

ERL-FEL を用いた半導体リソグラフィー用高出力 EUV 光源 ERL-FEL BASED HIGH-POWER EUV LIGHT SOURCE FOR LITHOGRAPHY

中村典雄^{#, A), B)}, 河田洋^{A), B)}, 加古永治^{A), B)}, 加藤龍好^{A), B)}, 梅森健成^{A), B)}, 阪井寛志^{A), B)}, 宮島司^{A), B)}
Norio Nakamura^{#, A), B)}, Hiroshi Kawata^{A), B)}, Eiji Kako^{A), B)}, Ryukou Kato^{A), B)}, Kensei Umemori^{A), B)}, Hiroshi Sakai^{A), B)}, Tsukasa Miyajima^{A), B)}

^{A)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{B)}The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI)

Abstract

Energy recovery linac(ERL) based free electron lasers(FEL) are possible candidates of a high-power EUV light source for lithography that can distribute 1 kW class power to multiple scanners simultaneously. An ERL-FEL based EUV light source has been designed using available technologies without much development to demonstrate generation of EUV power more than 10 kW and the EUV-FEL Light Source Study Group for Industrialization has been established in Japan since 2015 to realize industrialization of the light source and the related items. For industrialization, high availability is essential as well as high power and reduction of the light source size is also required. In this paper, we will report a brief outline of the designed ERL-FEL based EUV light source and some activities for the industrialization and describe considerations and developments for obtaining high availability and size reduction of the light source.

1. はじめに

EUV による半導体リソグラフィーは、200W 級のレーザー生成プラズマ(LPP: Laser-Produced Plasma)光源とそれに基づく露光装置の開発が進んで、量産化に向かっている[1]。一度量産が始まれば、近い将来には 3nm ノード以下の LSI 生産の実現に向けて LPP 光源では難しい 1 kW 級出力を供給できる EUV 光源が要求される[2]。エネルギー回収型リニアック(ERL: Energy Recovery Linac)を電子加速器とする自由電子レーザー(FEL: Free Electron Laser)は、多数の露光装置へ同時に 1kW 級の EUV 光を供給できる可能性を持つ。我々は、実際に ERL-FEL を用いた高出力 EUV 光源をコンパクト ERL(cERL)[3]の開発や経験をもとに設計し、全周に渡るシミュレーションによって 10 kW 級の EUV 光源が実現可能であることを示してきた。同時に、「EUV-FEL 光源産業化研究会」を組織して産業化に向けた活動も行ってきた。産業化においては、高出力性能以外にもいくつかの要求や課題がある。例えば、高い稼働率(availability)は不可欠で、光源サイズの縮小も要望されている。ここでは、半導体リソグラフィー用に設計された ERL-FEL 高出力 EUV 光源とその産業化に向けた活動を紹介するとともに、高い稼働率の確保と光源サイズの縮小で考慮すべき点を示し、改善のための検討・開発・課題について報告する。

2. ERL-FEL を用いた EUV 光源の現状

2.1 光源の概要

Figure 1 に設計された ERL-FEL を用いた EUV 光源[4-8]とその設計パラメータを示す。電子ビームは、入射リニアックで 10.5 MeV、主リニアックで 800 MeV まで加速される。この加速したビームを第 1 アークで磁気的にバンチ圧縮して SASE-FEL の発振

に必要な高いピーク電流を得る。バンチ圧縮後にビームはアンジュレータシステムに送られて、出力 10 kW 以上の 13.5 nm の EUV-FEL 光を生成する。FEL 発振後は第 2 アークでバンチ伸長されて、エネルギー回収のために主空洞で減速されてビームダンブに捨てられる。バンチ電荷 60 pC、バンチ繰り返し周波数 162.5 MHz で、平均電流約 10 mA になる。捨てられるビームパワーはエネルギー回収によって 8 MW から 100 kW に抑えられる。

