

Simulations of XFELO for the KEK ERL

R. Hajima ^{*⁽¹⁾}, N. Nishimori ⁽¹⁾, N. Sei ⁽²⁾, M. Shimada ⁽³⁾, N. Nakamura ⁽³⁾

⁽¹⁾ Japan Atomic Energy Agency, Tokai, Ibaraki, 319-1195 Japan

⁽²⁾ The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki, 305-8568 Japan

⁽³⁾ High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract

Following the recent development of high-brightness electron guns and high-reflectivity X-ray crystal optics, an FEL oscillator operated in a hard X-ray wavelength region (XFELO) has been considered as a possible extension of the 3-GeV ERL light source proposed at KEK. In order to deliver a 6-GeV electron beam to the XFELO, the ERL is operated at the energy-doubling mode with a low average current. In this paper, we present results of electron beam simulations and FEL simulations.

KEK 3-GeV ERL における共振器型 XFEL のシミュレーション

1. はじめに

エネルギー回収型リニアック (ERL) は高輝度の電子ビームを大電流で連続的に加速できることから、放射光源用の加速器として有用であり、高出力自由電子レーザー、X 線放射光源、レーザー・コンプトン線源などが運転または提案されている。KEK では 3-GeV ERL による X 線放射光源を Photon Factory(PF)に代わる次世代光源として建設する計画が議論されている。3-GeV ERL 光源では、アンジュレータからのコヒーレント、フェムト秒放射光に加えて、共振器型 X 線自由電子レーザー (XFELO) の建設と利用も提案されている[1]。

X 線自由電子レーザーは、いわゆる SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 方式の装置として SLAC-LCLS、SPRING-8-SACLA が完成し、利用研究に供されている。SASE では、自発放射光を高ゲイン領域の FEL 相互作用で増幅し、単一パスで飽和出力を得る。この時、FEL パルスは時間・周波数領域ともに、微細なスパイク構造を持っている。

これに対して、XFELO は共振器に蓄積された X 線を低ゲイン領域の FEL 相互作用で増幅するものであり、得られる X 線パルスは、時間・周波数領域で滑らかな構造 (スペクトル) を持つ[2]。典型的なパラメータで、10keV、1ps の X 線パルスのバンド幅は 10meV 程度であり、パルス長のフーリエ限界にほぼ等しい狭帯域 X 線パルスが得られる。また、赤外レーザーの光コムと同様に、「X 線コム」を実現することで、共振器の縦モード (~neV) を利

用することもできる[3]。

XFELO を実現するためには、低エミッタンスかつ高繰返し (1MHz 以上) の電子ビームが必要であり、また、直入射で高反射率を得るための X 線光学素子にも開発課題が少なからず存在するもの、これまでに 99%以上の反射率をもつ 5 mm x 5 mm の大きさのダイヤモンド結晶が得られているなど、XFELO の実現に向けた技術開発が着実に進展している[4]。

本稿では、共振器型 XFEL の原理、発振特性の解析結果を述べ、3-GeV ERL 放射光源における XFELO の設置と運転における問題点を整理する。

2. XFELO の構成と 3-GeV ERL における配置

XFELO は、赤外 FEL と同様に、電子ビーム、アンジュレータ、共振器の 3 つの要素から構成される (図 1)。完全結晶による Bragg 回折は、入射波と回折波の相互作用を含めた動力的回折の理論で記述できる。ダイヤモンドなどの完全結晶は、硬 X 線に対して直入射の構成で高い反射率 (95%以上) を実現できる。XFELO の共振器は、このような Bragg ミラーと収束光学系 (反射型の湾曲ミラー) からなる。X 線を取り出す側の Bragg ミラーは、薄い結晶を用いて X 線の一部を透過して取り出す。取り出しを含めた共振器の全損失は 10%程度となる。ミラーの枚数を増やすことで波長可変の構成とできる[5]。

