

[13A-04]

## STUDY OF FREE ELECTRON LASER BY LINAC AT LASTI - LEENA PHOTO CATHODE LINEAR ACCELERATOR -

S.Miyamoto\*), T.Inoue, S.Amano, H.Higashiuchi, D.Morishima, A.Shimoura, K.Fukugaki,  
M.Yatsuzuka<sup>A)</sup>, and T.Mochizuki

Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI),  
Himeji Institute of Technology (HIT), Koto 3-1-2, Kamigori-cho, Ako-gun, 678-1205 JAPAN

<sup>A)</sup>Facility of Electric Engineering, Himeji Institute of Technology (HIT)  
Shosha 2167, Himeji-shi, Hyogo, 671-2201 JAPAN

### Abstract

Small LINAC with photo-cathode RF gun will be started to operation at Lasti/HIT in Harima Science Garden city. It will be used for studying bright RF gun, for operation of free electron laser and for studying interaction between matter and infrared light generated by FEL. Compton back scatter x-ray generation will be tested using a synchronized laser.

## 高度研におけるライナック自由電子レーザーの研究 - LEENA光陰極線形加速器 -

### 1. はじめに

RF電子銃をフォトカソード動作で運転する電子源を用いることで、小型でシンプルな高性能ライナックを構成できる可能性がある。

姫路工業大学高度産業科学技術研究所ではRFフォトカソード電子銃小型ライナック(LEENA: Laser Emitted ElectroN Accelerator)を用いて、赤外から遠赤外自由電子レーザー光源の開発、軟X線放射光との同時利用、およびそれらの産業応用研究を行う計画である。LEENAはこれまで、書写キャンパス(姫路市)に設置されており、放射線遮蔽の関係から6MeVまでの運転に制限していた。研究所の移転に伴い、現在は播磨科学公園都市キャンパスのニュースバル放射光施設内に移設を終え、今夏より15MeVまでの運転を始める予定である。

### 2. LEENAパラメーター

Table I に5.4MeVで動作したビームパラメーターを示す。カソードはLaB<sub>6</sub>単結晶を用いた動作である。フォトカソード動作のレーザーパラメーターはTable II に示す。LaB<sub>6</sub>カソードでは、3倍高調波(波長351nm)を用いた。アルミターゲットからの光学遷移放射と高速ストリークカメラを用いて、マイクロパルス幅を計測した。マイクロパルスのピーク電流を、平均電流とマイクロパルス幅からの計算すると、表のようになる。駆動レーザーエネルギーおよび量子効率の制限から、フォトカソ

Table I. LEENA Performance

Operation energy	4 - 15 MeV	
RF frequency	2856 MHz	
Operation parameter @ 5.4MeV		
RF gun	Thermionic/Photocathode	
Emittance ex ( mm•mrad)	10.2	4.6
ey ( mm•mrad)	7.8	2.1
Energy spread	%	1.8
Macro pulse length	μs	3
Micro pulse length	ps	30
Beam current	mA	120
Peak current	A	1
Macro repetition	Hz	1

Table II. Photocathode drive laser system

Laser type	Nd:YLF oscillator+amp.	
Micro Pulse width	=14 ps	
Micro pulse separation	t = 11.2 ns	
Macro pulse width	T = 10 μs	
Macro repetition rate	Rep=10 Hz	
Micro pulse energy		
1 (1053nm)	E=150 μJ (1.18 eV)	
3 (351nm)	E3=3 (15) μJ (3.53 eV)	
4 (263 nm)	E4= 1 (5) μJ (4.71 eV)	

Table III. LEENA wiggler & resonator

Halbach Type Wiggler	w=16mm
	N=50
	B=2 - 6.6 kG
	(K=0.3 -0.98)
Resonator	Au coated mirror
Length	L=3359 mm
Output hole	1-3mm

\*)S.Miyamoto, 0791-58-0462,  
miyamoto@lasti.himeji-tech.ac.jp

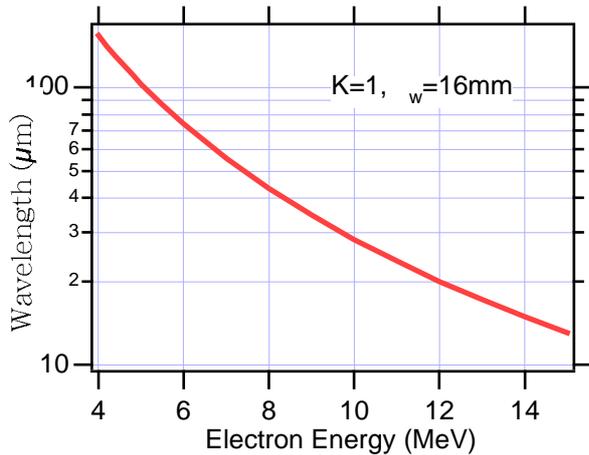


Fig.1 FEL wavelength on LEENA.