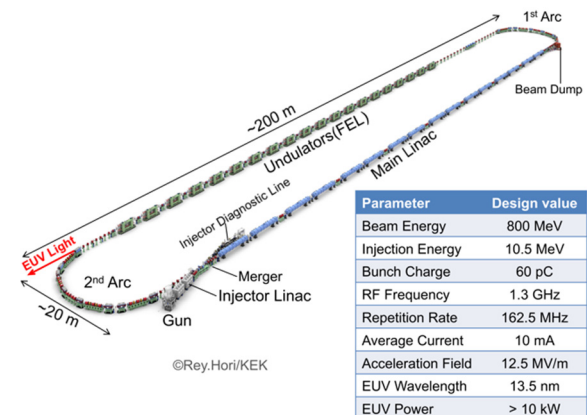


Figure 1: Design and specification of the ERL-FEL based high-power EUV light source for lithography.

入射部はcERLで開発した光陰極DC電子銃とcERL入射部で使用している2セルの入射超伝導空洞6台(3空洞クライオモジュール2台)を用いる。主リニアックの主超伝導加速空洞は9セル空洞4台を収納するクライオモジュールを16台(空洞64台)設置するが、12.5 MV/mの加速勾配を顕著な電界放出なしに安定的に達成できるようにcERLの空洞構造を変更して用いる。バンチ圧縮では第1アークでの

コヒーレント放射光 (CSR) のビームへの影響を抑え、10 kW を超える EUV 出力と問題となる損失のない電子ビーム輸送を S2E(Start-to-End)シミュレーションによって確認した[8]。

2.2 産業化に向けた活動

上記で示したような高出力 EUV-FEL 光源の産業利用に向けて、「EUV-FEL 光源産業化研究会」が 2015 年夏に設立された。Figure 2 にその構成を示す。現在までに、11 社の企業、8 つの大学・研究機関（個人）、1 つのコンソーシアが参加している。活動内容は下記の通りである、

- EUV-FEL 装置技術、高出力 EUV 光の利用技術・周辺技術について調査、検討する。
- EUV-FEL 光源のより広い発展を視野に入れ、産業、学術的应用分野について調査、検討する。
- EUV-FEL 光源装置および露光装置・プロセスとの整合性を中心とした利用技術・周辺技術に関する基礎研究からプロトタイプ装置試作にいたる一連の研究・開発プロジェクトを計画・立案する。
- 上記一連の研究・開発プロジェクトの実施を国に適宜提案し、予算獲得の働きかけを行う。

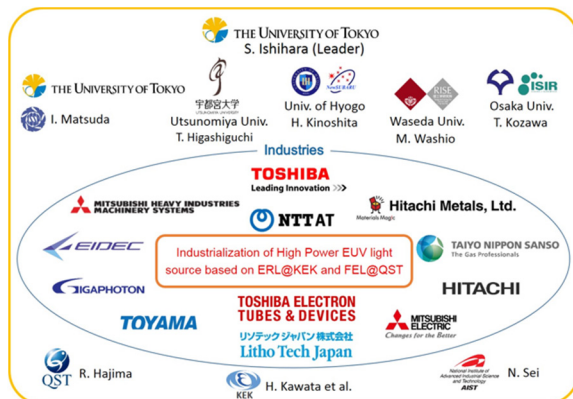


Figure 2: EUV-FEL light source study group for industrialization.

これまでに、上記目的の実現のために計 7 回の全体会議と光源の分科会などが開かれてきた。また、EUV-FEL 光源産業化研究会と高エネルギー加速器研究機構が共同で主催して、2016 年と 2017 年に EUV-FEL ワークショップ[9, 10]が 100 名を超える参加者のもとで開かれた。Figure 3 に 2016 年に開かれた第 1 回 EUV-FEL ワークショップの様子（写真）を示す。このワークショップでは EUV 光源はもちろん EUV リソグラフィーや EUV-FEL 関連技術の動向が紹介され、今後の EUV 高出力光源の展望とその実現に向けて活発な議論がなされた。



Figure 3: 1st EUV-FEL Workshop at Akihabara UDX 4F NEXT1 on December 13, 2016.

