

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)	要約
Type(English)	Outline

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

宗本尚也 東京工業大学

Abstract

レーザーアブレーションイオン源由来の 200 kV で加速された炭素イオンビームを KEK デジタル加速器に入射・加速・閉じ込め実証を行う事を目的として実験を行った。Nd-YAG レーザーで生成された 200 kV で加速された炭素イオンビームの価数毎の電流、エミッタンス、運動量拡がり等を取得し、炭素イオンビーム生成条件を含む入射器の基本特性を明らかにした。

Free run 実験結果からレーザーアブレーションイオン源由来ビームの運動量拡がり性を評価した。閉じ込め実験の結果を計算機シミュレーションで再現することで、バリアーバケット内でのビーム挙動を明らかにした。以上によりレーザーアブレーションイオン源によって供給されるビームは大型入射器及びストリッパフォイル等を用いずに完全電離炭素イオンを入射、加速、取り出しが可能であり、治療ビームとして供給する次世代がん治療加速器システムの展望を開いた。

第 1 章 序論

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。

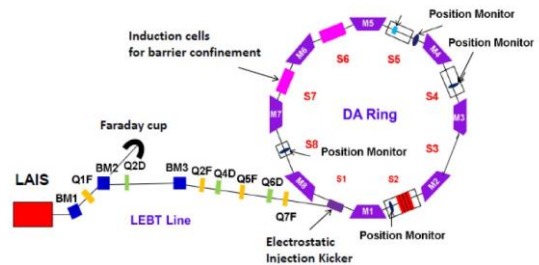
粒子治療施設の普及を推進する上では装置の小型化と共に施設の新設費や運転維持の低コスト化が重要な課題となっている。重イオン医療用加速器に用いられている従来の高周波シンクロトロンでは、高周波空洞と高周波増幅器自身の共振周波数の有限な可変幅がリングを周回するイオンの周回周波数のダイナミックレンジに制約を与えていた。そのため高周波シンクロトロンで加速できるイオンの質量対電荷比が限定され、ビームをシンクロトロンリングへ入射するには前段加速器及び線形加速器を用いて一定速度以上まで入射粒子を加速することが必須であった。

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[1]。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。

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。



ザー1 を $E=650$ mJ に設定したレーザーパルスは KEK-DA の運転周期と同期させパルスディバイダーを用いてターゲットに 0.5 Hz で供給された。プラズマチャンバーで生成されたプラズマは 50 G 出力された 1 m 長のソレノイドでガイドされた。Figure 4 に開口径 $\phi=2.8$ mm, 4 mm で構成される電圧差 20kV に印加された平面引き出し電極でイオンビームは引き出された。イオンビームは引き出し電極直後に置かれた Einzel lens (16 kV) を通過し、後段加速部で 180 kV だけ追加速され、LEBT へ伝搬する。LEBT では HVT で加速したイオンビームの価数分離を BM1 おこない、BM2 の後の観測器系 FC1 で価数分離されたビーム電流量とエミッタンスの測定と評価を行った(レーザー2 使用)。