電子ビーム、アンジュレータは、FEL ゲインが共

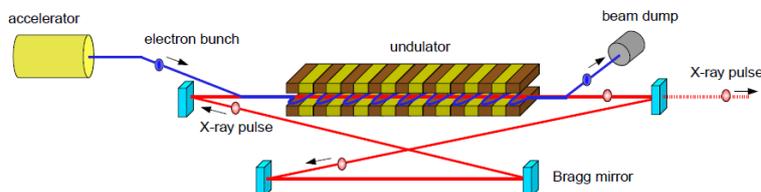


図 1:共振器型 X 線自由電子レーザー (XFELO) の構成

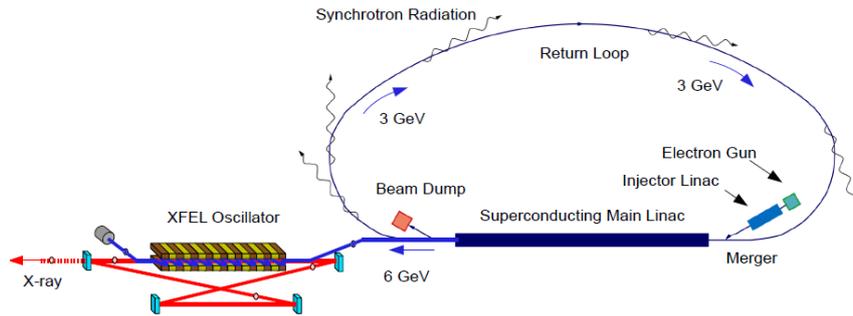


図 2: 3-GeV ERL における XFELO の配置

振器の全損失を上回るようなパラメータを選ぶ必要がある。後に示すように、ERL 型 X 線放射光源の電子ビームパラメータを用いれば、1 Å 領域の X 線発振が可能な FEL ゲインを得ることができる。

3-GeV ERL において XFELO を設置する場合、エネルギー回収モードではなく、2 回加速モードで 6 GeV の電子ビームを得て、これを XFELO のアンジュレータに導く配置となる (図 2)。XFELO は微小電流で運転可能であるため、エネルギー回収なしでもリニアックの運転が可能である。

3. XFELO のパラメータとゲイン

電子エネルギーを 6 GeV、FEL 波長を 1 Å とし、XFELO の装置パラメータを選ぶと表 1 のようになる。ここで、Case A は、標準的な ERL の運転モードに近い電子ビームパラメータであり、Case B は主加速器の初段部で速度集群[6]を行った場合である

表 1. XFELO のパラメータ例

Electron Beam	Case A	Case B
Energy	6 GeV	6 GeV
Charge	20 pC	7.7 pC
σ_t	1 ps	0.38 ps
σ_E/E	5E-5	1.5E-5
ϵ_n	0.2 mm-mrad	0.2 mm-mrad
β^*	17 m	17 m
Repetition	1 MHz	1 MHz
Undulator		
Pitch	1.94 cm	
a_w	0.65	
N_u	3000	
FEL		
Wavelength	1 Å	
Gain	35%	63%

表に示すアンジュレータを Halbach 型で構成すると、ギャップは 8 mm となる。アンジュレータ長は $L_u=58$ m である。電子ビームのエンベロープは、FEL ゲインが理論的に最大となる値として、アンジュレータ中央でのベータトロン関数 $\beta^* = L_u / \sqrt{12}$ を採用した。光ビーム (X 線) のエンベロープも電

子と同様に、アンジュレータ中央でのレーリー長を $Z_R=17$ m とした。

共振器型 FEL では、光ビームのプロファイルは共振器の閉じ込めモードで決まり、電子ビームと光ビームの空間的な重なり (フィリングファクター) を使って FEL ゲインを解析的に求めることができる [7, 8]。FEL ゲインが損なわれないように、電子ビームと光ビームの十分な重なりを得るための指標として、回折限界の条件がある。すなわち、光ビームの回折広がりよりも、電子ビームが細く絞れる条件である。回折限界の条件を満たす規格化エミッタンスは $\epsilon_n / \gamma \leq \lambda / 4\pi$ であり、6 GeV 電子、1 Å X 線の場合、 $\epsilon_n \leq 0.09$ mm-mrad である。

図 3 に FEL ゲイン (小信号利得) を規格化エミッタンスの関数として計算した結果を示す。規格化エミッタンスが回折限界を超えると FEL ゲインが低下してしまう様子が見える。