3. 稼働率 (Availability)

複数台の露光装置に同時に EUV 光を供給する EUV-FEL 光源では、98%以上の高い稼働率が要求される。これは、1 年間で約 1 週間しか運転を停止できないことを意味する。以下に高い稼働率のために考慮すべき事を列挙し、必要な対策と課題について述べる。

3.1 電子銃カソードの寿命と交換

使用する電子銃カソード材料としてはマルチアルカリが想定されているが、量子効率の減少に伴うカソード寿命はそれでも 10 mA 運転では 2 週間程度であり、1 年間で多くの交換作業が必要になる。交換作業による稼働率の低下を抑えるために、カソードのクリーニングや活性化を含む準備作業と交換作業を遠隔で操作できる必要がある。Figure 4 に cERL のために開発された光陰極 DC 電子銃のカソードの準備・交換システム[11]を示す。このシステムでは手動での作業を想定して製作されているが、このような作業を遠隔で制御できるようにすることで電子銃カソード交換時間は極力抑えられる。遠隔操作は技術的に十分に対応可能と考えている。

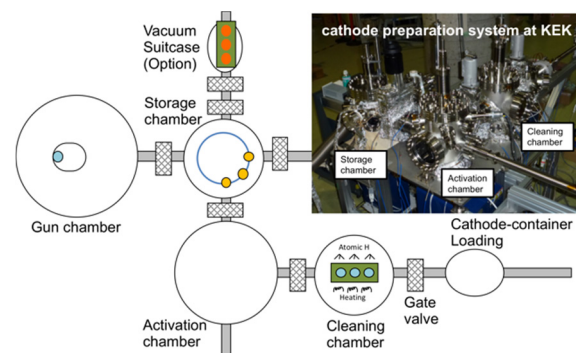


Figure 4: Cathode preparation and exchange system for the photocathode DC gun developed at KEK (courtesy of Dr. Masahiro Yamamoto).

3.2 超伝導空洞のトリップ率と電界放出

SACLA などの常伝導空洞を用いた FEL は既に高い稼働率で運転されているが、ERL-FEL で用いる超伝導空洞のトリップ率について調べておく必要がある。Figure 5 は 2014 年 4 月から 2016 年 3 月までの cERL の 2 台の超伝導主空洞(ML1, ML2)のトリップ数をその原因と共に示している[12]。2014 年 5-6 月の運転では LLRF(Low Level RF)のフィードバックの高いゲインによるトリップが多く見られたが、ゲインを下げて最適化したことで LLRF によるトリップは起こらなくなった。その結果、2015 年 1-5 月ではトリップ数が顕著に低下し、2月9日から3月23日の期間ではトリップが全く起きなかった。その後、トリップ数が増えたが、これは主空洞の加速電圧の変更 (ML1 の加速電圧増加と ML2 の加速電圧減少) に伴う一時的なものである。産業化に向けてトリップの原因に対して十分に対策を講じれば、トリップ率はさらに低減でき、トリップから運転再開までの時間も自動立ち上げなどで数分程度には短縮できる。このため、超伝導空洞によるトリップは稼働率に対して深刻な問題にはならないと考えられる。

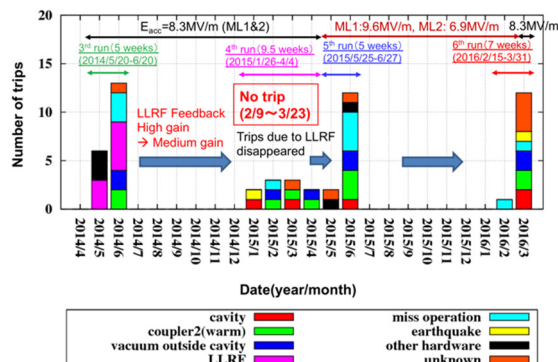


Figure 5: Trip number of cERL main superconducting cavities (ML1, ML2).

