

A SIMULATION STUDY ON KEK ELECTRON LINAC FEL

T. Kamitani, I. Sato, K. Nakahara, A. Enomoto, K. Furukawa, S. Yamaguchi, T. Shioya
S. Toyama^{*1}, R. Matsuda^{*2}

National Laboratory for High Energy Physics (KEK), Oho 1-1, Tsukuba-shi, 305, Japan

(*1) Power Reactor and Nuclear Fuel Corporation, Tokai Works (PNC Tokai),

3371 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun 319-11, Japan

(*2) Mitsubishi Heavy Industries, LTD., Takasago R & D Center

Shinhamma 2-1-1, Arai-cho, Takasago-shi, 676, Japan

ABSTRACT

We are planning to construct a test facility of FEL experiment using electron beam of KEK 2.5 GeV linac. It aims to realize short wave length FEL (shorter than UV light) in the final stage. In the preliminary stage, experiment in visible light region will be performed first. Design parameters are now under study with FEL gain simulation. Outline of the FEL simulation is described here.

KEK電子ライナックを用いたFELのシミュレーション

1. 短波長FELの必要性

現在X線源や真空紫外光源として用いられているシンクロトロン放射光はそれまでに利用することのできた光源に比べると飛躍的に強度の強いものであったが、これからの将来にわたっても十分なものとは言えない。なぜなら現在得られる放射光は、(1) コヒーレントでない、(2) 広い波長領域にわたって光があるので特定の波長領域の光のみ取り出したときに得られる光のパワーはあまり大きくない、という弱点があるからである。これらの問題を持たない光源として考えられるものの一つとして自由電子レーザー (Free Electron Lazer : FEL) がある。FELを用いると非常にコヒーレンスの高くしかも波長の拡がりの小さな光を得ることができる。また通常のレーザーでは光の波長をほとんど変えられないのに対して、FELでは電子のビームエネルギーを変えることにより、出てくる光の波長をかなり自由にすることができる。このようにFELには次世代の光源となりうる特長がいくつもある。このためFELについての研究を進めていくことは非常に重要であり、世界各地で研究が進められている。

これまでに行なわれたFELの実験を見るとその成否の鍵は電子ビームの質 (エネルギー拡がりやエミッタンス) にあるようである。そしてこのビームの質に対する要求は光の波長が短くなるほどさらに厳しいものとなる。実際、紫外領域よりも短い波長での発振、増幅に成功した実験は少ない。短い波長領域でのFELを実現するためには高いエネルギーで質の良い電子ビームが必要であるが、KEK電子ライナックを用いればエネルギーは十分であるから、あとはこのビームの質を向上させるように改良して行くことにより実現できるものと考えている。われわれの実験も最終的には質の高い電子ビームを用いてこのような真空紫外以上の短波長でのFELを目指すものであるが、まずは現在利用可能なビームを用いて、短波長FELに向けての予備実験としてまずは可視光領域での光増幅実験を行ないたい。

2. ビームエネルギーの決定と実験用ビームラインの建設

FELの光の波長と電子ビームのエネルギーの間には $\lambda_s = \lambda_w (1 + K^2) / 2\gamma^2$ のような関係 (共鳴条件) がある。 (λ_s はレーザー光の波長、 λ_w はウイグラー波長、 γ は電子のエネルギーを電子の静止エネルギーで割ったもの、 K はウイグラーの磁場の強さによって決まる量) 短い波長のFEL光を得るためには (1) λ_w を短くする (ウイグラーの周期を短くする)、(2) K を大きくする (磁場を強くする)、(3) 電子ビームのエネルギーを高くする、の3つが考えられる。しかし (1) と (2) については技術的問題があり、 $\lambda_w = 1 \text{ cm}$ 、 $K =$

1 (だいたい $B = 1$ Tesla に相当) がせいぜいでありこれ以上飛躍的に向上させることは難しい。これに対して電子ビームのエネルギーを変えることはかなり自由にできるので光の波長はだいたいビームエネルギーに決まると考えてよい。概算すると電子エネルギーが 10 MeV で $\lambda_s = 0.1$ mm、100 MeV で $\lambda_s = 1.0$ μ m、500 MeV で $\lambda_s = 40$ nm となる ($\lambda_w = 4$ cm のとき)。すなわち 100 ~ 200 MeV でだいたい可視光が、それより高いエネルギーでは紫外光或いはもっと短い波長の光が得られることになる。

実験を行なう場所としては KEK 2.5 GeV Linac の 500 MeV ビームラインを想定している。これは上流側から全長の約 5 分の 1 のところ (ビームエネルギーが約 500 MeV になる場所) でメインのビームラインとは 90 度横方向に分岐しているラインである。このラインは過去にはビームのエネルギー分析のために用いられていたが、現在使われておらず偏向電磁石等が取り外されているので新たに整備する必要があり、このラインのトランスポート系の設計の作業が行なわれている。このビームライン上にウイグラー磁石を設置して実験を行なう。上の計算によれば 500 MeV の電子ビームを用いれば (うまく FEL としてはたらけば) 紫外光が得られることになるが、現在のビームの質では短波長 FEL を実現するのは厳しい、また紫外光の測定は可視光よりもむずかしいし、初期光として入射するレーザーも紫外領域のものは手に入りにくいのでまずは可視光領域で実験を始めてその後紫外あるいはさらに短波長の実験に進むようにしたい。そのためには共鳴条件が可視光領域で成り立つようにライナックの加速フェーズをうまく調整してこのビームラインにビームが到達した時のエネルギーをもっと低くして実験を行なう。

3. FEL シミュレーションとその結果

レーザー光の増幅を観測できるのに十分なゲインを得るためにはどのような条件が必要かを知り、特にウイグラーの長さや強さを決めるには FEL によるレーザーパワーのゲインのシミュレーションを行なうことが必要である。このために、KMR (文献 1) の方程式系をルンゲクッタ法により数値積分することにより、1 次元シミュレーションを行なった。

