

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	炭素イオンビームのレーザーアブレーション生成とKEKデジタル加速器での加速研究
Title(English)	
著者(和文)	宗本尚也
Author(English)	Naoya Munemoto
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11110号, 授与年月日:2019年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:長谷川 純,小栗 慶之,奥野 喜裕,河村 徹,林崎 規託
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11110号, Conferred date:2019/3/26, 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

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論 文 要 旨 (和文2000字程度)

Dissertation Summary (approx. 2000 characters in Japanese)

報告番号 For administrative use only	乙 第 号	氏 名 Name	宗本 尚也
<p>(要 旨) (Summary)</p> <p>本研究ではKEKデジタル加速器(KEK-DA) 施設に導入されたレーザーアブレーションイオン源(LAIS)から生成されるプラズマ及びビームの特性を明らかにし、LAIS由来イオンビームの高圧引き出し技術、Fast Cycling Induction Synchrotron(FCIS)への直接入射技術、バリアーバケットによるビーム閉じ込め技術を実証した。</p> <p>粒子治療施設の普及を推進する上では装置の小型化と共に施設の建設費や運転維持の低コスト化が重要な課題となっている。重イオン医療用加速器に用いられている従来の高周波シンクロトロンでは、高周波空洞と高周波増幅器自身の共振周波数の有限な可変幅がリングを周回するイオンの周回周波数のダイナミックレンジに制約を与えていた。そのため高周波シンクロトロンで加速できるイオンの質量対電荷比が限定され、ビームをシンクロトロンリングへ入射するには前段加速器及び線形加速器を用いて一定速度以上まで入射粒子を加速することが必須であった。</p> <p>一方、誘導加速シンクロトロンには、バンド幅の制限のないビーム加速が可能で、加速と閉じ込めの機能が分離されているといった特徴がある。近年、これらの特徴を活用した重粒子線治療システムEnergy Sweep Compact Rapid-Cycling Therapy (ESCORT)が提唱されている。ESCORTではRFQやDTL等の線形加速器入射器が必要ない代わりに、イオン源の段階で完全電離の炭素イオンを生成・供給する必要がある。</p> <p>完全電離炭素イオンの生成が可能なコンパクトで安価なイオン源としてLAISが有力である。LAISには、固体由来イオンを高価数・高電流で生成できる、高電圧ターミナル上にマイクロ波源及びそれに付随する電力源を必要としないという利点がある。本研究で開発したLAISでは、パルスエネルギー1 J以下の小型レーザーを用いて高電離プラズマ及び完全電離炭素イオンの生成を行った。このエネルギー領域のレーザーにより生成されたプラズマから炭素イオンビームを引き出したことは過去に実績がなく、その特性を明らかにする必要がある。またLAIS由来の完全電離炭素イオンビームをKEK-DAに直接入射して、バリアーバケットにより閉じ込める技術を実証することで、ESCORTドライバーの実現可能性を検証する必要がある。</p> <p>本論文では、LAISの設計・製作、生成された完全電離炭素イオンビームの評価、KEK-DAへの炭素イオンビームの直接入射および閉じ込めの実証実験の成果について論じ、ESCORTシステムの基盤技術の確立のために得られた知見について述べる。</p> <p>本論文は全7章により構成され、各章の概要は以下の通りである。</p>			

第1章「序論」では、シンクロトロンとレーザーイオンの歴史的背景について説明し、研究の実施環境であるKEK-DAを構成する各コンポーネントの概要について解説を行い、ESCORTの先行研究とその実現へのステップを示す。LAIS生成プラズマの特性評価及びLAIS由来の完全電離炭素ビームの直接入射・閉じ込めを実証することの必要性を論じ、本研究の位置付けと目的を明らかにした。

第2章「原理と実験手法」ではLAISの原理、本研究で用いた実験装置及び実験結果の解析法について記した。

第3章「KEK LAIS高価数イオン生成」ではテストベンチで測定された炭素の価数分布、ソレノイド磁束密度依存性、炭素プラズマから引き出される電流特性について述べた。