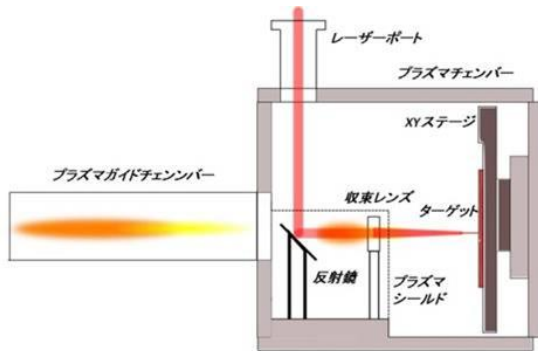


Figure 2: KEK-LAIS チェンバー概略図

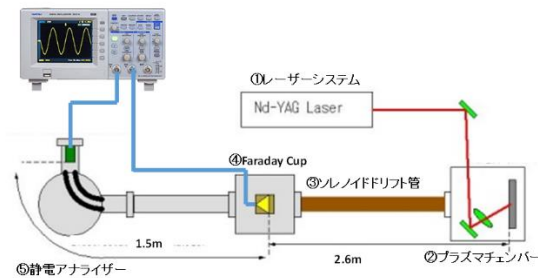


Figure 3: KEK LAIS プラズマ価数分離実験テストベンチ概略図

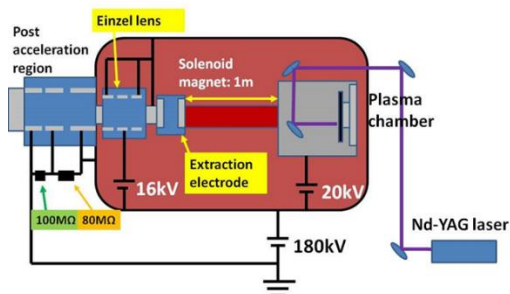


Figure 4: HVT 及びレーザー光学系概略図

第3章 KEK LAIS による炭素高価数イオン生成[3]

Figure 5 は炭素イオンの価数分布を示す。最大価数は C^{6+} であり、完全電離された炭素イオンが生成されていることがわかる。Figure 6 は炭素プラズマのイオン割合・粒子密度を示しており、炭素プラズマ中のイオンは $C^{4+}, C^{5+}, C^{3+}, C^{6+}$ の順で構成されている事が確認される。またこれらの粒子が $\phi=2.8$ mm の引き出し電極を理想的に通過した場合の粒子数密度は $C^{6+}:2.2 \times 10^{10}$ 個/cm², $C^{5+}:2.3 \times 10^{10}$ 個/cm², $C^{4+}:3.5 \times 10^{10}$ 個/cm² となり、LAIS により生成される炭素プラズマは KEK-DA の要求粒子数である 10^8 個/pulse を満たし得る事が確認された。

得られたプラズマはプラズマドリフト中に残留粒子との再結合を行い Time of flight の速い成分の価数は 4 価が支配的となっている。原因として三体衝突再結合及び残留粒子との再結合が候補として挙げられる。

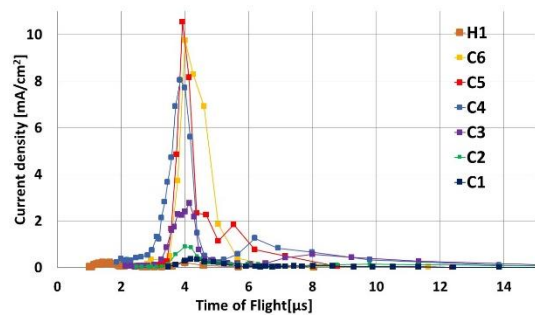


Figure 5: 炭素(¹²C=98.9%)価数分布

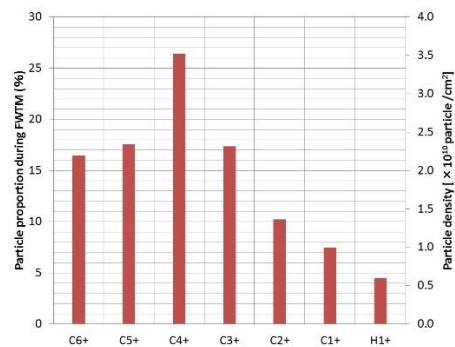


Figure 6: 炭素プラズマ粒子割合・粒子密度

第4章 炭素ビーム 200kV 加速実験

Figure 7 は価数分離電磁石 BM1 の下流 2 m 位置 (BM2 の背後) に置いた観測機器系 FC1 に設置されたファラデーカップにより測定された価数スペクトラムである。KEK-DA におけるビーム閉じ込め実験では高価数炭素イオン C^{6+}, C^{5+}, C^{4+} を供給した。