運動方程式系

* For electron motion

$$\text{Electron energy } \gamma = \frac{E}{m c^2}$$

$$\text{Ponderomotive phase } \psi = \int_0^z (k_w + k_s) dz_1 - \omega_s t$$

$$\frac{d\gamma}{dz} = - \frac{\omega_s a_w a_s}{c \gamma} \sin \psi$$

$$\frac{d\psi}{dz} = (k_w + \delta k_s) - \frac{\omega_s}{c} \frac{1}{2\gamma^2} (\mu^2 - 2a_s a_w \cos \psi)$$

* For EM field evolution

Optical field; amplitude a_s , wave number k_s , frequency ω_s

Wiggler field; amplitude a_w , wave number k_w , frequency ω_w

$$\mu = 1 + a_w^2, \quad \delta k_s = k_s - \omega_s / c$$

$$\text{Plasma frequency } \omega_p^2 = \frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m}, \quad n_e \text{ electron density}$$

$$\frac{da_s}{dz} = \frac{1}{2} \frac{\omega_s}{c} \left(\frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} \right) a_w \left\langle \frac{\sin \psi}{\gamma} \right\rangle$$

$$\frac{d(\delta k_s)}{dz} = \frac{1}{2} \frac{\omega_s}{c} \left(\frac{\omega_p^2}{\omega_s^2} \right) \frac{a_w}{a_s} \left\langle \frac{\cos \psi}{\gamma} \right\rangle$$

この際に用いた各種パラメータの値は表1にまとめた。シミュレーションに用いた粒子の数は500であり、その初期状態は位相空間で位相方向には等間隔で同一のエネルギー分布を並べる Quiet Start の手法をもちいて自発放射による影響を出ないようにした。

シミュレーションにより得られた結果の一つとしてレーザー光の振幅ゲインが電子ビームのエネルギー幅によってどのように変わるかを示したものが図1である。これよりゲインがエネルギー幅=0の理想の場合にくらべて約半分になるのはエネルギー幅=0.56%の時であることがわかる。この程度までは許容できるとしてこの値を目安にしてトランスポート系の設計を考えることになる。

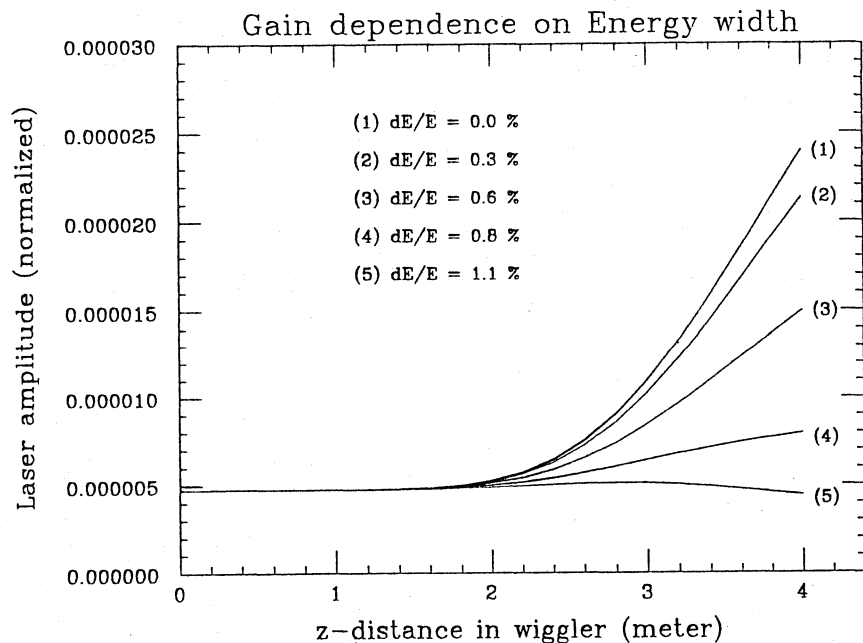
4. 今後の予定

今回のシミュレーションには電子ビームのエミッタンスの効果が考慮されていない。この効果をエネルギー拡がりに換算して取り入れる Equivalent Energy Spread法というやり方があるのでこれを用いて電子ビームのエミッタンスにどれだけの制限がつくかについても求めて、あわせて報告する予定である。

表1. シミュレーションに用いたパラメータ

ウイグラーの長さ	$L_w = 4.0$ (meter)
ウイグラー波長	$\lambda_w = 0.04$ (meter)
ウイグラー磁場	$B_w = 0.5$ (Tesla)
電子ビームエネルギー	$\gamma_m = 360$ ($E \sim 180$ MeV)
エネルギー幅	$dE/E = 0.0 \sim 1.1$ %
ビーム電流 (ピーク値)	$J_e = 100.0$ (A)
ビームサイズ (半径)	$r = 0.5$ (mm)
ウイグラー場の振幅	$a_w = eA_w / (mc) = eB_w \lambda_w / (2\pi mc) = 1.867$
レーザー波長	$\lambda_s = \lambda_w * (1 + a_w^2) / (2\gamma^2) = 6.924 * 10^{-7}$ (m)
レーザー周波数	$\omega_s/c = 9.073 * 10^9$
電子密度	$n_e = 2.65081 * 10^{18}$
プラズマ周波数	$\omega_p/c = 0.30638 * 10^9$
レーザー場の振幅	$a_s = 4.74 * 10^{-6}$ (~ 1 MW / $0.5^2 \pi$ m ²)

図1



参考文献

1. N. M. Kroll, P. L. Morton, M. N. Rosenbluth IEEE Vol. QE17 (1981)1436