ードモードでのピーク電流は3A程度に制限されていたが、モードロックレーザー発振器のメンテナンスにより、最大5倍程度レーザーエネルギーを回復できたので、ピーク電流上昇試験を行っていく予定である。また、フォトニードルカソードを用いた高輝度電子源の開発も並行して進めている[1]。さらに、マクロパルスのトリガータイミングを電源周波数に同期させることにより、クライストロンのパルス毎の安定性を改善できた。また、短時間では加速高周波とレーザーパルスのジッターは1ps程度を達成できているが、ケーブル系の温度変化等により、ゆっくりとした位相シフトが発

生ずる。このため、ビーム電流値を元に、位相シフターにフィードバックをかけて、安定化を行っている。

Table II に示すウィグラーを用い、電子エネルギー15MeVまでの動作で、波長10-100 μm領域 (Fig.1) のFEL運転を行う予定である。この波長領域は、波長可変レーザー光源がほぼFELに限られるためこれを用いて、物質との相互作用や、遠赤外イメージングの可能性を調べる。

Fig.2には移設後の加速器及びレーザーシステム配置を示す。

### 3 . FEL利得計算

ライナックFELの利得は次式で評価できる[2]。

$$G = (I/754) \sqrt{I_w} N^2 K^2 / (1 + K^2/2)^{3/2} H C_u \quad (1)$$

$$C_u = \{J_0(\cdot) - J_1(\cdot)\}^2, \quad = 0.25 K^2 / (1 + K^2/2)$$

ここで、 $J_0$ 及び $J_1$ は0次及び1次のベッセル関数である。有限なSlipage効果、 $I$ 補正-拡がり効果、 $I$ ミッタスの効果により、以下の利得低下が加わる。

Slipage効果

$$C_s = 1 / (1 + N_R / 3 z) \quad (2)$$

エネルギー拡がり効果

$$C_e = 1 / (1 + 1.7(4N_e)^2) \quad (3)$$

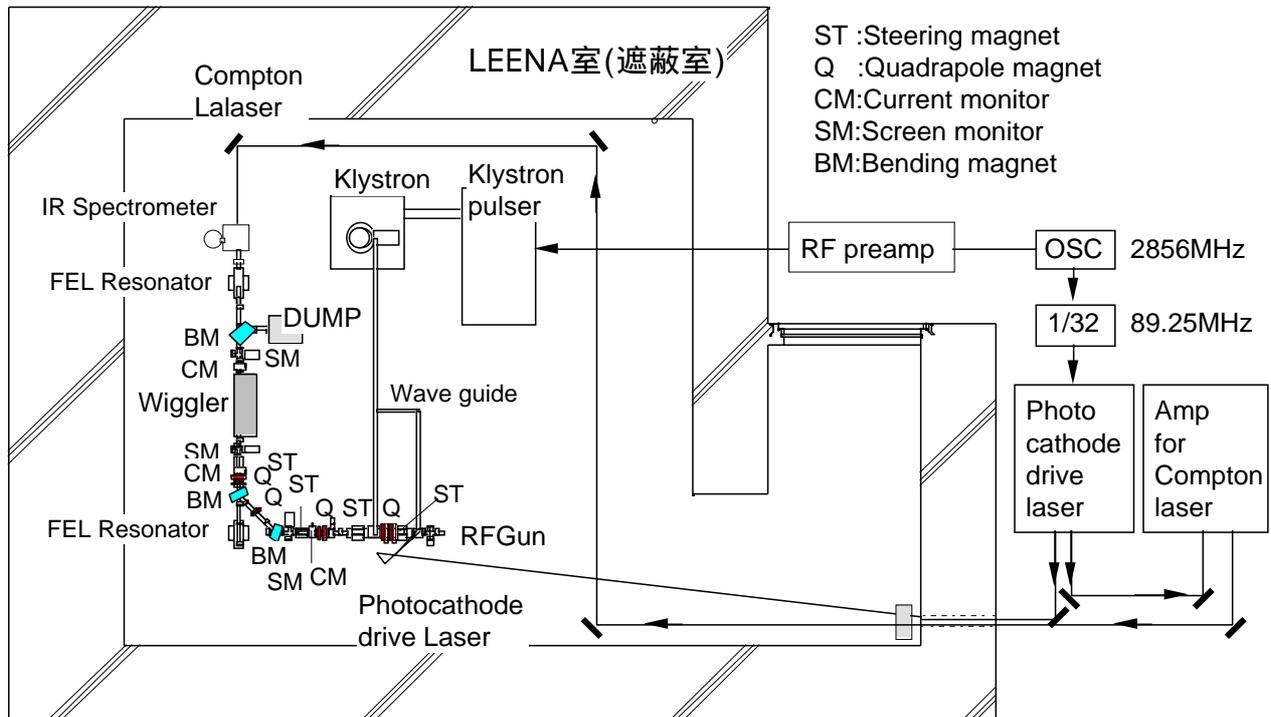


Fig.2 Layout of RF Gun Linac (LEENA) at "Harima Science Garden City" site.