cERL の運転から空洞の電界放出が時間的に増加し、それに伴う空洞 Q 値の劣化が見られることがわかっていく。この電界放出は Q 値の劣化以外に空洞のトリップや真空トラブルも引き起こす可能性もあり、稼働率を低下させる。空洞を取り外す事なくその場で短時間に行える回復方法が稼働率の低下抑制に有効である。現在 cERL ではパルスプロセッシングという手法を用いて電界放出抑制 (Q 値回復) を行っている[12, 13]。これは運転中の加速電圧に加えて短いパルス幅で高い電圧を付加し、放電により空洞内のゴミや埃を砕く方法である。Figure 6 は、cERL の ML2 の加速電圧 8.57 MV に 4 ms 幅の 2.3 MV のパルスを 10 Hz で付加して 40 分間パルスプロセッシングした前後での ML2 上下流での放射線 (X 線) 強度の変化を示す。パルスプロセッシングによって電界放出電子による放射線が顕著に減少しているのがわかる。ただし、この手法でも完全に回復することまではできていないので、ヘリウムプロセッシング[14]やプラズマプロセッシング[15]なども試行してより良い手法を確立することが今後の課題である。

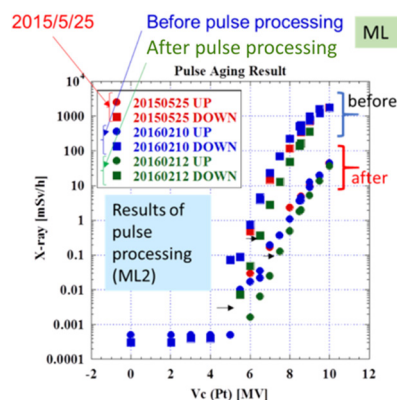


Figure 6: Pulse processing effect on the ML2 cavity of cERL. The field emission is reduced by the pulse processing method.

3.3 冗長システム (Redundant system)

前節のような努力によって電子銃や超伝導空洞の稼働率を上げたとしても、光源機器の深刻な故障が全く起こらない保証はない。また、空洞に液体ヘリウムを供給する冷凍機システムでは高圧ガス保安法による保安検査が必要になり、日本の場合は年 1 回が義務付けられている。そのような場合、運転停止が長期間続いて、高い稼働率を維持できなくなる。その解決策としてシステムを冗長化することが考えられる。例えば、冷凍機システム、主超伝導空洞、入射部、アンジュレータなどを冗長化することや光源全体を 2 重化することが挙げられる。Figure 7 に光源全体を 2 重化した場合の LSI 施設の配置例を示す。産業化に向けては、このような冗長システムのより具体的な設計を露光装置までの EUV の光学系を含めて構築することが必要になる。

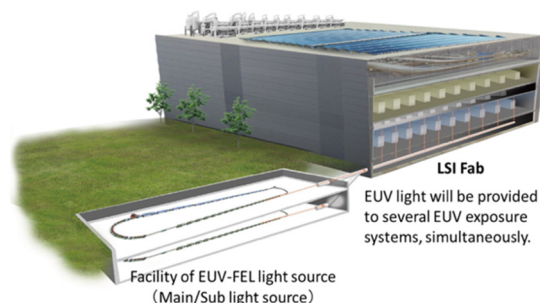


Figure 7: Redundant system of the EUV-FEL light source. The whole light source is duplicated.