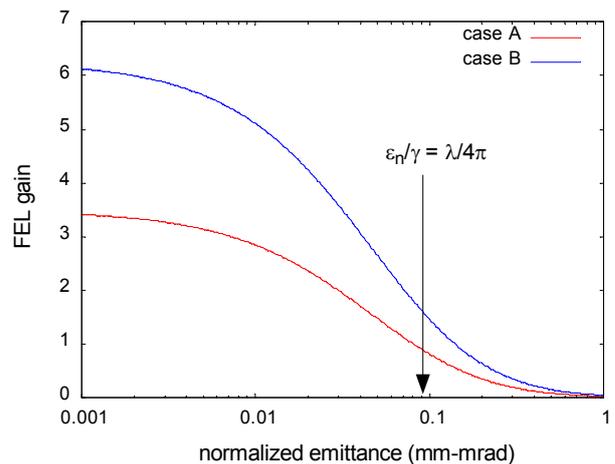


図 3: 規格化エミッタンスと FEL ゲイン

図 4 に FEL ゲインを電子ビームのエネルギー広がり関数として計算した結果を示す。アンジュレータ周期数で決まる FEL のバンド幅に対応したエネルギー広がり指標 $2\sigma_E/E \leq 1/2N_u$ を参考のため図中に示した。

図 3、図 4 からわかるように、表 1 に示したエミッタンス、エネルギー広がり電子ビームが実現すれば、XFELO の発振に十分な FEL ゲインが得られる。

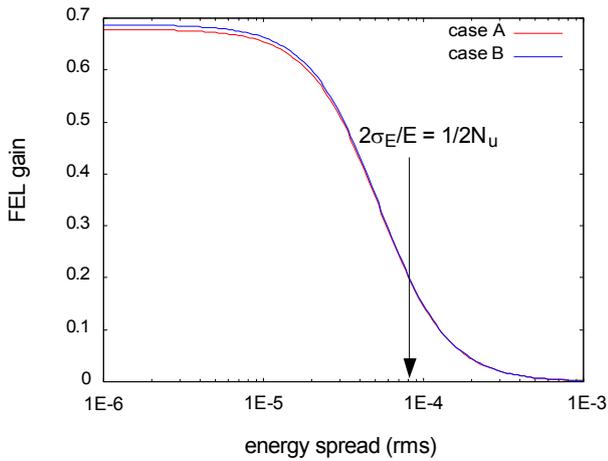


図4: エネルギー広がり と FEL ゲイン

4. 周回軌道における電子ビーム品質の劣化

3-GeV ERL で 2 回加速を行い、6 GeV 電子ビームを得る場合、周回軌道における電子ビーム品質（エミッタンス、エネルギー広がり）の劣化が問題となる可能性がある。電子ビーム質の劣化要因としては、偏向磁石およびアンジュレータからの放射光発生にともなう量子励起、真空パイプや加速管におけるウェーク場などがある。ここでは、放射光（インコヒーレント、コヒーレント）、加速管の近距離ウェーク場について、解析式と粒子シミュレーションによる評価をおこない、ビーム質劣化への影響を調べた結果を述べる。

偏向磁石におけるインコヒーレントなシンクロトロン放射光の効果(ISR-Bending)は [9]、

$$\sigma_E^2 = \frac{55}{48\sqrt{3}} \frac{\hbar c e^2 \gamma^7}{\epsilon_0 \rho^2} \quad (1)$$

$$\epsilon_x = \frac{55}{96\sqrt{3}} \frac{\hbar c e^2 \gamma^7}{\epsilon_0 \rho^2} \langle H_x \rangle \quad (2)$$

と表される。周回軌道における電子エネルギーを

3 GeV、偏向磁石の軌道半径を 19.1 m、 $\langle H_x \rangle = 3$ mm とした時、ISR-Bending の寄与は、

$$\frac{\sigma_E}{E} = 1.3 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_x = 2.6 \times 10^{-13} \text{ m}$$

と求められる。

アンジュレータからのインコヒーレント放射の効果(ISR-Undulator)は [10]、

$$\sigma_E^2 = \frac{7}{15} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\hbar}{mc} \left(\frac{2\pi}{\lambda_u} \right)^3 \gamma^4 K^2 F(K) L_u \quad (3)$$

$$\epsilon_x \approx \frac{1}{2} \frac{\sigma_E^2}{E^2} \langle H_x \rangle \quad (4)$$

