

[12P-19]

## Numerical Analysis and Experiment for Laser Plasma Linac

H. Okuda<sup>1</sup>, N. Hafz<sup>1</sup>, R. G. Hemker<sup>1</sup>, K. Kinoshita<sup>1</sup>, T. Watanabe<sup>1</sup>, T. Kobayashi<sup>1</sup>, K. Nakamura<sup>1</sup>,  
A. Fukasawa<sup>1</sup>, T. Ueda<sup>1</sup>, K. Yoshii<sup>1</sup>, K. Nakajima<sup>1,2,3</sup> and M. Uesaka<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nuclear Engineering Research Laboratory, Graduate School of Engineering,  
University of Tokyo, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1106, JAPAN

<sup>2</sup>JAERI, Kansai Research Establishment, Kizu-chou, Sora-ku, Kyoto 619-0215, JAPAN

<sup>3</sup>High Energy Accelerator Organization, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-0801, JAPAN

### Abstract

New 50 fs 12 TW laser system was installed at the NERL, University of Tokyo in 1999. One application of our laser system is the electron and helium ion beam generation in the plasma wave excited by the laser plasma interaction. The plasma wave is supposed to be excited up to the wavebreaking limit. Two-dimensional numerical simulation using PIC code showed the generation of 12 fs (at FWHM) 25 MeV electrons from the background plasma electrons. The r.m.s. emittance was about 2.8 mm mrad and the total accelerated charge was more than 1 nC. A preliminary experiment on focusing 1.1 TW laser pulses on a helium gas jet in air produced hundreds keV electrons. More precise calculations and experiments are underway. The helium ion beams are also going to be generated and analyzed.

## レーザープラズマライナックの数値解析と実験

### 1. 序論

東大院工原施では、1998年にフェムト秒高速量子現象研究設備(フェムト秒極短電子パルスの生成、計測、放射線物理・化学への応用まで目的は多岐にわたる)が導入され、その設備の一環として1999年にフェムト秒テラワットレーザー装置(12TW/50fs)が設置された。本研究の目的は、このフェムト秒テラワットレーザーを用いて、レーザーとプラズマの相互作用によって、プラズマ波を波の破碎限界(wavebreaking limit)以上にまで励起し、破碎によるエネルギーによって、プラズマ中の電子を加速し、フェムト秒極短電子パルスを生成、計測することにある。また、電子加速の際に、電荷の不均衡から、プラズマイオンのクーロン爆発が起こり、高エネルギーイオンも生成される。この高エネルギーイオンを生成、計測することも本研究の目的である。この発生したイオンは高エネルギー粒子照射損傷実験への利用等が期待される。この一連の電子・イオン生成過程はレーザープラズマライナックと呼ばれる。

レーザーとプラズマの相互作用を用いた電子加速は1979年にTajimaとDawsonによって、提唱され、今日まで様々な実験検証・理論解析・数値解析が行われている。特に1989年のMourouらによるChirped Pulse Amplification法が発明され、小型で超

短・高強度レーザーパルスが作り出せるようになり、テーブルトップテラワットレーザー(table-top terawatts laser)と呼ばれる小型のレーザーが普及し、超短・高強度レーザーパルスを用いた実験が盛んに行われるようになった。[1]しかし、従来のレーザープラズマ加速では加速粒子として、ライナックからの入射粒子を必要とし、装置全体の小型化が困難であった。しかし、本システムではガスプラズマ中のプラズマ電子を加速に用いるため、ライナックを必要とせず、装置の大幅な小型化が実現可能となる。[2]

### 2. 理論

極短・高強度レーザーパルスをガスジェットから噴出される高圧ガスに集光すると、完全に電離した高密度プラズマ( $\sim 10^{19}$ W/cm<sup>2</sup>)がレーザーパルスの先端部(leading edge)によって生成される。この高密度プラズマとレーザーパルスのピークにおけるポンデラモーティブ力の相互作用によって、軸方向の大振幅プラズマ波が励起され、加速勾配100GV/m、振動数 $\omega_p = (4\pi n_0 e^2/m)^{1/2}$ の航跡場を生成する(ここで $n_0, e, m$ はそれぞれプラズマ密度、素電荷、電子の質量である)。プラズマ波の振幅が増加し続け、波の破碎限界を越え、プラズマ波が壊れると、波のエネルギーがプラズマ電子に移る。このエネルギーを受けた電子が高エネルギー電子として放出され