4. 光源サイズ

光源サイズ、特に Fig. 1 にある 200 m 近い長軸方向の長さを縮小することが望まれる。その長さは主リニアックの長さで決まっているので、次のような方法が改善策として考えられる。

- 1) 主超伝導加速空洞の加速勾配を上げる。
- 2) 電子ビームのエネルギーを下げる。
- 3) 周回部を 2 重ループ構造にする。

これらの可能性について以下で述べる。

4.1 超伝導空洞の高加速勾配化

ERL-FEL の主超伝導空洞の加速勾配を上げると、同じ電子エネルギーに対して主リニアックの長さを短縮できる。それを実現するためには次の 2 つのことを考慮する必要がある。

- 空洞からの電界放出の抑制
- 高い Q 値の実現

高い加速勾配になればなるほど、一般に電界放出は激しくなるので、それを抑える必要がある。電界放出の原因は空洞内の塵や埃の粒子にある。空洞やクライオモジュール組み立て時の外部から空洞への塵や埃の粒子混入を防ぐために、真空中の粒子測定システムや粒子の動きを抑制する排気システムの導入を進めている[16]。Figure 8 は粒子を真空中で計測するシステムのセットアップの写真である。また、このようなシステムの下で清浄に組み立てられた空洞において著しい電界放出なしに高い加速勾配が得られているかを評価するために、新たに横型クライオスタートも製作・導入した。

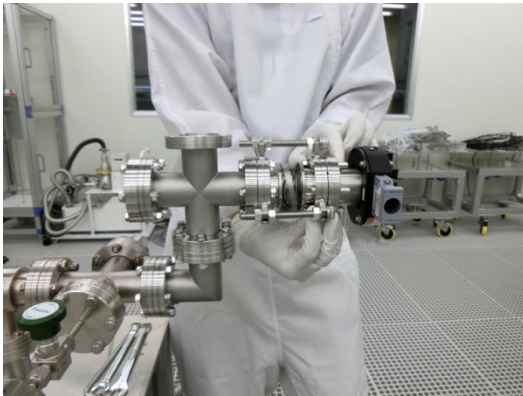


Figure 8: Set-up of particle measurements in vacuum by using a vacuum particle counter.

超伝導空洞の電力損失は加速勾配の 2 乗に比例し、その Q 値に反比例するので、高い加速勾配での電力損失を抑えるためには高い Q 値が要求される。高い Q 値を得るための方法としては、1) 空洞の残留磁場の抑制と 2) 窒素ドーピングの 2 つが考えられる。前者の方法では、ソレノイドコイルなどで残留磁場を消すことによって単セル空洞で 15 MV/m の加速勾配と 2K の温度の下でこれまでの約 2 倍の Q 値を得ることに成功した[17]。さらに後者の方法を試験した結果が Fig. 9 に示してある[18]。この窒素ドーピングでは、800 $\square$, 1x10⁻⁶ Pa で 3 時間の熱処理をした後で 2.7Pa で 20 分間窒素をドーピングし、さらに 800 $\square$, 30 分間熱処理した。その後、15 μ m だけ空洞表面を電解研磨した。この結果、図に示すように Q 値は 15 MV/m, 2K で通常のプロセスに比べて約 1.5 倍高くなった。ただし、それ以上の加速勾配でクエンチが起きたので、最適な窒素ドーピングのパラメータを調べて、達成可能な加速勾配や Q 値をさらに改善することが求められる。

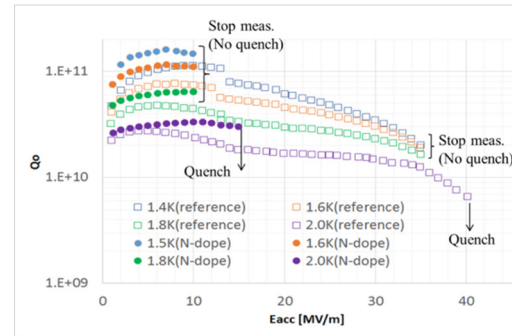


Figure 9: Comparison of Q-values between normal processing and nitrogen doping treatment.