エミッタンス測定に用いたレーザーはレーザー2 である。引き出された分析電流波形は Figure 8 に示

される。この測定では C^{5+} , C^{4+} のエミッタンス測定を行った。測定 rms エミッタンスは Table 1 にまとめられる。エミッタンスはアクセプタンスに対応するエミッタンスは 4rms エミッタンスで評価される。測定されたビームは KEK-DA のアクセプタンス値 (Table2)を明らかに超えており LEBT 中の四重極電磁石によるガイド磁場を用いたとしてもアクセプタンスを満たすエミッタンスに調整する事は不可能である。

レーザー2 で生成されたイオンビームのエミッタンスはKEK-DAアクセプタンスを満たさない。なぜこのように大きなビームエミッタンスとなったのか、その原因を探るため、以下の項目に注目して、イオン源プラズマ開発で実績のある I-GUN[4,5]を用いてシミュレーションを行った。Figure9 にシミュレーションを行った領域の概略図を示す。Region4 は FC1 までのドリフト区間であり直線であるため図への表記は省略している。

- どの場所でエミッタンス増大・ビームロスが発生しているか
- Spectron SL800 ($\tau = 20$ ns, $E = 750$ mJ)使用時のビームエミッタンスの概算量

Figure10 に各 Region 毎の最終端の C^{6+} ビーム規格化エミッタンスを示す。Region2 の Einzel レンズ部のビーム径が電極と近接していると、Einzel レンズ近傍のみに強く表れる高次項の電場の影響を受ける事によりビーム位相空間に変形を引き起こす。この事によりビームのエミッタンスは Region1 の場合の数十~数百倍へと急激に増大する。このことより KEK-DA HVT より出力されるビームエミッタンスはイオン源そのものに依存するのではなく Region2 の Einzel レンズ区間で決定されることが分かった。ビームを Region3 で合計 200 kV まで加速した後、測定器までの距離をドリフトさせると、ビームの発散角が大きいため Region4 でビームの一部が壁面に衝突・消失し、FC0 の位置で観測されるビーム電流が引き出された電流より小さな値になることが分かった。

FC0 におけるビーム電流の実測結果には、2 台の仕様の異なるレーザーでプラズマ生成を行った。レーザー1 の条件の引き出し電極位置のイオン電流密度は約 20-25 mA/cm², レーザー2 の条件の場合で 15 mA/cm²程度であると推測された。Figure11 に、Einzel レンズに 16 kV 印加した時の FC0 位置の各価数及び全価数エミッタンスのイオン電流密度依存性を示す。このグラフのエミッタンスは、計算で得られた rms エミッタンスを実験で用いた Horizontal Vertical 表示に座標変換したものである。 $C^{3+} \sim C^{6+}$ ビームの場合、ドリフトポテンシャルが 400 V でイオン電流密度が 20-40 mA/cm² の場合と、700 V で 30-35 mA/cm² の場合のエミッタンスはどちらも数~数 10 mm · mrad 以内に収まっており、 C^{4+} - C^{6+} ビー

ムのピーク部分は概ねエミッタンスが低い状態で Region4 内を伝搬することができている。しかし、イオン電流密度が低い 10 mA/cm² 近傍またはそれ以下の場合のビームエミッタンスは数 100 mm · mrad と非常に大きくなってしまっている。

以上より、レーザープラズマのように空間的に電流密度・ドリフトエネルギーが異なるプラズマから引き出されるビームエミッタンスはビーム進行方向に対し一様ではないため、測定されるエミッタンスは時間的に大きく変化すると考えられる。測定で行ったように伝搬してくるビーム信号をすべて時間積分して算出したエミッタンスは、ビームバンチ内で特にエミッタンスが大きい部分の影響を受けやすいため、結果として過大評価されてしまう。

第 5 章で示すビーム入射実験では、プラズマのピークイオン電流密度が 20-25 mA/cm² 程度であり、 C^{6+} - C^{4+} いずれのビームにおいても電流ピークにおけるエミッタンスはKEK-DA入射条件であるアクセプタンス以下であると推測される。

