

[P 1 – 5]

## 1-D CALCULATION FOR SPring-8 LINAC SINGLE PASS FEL

K. Yanagida, H. Yoshikawa, S. Suzuki, T. Taniuchi, A. Mizuno, T. Hori, T. Kobayashi,  
T. Asaka, S. Fukushima, Y. Itoh, A. Kuba, H. Sakaki, Y. Kishimoto\* and H. Yokomizo

SPring-8

Kamigori-cho, Hyogo 678-12, Japan

\*Japan Atomic Energy Research Institute, Naka Fusion Research Establishment  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki 311-01, Japan

### ABSTRACT

SPring-8 linac was completed and the first beam was observed in August 1996. The linac will be operated twice a day as the injector in the future. The linac will be utilized for various applications in the rest of the time. A single pass FEL operating in the Self Amplified Spontaneous Emission (SASE) mode is planned as the most interesting application. For the FEL 1-dimensional calculation was performed. The target wavelength is determined as 20nm at 0.69GeV. After the 20nm FEL is realized, the shorter wavelength FEL, 4nm at 1.55GeV, will be challenged. At present the first phase parameters are determined as the peak current of 1 ~ 10kA, the normalized emittance of  $1.0\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  in the undulator section ( $\beta=10.0\text{m}$ ).

### SPring-8 リニアック シングルパス FEL の 1 次元計算

#### 1. はじめに

SPring-8 リニアックは1996年8月に完成し、ファーストビームを確認した[1]。10月にはシンクロトロンへの入射が始まる予定である。このリニアックは、蓄積リングが稼働を始める1997年秋以降、1日2回のシンクロトロンへの入射を予定している。将来的には、入射時以外の時間を使って、リニアックの電子ビームを利用する計画が進んでいる。例えば、逆コンプトン散乱より得られる $\gamma$ 線を用いた核励起の実験、パラメトリックX線やチャネリングX線の発生、低速陽電子の発生等である。更に、1998年にはニュースバルへの入射が始まる予定である。

特に興味深い応用として、SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) モードのシングルパスFELにより、紫外～軟X線領域のコヒーレント光を発生させる提案がある。通常のFELでは、2枚の高反射率の反射鏡を用いて光共振器を構成し、バンチが通る度に増幅されていき、レーザー発振となる。ところが、光の波長がnm領域では、反射鏡が存在せず、光共振器を構築できないので、SASEモードのシングルパスFELが最有力視されている。このような、波長がnm以下のSASE計画はSLAC[2]

及びDESY[3]で提案されている。

本研究会では、SPring-8 リニアックに於けるSASEの諸元及びビームパラメータを決定するため、1次元の評価式及びコードを用いて計算を行った。1次元の評価式はKwang-Je Kimの論文(1992 FEL Conf.)[4]または木原氏の解説[5]を参考にした。1次元計算コードはラマン領域FEL用に開発したものを改造して使用した。SASE用のアンジュレータには収束用四極磁場成分が不可欠であるが、現在、四極磁場成分を組込可能な3次元計算コードを開発中である。

現在、当面の目標及びPOP (Proof of Principle) として電子エネルギー0.69GeVのシングルパルスビーム用いて、波長20nmのSASE発生を計画している。さらに、Water windowの4nm付近を1.55GeVで挑戦する予定である。

#### 2. SASE 1 次元計算

SASEの増幅や飽和を特徴付けるものとしてピアスパラメータ $\rho$ があり、以下のように定義される。

$$\rho = \left( \frac{e^2 z_0 n K^2 [JJ]^2}{32 \gamma m_0 c^2 k^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

Pierce Parameter

$\gamma$ : ローレンツ因子

$$Z_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c} = 377 [\Omega] \quad (2)$$

$n$ : 1-D Electron Density [個/m<sup>2</sup>]

$$k = \frac{2\pi}{\lambda_u} [\text{m}^{-2}] \quad (3)$$

$\lambda_u$ : アンジュレータ周期長 [m]

$$K = \frac{ecB}{mc^2 k} = 93.44B\lambda_u \quad (4)$$

Kパラメータ (Plannerの場合)

B: 磁場強度 [T]

$$[JJ] = J_0(\xi) - J_1(\xi) \quad (5)$$

J( $\xi$ ): ベッセル関数

$$\xi = \frac{K^2}{4 \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)} \quad (6)$$

(Plannerの場合)

アンジュレータ中に於いて光のパワーPは指数関数的に増幅(発振)され、以下のように表される。

$$P = P_{in} \exp(z/L_G) [\text{W}] \quad (7)$$

Z: Z方向の距離(変数)

L<sub>G</sub>: パワーゲイン長

$$P_{in} = \frac{c}{\lambda} \rho^2 \gamma mc^2 [\text{W}] \quad (8)$$

$$L_G = \frac{1}{2\sqrt{3}kp} [\text{m}] \quad (9)$$

ここでP<sub>in</sub>は初期パワーであり、仮想的な種火に相当する。L<sub>G</sub>はパワーゲイン長であるが、この値が小さいと飽和距離L<sub>sat</sub>が短くなる。そのため、アンジュレータの周期長は出来るだけ小さい方が望ましい。SASEで発生する光の波長は;

