超短パルス超高強度レーザーを用いた高速イオン源

根本 孝七, 大石 祐嗣, 名雪 琢弥, 藤井 隆, Xiaofang WANG

(財)電力中央研究所 電力技術研究所(〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1)

Energetic Ion Source Using Ultra-Short High Power Laser System

Koshichi NEMOTO, Yuji OISHI, Takuya NAYUKI, Takashi FUJII, and Xiaofang WANG

Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1, Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa 240-0196

(Received August 29, 2005)

Energetic proton generation by irradiation of several kinds of tape targets by ultra-short high-power laser pulses was investigated in the intensity region around 10^{18} W/cm^2 and sub-pico second pulse duration. The maximum proton energy showed a dependence on the product of target thickness and mass density. The fast electrons should lose energy after passing through solid targets of high mass density, which was also confirmed by a Monte Carlo simulation code, Geant4. A deformable mirror was successfully controlled to increase the maximum proton energy. Only 30 mJ of laser energy was sufficient to generate 1 MeV protons.

Key Words: Ultra-short Ultra-intense laser, Particle generation, Laser acceleration

1. はじめに

近年, チャープパルス増幅技術などの進展により, これまで原子炉や加速器などで生成されていた高エネルギーの電子, X線, さらには高速イオンなどが, 比較的小型のレーザーでも容易に発生できるようになりつつある¹⁾. レーザーを用いた高エネルギー粒子生成は, 他の発生方法に比べコンパクトで, 時間的・空間的制御性に優れており, 将来的に透過画像計測をはじめとする様々な計測・診断技術への応用が期待されている. また, 高エネルギー粒子の中で特に高速イオン加速は, プロトンラジオグラフィー²⁾, 高速点火核融合³⁾, 陽電子放出トモグラフィー(PET)用の短寿命放射性同位体生成⁴⁾, 粒子線ガン治療⁵⁾などへの応用が可能であり, 近年研究が盛んに行われている.

これまでの研究により, 超高強度レーザーと固体ターゲットとの相互作用により生じる高エネルギーイオンの生成メカニズムの概略は, 以下のように考えられている³⁻¹⁷⁾. まず, 超高強度レーザーの光電場により光電場電離(Optical Field Ionization)が起こるため, プラズマが生成される. 次にポンドロモティブ力などによって電子が相対論的速度まで加速されターゲットから放出される. この高エネルギー電子の放出により生じた高強度の電荷分離電界によってイオンが加速される.

ターゲットの材質によらず発生するイオン種としてはプロトンが主であることが知られている^{6,11,12)}. プロトンの起源は, ターゲット表面に取り込まれた不純物であり, 原子質量が最も小さいため加速され易いと考えられている. ローレンスリバモア研究所では, ペタワット

レーザーを用いて, 最大エネルギーが55 MeVにも及ぶプロトンを観測している⁹⁾.

本報告では, 超短・超高強度レーザー照射による高速イオン源について, 10^{18} W/cm^2 程度の照射強度およびサブピコ秒領域におけるイオンの加速特性について電力中央研究所で得られた最近の実験結果を報告する. また, 高速電子と高速イオン発生の関係についても検討する.

2. 高速イオン加速におけるプラズマ膨張モデル

薄膜にレーザーを照射するとレーザーとプラズマの相互作用により, まず高速の電子が加速される. この高速電子がプラズマシースを生成し, その静電場により高速イオンが加速される. これについてはPICシミュレーション, あるいは解析的な手法を用いて理論的な解明が行われている. 解析的な手法としてはプラズマ膨張モデルによる説明が試みられている. プラズマ膨張モデルではレーザーの照射時間により, 等温的プラズマ膨張モデル(Isothermal Plasma Expansion Model)¹⁸⁻²¹⁾と断熱的プラズマ膨張モデル(Adiabatic Plasma Expansion Model)²⁰⁾が提案されている.

2.1 等温的プラズマ膨張モデルの場合

等温的プラズマ膨張モデルについては, P. Moraなどの論文¹⁹⁾にも詳しいが, ここではV. Yu. Bychenkovらの記述^{20,22)}に基づく.