と表される。アンジュレータ周期を 1.8 cm、 $K=2$ 、アンジュレータの総延長を 290 m、 $\langle H_x \rangle = 0.082$ mm とした時、ISR-Undulator の寄与は、

$$\frac{\sigma_E}{E} = 4.7 \times 10^{-5}$$

$$\epsilon_x = 9.2 \times 10^{-14} \text{ m}$$

となる。

解析式による評価では、ISR-Undulator によるエネルギー広がりが XFEL に影響を与える可能性があるものの、それ以外の効果は全く問題ないレベルであることがわかる。XFEL の運転時にはアンジュレータを開くといった措置を求めれば、エネルギー広がりも十分に小さくできる。

次に、粒子追跡シミュレーションによるビーム品質劣化の評価結果を示す。シミュレーションは elegant [11] を使い、入射合流部 (10 MeV) から 1 回目の加速、周回軌道、2 回目の加速 (6 GeV) まで計算した。10 MeV 位置での初期値は、電子パンチ長 1 ps (rms)、電荷量 20 pC、規格化エミッタンス 0.1 mm-mrad、エネルギー広がり 0.2% (rms) とした。偏向磁石におけるインコヒーレント放射、コヒーレント放射、加速空洞における近距離ウェーク場を含んだ計算を行ったが、アンジュレータは含んでいない。なお、加速空洞におけるウェーク場は、TESLA 空洞の値 [12] を用いたが、ERL 空洞でも大きく異なることはないと思われる。