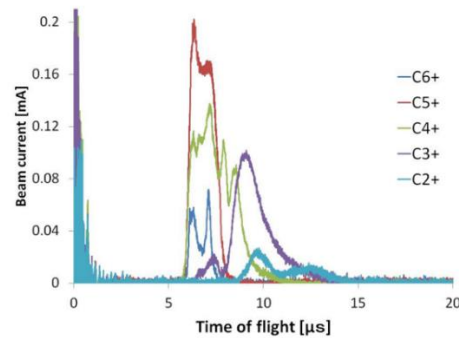


Figure 7: 価数分離された炭素イオンビーム電流波形

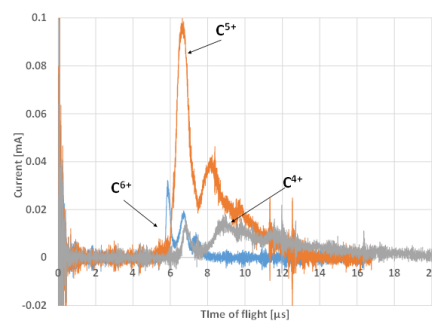


Figure 8: エミッタンス測定時の炭素イオンビーム電流波形

Table 1: エミッタンス(rms)測定結果

Emittance [$\mu\text{m} \cdot \text{rad}$]	C^{4+}	C^{5+}
\mathcal{E}_{Hrms}	84	86
\mathcal{E}_{Vrms}	83.6	86.8

Table 2 KEK-DA アクセプトランス

KEK-DA アクセプトランス	A _H	A _V
[$\mu\text{m} \cdot \text{rad}$]	277	32

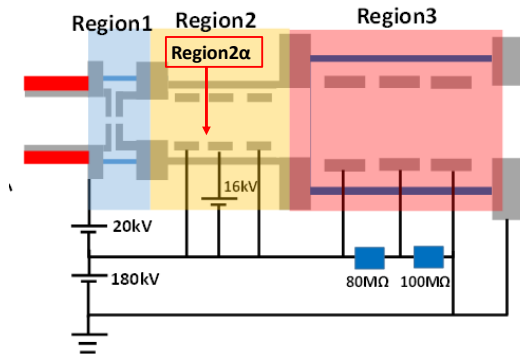


Figure 9: シミュレーション領域: Region1: 引き出し電極電極領域; 引き出し電圧 20kV、Region2: Einzel lens 領域; 閉じ込め電圧 16kV, 追加速電極領域; 加速電圧 180kV

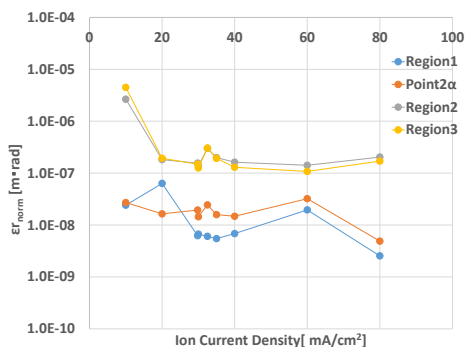


Figure 10 各 Region 毎の最終端の C⁶⁺ ビーム規格化エミッタンス (変数: イオン電流密度)

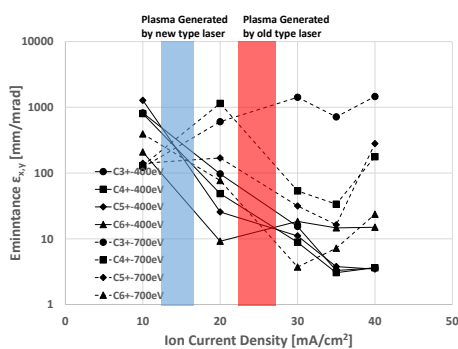


Figure 11 Ein16kV 条件時の FC0 位置における各価数エミッタンスのプラズマ電流密度依存性。(青領域: レーザー2 使用時のビームエミッタンス、赤領域: レーザー1 使用時のビームエミッタンス)

