

ERL を用いた高出力 EUV-FEL 光源のシミュレーション研究

SIMULATION STUDY OF AN HIGH-POWER ERL-BASED EUV-FEL LIGHT SOURCE

中村典雄^{#,A)}, 宮島司^{A)}, 加藤龍好^{A)}

Norio Nakamura^{#,A)}, Tsukasa Miyajima^{A)}, Ryuko Kato^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

Energy recovery linac(ERL) based free electron lasers(FELs) are possible candidates of high-power EUV sources for lithography and have merits of energy recovery, low dumped beam power and activation compared with those based on ordinary linear accelerators. An ERL-based EUV-FEL has been designed with the target of 10-kW power generation by the EUV-FEL study group in Japan. To check this design, we perform simulations of off-crest acceleration in the main superconducting linac, bunch compression in the 1st arc and chicane, SASE-FEL in the undulators and bunch decompression and energy recovery in the 2nd arc and main linac. As a result, we demonstrate that, after producing the FEL output power of more than 10 kW, the electron beam is successfully transported to the exit of the main linac just before the dump line without any beam loss. This result greatly enhances the feasibility of the high-power ERL-based EUV-FEL light source.

1. はじめに

近年、高出力の EUV(13.5nm)光源が半導体リソグラフィの次世代光源として切望されている。現在の有力な EUV 光源の候補である LPP(Laser-Produced Plasma)光源は 100W を越える出力が試験的に得られているが、1kW まで上げることは難しいと考えられている。その一方で、自由電子レーザー(FEL)は高コストで建設面積も大きい、10kW を越えるような出力が得られれば多数の露光装置に同時に EUV 光を供給できる。特にエネルギー回収型リニアック(ERL)を用いた EUV-FEL 光源を使用すれば、高出力化とともに格段の低放射化も同時に期待できる。

高エネルギー加速器研究機構(KEK)や量子科学技術研究開発機構(QST)を中心とした研究者グループは、10kW 級の出力を目標として ERL を用いた EUV-FEL 光源の設計検討を日本の企業と共同で進めている[1-8]。比較的短期に開発・準備できる技術を主に利用することによって、光源の開発やプロトタイプ建設・立上げをできるだけ短い期間で実現することを目指している。KEK に建設されたコンパクト ERL(cERL)[9,10]の技術や運転経験等の資産も最大限に活用する。ここでは、その EUV-FEL 光源におけるビームのシミュレーションとそれによる研究結果について報告する。

2. EUV-FEL の概要

Figure 1 に設計検討中の ERL を用いた EUV-FEL 光源のイメージ図を示す。入射部は cERL の第 2 電子銃[11]と超伝導入射空洞[12]を用い、入射エネルギーを 10MeV 以上まで上げるために入射空洞モジュールをもう 1 台追加して 2 台とし、合計で 6 台の 2 セル空洞を用いて加速する。周回ループと入射部をつなぐ合流部は cERL を改良した設計とする。

主超伝導加速空洞は、フィールドエミッションの影響を

抑えるために cERL の 9 セル空洞[13]のセル構造を TESLA 型に変更して最大電場と加速電場の比を 3 から 2 に低減し、12.5MV/m の加速勾配を安定的に実現する[14]。また、HOM による空洞の発熱や横方向 BBU(Beam Breakup)の影響を抑えるために空洞端はパイプ径を広げて HOM 吸収のためのアブソーバやキャプラーを設ける。800MeV までの加速のために 4 空洞を収納するモジュールを 16 台設置する。2 モジュール毎に四極電磁石のトリプレットをビームの収束ために挿入する。

加速したビームをバンチ圧縮する方法としては、主空洞で off-crest 加速を行い、第 1 アークやシケインの電磁石を使って磁氣的に圧縮する。これによって SASE-FEL の発振に必要な高いピーク電流を得る。また、コヒーレント放射光(CSR)の水平エミッタンスへの影響を最小限にするようにオプティクスを最適化する。圧縮したビームは多数の長尺アンジュレータから成る FEL システムにおいて EUV-FEL 光を生成する。FEL 通過後は第 2 アークによってバンチは伸長されて、ビームダンプまで深刻なビーム損失なくエネルギー回収を行う必要がある。

