

[F18p10]

## 5 ~ 15 Hz FEL macropulse operation and Calibration of electron beam energy with FEL wavelength at the FELI

Y.Kanazawa, A.Zako, E.Oshita, T.Takii, A.Nagai, T.Tomimasu

Free Electron Laser Research Institute, Inc.(FELI)  
2-9-5, Tsuda-Yamate, Hirakata, Osaka 573-0128, Japan

### Abstract

The electron beam of the FELI linac consists of a train of several picosecond pulses (micropulse) repeating at 22.3125 MHz, or at 89.75 MHz. The train of micropulses continues for 24  $\mu$ s (macropulse) and usually repeats at 10 Hz. In the paper we report first some results and problems on a test operation of 5 ~ 15 Hz FEL macropulse operation and secondly calibration of electron beam energy with FEL wavelength at the FELI.

### 5~15Hz 運転と FEL 波長による電子ビームエネルギーの較正

#### 1. はじめに

(株)自由電子レーザー研究所 (FEL 研) では、1994 年 10 月に FEL 装置 1 ( $\lambda_u=3.4\text{cm}$ ,  $5\sim 22\mu\text{m}$ ) で中赤外域 FEL 発振以来、1995 年 2 月には FEL 装置 2 ( $\lambda_u=3.8\text{cm}$ ,  $1\sim 6\mu\text{m}$ ) で可視～近赤外域 FEL 発振、同年 12 月には FEL 装置 3 ( $\lambda_u=4.0\text{cm}$ ,  $0.278\sim 1.2\mu\text{m}$ ) で紫外～可視域 FEL 発振に成功している。

1996 年 4 月には FEL 装置 1 の下流に遠赤外域用 FEL 装置 4 を設置し、FEL 装置 1 で一度発振に使われた電子ビームを FEL 装置 4 で再度発振に使用している。図 1 に FEL 研の電子リニアック、ビーム輸送系、FEL 装置 1～4 の配置を示す。

尚、FEL 装置 1 の電子ビーム運転条件はマイクロパルス 22.3125MHz, マクロパルス 24  $\mu$ s - 10Hz である。この時 FEL 光はマイクロパルス 22.3125MHz, マクロパルス 18 $\mu$ s - 10Hz, ピーク出力 10MW, 利用平均出力 100mW<sub>max</sub> である。しかし、よりハイパワーを必要とするユーザもある。現状の FEL 研の設備にて平均出力を増大する方法としては①

マイクロパルスの高繰返し化(89.25MHz)②マクロパルスの高繰返し化( $\sim 20\text{Hz}$ )があり、うまくゆけば平均出力は 8 倍になる。本報の前半は後者②について試験運転を行った結果の報告である。

また、加速器の電子ビームエネルギーの較正は、従来、原子核反応のしきい値、チェレンコフ光発生 のしきい値、偏向電磁石の磁場強度、軌道半径などを基に求められている。本報後半は FEL 光の発振波長とその計算式を用いて電子ビームエネルギーを算出し、偏向電磁石の磁場強度と軌道半径により求める電子ビームエネルギーの較正についての報告である。

#### 2. マクロパルス 5~15Hz 運転

図 2 は FEL 装置 1 にてマクロパルスの繰返しを 5~15Hz に変化させたときの FEL 平均出力と FEL スペクトルの半値幅 (FWHM) であり、条件は電子ビーム加速エネルギー約 29MeV、アンジュレータギャップ 20.7mm で 7.1  $\mu$ m の FEL を発振させたときのものである。

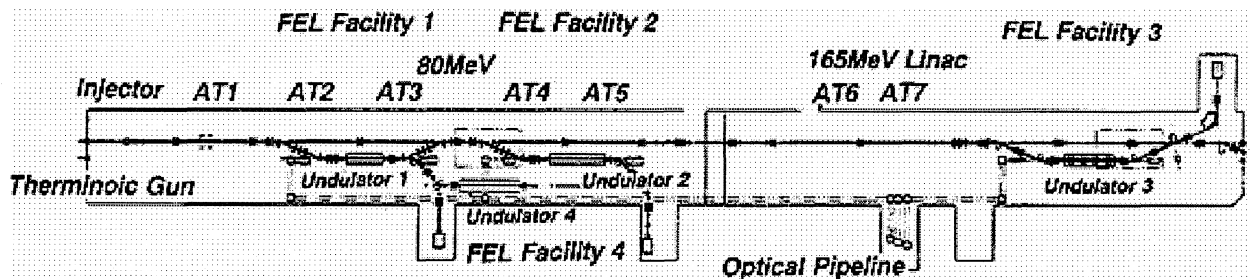


図 1. FEL 研電子リニアックと FEL 装置 1, 2, 3 及び 4 の配置

マクロパルスのみを変化させた場合、FEL 出力は繰返し率比例にならず(FEL 発振しない場合もあり) また FEL スペクトル幅が広がった。これは①RF 増幅用クライストロンの印可パルスの平坦度が乱れることで電子エネルギー広がりが大きくなること、②導波管のSF<sub>6</sub> ガス圧の温度変化による RF 位相のずれにより加速エネルギーが変化したことが大きな原因であった。