まず, Bychenkovらは数値解析結果と比較し, プロトンフロントの電界の過渡解は

$$E_p \approx \frac{E(L)}{\sqrt{1+(t/t_0)^2}} \quad (1)$$

で近似できることを見出している．これを質量 m_p ，電荷

Z_p を持つ運動方程式， $m_p \frac{dv_p}{dt} = Z_p e E_p$ に代入すると

$$u_p \approx \sqrt{2} C_p \ln(t/t_0 + \sqrt{t^2/t_0^2 + 1}) \quad (2)$$

を得る．従って，最大プロトンエネルギーについては

$$E_{p,\max} = m_p \mu_p^2 / 2 = m_p C_p^2 \ln^2(t/t_0 + \sqrt{t^2/t_0^2 + 1}) \quad (3)$$

上記の式で t はイオンの実効加速時間であり，レーザーパルス幅とほぼ等しいと考えられる．ここで， $t_0 = \lambda_{ph}/C_p$ ，すなわちデバイシスをイオンが通過する時間，また，

$$\lambda_{ph} = \sqrt{\frac{T_h}{4\pi e^2 n_{h0}}} \quad (4)$$

$$C_p = \sqrt{T_h/m_p} \quad (5)$$

である．(5)式を(3)式に代入すれば，

$$E_{p,\max} = T_h \ln^2(t/t_0 + \sqrt{t^2/t_0^2 + 1}) \quad (6)$$

となり，プロトンの最大エネルギーは電子温度とイオンの実効加速時間に依存することがわかる．さらに， $t \gg t_0$ の時には，

$$E_{p,\max} \approx T_h \ln^2(t/t_0) \quad (7)$$

となる．従って，一次元的な等温的プラズマ膨張モデルによれば最大のイオンエネルギーは主としてレーザーパルス幅と電子温度の関数となる．電子温度については100 fs以下のパルス幅で 10^{18} W/cm²のオーダーの照射強度領域においては，ほぼポンデロモータィブスケーリングにより

$$T_e = mc^2 \left(\sqrt{1 + I\lambda^2 / 1.37 \times 10^{18}} - 1 \right) \quad (8)$$

と記述できることが分かっている^{23,24)}．ただし，プレパルスが大きい場合にはパラメトリック不安定性などにより，ポンデロモータィブポテンシャルにより予測される値よりも電子温度は高くなることが知られている．

一方，Tikhonchukによれば， τ を加速時間もしくはレーザーパルス幅程度の時間とし，self-similar領域になる時間を $t_i \approx \sqrt{m_i / Ze^2 n_b}$ とすると， $\tau > t_i$ の場合は等温膨張領域になるが⁸⁾， $\tau < t_i$ の場合には断熱膨張領域になり，

$$dN_p/dv \sim \exp(-v^2/2C_p^2) \quad (9)$$

$$v_{\max} = 2C_p \sqrt{2 \ln(d/h)} \quad (10)$$

となる²²⁾．ここで， n_b は高速電子の密度， d は高速イオンビーム径であり，また， h は高速電子の初期におけるデバイ長である．従って，この場合にも最大プロトンエネルギーは T_h に比例することが分かる．なお，これらの議論では $d \gg h$ を仮定している．実際にはレーザー光は高い集光強度を得るためにできるだけ小さく集光されるので，こ

の条件はそれほど満たされないことが多い．なお，このTikhonchukのモデルではイオン加速は電荷分離の影響が大きくなった時か，2次元的な効果が大きくなった時に終了するものとしている．

3. 実験装置

今回用いた実験装置をFig. 1に示す．レーザーはタレス社製チタンサファイアレーザー (THALES laser, Alpha 10/US-20TW) を使用した．このレーザーはチャープ増幅により，最大エネルギー1 J，最短パルス幅50 fs，最大出力20 TW，繰り返し周波数10 Hzにて動作するが，今回は放射線などの安全性の観点から，シングルショットモードでの実験を行った．

基本中心波長800 nm，P偏光のレーザー光は，金メッキ蒸着の軸外し放物面鏡によりターゲットに対して45°で入射した．レーザー照射ターゲットとしてはテープが用いられ²⁵⁾，常に未照射面が照射位置に供給されるよう1ショットごとにテープを移動させた．小出力のレーザーをターゲットに照射し，数keVのX線を計測し，その発生量が最大となるようにターゲットとレーザーフォーカス位置の最適化を行った．なお，X線の強度とプロトンの最大エネルギーには相関があることを確認している²⁶⁾．X線の測定にはX線フォトディテクター (XPD) として，窓材 (硼珪酸ガラス) をアルミ箔に置き換えたSi-PINフォトダイオード (HAMAMATSU, S1223-01) を使用した．テープ駆動による照射面の位置精度は $\pm 15 \mu\text{m}$ で，これはレイリー長 $100 \mu\text{m}$ に比べ十分小さな値である²⁵⁾．ターゲット上での照射強度は $\lambda/2$ 板と偏光板により40 mJから430 mJの間で変化させた．また，パルス幅に関しては，コンプレッションチャンバーの回折格子間隔を変えることにより55 fs～400 fsまで変化させた．レーザーパルスの照射強度領域は下限が 8.5×10^{17} W/cm²であり，上限が 1.1×10^{19} W/cm²であった．レーザーパルス幅は自己相関計を用いて実験毎に計測した．なお，レーザーのメインパルスの5～6 ns前に 10^{-5} 以下のプレパルスが存在することをフォトダイオードを用いた計測により確認している．