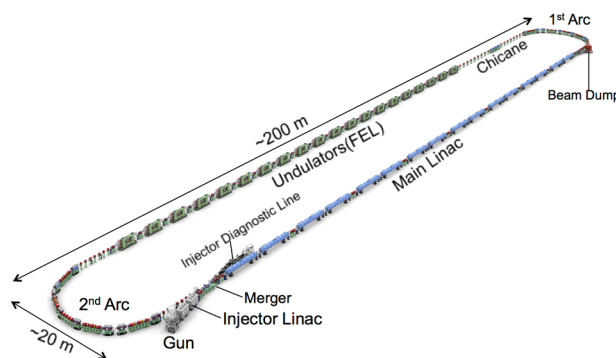


Figure 1: Image of the designed ERL-based EUV-FEL.

3. バンチ圧縮

EUV-FEL においてバンチ圧縮は、主空洞での off-

[#] norio.nakamura@kek.jp

crest 加速とアーク部及びシケインでの有限の R_{56} を持つ オプティクスを使って行う。ここで、まずは解析的に入射・合流部後での初期分布 (パラメータ) に対するバンチ圧縮後の分布 (パラメータ) を解析的に見積る。電子の加速・バンチ圧縮後のエネルギー E_f は、入射・合流部後の電子エネルギー E_i とすると、

$$E_f = E_i + \frac{E_{f0} - E_{i0}}{\cos \varphi_0} \cos(\varphi_0 + 2\pi f_{RF} \Delta t_i) \quad (1)$$

となる。ここで、 $E_{i0}, E_{f0}, \varphi_0, f_{RF}, \Delta t_i$ は入射・合流部後と加速・バンチ圧縮後の電子ビームの中心エネルギー、off-crest 加速での RF 位相、RF 周波数、バンチ中心から時間のずれである。バンチ圧縮後の時間のずれ Δt_f は、

$$\Delta t_f = \Delta t_i + R_{56} \delta_f / c \quad (2)$$

と書ける。ここで、 δ_f は主空洞加速後のエネルギー (運動量) の中心からのずれで、入射・合流部後の初期のエネルギーの中心からのずれ δ_i と共に以下の通り定義される。

$$\delta_f \equiv (E_f - E_{f0}) / E_{f0} \approx (p_f - p_{f0}) / p_{f0} \quad (3)$$

$$\delta_i \equiv (E_i - E_{i0}) / E_{i0} \approx (p_i - p_{i0}) / p_{i0}$$

ここで、初期のエネルギーと時間に相関がないとし、その標準偏差を $\sigma_{ii}, \sigma_{\delta i}$ とすると、バンチ圧縮後の電子のエネルギーと時間分布の標準偏差は、エネルギー幅 $\sigma_{\delta f}$ 、バンチ長 σ_{tf} として、

$$\sigma_{\delta f} \approx \sqrt{k^2 \sigma_{ii}^2 + \sigma_{\delta i}^2 (E_{i0} / E_{f0})^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{tf} \approx \sqrt{R_{56}^2 \sigma_{\delta i}^2 (E_{i0} / E_{f0})^2 / c^2 + (1 + kR_{56} / c)^2 \sigma_{ii}^2} \quad (5)$$

と表せる。ただし、

$$k \equiv \frac{\partial \delta_f}{\partial \Delta t_i} = -2\pi f_{RF} \left(1 - \frac{E_{i0}}{E_{f0}} \right) \tan \varphi_0 \quad (6)$$

である。バンチ長が最小となる条件 ($k = -c/R_{56}$) を考えると、バンチ圧縮後のバンチ長、エネルギー幅、RF 位相は、

$$\sigma_{tf} \approx |R_{56}| \sigma_{\delta i} (E_{i0} / E_{f0}) / c \quad (10)$$

$$\sigma_{\delta f} \approx c \sigma_{ii} / |R_{56}| \quad (11)$$

$$\tan \varphi_0 = \frac{c}{2\pi f_{RF} R_{56}} \left(1 - \frac{E_{i0}}{E_{f0}} \right)^{-1} \quad (12)$$