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) [\text{m}] \quad (10)$$

である。勿論これは普通の自発アンジュレータ光の波長と同じである。飽和パワーP<sub>sat</sub>及び飽和距離L<sub>sat</sub>は;

$$P_{sat} = \rho P_{beam} [\text{W}] \quad (11)$$

P<sub>beam</sub>: ビームパワー

$$L_{sat} = L_G \ln \left( \frac{P_{sat}}{P_{in}} \right) [\text{m}] \quad (12)$$

である。光のライン幅 $\Delta\lambda/\lambda$ は;

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{\rho}{N}} \quad (13)$$

N: アンジュレータの周期数

で与えられる。結局のところ、ピասパラメータを大きくとって、飽和距離を如何に小さくするかが問題となる。そこで、光の波長を固定した場合、アンジュレータ周期長 $\lambda_u$ に対するピասパラメータ $\rho$ 及び飽和距離L<sub>sat</sub>の振舞をみる。その前提として、アンジュレータ磁場強度B、アンジュレータ周期長 $\lambda_u$ 及びアンジュレータギャップgをモデリングする必要がある。但し、このモデリングはハイブリッドプラナー型アンジュレータに限定する。

$$B = 0.3 \left( \frac{\lambda_u}{g} - 0.66 \right) [\text{T}] \quad (14)$$

図1に式(14)のグラフと実機との比較を示す。係数の0.3は実機の磁場強度より低くなるような値とした。アンジュレータギャップは小さい方が望ましいが、機械的に可能なギャップ値として0.015 [m], 0.013 [m], 0.011 [m]をサーベイした。

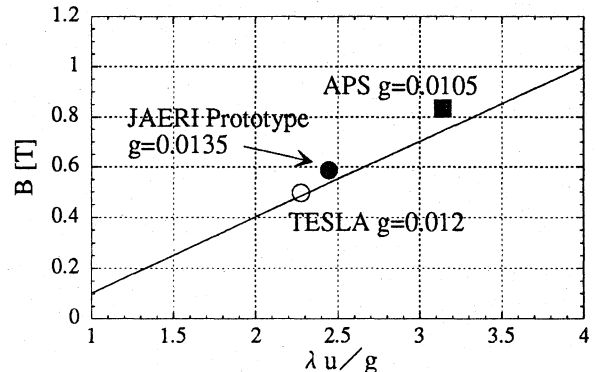


図1. ハイブリッドプラナー型アンジュレータ磁場強度のモデリング(直線)。点は実機若しくは計画中のアンジュレータの値である。

以上を基にして計算されたピասパラメータを図2及び図3に、飽和距離を図4及び図5に示す。SASEの波長は20nm及び4nmである。規格化エミッタンスは1.0πmm·mrad、ベータ関数は10.0mで計算した。