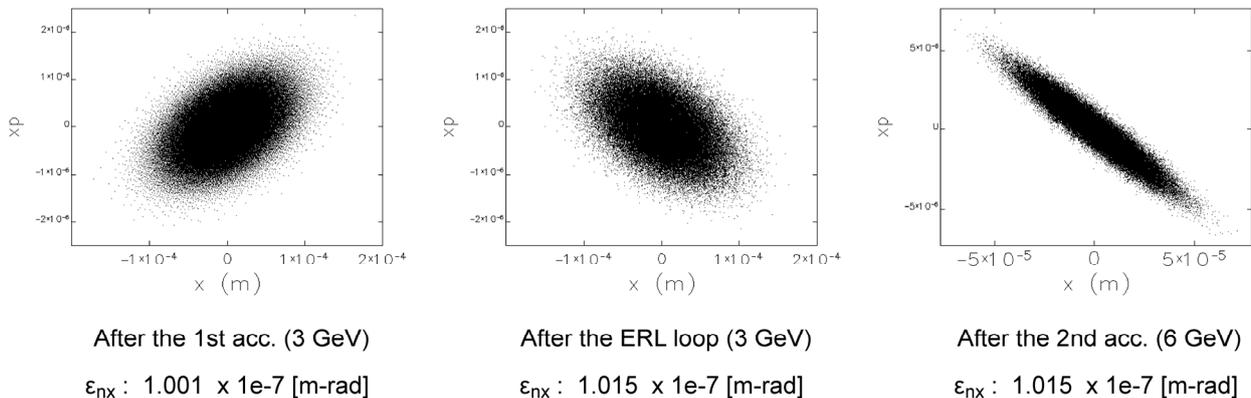


図5: 周回軌道におけるエミッタンス増加の計算結果

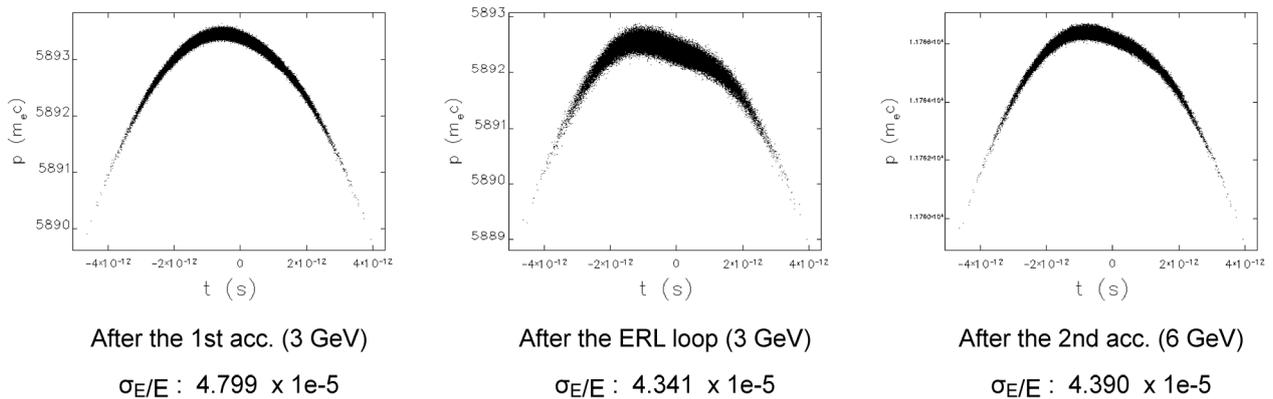


図 6: 周回軌道における縦方向位相分布の計算結果

図 5 に横方向位相分布(x-x')とエミッタンス増大の計算結果を示す。10 MeV から 6 GeV まで加速する間のエミッタンス増大はほぼ無視できる大きさである。

図 6 に縦方向位相分布の計算結果を示す。ここでも周回軌道におけるエネルギー広がりが増大は問題ないことがわかる。

なお、3-GeV ERL 周回軌道の設計と粒子追跡計算は、[13]に詳しく述べている。

5. XFEL の発振シミュレーション

XFEL のシミュレーションでは、光パルス全体に渡る時間コヒーレンスを調べる必要がある。したがって、バンチの一部 (スライス) のみを計算するのではなく、電子バンチと光パルス全体を取り扱う手法 (時間依存シミュレーション) を採用し、XFEL-O の発振特性を解析した。解析には、過去に開発した 1 次元 FEL コードを用いた。

共振器型 FEL では、光の横方向モードが共振器の境界条件で決まり、また、ゲインが小さいためにゲインガイド (電子ビームに光ビームが閉じ込められる効果) も弱く、発振特性が 1 次元コードで精度良く再現できる。同コードを用いて行った JAERI-FEL (赤外) の解析では、single super-mode、limit cycle、spiking mode などの発振特性について、実験結果がよく再現できている[14]。

Bragg ミラーによる狭帯域反射のシミュレーションは、光パルスを高速フーリエ変換で周波数領域に

変換した後、完全結晶による X 線反射のモデル (Darwin 曲線) を用いた[15]。

表 1 のパラメータ case-A を用いて、シミュレーションを行った。なお、電子バンチは三角形波形、全幅=4.9 ps (rms=1 ps に相当) とし、Bragg ミラーの帯域を 10 meV、帯域内での損失を 10% とした。図 7 は、FEL パワー (intra cavity) の成長を示したものである。約 200 往復で飽和に至ることがわかる。

図 8 に、成長に伴う X 線パルス波形の変化を示す。立ち上がりでは、インコヒーレントな自発放射光であるが、100 往復後には X 線パルス波形は徐々になめらかになり、200 往復後ではパルス全体が滑ら