Fig. 1 Experimental Setup.

照射ターゲットとしては、厚さ5 μm と30 μm の銅テープ、30 μm のアルミテープおよび7.5 μm のポリイミドテープを使用した。加速されるイオンはどの素材のテープターゲットを用いてもプロトンがほとんどであることがトムソン質量分析器による計測により分かっている。本研究においては、プロトンエネルギーはCR-39の前面に置いた厚さ5 μm のマイラフィルターの積層数を変化させ、そのマイラをプロトンが透過できるかどうかでエネルギーを推定するレンジフィルター法により求めた。プロトンのカットオフエネルギーはPSTARデータベースを用いて計算した²⁷⁾。プロトン検出器として用いたCR-39はレーザーショット終了後、6.25N、70℃の水酸化ナトリウム溶液に6時間漬けてエッチングし、CCDカメラや顕微鏡を用いてエッチピットを観察した。プロトンに対してエッチピットが生成されるしきい値エネルギーは約100 keVである。

4. プロトンのエネルギースペクトルとターゲット依存性

4.1 プロトンのエネルギースペクトル形状

トムソンパラボラによりプロトンのエネルギースペクトルを計測した結果をFig. 2に示す。レーザー照射強度は $6.6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 、レーザーパルス幅は55 fsである。プロトン最大エネルギーのパルス幅依存性などからこの領域では等温プラズマ膨張モデルが適用できることが分かっている²¹⁾。プロトンのエネルギースペクトルは等温的プラズマ膨張モデルにおいては、

$$f_i(E_i) \propto E_i^{-1/2} \exp(-\sqrt{2E_i/T_h}) \quad (11)$$

である²⁸⁾。ここで、 E_i はプロトンエネルギーである。一方、断熱的プラズマ膨張モデルによれば、

$$f_i(E_i) \propto E_i^{-1/2} \exp(-E_i/T_h) \quad (12)$$

と記述できる²⁸⁾。Fig. 2の実測データに等温的プラズマ膨張モデルおよび断熱的プラズマ膨張モデルによる理論曲線を重ねて表示したが、得られた実験データの範囲においてはこれら2つのモデルによる差はそれほど大きくないことがわかる。すなわち、今回のレーザー照射条件においてはエネルギースペクトル形状を見る限り、等温的プラズマ膨張モデルと断熱的プラズマ膨張モデルの違いは少ない。

4.2 プロトン最大エネルギーのターゲット膜厚および材質依存性

次に、Fig. 3 (a)にCR-39にエッチングされたトムソンパラボラを、Fig. 3 (b)にターゲットの材質と厚みを変えた時の最大プロトンエネルギーを示す。レーザー照射強度は $8.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 、パルス幅は55 fsである。Fig. 3 (b)の横軸はターゲットの厚み $t[\mu\text{m}]$ と質量密度 $\rho[\text{g/cm}^3]$ の積 pt である。これより、最大プロトンのエネルギーは pt に依存していることが分かる²⁶⁾。厚さ7.5 μm のポリイミドをターゲットとして用いた場合に最大1.5 MeVに近いプロトンエ

Fig. 2 Proton energy spectrum obtained by irradiation of ultrashort laser pulse of 55 fs and $6.6 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$.

Fig. 3 (a) Proton parabola trace on the CR-39 and (b) dependency of the maximum proton energy on products of thickness and mass density of targets.