第5章 KEK-DA によるビーム閉じ込め[6]

Figure 12 はリング内に入射された C⁶⁺ ビーム電流の時間履歴を表しており、時間・ターン数平面に、

ビーム強度 (電流密度) を示すカラーバーが表示されている。

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。Δp/p は C⁶⁺で±0.18%、C⁵⁺で-0.34% < Δp/p < 0.41、C⁴⁺で±0.13%と見積もられた。

バリアー電圧を、横軸にビーム周回周期、縦軸に周回数をとってプロットすることにより 2次元平面で表示したものが Figure 13 であり、C⁶⁺用の閉じ込め電圧パルスの時間履歴を表している。実験では、最大値を±500 Vに固定し、パルス幅を 2 μs とした。閉じ込め区間の時間幅は C⁶⁺、C⁵⁺に対しては 2 μs、C⁴⁺は 3.5 μs と設定した。周回周期・ターン数平面で表した典型的な C⁶⁺ビーム閉じ込め結果を Figure 14 に示す。ビームの生き残るターン数は、前節の Figure 12 で示された Free run 実験の結果と比べると 5 倍程度大きいことを確認した。明らかにイオンビームバリアー電圧パルスの間隔内に収まっている。しかし、閉じ込め区間内に一様に閉じ込められるのではなく非一様性が顕著である。運動量の逸脱の極めて小さなイオンの運動がバリアー電圧パルスの微細構造に敏感であることが知られている。誘導加速システム内を伝搬する反射電圧が加速ギャップに現れ、位相空間内作るバリアーバケット構造が歪められる。

Figure 15 に任意の 1 周期の閉じ込め電圧プロファイルを示す。負のバリアー電圧パルスの直後に最大 35 V 程度のバンプ構造が見いだされる。これらのエラー電圧波形を考慮したバリアーバケット閉じ込めの多粒子シミュレーションによって実験結果の再現が試みられた。C⁵⁺イオンの入射後、1000 ターンに渡って反射電圧がある場合とない場合を比較した。Figure 16 はバリアーバケット内の代表的な数点を 1000 ターントラックした軌跡を示す。明らかにバリアーバケットが内部構造を持つことが判る。小さい運動量の逸脱を持つイオンの一部は内部構造の安定領域に捕捉され、マイクロバンチを形成する。大きな運動量の逸脱を持つイオンは反射電圧によるポテンシャルを乗り越えるが、本来の閉じ込めポテンシャルで閉じ込められる事が確認された。Figure 17 は上記の条件におけるビーム線密度電流の初期条件と、1000 ターン後の反射電圧あり、無しの場合を示している。実験結果を再現しているように見える。

Figure 18 に Free run させた場合のリング内における C⁵⁺のビーム寿命を示す。この結果よりビームの寿命と加速器リングの真空度の関係を残留分子・原子との相互作用の観点から評価した結果、現条件下では残留粒子による電子捕獲に伴うイオンビームの損失が支配的であり、少なくとも 10⁻⁷ Pa 台以下のレベルの真空が必要である事を示唆した。