る。このとき、プラズマ波は非線型であり、非線型性が強まるにつれ、プラズマの密度変化はインパルス列になり、航跡場は鋸刃状波になる。航跡場の大きさはレーザー強度パラメータ  $a_0 = 0.85 \times 10^{-9} \lambda_L [\mu\text{m}] I^{1/2} [\text{W}/\text{cm}^2]$  を用いて表すと、 $eE_z/m_p c = (\gamma^2 - 1)/\gamma$ ,  $\gamma = 1 + a_0^2$  である (ここで  $\lambda_L, I, E_z, c$  はそれぞれ、レーザーの波長、レーザーの強度、軸方向の航跡場の大きさ、光速である)。

### 3. 数値解析

完全相対論化された 2 次元 Particle-in-cell コード (2D-PIC) を用いて、数値解析を行った。メッシュ数、粒子数、ステップ回数はそれぞれ、 $2500 \times 300$ 、 $750,000$ 、 $8000$  で行った。プラズマ密度、プラズマ温度はそれぞれ、 $1.5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、 $1 \text{keV}$  とし、プラズマイオンは静止していると仮定した。また、レーザーパルスはガウス分布でパルス幅  $50 \text{fs}$  (FWHM)、出力  $12 \text{TW}$  とした。数値解析の結果を図 1 に示す。 $12 \text{fs}$  (FWHM)、 $25 \text{MeV}$ 、 $1 \text{nC}$  の電子パルスが得られた。[2]

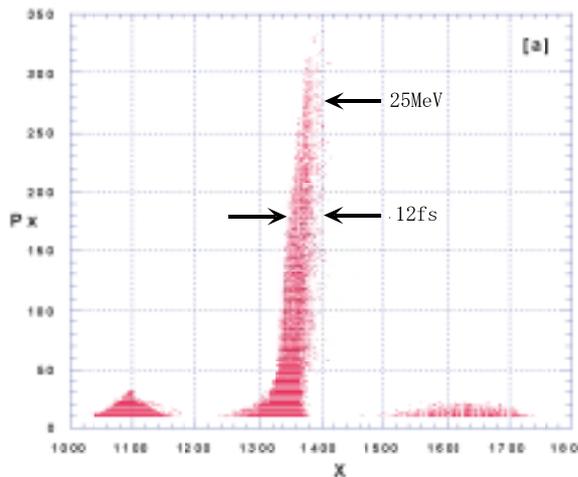


Fig. 1: The generation of 12 fs (FWHM), 25 MeV electrons from the background plasma electrons by numerical simulation using PIC code

### 4. 実験

実験体系図を図 2 に示す。1TW ~ 12TW の強度をもったレーザーパルスが双曲線型ミラー ( $F=f/D=1.5$ ) によって、耐高圧パルスガスジェットのノズル出口付近に集光された。ガスジェットのノズル口径は  $2.5 \text{mm}$  である。今回、予備実験として、電子検出にイメージングプレートを用いた。図 3 に、 $1000 \text{psi}$  のヘリウムガスジェットに  $1.1 \text{TW}$  のレーザ

ーパルスを集光したときにプラズマから放出された、電子の像 (イメージングプレート) を示す。実験は、真空トラブルのために空気中で行った。放出された電子のエネルギーは、イメージングプレートの像の解析から  $50 \text{keV}$  程度と見積もられた。次に図 4 に CCD カメラを用いて、プラズマの空気中で撮影した像を示す。今後、実験では真空中で、フルパワー ( $12 \text{TW}$ ) での実験を行うとともに、電子ビームのパルス幅計測についても、CTR や fluctuation method による測定も予定している。

また、気体ターゲットに限らず、固体ターゲット

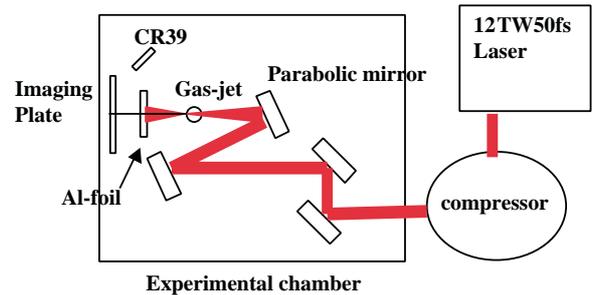


Fig. 2: Schematic diagram of Laser-Plasma Linac at NERL, Univ. of Tokyo



Fig. 3: Image of electrons emitted from plasma when laser of  $1.1 \text{TW}$  was focused on helium gas jet of pressure  $10^3 \text{psi}$  by Imaging plate