ネルギーが得られている。レーザー照射強度 $1.1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ では最大3 MeVのエネルギーのプロトンを得ている。このエネルギーのプロトンはPET(ポジトロン・エミッション・トモグラフィー)に最も用いられる ^{18}F を生成する $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ のしきい値を越えている。

4.3 Geant4によるターゲット内における高速電子の損失の検討

プラズマ膨張モデルによれば最大イオンエネルギーは高速電子の温度に比例する。そこでモンテカルロ・シミュレーションプログラムであるGeant4を用いて、薄膜ターゲットを電子が通過する際の電子のエネルギースペクトルの変化を計算した。レーザー照射強度は $8.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ とした。これよりボンデロモーティブスケールリングにより推定される等価電子温度0.63 MeVの高速電子が厚さ30 μm および5 μm の銅、30 μm のアルミ、7.5 μm のポリイミド薄膜ターゲットを通過した後の電子のエネルギースペクトルをFig. 4に示す。本研究で行ったGeant4を用いたシミュレーションは、最大4 MeVまで20 keV刻みで10万個の各々の電子についてターゲットを通過後のエネルギーを計算した後に、それらの計算結果について入射電子の温度を有するボルツマン分布で重み付けした値を積

Fig. 4 Electron energy spectrum after passing through solid thin targets simulated by Geant4. Initial electron temperature is assumed 0.63 MeV that is equivalent to the ponderomotive potential for $8.5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$.

算することで行った。なお、Geant4では電子の衝突や散乱の影響、さらには制動輻射などを計算することができるが、PICのようにプラズマの効果は計算することができない。Fig. 4より明らかなように、厚さ30 μm の銅テープターゲットを通過した電子のエネルギースペクトルは0.4 MeV以下の低エネルギーの成分が失われ、ボルツマン分布より大きくずれてしまっているため、エネルギースペクトルの高エネルギーの端を別にすれば、等価電子温度の定義は慎重に行う必要がある。我々は以前、銅テープにレーザーを照射した際にテープ裏面に放出される電子のエネルギースペクトルを測定したが、300 keV以上の領域では、ほぼボルツマン分布となっていた²⁴⁾。この時の測定ではスペクトルメーターの検知素子としてイメージングプレート(IP)を用いた。IPの感度は200 keVに急激なピークを有し、それ以下では感度が極端に低下するため、300 keV以下では正確な校正が困難であり電子数を評価することができなかった。また、静電的な影響により、低エネルギー成分の電子はレーザー照射面へ引き戻す力が作用するが、このような効果はGeant4ではシミュレーションすることが出来ない。

4.4 高速電子の損失と最大プロトンエネルギー

Geant4によるシミュレーションによれば、Fig. 4に示すように p_{rel} が増大するにつれて低エネルギー側の電子数が減少してゆき、高速電子数の減少は p_{rel} にほぼ比例する。また、 p_{rel} が増大するとボルツマン分布からのズレが大きくなり、単純な電子温度の定義が困難になることが分かる。このため物理的なイメージとしては等温的プラズマ膨張モデルが成立するとしても、実際の電子のエネルギースペクトルを考慮した、より厳密な議論を行うには(6)式における電子温度の項に代わる変数が必要となると思われる。

また、Fig. 3(b)において同じ銅テープにレーザーを照射した場合を比較すると、最大プロトンエネルギーは厚さ5 μm のテープの方が30 μm に比べて約5倍程度大きい値が得

られている。これはFig. 4において厚さ30 μm の方が高速電子数の減少が大きいことと関連が深いと定性的には考えることはできるものの、(6)式を用いた定量的予測はそれほど容易ではないように思える。さらに、Fig. 3 (b)に示されるような、ターゲット厚みの影響についてはターゲット内の循環電流の効果¹⁴⁾も寄与している可能性もあり、また、ターゲット材料の質量密度の影響についてはレーザー吸収効率などの影響も考えられ、さらなる研究が必要である。

5. デフォーマブルミラーによる集光径の最適化

(6)式によれば、レーザー集光径を小さくしレーザー集光強度を高くすれば、電子温度が高くなり、それによりプロトンエネルギーをより高めることが可能となる。しかし、レーザー集光径が小さくなるとプラズマ膨張の2次元的あるいは3次元的な効果により加速が抑制されるようになると推定される。そこで、本研究ではターゲットの厚さよりも集光径が小さくなるような条件でのプロトン発生特性を調べた。集光径が小さくなると、熱レンズによる収差の影響が顕著になり、またターゲットの設定位置にも高い精度が要求されるようになる。我々はデフォーマブルミラーを用いてこれらの問題を解決することを試みた²⁹⁾。これまでの実験より、発生するプロトンの最大エネルギーはレーザープラズマからのX線強度に比例することが分かっている²⁷⁾。このため、X線をモニターするフォトダイオードの信号値が最大になるように、デフォーマブルミラーを用いてレーザー光の集光の最適化を図った。Fig. 5にその実験配置図を示す。デフォーマブルミラーは軸外放物面鏡の手前に設置されている。軸外放物面鏡の実効焦点距離は50.8 mmである。この時、ビーム径は最小2~3 μm まで集光された。デフォーマブルミラーの制御には遺伝的アルゴリズムを用いており、最適化する評価関数としては、CCDカメラで計測した集光径およびX線フォトダイオードの信号の二つを用いた。結果としてはX線フォトダイオードの信号を評価関数に用いた場合の方が、高いプロトンエネルギーを得ることができ

Fig.5 Experimental setup with deformable mirror.