となる。FEL 出力パワーが電子ビームエネルギーとピアースパラメータの積で粗く見積られることを考えると、10kW 程度の FEL 出力ではバンチ圧縮後のエネルギー幅 $\sigma_{\delta f}$ をピアースパラメータより小さくするために 0.1% 程度あるいはそれ以下を考える必要がある[15]。 $\sigma_{\delta f} = 0.1\%$ 、 $E_{i0} = 10.5 \text{ MeV}$ 、 $E_{f0} = 800 \text{ MeV}$ 、 $f_{RF} = 1.3 \text{ GHz}$ に対して、 $\sigma_{ii} = 1 \text{ ps}$ 、 $R_{56} = \pm 0.3 \text{ m}$ 、 $\sigma_{\delta i} = 0.31\%$ の場合には $\sigma_{tf} = 41 \text{ fs}$ 、 $\varphi_0 = 7.1 \text{ deg}$ であり、 $\sigma_{ii} = 2 \text{ ps}$ 、 $R_{56} = \pm 0.6 \text{ m}$ 、 $\sigma_{\delta i} = 0.31\%$ の場合には $\sigma_{tf} = 81 \text{ fs}$ 、 $\varphi_0 = 3.5 \text{ deg}$ となる。FEL ではバンチ圧縮でバンチ長を短くしてピーク電流を稼ぐ必要があるために、初期バンチ長は 2ps よりも 1ps の方が基本的には良い。ただ、入射・合流部のバンチ長を短くすると初期エミッタンスも上がる傾向にあるので、バンチ長とエミッタンスとのトレードオフとなる。また、実際には CSR の影響、RF 電場やオプティクスの高次の効果、空洞ウェーク場の影響

などが加わって複雑になり、圧縮後のバンチ長は一般的にはさらに長くなる。

ここでは、入射・合流部での初期分布として 6 次元ガウス分布を仮定し、バンチ電荷 60pC、入射バンチ長 1ps としてシミュレーションを行う。初期の規格化エミッタンスは水平・垂直ともに $0.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、エネルギー幅は 0.31% とした。共に $R_{56} = -0.15 \text{ m}$ の第 1 アーク部とシケインを用い、合計 $R_{56} = -0.30 \text{ m}$ でバンチ圧縮を行った。シケインの最後の偏向電磁石の CSR キックの方向が (x, x) の位相空間 (楕円) の長軸方向と重なるようにオプティクスを最適化して水平エミッタンスの増加を抑えた。また、六極電磁石と RF 位相の調整も行った。バンチ圧縮の結果を Figure 2 と Figure 3 に示す。シミュレーションは elegant[16] を使って行い、RF 空洞のウェーク場として TESLA 空洞の結果[17]を用いた。図からわかるように、バンチは 1ps から 51fs まで圧縮され、エネルギー幅は約 0.1%、ピーク電流前後での規格化スライスエミッタンスは水平では $0.9\text{--}1.5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ と変化していて、垂直方向は $0.7 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ でほぼ一定であった。

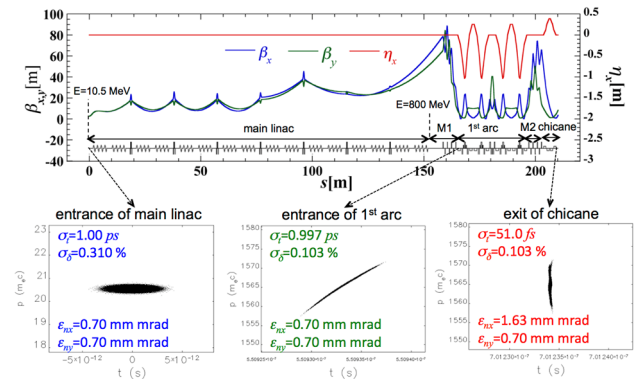


Figure 2: Betatron and dispersion functions from the main-linac entrance to the chicane exit (upper) and the time-momentum distributions with the beam parameters at the main-linac entrance, the 1st arc entrance and the chicane exit obtained by simulation of the bunch compression using the 1st arc and chicane (lower).