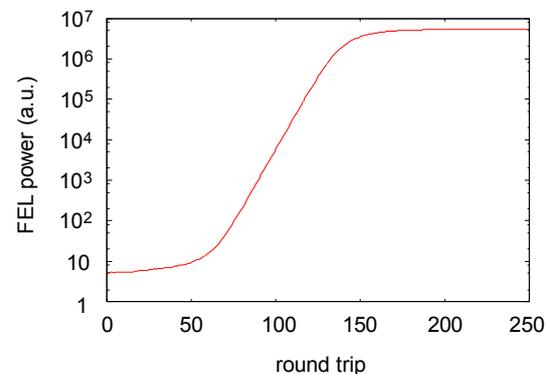


図 7: XFEL の発振シミュレーション。増幅から飽和にいたる過程。

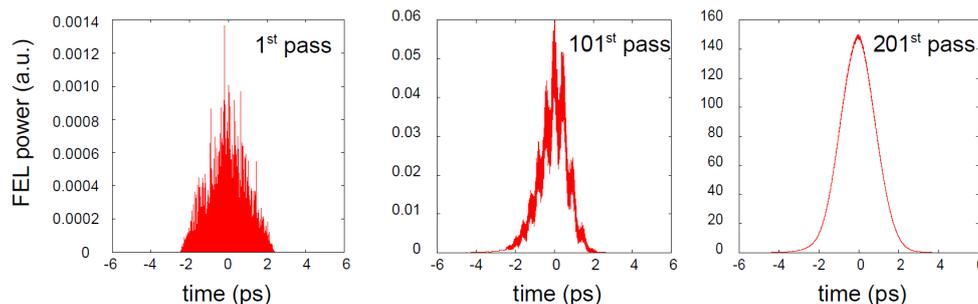


図 8: XFEL の発振シミュレーション。X 線パルス波形の変化。ショットノイズから飽和まで。

かなエンベロープを持つ。すなわち、時間コヒーレンスが確立する。飽和後の X 線パルスはガウシアンに近い波形を示し、パルス長 2.0 ps (FWHM) となった。取り出し側の Bragg ミラーの透過率を 5% と仮定すると、共振器から取り出されるパルス当たり X 線光子数は 2×10^9 である。

6. まとめ

KEK で提案中の 3-GeV ERL を 2 回加速モードで運転して得られる 6 GeV 電子を用いて、共振器型 X 線自由電子レーザーの検討を進めている。3-GeV ERL が目標としている電子ビームパラメータ（エミッタンス、電荷、エネルギー広がり）とほぼ同様のパラメータを仮定して FEL ゲインを評価し、1 Å の XFEL の発振が可能であることを確認した。

ERL の周回軌道、2 回加速の間に生じる電子ビームのエミッタンス、エネルギー広がりの増大について、解析式と粒子追跡シミュレーションで調べた。周回軌道のアンジュレータを全て閉じた場合（ $K=2$ とした場合）は、アンジュレータ放射による電子のエネルギー広がりが問題になる可能性があるが、それ以外の効果（偏向磁石のインコヒーレント放射、コヒーレント放射、加速空洞の近距離ウェーク場）は、XFEL の発振に問題ないとの見通しを得た。

1 次元時間依存の FEL 発振コードを用いて、XFEL の発振シミュレーションを行い、自発放射光から飽和にいたる過程を明らかにした。

XFEL の実現に向けては、本稿で述べた問題に加えて、X 線光学素子の開発として、Bragg ミラーのための高反射率の完全結晶、長大な光共振器で結晶を精密にアラインする手法、光学素子の熱負荷による変形などを解決しなければならない。XFEL に用いる電子バンチの電荷量を小さくできれば、光学素子の熱負荷を下げるができる。今後は、エミッタンスをさらに小さくするための入射器の最適設計、速度集群によるピーク電流増大などを検討し、小さな電荷量で XFEL の発振が可能なパラメータセットの追求が望まれる。

参考文献

- [1] Energy Recovery Linac Preliminary Design Report, IMSS/KEK (2012).
- [2] K-J. Kim et al., Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 244802.
- [3] B. Adams et al., to be published.
- [4] Y. Shvyd'ko et al., Nature Photonics 5 (2011) 1-4.
- [5] K-J. Kim and Y. Shvyd'ko, Phys. Rev. ST-AB 12 (2009) 080703.
- [6] R. Hajima et al., Nucl. Instr. Meth. A637 (2011) S37-S42.
- [7] W.B. Colson, IEEE J. Quantum Electron. 17 (1981) 1417.
- [8] D. Iracane et al., Phys. Rev. E49 (1994) 800-814.
- [9] H. Wiedemann, "Synchrotron Radiation", Springer (2003).
- [10] E.L. Saldin et al., Nucl. Instr. Meth. A381 (1996) 545-547.
- [11] M. Borland, Argonne. National Laboratory Advanced Photon Source Report No. LS-287 (2000).
- [12] TESLA Technical Design Report (2001).
- [13] M. Shimada et al., in these Proceedings.
- [14] R. Nagai et al., Nucl. Instr. Meth. A483 (2002) 129-133.
- [15] R. Hajima et al., Proc. FEL-2008 (2008) 87-89.