4.2 電子ビームエネルギーの低減

電子ビームエネルギーを下げるにより少ない加速空洞の数ですむので、光源の長さは短くなる。一方、EUV 光の波長を 13.5 nm に合わせるために、エネルギー減少分だけアンジュレータの磁場周期を短くする必要がある。アンジュレータを小ギャップ可能な真空封止アンジュレータ (IVU) あるいは窒素温度まで冷却してさらに磁場を高めるクライオアンジュレータ (CPMU) にして達成可能な磁場周期とそれによるビームエネルギーの低減、さらには EUV 出力の変化を評価した。簡単のために Table 1 のパラメータを仮定し、アンジュレータも円偏光型ではなく直線偏光型とした。

Table 1: Beam Parameters for the Calculation

Energy spread	0.1 %
Bunch charge	60 pC
Bunch length	100 fs
Peak current	600 A
Average current	9.75 mA
Normalized emittance	1 mm·mrad
Betatron function	5 m

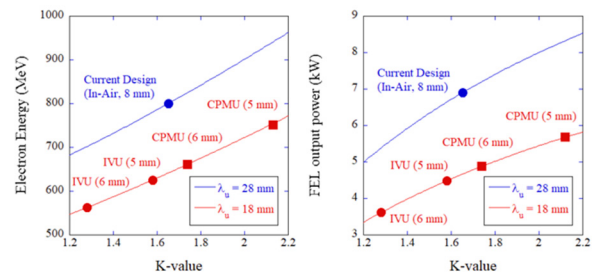


Figure 10: Calculated electron beam energy (left) and average FEL output power (right) as a function of the undulator K-value.

日立金属製の磁石 NMX-S38EH[19]を用いた IVU と同じく日立金属製の NMX-68CU[20]を 100K まで冷却して用いた CPMU についてギャップ 5 mm, 6 mm で得られる K 値 (周期 18mm) から 13.5 nm の EUV 光を出す電子ビームのエネルギーを計算して Fig. 10

の左のグラフに示す。これをもとに Table 1 のパラメータから FEL 出力を 1 次元の FEL 計算式[21]で評価した結果が Fig. 10 の右のグラフになる。現在の 800 MeV の場合に比べて、ビームエネルギーは IVU や CPMU によって下がるが、それ以上に FEL 出力が下がっていることがわかる。従って、ビームエネルギーを下げることは得策ではないと言える。

4.3 2 重ループ構造

Figure 11a,11b に 2 つのタイプの 2 重ループ構造を示す。Type A では、ビームは同じ主空洞で 2 回加速されるので、主リニアックの長さ（空洞の数）が半分で済むことになる。ただ、2 回ビームが通過するので空洞内の平均ビーム電流は 2 倍になって、2 倍の高次モード(HOM)パワーにも対応できる HOM 減衰機構が必要である。Type B は主リニアックを 2 つに分けることで実効的に光源の長さを短くしている。この場合、空洞の数は同じで空洞内での平均電流や HOM パワーも 1 ループの場合と変わらない。どちらの場合でも構造は複雑にはなるが、光源サイズを縮小することが可能である。ただ、アーク部の増加や接合部の追加によってコヒーレント放射(CSR)などの影響で電子ビームの質の劣化やそれによる EUV 出力の低下が起これないかをシミュレーションを含む設計研究によって評価する必要がある。

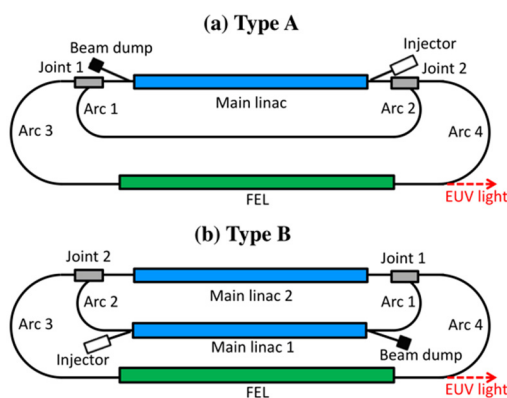


Figure 11: Schematic view of two types of double-loop configuration, (a) Type A and (b) Type B.

