

氏 名 亀島 敬

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1230 号

学位授与の日付 平成 21 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 GeV-class High Quality Electron Beams Accelerated by  
Laser Wakefield in Capillary Discharge Plasma

論文審査委員 主 査 准教授 中島 一久  
教授 鎌田 進  
教授 平田 光司  
教授 大見 和史  
教授 黒川 眞一  
副主幹 神門 正城  
(日本原子力研究開発機構)  
特任教授 小山 和義 (東京大学)

This dissertation reports the results of the research for electron beams acceleration with laser wakefield in capillary discharge plasma. The aim of this research is to increase energy gain of electron beams by solving a problem of laser wakefield acceleration, that is, shortness of acceleration length. Since excitation of the laser wakefield needs a laser pulse with a high intensity, the duration of the laser wakefield strictly depends on the length of laser focusing, which is fundamentally determined by diffraction of laser beams. The acceleration length is limited to be only a mm-scale owing to the diffraction effect. In order to overcome the diffraction limit, a discharge-plasma channel is proposed. The discharge-plasma channel generated in a capillary plays a role of an optical waveguide for propagating an intense laser pulse and prevents the laser pulse from defocusing over many Rayleigh lengths. This technique enables one to extend the acceleration length much longer to be a cm-scale that is required for accelerating electron beams up to the GeV-range energy.

Ablative capillaries made from acrylic resin are investigated for the generation of discharge-plasma channel. Propagation of intense laser pulses in plasma depends on the radial profile of refraction index which is determined by a plasma density profile in the capillary. Therefore, the plasma density profile in the capillary-discharge-plasma channel was characterized by the plasma-spectroscopy measurement. The temporal evolution and the dependence on discharge current are acquired for the search of the optimum condition of laser optical guiding. In addition, plasma dynamics in the capillary are numerically simulated on base of magnet hydro-dynamics by using the parameters taken by the plasma-spectroscopy measurement. In the simulation, the plasma parameters such as density, temperature, and a current profile can be calculated from the measured discharge current and the material of the capillary wall. The results of the measurement and the simulation in good agreement verify that a formed density channel in the capillary is capable of optically guiding an intense laser pulse.

Two experiments of laser wakefield acceleration were demonstrated with the ablative capillary and the ultra-intense lasers, the SILEX-I at the China Academy Engineering Physics (CAEP) and the J-KAREN at the Japan Atomic Energy Agency (JAEA). The laser system of the CAEP institute provides laser pulses with a maximum energy of 5.6 J and a pulse duration of 27 fs. Laser pulses up to energies of 4.4 J are optically guided in the capillary-discharge-plasma channel with a length of 4 cm. The laser spot size at the exit of the capillary is close to the initial injected one at the entrance of the capillary. When 3.8 J laser pulses are injected into the capillary-discharge-plasma channel, the GeV-class, high-quality beams are produced, showing an energy of 0.56 GeV, an energy spread of 0.21 % r.m.s., and a divergence of 0.58 mrad r.m.s. In the experiment at the JAEA institute, the stable conditions for the optical guiding and the electron productions are investigated. It is found that the

optimum condition of the electron production is not always matched to that of the optical guiding. The designed capillary has a low plasma density at a timing of the optimum condition of the optical guiding. Therefore, the provision of electrons for the laser wakefield due to the background plasma is difficult to occur. In addition, erosion of ablative capillaries is inspected. It is observed that after more than 100 shots an enlargement of the capillary's diameter is small enough to be negligible. However, warped irregularities and many blisters emerges around the inner wall of the capillary due to water absorption in the capillary wall and thermal expansion caused by discharge current. Such geometric distortion would make a plasma profile also warped, so that the path and the profile of a laser pulse would be strayed and deteriorated.

The electron beams acceleration experiments with the investigated capillary verifies that the laser wakefield can accelerate electron beams up to GeV-class with high collimation through optical guiding in the capillary-discharge-plasma channel with a length of a cm-scale. These results shows a prospect of the arrival of 'tabletop accelerators' delivering high-quality GeV-range beams. With improvement of the capillary-discharge technique and separation of electron injection and acceleration, electron beams accelerated by the laser wakefield in the capillary-discharge-plasma channel is capable of achieving the strict beam parameters required by advanced accelerators, such as the x-ray free electron laser.

## 論文の審査結果の要旨

本論文は、レーザー航跡場加速原理に基づき、高エネルギー電子ビームを加速するためのキャピラリープラズマ導波路の精密プラズマ特性測定を行うとともに、実際に100TW級フェムト秒レーザーパルスを伝播させ、GeVレベルの高品質電子ビーム発生に成功したレーザープラズマ加速実験について述べた。当該実験に使われたアブレーション型キャピラリープラズマ導波路を用いた高品質電子ビーム加速の実証研究は、世界でも初めてであり、従来行われた水素ガス充填型に比べ、加速器としての優れた特性を明らかにするとともに、その限界についても検討を加えた。

レーザープラズマ加速研究は、最近準単色ビームの発生機構が解明され、安定にビームを発生する技術の確立によって、コンパクト粒子ビーム源や放射光源とくにX線自由電子レーザーへの応用をめざした、GeVレベルの高エネルギー高品質電子ビーム発生法の開発研究が世界的に本格化している。本論文は、第1章でレーザープラズマ加速研究の背景についてレビューした後、第2章で加速原理となるレーザー航跡場加速理論、高強度レーザーパルスの発生法、プラズマ光導波路の生成と高強度レーザーパルスの伝播理論等、本研究の基礎となる理論的背景について要領よく述べている。本研究の成果であるアブレーションキャピラリープラズマ導波路の詳細な特性値測定および電磁流体理論を用いた数値解析の結果を第3章で詳述し、本プラズマ導波路を用いたGeV級高品質電子ビーム加速実験および最適化条件の探索実験を第4章で述べた後、最後に本研究の結論を第5章でまとめている。

本研究の主眼とするところは、プラズマ加速器として数mm長の加速長しかとれないガスジェットに替え、キャピラリープラズマ導波路を用いることにより、cmスケールの加速長が可能となり、0.56GeVというGeV級電子ビーム加速ができたことである。さらにエネルギー幅が1%オーダー、広がり角が1mrad以下という高品質性能を実証できたことは、1GeV加速で実績があるガス充填型プラズマ導波路実験と比べ、格段に優れた性能で、実用化の目標となるコンパクトX線自由電子レーザーの実現に、より近づいたことを意味している。またプラズマ導波路の分光学的な手法によるプラズマ電子密度およびその分布構造の時間分解測定と数値解析には、アブレーションキャピラリープラズマ導波路生成過程に、衝撃波が関与していることを示唆する測定結果が得られており、従来考えられていた遅いプラズマ導波路の生成機構とは異なる新しい知見を示唆し、興味深い。

なお本論文の骨子である「GeV級高品質電子ビームのキャピラリー加速実験」の成果は、すでに申請者を筆頭著者として国際学術誌(Applied Physics Express)に出版されており、その論文は、一流科学誌 nature photonics でも採り上げられ、高い評価を受けている。以上の理由で、本論文は博士(理学)に十分値するものと、審査員一同判断した。