Fig. 6 Dependency of maximum proton energy on laser focusing spot size.

た。プロトンエネルギーはマイラ薄膜とCR-39を用いたレンジフィルター法により計測した。レーザーエネルギー30 mJ, パルス幅80 fsにおいて得られたプロトン最大エネルギーとレーザー集光径の大きさとの関係をFig. 6に示す。これより、集光径3 μm において約1 MeVのプロトンを得ることができた。集光径2 μm では集光強度は高まっているにも関わらず、プロトンエネルギーは低下しており、3次元的なプラズマ膨張あるいは高速電子の運動の効果による可能性があると考えられる。

6. まとめ

サブピコ秒の超短パルスレーザーによる 10^{18} W/cm^2 程度の照射強度におけるレーザーイオン源の特性について実験的に調べた。このレーザー照射強度領域においては等温的プラズマ膨張モデルが比較的良く成立するが、プロトンのエネルギースペクトルの傾きに関し、それぞれ(11)と(12)式で表されるような等温的プラズマ膨張モデルと断熱的プラズマ膨張モデルでは、元々それほど大きな差異は見られない。一方、薄膜ターゲットについてはターゲットの膜厚とターゲット材質の質量密度の積が重要であると考えられる。Geant4によるシミュレーションより高速電子のターゲット中における損失を評価した。また、デフォーダブルミラーを用いレーザーの集光を最適化することにより、30 mJという小出力においても1 MeV程度の高速プロトンを発生することができた。

謝 辞

ロシア科学アカデミー Dr. A. A. Andreev, Dr. V. Yu. Bychenkov, 日本原子力研究所関西研 大道 博行リーダー, 東京工業大学大学院総合理工学研究科 堀岡 一彦教授, 東京工業大学応用セラミックス研 近藤 建一教授, 中村 一隆 助教授, 電気通信大学 植田 憲一教授には有益な助言とご指導を頂きましたことを感謝いたします。

参考文献

- 1) D. Umstadter: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 1774.
- 2) J. A. Cobble, R. P. Johnson, T. E. Cowan, N. R. Galloudec, and M.