### エミッタンス効果

$$C_x = 1 / (1 + (2N K(1+K^2/2) n / w)^2)$$

$$C_y = 1 / (1 + 2(2N K(1+K^2/2) n / w)^2) \quad (4)$$

LEENA-FELにおいて、それぞれの効果で利得が1/2となる値を目安として求める。Slipage効果は、波長が長い場合に顕著であるが、E=4MeV、K=1においても、パルス幅 $t_p=9$  psecで利得半減であるので、FEL波長が100 $\mu$ m以上で考慮する必要がある。エネルギー拡がり効果による利得半減値は、E=0.4%であり、現状の1%を改善することが利得改善に大きく効果あることが分かる。エミッタンス効果による利得半減値は、正規化エミッタンスで  $n=10 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$  である。これは、実測エミッタンスの1/5程度であり、利得改善にはエミッタンス改善も主要課題である。フォトカソードによるエミッタンス改善性能も調べる予定である。

### 4. レーザーコンプトン散乱X線源

LEENAはモードロックレーザーによる光電子を電子銃として利用するため、ビームに高精度で同期したレーザー光を容易に発生できる。このため、1.5GeV電子蓄積リングNewSUBARUでの逆コンプトン散乱実験の予備試験として、レーザーコンプトン散乱X線の発生と計測を試験する。逆コンプトン散乱光子エネルギー  $h_x$  は

$$h_x = 4\hbar^2 / (1 + \gamma^2 \theta^2) \quad (5)$$

となる。ここで、 $h$  は入射レーザーエネルギー、 $\gamma$  は電子の相対論的係数、 $\theta$  は電子の初期進行方向に対する散乱光角度である。これからわかるように、散乱X線エネルギーは入射光子エネルギーに比例する。一方、電子エネルギーに対しては2乗で変化する。

例えば、LEENAの15MeV電子 ( $\gamma = 30$ ) でYLFレーザー光 (波長1 $\mu$ m、 $h$  は約1.2eV) を散乱した場合、発生するX線は0度方向で約4keVの軟X線となる。

このようなコンプトン散乱断面積は、仁科-Kleinの式で与えられる。LEENAの場合、発生X線エネルギーに対する微分散乱断面積は次のように表される。

$$\frac{d}{d\Omega} = 4 r_0^2 (2 \gamma^2 - 2 \gamma^2 \theta^2 + 1) \quad (2)$$

ここで、 $\theta = S / (S_0)$  は最大エネルギーに対するX線エネルギーの割合。散乱断面積に、相互作用する電子と光子の数をかけ、電子ビームと

Table IV. Laser system for Compton scattering

Amplified laser for compton scattering	
Laser type	Nd:Glass slab 4-pass amp.
Micro Pulse width	=14 ps
Macro pulse width	T = 10 $\mu$ s
Macro repetition rate	Rep=1 Hz
Average power	P = 10 W
Micro pulse energy	E = 10 mJ (105 $\mu$ m)

レーザーが相互作用する断面積で割れば発生するX線の個数が求まる。1秒間に相互作用領域を通過する電子数は  $N_e = I/e$  (electron/sec)、また光子数は  $N_p = P/h$  (photon/sec) で与えられる。ここで、 $I$  は電子ビーム電流、 $e$  は電子の電荷、 $P$  は相互作用するレーザーパワー。電子ビームの相互作用断面積を  $S$ 、レーザー光断面積は電子ビーム断面積と同じと仮定すれば、コンプトン散乱イールド  $Y$  (photon/sec) は、

$$Y = \frac{N_e N_p}{S} \frac{d}{d\Omega} \quad (6)$$

で求められる。

LEENAで逆コンプトン散乱実験に用いるレーザーシステムをTable IV に示す。フォトカソード励起用レーザー (Nd:YLFレーザー) の基本波長の一部を取り出し、ガラススラブ増幅器で4パス増幅を行い、約200倍に増幅する。このレーザーを用いて、毎秒 $10^7$ 程度の散乱X発生が可能である。発生するX線は、透過型グレーティング分光器あるいは結晶分光器とX線CCDカメラを組み合わせ、スペクトル計測を行う。

### 5. まとめ

LEENA小型ライナックはNewSUBARU放射光施設サイトに移設され、放射線発生装置使用許可取得後、電子ビーム性能改善と自由電子レーザー試験を行う。さらに、赤外光と物質の相互作用研究、同期増幅レーザーを用いた、逆コンプトン散乱X発生の予備実験を行う予定である。

### 参考文献

- [1] T.Inoue et al., this meeting.
- [2] "入門自由電子レーザー", 日本原子力学会編 (1995). G.Dattori and A.Renieri, "Experimental and theoretical aspects of the free electron laser," in Laser Handbook Vol.4, eds. M.L.Stitch and M.Bass (North-Holland, Amsterdam, 1985) p.25.