第4章「炭素ビーム200 kV加速実験」ではKEK-DAの200 kV高圧ターミナル (HVT) 内に設置したKEK LAISから引き出したイオンビームを下流の低エネルギービームライン (LEBT) に入射し、ビーム電流とエミッタンスを測定した。これらのビーム特性の測定を通じてKEK LAISのビームクォリティーを評価した。また、シミュレーションコードI-GUNにより、プラズマ密度とプラズマのドリフトエネルギーをパラメータとしてプラズマより引き出されたイオンビームの軌道解析を行い、HVT内のビームガイド系の問題点を明らかにした。さらに、LAISの構造に由来するビームローディングによる引き出し電圧降下が観測されたため、補償回路の追加および真空配管の変更によりその対策の結果について述べる。

第5章「KEK-DAによるビーム閉じ込め」ではレーザーエネルギー650 mJの条件で発生させたプラズマから引き出した炭素イオン (C^{6+} , C^{5+} , C^{4+}) ビームをKEK-DAリングに入射し、(1) Free runと(2) バリアーバケットによる閉じ込め実験を行った。Free run 実験結果からLAIS由来ビームの運動量のずれを評価した。また、閉じ込め実験結果を計算機シミュレーションで再現し、バリアーバケット内でのビーム挙動を解析した。さらに、ビーム生き残り寿命とリング真空度の関係について、ビーム粒子と残留分子・原子との相互作用の観点から評価について述べる。

第6章「結論」では、本論文の成果をまとめ、ESCORT実現のための課題と将来展望について述べる。

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: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

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。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.

(論文博士)
(Dissertation Doctorate)

論 文 要 旨 (英 文) (300語程度)

Dissertation Summary (approx. 300 words in English)

報告番号 For administrative use only	乙 第 号	氏 名 Name	宗本 尚也
<p>(要 旨) (Summary)</p> <p>This study clarified the fundamental characteristics of a laser ablation ion source (LAIS), which was installed to the KEK Digital Accelerator (KEK-DA) facility and demonstrated the direct injection of highly charged carbon ions to the KEK-DA and the beam confinement using barrier buckets.</p> <p>In Chapter1, the historical backgrounds of synchrotrons and laser ablation ion sources are explained and the previous research and steps toward the realization of the Energy Sweep Compact Rapid-Cycling Therapy (ESCORT) are shown. Then, the motivation and purpose of this research are mentioned.</p> <p>In Chapter 2, the structure and function of each component of the KEK-DA are precisely explained.</p> <p>In Chapter 3, the structure and function of each component of the LAIS are explained.</p> <p>In Chapter 4, the characteristics (flux waveform, charge distribution, and so on) of laser-ablation plasmas generated from various target materials (C, Al, Fe, Cu, Ag) are reported. In addition, the dependences of plasma ion flux on guiding magnetic field strength and the characteristics of the extracted beam current from the carbon plasma are also reported.</p> <p>In Chapter 5, the results of current and emittance measurement of carbon ion beams extracted from the LAIS installed to the KEK-DA 200-kV high voltage terminal are shown. Beam particle trajectories analyzed by the simulation code I-GUN under various plasma drift energies and densities are also reported. The cause of the terminal voltage drop during beam extraction is discussed and its countermeasure is explained.</p> <p>In Chapter 6, the experiments on injection and confinement highly charged carbon beams (C^{4+}, C^{5+}, and C^{6+}) performed at the KEK-DA facility are reported. The beam momentum spread is evaluated from the results of the free-run experiments. The beam behavior in a barrier bucket is shown for each ion species and the mechanism is clarified by a computer simulation. The relationship between the beam life time and the residual gas pressure in the KEK-DA beam pipe is also discussed by considering the charge exchange reactions between the beam ions and the residual molecules and atoms.</p> <p>In Chapter 7, the results of this study, the technical issues, and future prospects for realizing a novel cancer therapy machine based on the induction synchrotron technology are summarized.</p>			

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: Dissertation summaries must be written in either of the following formats: (A) both in Japanese (approx. 2000 characters) and in English (approx. 300 words), or (B) in English (approx. 800 words).

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。

Important: Dissertation summaries will be published online on the Tokyo Tech Research Repository (T2R2). Do not include information treated as confidential under certain circumstances.