- Allen: *J. Appl. Phys.* **92** (2002) 1775.
- 3) M. Roth, T. E. Cowan, M. H. Key, S. P. Hatchett, C. Brown, W. Fountain, J. Johnson, D. M. Pennington, R. A. Snavely, S. C. Wilks, K. Yasuike, H. Ruhl, F. Pegoraro, S. V. Bulanov, E. M. Campbell, M. D. Perry, and H. Powell: *Phys. Rev. Lett.* **86** (2001) 436.
- 4) K. Nemoto, A. Maksimchuk, S. Banerjee, K. Flippo, G. Mourou, D. Umstadter, and V. Yu. Bychenkov: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 595.
- 5) S. V. Bulanov and V. S. Khoroshkov: *Plasma Phys. Rep.* **28** (2002) 453.
- 6) A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo, D. Umstadter, and V. Yu. Bychenkov: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 4108.
- 7) E. L. Clark, K. Krushelnick, J. R. Davies, M. Zepf, M. Tatarakis, F. N. Beg, A. Machacek, P. A. Norreys, M. I. K. Santala, I. Watts, and A. E. Dangor: *Phys. Rev. Lett.* **84** (2000) 670.
- 8) R. A. Snavely, M. H. Key, S. P. Hatchett, T. E. Cowan, M. Roth, T. W. Phillips, M. A. Stoyer, E. A. Henry, T. C. Sangster, M. S. Singh, S. C. Wilks, A. MacKinnon, A. Offenberger, D. M. Pennington, K. Yasuike, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, J. Johnson, M. D. Perry, and E. M. Campbell: *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 2945.
- 9) S. P. Hatchett, C. G. Brown, T. E. Cowan, E. A. Henry, J. S. Johnson, M. H. Key, J. A. Koch, A. B. Langdon, B. F. Lasinski, R. W. Lee, A. J. Mackinnon, D. M. Pennington, M. D. Perry, T. W. Phillips, M. Roth, T. C. Sangster, M. S. Singh, R. A. Snavely, M. K. Stoyer, S. C. Wilks, and K. Yasuike: *Phys. Plasmas* **7** (2000) 2076.
- 10) Y. Murakami, Y. Kitagawa, Y. Sentoku, M. Mori, R. Kodama, K. A. Tanaka, K. Mima, and T. Yamanaka: *Phys. Plasmas* **8** (2001) 4138.
- 11) E. L. Clark, K. Krushelnick, M. Zepf, F. N. Beg, M. Tatarakis, A. Machacek, M. I. K. Santala, I. Watts, P. A. Norreys, and A. E. Dangor: *Phys. Rev. Lett.* **85** (2000) 1654.
- 12) M. Hegelich, S. Karsch, G. Pretzler, D. Habs, K. Witte, W. Guenther, M. Allen, A. Blazevic, J. Fuchs, J. C. Gauthier, M. Geissel, P. Audebert, T. Cowan, and M. Roth: *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 085002.
- 13) A. J. Mackinnon, Y. Sentoku, P. K. Patel, D. W. Price, S. Hatchett, M. H. Key, C. Andersen, R. Snavely, and R. R. Freeman: *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 215006.
- 14) Y. Sentoku, T. E. Cowan, A. Kemp, and H. Ruhl: *Phys. Plasmas* **10**, 2099 (2003).
- 15) 沖原 伸一朗, 佐藤 文信, 高橋 浩司, 坂部 祐介, 阪部 周二, 飯田 敏行, 千徳 靖彦, 井澤 靖和: *放射線* **27** (2001) 31.
- 16) P. McKenna, K. W. D. Ledingham, I. Spencer, T. McCany, R. P. Singhai, C. Ziener, P. S. Foster, E. J. Divall, C. J. Hooker, D. Neely, A. J. Langley, R. J. Clarke, P. A. Norreys, K. Krushelnick, and E. L. Clark: *Rev. Sci. Instrum.* **73** (2002) 4176.
- 17) K. Matsukado, T. Esirkepov, K. Kinoshita, H. Daido, T. Utsumi, Z. Li, A. Fukumi, Y. Hayashi, S. Orimo, M. Nishiuchi, S. V. Bulanov, T. Tajima, A. Noda, Y. Iwashita, T. Shirai, T. Takeuchi, S. Nakamura, A. Yamazaki, M. Ikegami, T. Mihara, A. Morita, M. Uesaka, K. Yoshii, T. Watanabe, T. Hosokai, A. Zhidkov, A. Ogata, Y. Wada, and T. Kubota: *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 215001.
- 18) P. Mora: *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 185002.
- 19) Y. Kishimoto, K. Mima, T. Watanabe, and K. Nishikawa: *Phys. Fluids* **26** (1983) 2308.
- 20) V. Yu. Bychenkov, V. N. Novikov, D. Batani, V. T. Tikhonchuk, and S. G. Bochkarev: *Phys. Plasmas* **11** (2004) 3242.
- 21) Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii, Y. Takizawa, X. Wang, T. Yamazaki, K. Nemoto, T. Kayoiji, T. Sekiya, K. Horioka, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, K. Kondo, and A. A. Andreev: *Phys. Plasmas* **12** (2005) 073102.
- 22) V. T. Tikhonchuk: *Phys. of Plasmas* **9** (2002) 1416.
- 23) S. C. Wilks, W. L. Kruer, M. Tabak, and A. B. Langdon: *Phys. Rev. Lett.* **69** (1992) 1383.
- 24) Y. Oishi, T. Nayuki, K. Nemoto, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, and K. Kondo: *Appl. Phys. Lett.* **78** (2001) 1234.
- 25) T. Nayuki, Y. Oishi, T. Fujii, Y. Takizawa, K. Nemoto, T. Kayoiji, Y. Okano, Y. Hironaka, K. G. Nakamura, and K. Kondo: *Rev. Sci. Instrum.* **74** (2003) 3293.
- 26) T. Nayuki, *et. al.*: in preparation.
- 27) NIST PSTAR Database Program, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/PSTAR.html>.
- 28) V. Yu. Bychenkov: private communication.
- 29) T. Nayuki, T. Fujii, Y. Oishi, K. Takano, X. Wang, A. A. Andreev, K. Nemoto, and K. Ueda: *Rev. Sci. Instrum.* **76** (2005) 073305.