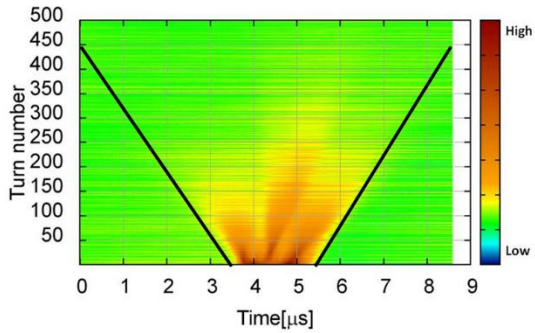


Figure 12: Free run 運転時の C^{6+} ビーム電流 (時間-ターン数平面上の 2D 表示結果)。

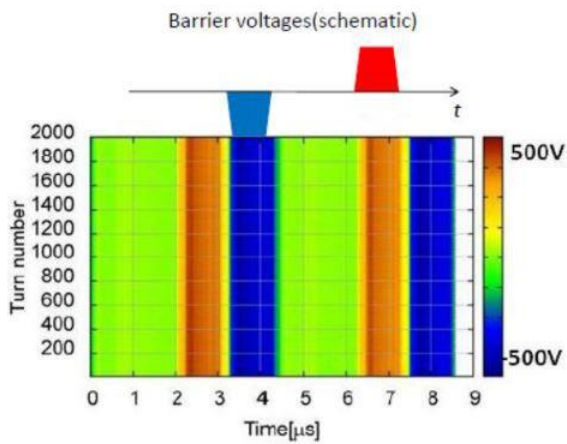


Figure13 C^{6+} ビームに対して用いたバリアー電圧閉じ込め区間

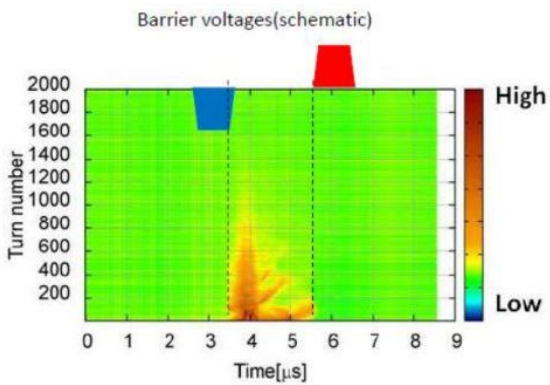


Figure 14: トラップされた C^{6+} ビームの時間-ターン平面図

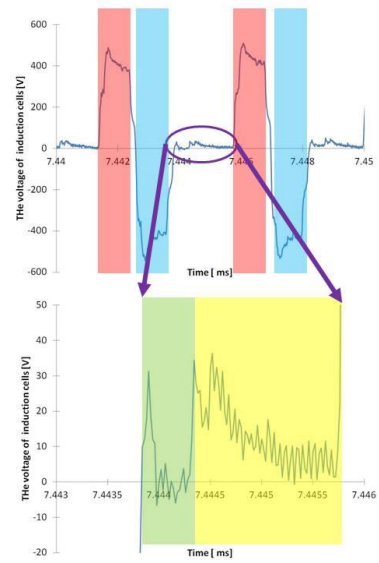


Figure 15: 上図： C^{6+} に対する任意の 1 周期のバリア電圧プロファイルと閉じ込め区間のバンプ構造 (500 V)。下図：バンプ構造拡大図

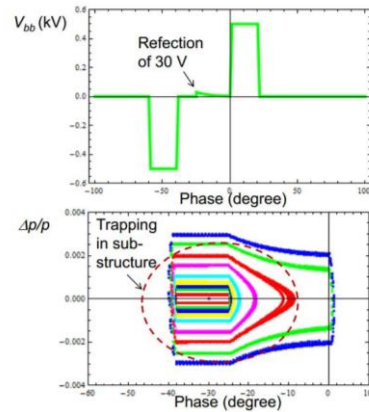


Figure 16: 上図：シミュレーションに用いた電圧模型。 ± 500 V の閉じ込め電圧と反射電圧 30 V で構成されている。下図：反射電圧を有する閉じ込め電圧により形成されるバリアーバケット内で、代表的なビーム粒子を 1000 ターン追跡したときのビーム粒子の軌跡。

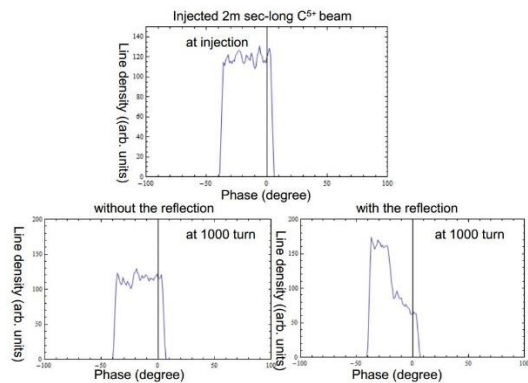


Figure 17: C^{5+} イオンの多粒子シミュレーション結果（上図）実験により得られた入射時のビーム線電流密度（下左図）反射電圧のない閉じ込め電圧による 1000 ターン閉じ込めシミュレーションの結果（下右図）反射電圧を有する閉じ込め電圧による 1000 ターン閉じ込めシミュレーションの結果