ここで FEL 発振条件を最良とする為に①については各繰返しに対し PFN 回路のインダクタンス調整を行い印可パルスの平坦度を整え、②については各繰返しに対し位相調整に努めたが導波管内の温度が平衡状態に達し SF<sub>6</sub> ガス圧が一定となり RF 位相が安定するまでに約 1.5 時間を必要とした。

尚、PFN 回路のインダクタンス値はモータ駆動のプランジヤによって容易に変更可で、パルス平坦度を容易に調整できる。また、各プランジヤ位置を記録しておくことも可能である。

このように各繰返しにおいて印可パルス平坦度を整え均一かつガス圧平衡状態で RF 位相を調整し、FEL 平均出力とスペクトルを測定した。この状態でも FEL 平均出力は繰返し率比例にならず、高繰返しほど比例値よりも出力が低下した。その原因にビーム負荷増大に伴う RF レベルの低減、他の電源や電子ビームの安定性の低下等が考えられるが、再現性のあるデータは得られていない。

また、繰返しを変化させた時に見られた RF 増幅用クライストロン印可パルス平坦度の乱れにより 2 波長の FEL 発振が観測された。図 3 は 10Hz の運転時に意図的に 2 波長の発振をさせたもので図 4 はその時のクライストロン出力電流波形である。前半の 12 μs が 7.1 μm、後半の 12 μs が 6.9 μm の FEL 発振に寄与していると考えられる。図 5 はその時の FEL マクロパルス波形であり、中央部に出力の減少が見られる。これは 2 波長発振時には前半の 12 μs は 7.1 μm の電子ビーム集群状態であり 7.1 μm の FEL 光が減衰するために必要な約 12~17 μs の間はその影響が残るため、7.1 μm の電子ビーム集群が 6.9 μm となり発振の平衡状態にいたるまでの間は電子ビームの集群間隔が徐々に変化することにつれ波長が徐々にシフトしておりスペクトルが広がっていると思われる。

このような 2 波長同時発振は 24 μs の長パルスで可能なものであり、利得が 20% の FEL 装置 1 であれば 3 波長同時発振も可能と思われる。ただし、クライストロン出力を大幅に変えることは電子ビームのエネルギースペクトルを広くすることに他ならず、決して良い FEL 光が得られるとはいえない。

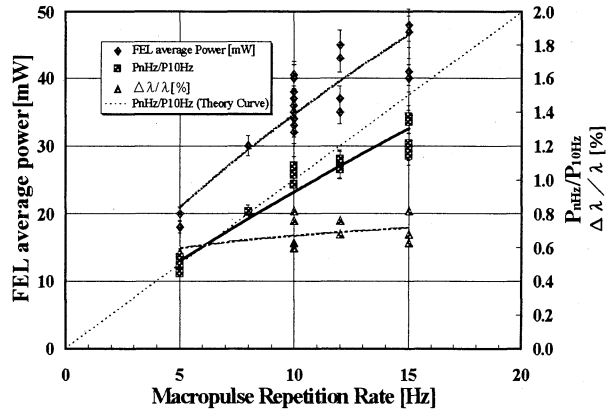


図 2. マクロパルス繰返しと平均出力, 半値幅

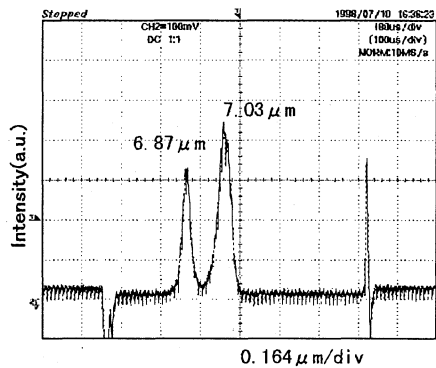


図 3. 2 波長発振時のスペクトル

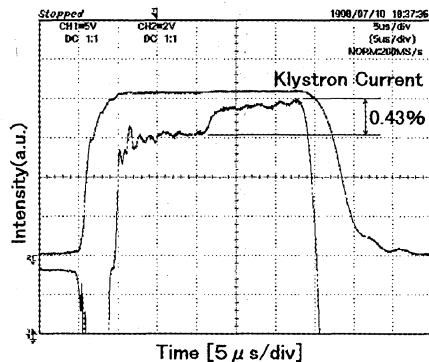


図 4. RF 増幅用クライストロン出力電流

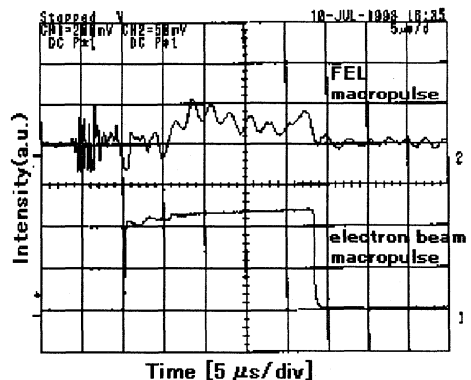


図 5. 2 波長発振時の FEL マクロパルス

表1. アンジュレータ1~4のパラメータ

| FEL Facility         |             | No.1    | No.2    | No.3    | No.4      |
|----------------------|-------------|---------|---------|---------|-----------|
| Period length        | $\lambda u$ | 3.4cm   | 3.8cm   | 4.0cm   | 8.0cm     |
| Gap length           | $g$         | 15mm    | 20mm    | 16mm    | 30mm      |
| Magnetic field(peak) | $Bu$        | 0.48T   | 0.40T   | 0.60T   | 0.41T     |
| Parameter K          | K           | 0.5-1.5 | 0.5-1.4 | 0.5-2.3 | 3.37-1.26 |