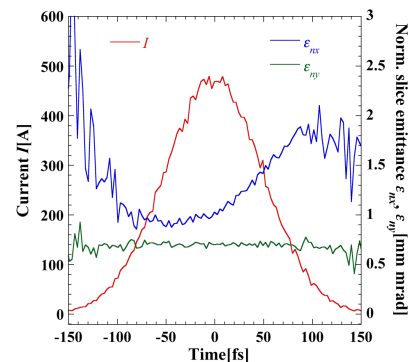


Figure 3: Current and normalized horizontal and vertical slice emittances in the bunch at the exit of the chicane.

4. FEL

前章で求めたバンチ圧縮後の分布から FEL シミュレーションを行った。ただし、シケインと FEL の間には出力の最適化を行うオブティクス調整用の四極電磁石を配置して、FEL 入口で $\beta_x=4\text{m}$, $\beta_y=6\text{m}$, $\alpha_{x,y}=0$ となるように調整した(ただし、今回は出力最大になるような最適化調整までしていない)。FEL は、その入口出口と 2.8m アンジュレータセグメント間に専用の四極電磁石をビーム収束のために配置している。アンジュレータは円偏光型で周期 28mm、セグメント間のスペースは 0.67m とした。

GENESIS[18]を用いた FEL のシミュレーション結果を Figure 4 に示す。ここで、Fig. 4a はテーパー無しと線形テーパーリング 3%での FEL のパルスエネルギー、Fig. 4b は FEL の時間プロファイル、Fig. 4c は FEL スペクトルである。バンチの繰り返し周波数を $f_b=162.5/325$ MHz とすると、平均電流は 9.75/19.5 mA で、アンジュレータのテーパー無しで FEL パワーは 8.5/16.9 kW、3%の線形テーパーリングで調整すると 12.1/24.2 kW になった。スペクトルについては、約 13.5nm を中心に広がりはあるが、Mo/Si 多層膜ミラーの反射率の半値幅よりも十分に狭いスペクトル幅であることがわかった。

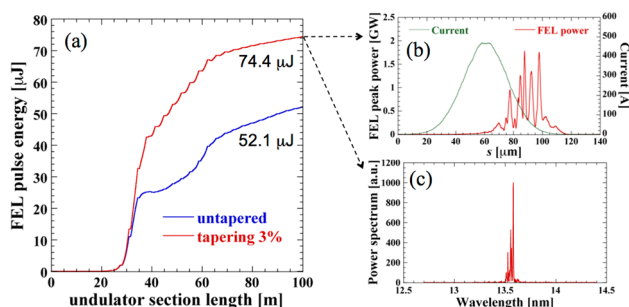


Figure 4: Results of the FEL simulation: (a) the FEL pulse energy without and with tapering as function of the undulator section length, (b) the FEL temporal profile and (c) the FEL power spectrum for the tapered undulators at the distance of 100 m from the FEL entrance.

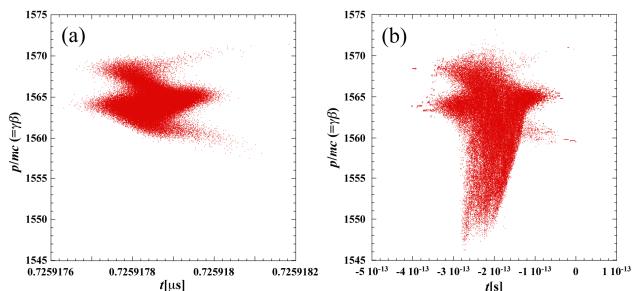


Figure 5: Time-momentum distributions in the electron bunch (a) before and (b) after the FEL.

FEL 後の電子ビームのシミュレーションを行うために、FEL 後の電子分布を Genesis より求めた。Figure 5a, 5b に FEL 直前と直後のバンチの (t,p) 分布を示す。それぞ

れ、elegant と GENESIS から得られた分布である。2つの図の比較からわかるように、電流が高い部分の電子の一部が FEL 発振によって運動量(エネルギー)を大きく失うために、運動量分布が低い方にシフトして運動量(エネルギー)幅が増大しているのが確認できる。