5. まとめ

ERL-FEL を用いた高出力 EUV 光源は将来必要とされる 1 kW 級の EUV 出力を多数の半導体露光装置に供給する画期的な光源になりうる。それを実現するために EUV-FEL 光源産業化研究会が設立され、この研究会を核として光源の産業化に向けて種々の活動が行われている。

産業化に向けては光源及び関連する装置に対していくつかの要求や課題があり、それに対する検討や必要な開発が行われている。ここでは、稼働率と光源サイズの改善に関する検討・開発・課題を示した。高い稼働率の確保には、電子銃カソードの準備・交換作業の遠隔制御、超伝導空洞のトリップ率の改善や電界放出のその場回復方法の開発、冗長システム

の設計などが重要になる。カソードの準備・交換の遠隔制御は技術的に大きな問題はなく、超伝導空洞のトリップ率も cERL の運転から深刻なものではない。電界放出抑制のためにパルスプロセッシングが利用されているが、別の方法も試して比較したい。光源サイズの縮小のためには、加速空洞の高加速勾配化や ERL の 2 重ループ構造化が改善策になる。前者では、空洞やクライオモジュールの清浄な組み立て技術や窒素ドーピング技術の開発が進められている。後者は、2 重ループ構造の設計研究を進めることが課題になる。ビームエネルギーの低減は EUV 出力の顕著な低下をもたらすのでサイズの縮小には有効ではない。

謝辞

KEK の山本将博氏には電子銃カソード準備・交換システム、KEK の羽入勇氏には EUV-FEL 光源産業化研究会の情報や図を提供していただきました。この場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Borodovsky, "Moore's Law At and Beyond 5nm", SPIE Advanced Lithography 2018, February 26, 2018, San Jose, CA, USA.
- [2] E. Hosler *et al.*, Proc. of SPIE 9422, Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI, 94220D (March 13, 2015).
- [3] M. Akemoto *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A877 (2018) 197.
- [4] N. Nakamura *et al.*, Proc. of ERL2015, Stony Brook, NY, USA, June 7-12, 2015, pp.4-9.
- [5] T. Miyajima *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2015, pp.247-250.
- [6] R. Kato, Proc. of 2016 EUVL Workshop, Berkeley, CA, USA, June 13-16, 2016, S43.
- [7] H. Kawata, Proc. of 2016 Source Workshop, Amsterdam, Netherlands, November 7-9, 2016, S62.
- [8] N. Nakamura *et al.*, Journal of Physics: Conference Series 874 (2017) 012013.
- [9] http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop/
- [10] http://pfwww.kek.jp/PEARL/EUV-FEL_Workshop2/
- [11] M. Yamamoto *et al.*, Proc. of ERL2013, Novosibirsk, Russia, September 9-13, 2013, pp.28-31.
- [12] K. Umemori *et al.*, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, July 17-21, 2017, pp.736-740.
- [13] E. Kako *et al.*, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, July 17-21, 2017, pp.289-293.
- [14] H. Sakai *et al.*, Proc. of SRF2015, Whistler, Canada, September 13-18, 2015, pp.1019-1023.
- [15] M. Doleans *et al.*, Nucl. Instrum. Methods A 812 (2016) 50.
- [16] H. Sakai *et al.*, these proceedings, THP111.
- [17] K. Umemori *et al.*, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, July 17-21, 2017, pp.736-740.
- [18] T. Konomi *et al.*, Proc. of SRF2017, Lanzhou, China, July 17-21, 2017, pp.775-778.
- [19] https://www.hitachimetals.com/materials-products/permanent-magnets/documents/Permanent_Magnets.pdf
- [20] T. Kohda (NEOMAX ENGINEERING Co., Ltd.), private communication.
- [21] K. J. Kim and M. Xie, Nucl. Instrum. Methods A 331 (1993) 359.