表2. 偏向電磁石のパラメータ

| FEL Facility   | No.1 |      |      |      | No.2 |      |      |      | No.3 |      |  |  | No.4 |  |  |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|--|------|--|--|
| Bending Magnet | B101 | B105 | B201 | B205 | B301 | B303 | B82  | B101 | B105 | B107 |  |  |      |  |  |
| $\rho$ [m]     | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.50 | 0.70 | 0.70 | 1.00 | 0.50 | 0.50 | 0.15 |  |  |      |  |  |
| Degree[°]      | 22.5 | 45.0 | 22.5 | 45.0 | 22.5 | 22.5 | 67.5 | 22.5 | 45.0 | 90.0 |  |  |      |  |  |

3. FEL 波長による電子ビームエネルギーの較正

電子ビームエネルギー  $E$ [MeV]の算出は偏向電磁石の磁場強度  $B$ [T]と軌道半径  $\rho$  [m]による式

$$E = 300B\rho \tag{1}$$

で与えられる。しかしこれは端部までも磁場強度が均一である理想的な偏向電磁石での近似式であり、実際の偏向電磁石においてはエッジ効果があるため正確な電子ビームエネルギーを算出することは困難となる。しかし、FEL の発振波長  $\lambda$  [μm]とその計算式

$$\lambda = \lambda u \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) / 2 \left( \frac{E}{0.511} + 1 \right)^2 \tag{2}$$

$$K = 93.4Bu\lambda u \tag{3}$$

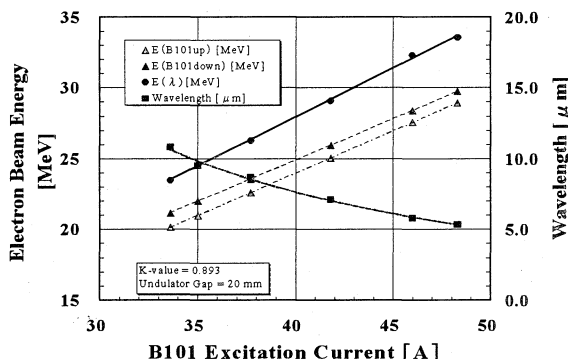
を用いればより精度の高い電子ビームエネルギーの算出を行うことができる。 $\lambda u$ [m]はアンジュレータの周期長、 $K$  はアンジュレータギャップによる磁場パラメータであり、 $Bu$  はアンジュレータギャップによるピーク磁場強度である。表 1 は FEL 装置 1~4 のアンジュレータのパラメータである。

図 6 に示すのが、FEL 装置 1 において(1)式及び(2)(3)式を用いて算出した電子ビームエネルギーの比較である。(1)式による値は(2)式による値の約 0.9 倍 (<1) となっている。これは、偏向電磁石の端部における磁場強度の減少から予想されるものに相反するが、電子ビームが偏向電磁石の曲率半径よりも大きい軌道半径にて偏向されたためと思われる。

また FEL 研の FEL 装置 1~4 には表 2 に示す 22.5°, 45°, 67.5°, 90° の偏向電磁石が使用されており図 7 は偏向電磁石の角度による(1)式による値と(2)式による値の比である。偏向角が大きいほど(1)(2)両式によるエネルギー算出値の差が少ないことが見られる。これは偏向角が大きいほど全磁場強度に対

して端部の占める割合が少ないためと思われる。

以上の結果からは(1)式の補正係数を求めるには信憑性が乏しく、正確なビーム軌道の測定と偏向電



磁石磁場強度, 端部形状等を考慮した検討が必要と思われる。

図 6. FEL 装置 1 における電子ビームエネルギー算出方法の比較

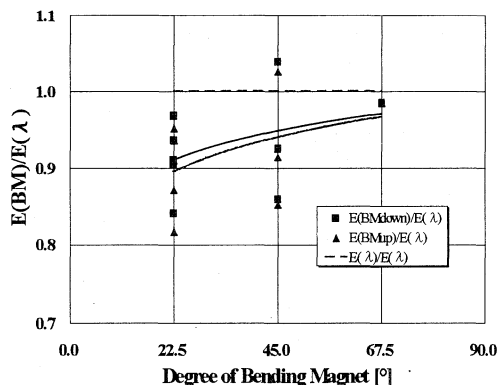


図 7. 偏向電磁石の角度に対する電子ビームエネルギー比

参考文献

[1] E.Oshita et al IEEE Proc. PAC'95(Dalls,May1-5,1995) p.1608