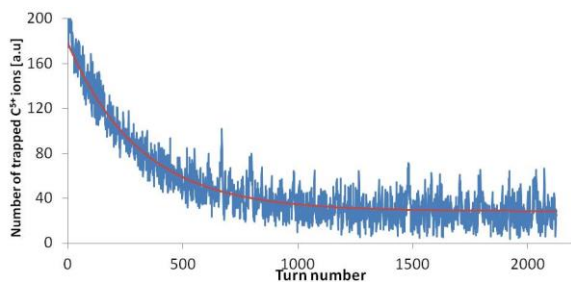


Figure 18: C^{5+} のビーム寿命

結論と将来の展望

本研究の結果は以下にまとめられる。

- LAIS-テストベンチにおいて炭素標的を用いて生成されるプラズマの電流特性、価数分布・安定性・磁場環境下における依存性の評価を行った結果、完全電離炭素イオンビームが KEK-DA の要求粒子数を満たしている事が分かった。
- LAIS を KEK-DA の 200 kV 高圧ターミナル組み込み、出力した炭素イオンビームの電流値、エミッタンス、運動量のずれの評価をおこなった。アブレーションプラズマの適切な部分をビームとして切り出す事で KEK-DA の要求仕様を満たす事が分かった。
- LAIS により生成した高価数炭素イオン (C^{4+} , C^{5+} , C^{6+}) を KEK-DA へ直接入射、閉じ込め実証に成功した。
- 円型リングにおける炭素ビームの蓄積実験を通して電子捕獲・剥離によるビーム損失と真空度との関係性を評価した。その結果電子捕獲に伴うイオンビームの損失が支配的である事が分かった。

本研究の成果は以下の様にまとめられる。

LAIS によって供給されるビームは RFQ や DTL 等の大型入射器及びストリッパフォイル等を用いずに完全電離炭素イオンを入射、加速、取り出しが可能であり、治療ビームとして供給する ESCORT ドライバーの展望を開いた。

REFERENCES

- [1] K. Takayama, “The Next Generation of Hadron Therapy Driver: *Continuous tracking irradiation on a moving and deformed tumor*”, *New Technologies in Hadron Therapy Workshop IEEE NSS-MIC 2018* in Sydney, November 13th 2018.
- [2] N. Munemoto, K. Takayama, S. Takano, M. Okamura and M. Kumaki, “Development of the C^{6+} laser ablation ion source for the KEK digital accelerator”, *Rev. Sci. Instr.* **85**, 02B922 (2014).
- [3] N. Munemoto, S. Takano, K. Takayama, K. Okamura and K. Horioka “LASER ABLATION ION SOURCE FOR HIGHLY CHARGE-STATE ION BEAMS”, in *Proceedings of IPAC2016 WEPMY036*
- [4] R. Becker and W. B. Herrmannsfeldt, “IGUN-A Program for the Simulation of Positive Ion Extraction including Magnetic Fields”, *Rev. Sci. Instr.*, **63**, 2756 (1992)
- [5] R. Becker “Numerical simulation of ion-beam formation (invited)” *Rev. Sci. Instr.*, **67**, 1132 (1996)
- [6] N. Munemoto, S. Takano, E. Kadokura, Taufik, T. Yoshimoto, X. Liu, T. Adachi, M. Ikeda, T. Kawakubo, K. Okamura, K. Takayama, and M. Wake, “Direct injection of fully stripped carbon ions into a fast-cycling induction synchrotron and their capture by the barrier bucket”, *Phys. Rev. Accel. & Beams* **20**, 080101 (2017).