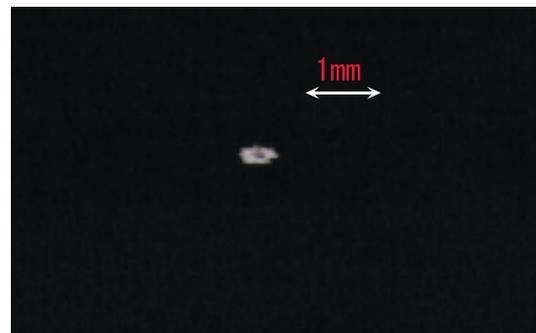


Fig. 4: An image taken in air for the plasma by CCD camera

にレーザーを集光した場合も同様に固体表面にプラズマを形成し、レーザーとプラズマの相互作用により、イオンを生成する。そこで、図5のような実験体系を組み、レーザーパルス(5.5TW,50fs)を銅ターゲットに集光し、銅ターゲットから放出されるイオンをCR39 プラスチックを用いて測定した。CR39は銅ターゲットから370mm離れたところに置かれ、実験チャンパー内は真空中に保たれた。レーザーパルスは60分間、銅ターゲットに照射された。図6、図7に銅ターゲットから放出したCuイオンがCR39に衝突し、エッチピッドを形成した様子を示す。CR39はエッチピッドを強調するため、5NのNaOHに12.5時間つけられている。単位面積あたりのエッチピッドの数から、レーザーパルス1ショットあたり、 $\sim 10^3$ 個のCuイオンが発生していると思積もられた。Cuイオンのエネルギーについては、現在解析中である。

## 5. 結論

レーザーとプラズマの相互作用を用いた、フェムト秒極短電子パルス生成の数値解析並びに予備実験を行った。数値解析から、12TW50fsレーザーから12fs(FWHM)、最高25MeVの電子ビームが生成されるという結果を得た。実験では、1.1TW50fsのレーザーを1000psiのHeガスジェットに集光し、50~100keVの電子が発生していることを確認した。また、5.5TW50fsのレーザーをCuターゲットに集光し、レーザー1ショットあたり、 $\sim 1000$ のCuイオンが発生していることを確認した。

## 参考文献

- [1] M. Kando and K. Nakajima et al., proc. of Part. Acc. Conf., (1999) 3702
- [2] H. Nasr, K. Nakajima and M. Uesaka et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A, in press

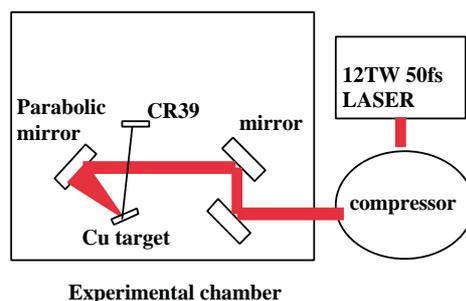


Fig. 5: Experimental setup of Cu ion measurement from laser-plasma of Cu target.

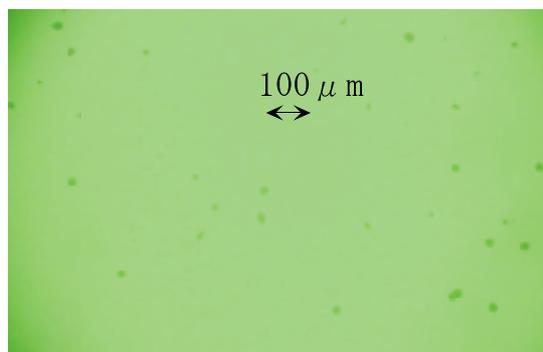


Fig. 6: Cu ion emitted from Cu plasma when laser of 5.5 TW was focused on Cu target by CR39. There are some etch pits engraved by Cu ion.

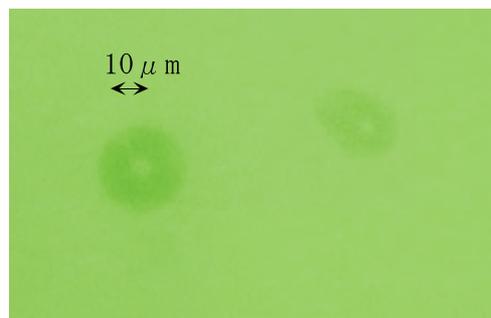


Fig. 7: The enlarged photo of Fig. 6. The size of a each etch pit was estimated at 10~20 μm.