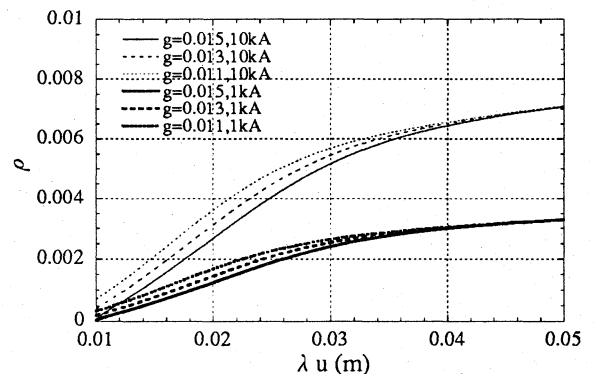


図2. 波長20nm時のピասパラメータの変化。

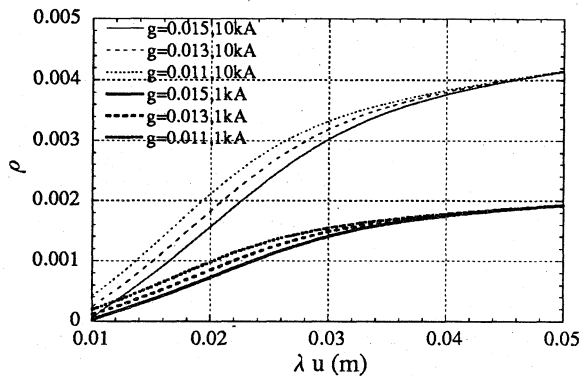


図3. 波長4nm時のピアスパラメータの変化。アンジュレータ周期長 $\lambda u$ を大きくすると、ビームエネルギーも式(10)に従って大きくなる。

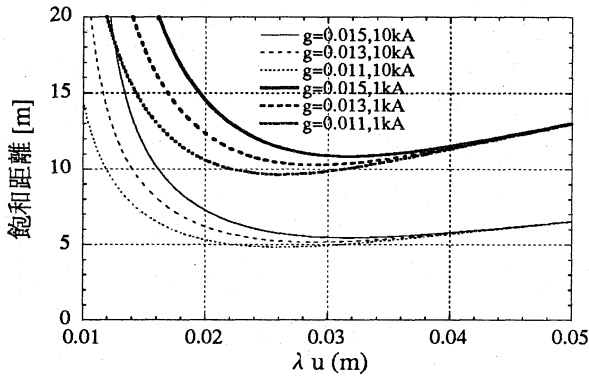


図4. 波長20nm時の飽和距離。 $g=0.013$ のとき、 $\lambda u=0.028$ で最小値をとる。

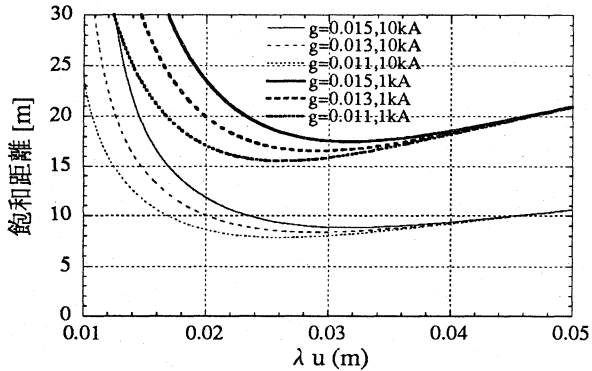


図5. 波長4nm時の飽和距離。 $g=0.013$ のとき、 $\lambda u=0.028$ で最小値をとる。

以上の結果及び機械的な製作性等を考慮し、アンジュレータのギャップ $g$ を0.013[m]、周期長 $\lambda u$ を0.032[m]に決定した。この時のビームエネルギーは0.69GeV (20nm) 及び1.55GeV (4nm) である。図6は1次元計算コードによるパワー増幅の様子である。表1にこれらのパラメーター一覧を示す。

### 3. おわりに

SPring-8リニアックの将来計画としてのシングル

パスFEL計画は立ち上がった段階であり、今後、3次元コードの開発、RF電子銃とフォトカソード用レーザーの開発、ビーム輸送(含むバンチ圧縮)等検討課題はたくさんある。以降早急にこれらを解決し、SASE実現へ向かう予定である。

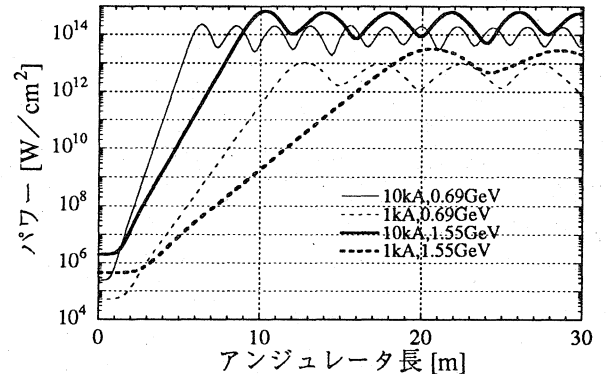


図6. 1次元計算コードによるパワー増幅の様子。 $\lambda u=0.032$ [m]、 $g=0.013$ [m]、 $K=1.62$ である。

表1 Parameters for SPring-8 Linac Single Pass FEL

| 波長                    | 20nm                      | 4nm                       |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|
| エネルギー                 | 0.69GeV                   | 1.55GeV                   |
| $\lambda u$           | 32mm                      | 32mm                      |
| Und. Gap              | 13mm                      | 13mm                      |
| Und. Type             | Planner Hybrid            | Planner Hybrid            |
| K                     | 1.62                      | 1.62                      |
| 尖頭電流                  | 1~10kA                    | 1~10kA                    |
| $\beta\gamma\epsilon$ | 1.0 $\pi$ mm $\cdot$ mrad | 1.0 $\pi$ mm $\cdot$ mrad |
| $\rho$ (1-D)          | 0.0027~0.0057             | 0.0016~0.0034             |
| $L_G$ (1-D)           | 0.55~0.26m                | 0.94~0.44m                |
| $L_{sat}$ (1-D)       | 10.4~5.2m                 | 16.8~8.5m                 |
| Und. Length           | 20~10m                    | 30~15m                    |
| $\beta$ in Und.       | ~10m                      | ~10m                      |

### 参考文献

- [1] H. Yokomizo et al., "Commissioning of SPring-8 Linac", Proc. of the 21th Linear Acc. Meeting in Japan, 1996, Tokyo.
- [2] C. Pellegrini et al., "The SLAC soft X-ray high power FEL", Nucl. Instr. and Meth. A341 (1994) 326.
- [3] A VUV Free Electron Laser at the TESLA Test Facility at DESY, 1995, TESLA-FEL 95-03.
- [4] K. -J. Kim and M. Xie, "Self-amplified spontaneous emission for short wavelength coherent radiation", Nucl. Instr. and Meth. A331 (1993) 359.
- [5] 木原元央, "コヒーレント X線源への挑戦", 放射光第9巻220 (1996).