5. バンチ伸長とエネルギー回収

前章で求めた FEL 通過直後の 6 次元の電子分布からバンチ伸長及びエネルギー回収までのシミュレーションを今度は elegant を用いて行う。Figure 6 に FEL 出口から第 2 アーク部を経て主空洞(減速位相)出口までのオブティクスを示す。第 2 アーク部の R_{56} はバンチ圧縮とは逆符号で絶対値が同じ $R_{56}=0.3\text{m}$ に設定した。主空洞のオブティクスは Fig. 2 と Fig. 6 を比較してわかるように加速ビームと減速ビームで対称になるように設計している。FEL と第 2 アーク部、第 2 アーク部と主空洞の間にはオブティクスマッチング部が置かれている。今回、合流部から主空洞までのマッチング部は入射ビームエネルギー用に最適化するので 800MeV ビームのオブティクスとしてはドリフトスペースとして近似した。

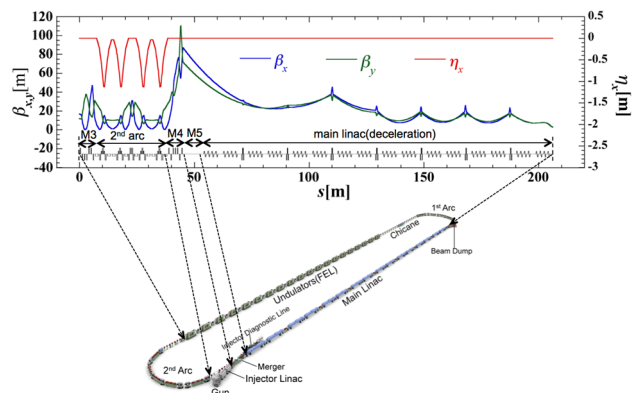


Figure 6: Betatron and dispersion functions from the FEL exit to the exit of the main linac (deceleration phase).

上に述べたオブティクスと FEL 後の電子分布を用いて行ったシミュレーション結果を Figure 7 と Figure 8 に示す。Figure 7 はエネルギー幅とバンチ長及び3ヶ所の (t,p) 分布、Figure 8 は水平・垂直のビームサイズと3ヶ所の (x,y) 分布を図示している。Figure 7 からわかるように、第 2 アーク部の R_{56} でバンチの伸長が起きる。ただし、FEL 発振によってエネルギー幅が広がってしまうので、バンチ長は第 2 アーク部出口では 1ps ではなく 2.4ps まで伸びることがわかる。エネルギー幅についても主空洞(減速位相)出口で初期のエネルギー幅の 2 倍以上に広がっているが、これは CSR や FEL 発振などによるエネルギー変調を受けて完全に初期分布に戻らないためである。エネルギーは主に FEL 発振の影響で電子エネルギーが奪われるために初期の 10.5MeV よりも低い 8.95MeV まで減速された。ダンプリンの分散で横方向にビームが広がってビームロスが生じないように、ここではエネルギーの回収効率を上げるよりも、エネルギー幅が最小に

なるように RF 位相を調整して最適化した。一方、Figure 8 でわかるように、最大の水平方向ビームサイズは約 3mm で、その点での (x,y) 分布から見ても cERL と同じ直径 50mm アパーチャで十分にロスなくビームを通すことができている。減速後のビームサイズや分布にも大きな問題は見られない。これは、10kW クラスの EUV-FEL で周回部の輸送やエネルギー回収をロスなくできる可能性を示唆するものである。

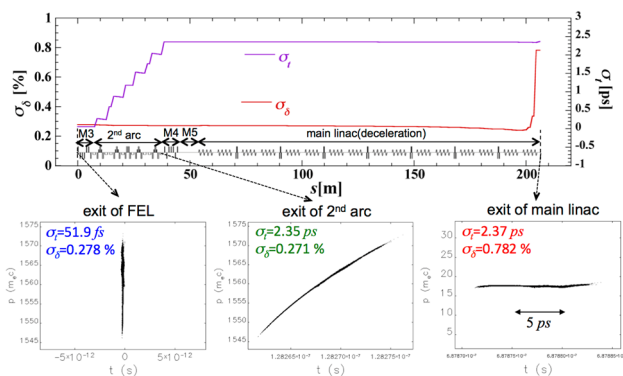


Figure 7: Energy spread and bunch length from the FEL exit to the main-linac exit (upper) and the time-momentum distributions at the FEL exit, the 2nd arc exit and the main-linac exit obtained by simulation of the bunch decompression and energy recovery (lower).

