

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	レーザーアブレーション型クラスタービーム源の高フラックス化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	石川裕太
Author(English)	Yuta Ishikawa
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11386号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長谷川 純,肖 鋒,末包 哲也,小栗 慶之,赤塚 洋
Citation(English)	Degree:Doctor (Science), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11386号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(理学)
学生氏名： Student's Name	石川裕太		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	長谷川純 准教授
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)	

要旨(和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

誘導加速マイクロトロン発明により、これまで未踏であった核子あたりのエネルギーが 100 keV/u を超える速度までクラスターイオンを加速することが可能になりつつある。高エネルギークラスタービームをパルク材料へのイオン注入や材料改質などに応用するには高フラックスのクラスタービームを加速器に供給することが必要不可欠であり、高エネルギー加速の観点から結合エネルギーが大きく多価イオンが生成可能な金属や半導体クラスターが求められる。レーザーアブレーションクラスター源は金属や半導体クラスターの生成に適しているが、どの程度のビームフラックスが達成できるかは明らかにされていない。本研究の目的は、クラスター源の動作パラメータとクラスター生成・輸送との関係を明らかにすることで高フラックス化への方策を示し、加速器へのクラスターイオン供給に対するレーザーアブレーションクラスター源の適応可能性を調査することである。幅広いバッファガス圧力のもとにおけるクラスター生成を調べるために低圧バッファガスクラスター源(<1000 Pa)と高圧バッファガスクラスター源(>1 MPa)を製作し、それぞれのクラスター生成・輸送の特性を調べた。

低圧バッファガスクラスター源では、原子間力顕微鏡による蒸着クラスターの観察と高速撮影による蒸気ブルームの挙動解析を行った。低圧バッファガス中のレーザーアブレーションでは蒸気ブルームの断熱膨張を伴う急速な冷却過程(Rapid 過程)とヘリウムバッファガスとの熱交換による比較的緩やかな冷却過程(Slow 過程)の双方がクラスター生成において重要な役割を持つ。100 Pa 以下の希薄なバッファガス中における Rapid 過程では蒸気ブルームのキャビティー内における流体挙動がクラスター生成と取り出しの効率に大きく影響することを示している。本実験では Rapid 過程による生成クラスターとして小さなもの ($N = 2$) のみが観察されたが、生成蒸気の密度を高めて大きなサイズのクラスターを生成することで短パルス(<1 ms)・高繰り返し(1 kHz)のクラスター源として利用可能であると期待できる。一方、100 Pa 以上のバッファガス圧力では、蒸気ブルームの膨張を抑制して十分にクラスター成長時間を稼ぐことができるため、Slow 過程によるクラスター生成が支配的となる。構成原子数が 100 以上のクラスターを効率的に生成でき、バッファガス圧力を高くするとともにクラスター生成・輸送の効率が向上したが、キャビティーからのクラスター取り出しと下流への輸送に時間がかかっているため、高フラックス化のためにはより高圧のバッファガス供給が必要であるとわかった。

高圧バッファガスクラスター源では、飛行時間質量分析装置を用いてクラスタービーム源の性能指標となるクラスター収量とビームパルス波形を評価した。最大でサイズ 200 のアルミニウムクラスターが観察され、極めて短パルス(100 μ s)のビームを生成することができた。クラスター粒子の速度計測により、クラスターが滞留室から取り出されるのに約 100 μ s かかっていることを明らかにし、これが下流におけるクラスタービームのパルス幅の下限を決定していることがわかった。また、動作パラメータとクラスタービーム源の性能の相関を調べることでより以下の高フラックス化への指針を得ることができた。アブレーションレーザーのフルエンスの増加によってクラスター生成量を増やすには限界があることから、クラスター生成量の増大のためにはアブレーションレーザーの最適なフルエンスを保ちながらレーザー照射面積を大きくする方法が有効であることを示した。また、バッファガス圧を高くするとクラスター生成が促進される一方で、クラスター源下流の背圧の上昇がクラスタービームの指向性を乱し輸送効率を悪化させており、バッファガスの放出量を減らすことが課題となることを明らかにした。超音速ノズル形状に対するクラスター収量の依存性から、ヘリウムバッファガスの流速および指向性を高めるノズル形状を採用することで輸送効率の改善が期待できることを明らかにしている。

以上の結果から、加速器へのクラスターイオン供給には高圧バッファガスクラスター源が適していることを明らかにした。クラスターフラックスは $\sim 2 \times 10^6$ particles/cm²・s と見積もられており、実際の応用には不十分であるが低電流でも行うことができる基礎実験(ストップピングパワー計測など)に対しては適応可能である。また、実験で得られた高フラックス化への方策を実行することで大幅にフラックスが向上すると期待できる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

論文要旨

THESIS SUMMARY

系・コース： Department of, Graduate major in	機械 機械	系 コース	申請学位(専攻分野)： 博士 Academic Degree Requested Doctor of	(理学)
学生氏名： Student's Name	石川裕太		指導教員(主)： Academic Supervisor(main)	長谷川純
			指導教員(副)： Academic Supervisor(sub)	

要旨(英文 300 語程度)
Thesis Summary (approx.300 English Words)

High-flux metal or semiconductor cluster beams are required for high-energy cluster ion irradiation experiments. In order to evaluate the supply capacity of laser ablation cluster sources, we developed two laser ablation cluster sources (low-pressure and high-pressure types) and investigated the performance in various operating conditions (ablation laser fluence, helium gas pressure, source geometry, and nozzle shape).

In the experiments using the low-pressure type source (≤ 1000 Pa), an atomic force microscope was used to examine the cluster size and yield. It was found that nano-sized silicon clusters constituting of more than 100 atoms were efficiently generated at helium pressures over 100 Pa. The time-resolved observation of vapor plume reveals that the cavity shape strongly affects the hydrodynamic behavior of the vapor plume and also affects both the cluster generation and the cluster transportation. We clarified that increasing helium pressure enhanced cluster generation and improved the transportation efficiency of clusters.

In the experiments with the high-pressure type source ($> \text{MPa}$), we observed aluminum clusters with sizes up to ~ 200 by a time of flight mass spectrometer. A short pulse width of the cluster beam (~ 100 μs FWHM) was achieved by modifying the source geometries. We found that increasing the laser spot size maintaining laser fluence is effective to enhance the vapor production without the excess heating of the vapor. The increase in the helium pressure improved the cluster generation. In order to eliminate disturbance of cluster beam by the residual gas, we should intensify the evacuation speed and decrease helium consumption by improving the pulse valve. The nozzle shape dependence showed that the cluster flux increased with increasing the directivity of the supersonic jet. The flux of cluster beam (Al_{50}) was estimated to be $\sim 2 \times 10^6$ particles/cm²·s, which is enough for fundamental experiments such as the stopping power measurement.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。
Note: Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).