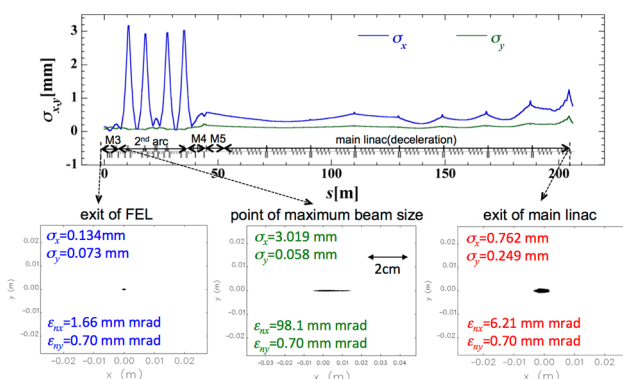


Figure 8: Horizontal and vertical beam sizes from the FEL exit to the main-linac exit (upper) and the transverse position distributions at the FEL exit, the 2nd arc exit and the main-linac exit obtained by simulation of the bunch decompression and energy recovery (lower).

6. 結論

主空洞手前で初期の 6 次元ガウス分布を設定して、主空洞による加速、第1アーケ部とシケインによるバンチ圧縮、SASE-FEL 発振、バンチ伸長とエネルギー回収のシミュレーションを行った。この設定において、FEL 出力は 10mA で 10kW を越え、その FEL 出力後の電子ビームはバンチ伸長とエネルギー回収(減速)を行っても途中のビームラインでロスすることはなかった。この結果は、ERL を用いた高出力 EUV-FEL の実現可能性を大きく

高めるものである。今後の課題の1つは、入射・合流部の設計と最適化を進めて電子銃から減速・ダンプまでの S2E(Start-to-End)シミュレーションを行うことである。また、バンチ圧縮における CSR の影響をさらに抑える検討も FEL 出力向上のために求められる。

参考文献

- [1] E. Kako *et al.*, S55, 2014 EUV Source Workshop, November 3-6, Dublin, Ireland.
- [2] R. Hajima *et al.*, S56, 2014 EUV Source Workshop, November 3-6, Dublin, Ireland.
- [3] N. Nakamura *et al.*, Proc. of ERL2015, June 7-12, Stony Brook, NY, USA, pp.4-9 (2015).
- [4] N. Nakamura *et al.*, P42, 2015 EUVL Workshop, June 15-19, Maui, HI, USA.
- [5] T. Miyajima *et al.*, Proc. of the 12th Annual Meeting of PASJ, Tsuruga, pp.247-250 (2015).
- [6] H. Kawata *et al.*, TUAA01, SRF2015, September 13-18, Whistler, Canada.
- [7] K. Umemori *et al.*, S22, 2015 EUV Source Workshop, November 9-11, Dublin, Ireland.
- [8] R. Kato *et al.*, P43, 2016 EUVL Workshop, June 13-16, Berkeley, CA, USA.
- [9] S. Sakanaka *et al.*, WEOM15, these proceedings.
- [10] T. Obina *et al.*, Proc. of IPAC2016, May 8-13, Busan, Korea, pp.1835-1838 (2016).
- [11] M. Yamamoto *et al.*, TUIBLH1020, ERL2015, June 7-12, Stony Brook, NY, USA.
- [12] E. Kako *et al.*, Proc. of IPAC2012, New Orleans, LA, USA, pp.2239-2241 (2012).
- [13] H. Sakai *et al.*, Proc. of ERL2015, June 7-12, Stony Brook, NY, USA, pp.63-66 (2015).
- [14] T. Konomi *et al.*, WEOM09, these proceedings.
- [15] Z. Huang and K.J. Kim, Phys. Rev. ST-AB **10**, 034801 (2007).
- [16] *elegant*, http://www.aps.anl.gov/Accelerator_Systems_Division/Accelerator_Operations_Physics/manuals/elegant_latest/elegant.pdf
- [17] TESLA Technical Design Report, Part II, chapter 3, http://tesla.desy.de/new_pages/TDR_CD/PartII/chapter03/chapter03.pdf
- [18] *GENESIS*, <http://genesis.web.psi.ch>