

完全電離炭素イオンの Fast-Cycling Induction Synchrotron への直接入射・バリア バケットによる閉じ込め

DIRECT INJECTION OF FULLY IONIZED CARBON IONS INTO A FAST-CYCLING INDUCTION SYNCHROTRON AND THEIR CAPTURE BY THE BARRIER BUCKET

宗本尚也^{#, A)}, 高野進^{A)}, Taufik^{A,B)}, 由元崇^{C)}, 劉星光^{D)}, 安達利一^{A,B)}, 池田光男^{A)}, 川久保忠道^{A)}, 岡村勝也^{A)}, 高山健^{A,B)}, 和気正芳^{A)}

Naoya Munemoto^{#, A)}, Susumu Takano^{A)}, Taufic^{A,B)}, Takashi Yoshimoto^{C)}, Xingguang Liu^{D)}, Toshikazu Adachi^{A)}, Mitsuo Ikeda^{A)}, Tadamichi Kawakubo^{A)}, Katsuya Okaura^{A)}, Ken Takayama^{A,B)}, Masayoshi Wake^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ^{B)}Sokendai, ^{C)}Michigan State University, Facility for Rare Isotope Beams, ^{D)}Riken

Abstract

The KEK Laser ablation ion source (KEK-LAIS) has been developed in order to obtain highly ionized metal ions and fully ionized carbon ions since 2012. Recently, the electron resonance ion source of the KEK-Digital accelerator (KEK-DA), which is small-scale induction synchrotron, has been replaced by the KEK-LAIS. $2\ \mu\text{s}$ long fully ionized carbon ion beam with 10^8 ions, which was derived from the LAIS mounted on the 200kV high voltage platform, was directly injected into the KEK-DA ring at 0.5 Hz without an injector, as well as C^{5+} and C^{4+} . They were captured by the barrier bucket to survive until beam intensity life. Intensity distribution in the low energy transport line, the momentum spread and beam lifetime in the ring, were measured. The effect due to reflection in barrier voltage on confined beam is explained by experimental data and the results of simulation. It is noted that the first step of the essential characteristics required for a carbon driver of future carbon therapies has been demonstrated.

1. はじめに

KEK デジタル加速器 (KEK-DA)[1]は 10Hz 高繰返し誘導加速シンクロトロン[2]である。周波数のバンド幅制約がないため、任意の質量価数比 (A/Q) を持ったイオンの加速が可能である。これまで X-band ECR イオン源から得られる比較的低価数のイオンをイオン源から直接入射し、加速とバリアーバケットを用いた各種ビームハンドリングの研究が行われてきた[3,4,5]。一方、固体標的から高価数イオンを得るべく Laser Ablation Ion Source (LAIS)の開発が 2012 年に開始された [6,7]。LAIS は 2016 年に KEK-DA の 200 kV プラットホームに組み込まれた(Figure 1 参照)。2017 年 3 月に 0.5 Hz CW 運転で完全電離炭素イオンは KEK-DA へ入射され、バリアー電圧で閉じ込められた[8]。

デジタル加速器に入射された炭素ビームの価数強度分布、運動量拡がり、ビーム閉じ込め中のビーム振る舞い、ビーム寿命について解説する。最後に今後の課題が言及される。

2. LAIS ビーム

Figure 2 は KEK-DA200 kV プラットホームの概略図である。プラズマ発生に用いたレーザーは Spectron SL800 Nd-YAG (Max Energy:850mJ, Pulse width:20 ns, Rep rate:10 Hz)であった。KEK-DA の運転周期と同期させ E=650 mJ のレーザーパルスは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。炭素標的はラファイト(東洋炭素 IG-110)を用いた。X-Y ステージにマウントした標的を移動させ、ショット毎に照射面はリフレッシュされた。プラズマチェンバーで生成されたプラズマは 50 Gauss 1 m 長のソレノイドでガイドされた。開口径 $\phi=2.8\ \text{mm}$, 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。Figure 3 は価数分離電磁石 BM1 の下流 2 m 位置 (BM2 の背後)に置いたファラデーカップ FC1 により測定された価数スペクトラムである。Table 1 にその詳細がまとめられている。

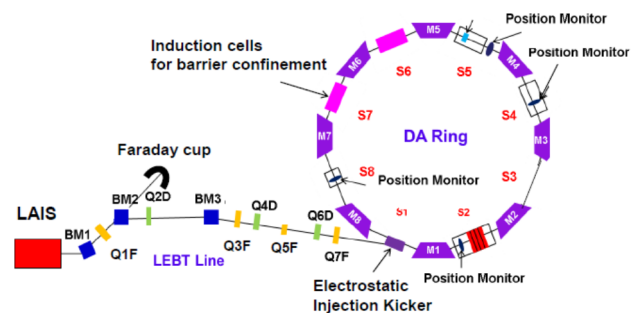


Figure 1: Schematic view of the KEK-DA integrated with the LAIS.

[#] munemoto@post.kek.jp

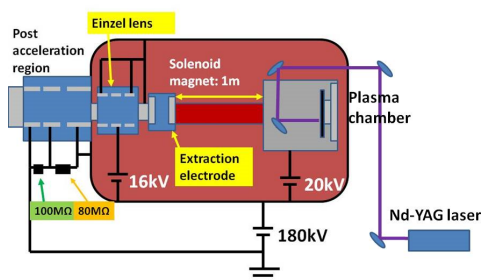


Figure 2: The HVP for the LAIS system.

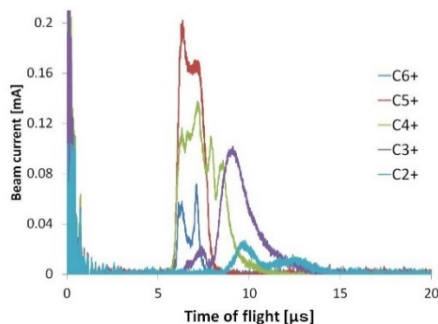


Figure 3: Charge state spectrum of carbon beam, which is generated from LAIS and accelerated by 200 kV.

Table 1: Parameter of Carbon Ions

	C ⁶⁺	C ⁵⁺	C ⁴⁺
Number of particles (one shot) [$\times 10^8$ particles]	0.56	3.37	4.77
Peak current [μ A]	72	200	137
Pulse width (FWHM) [μ s]	1.2	1.5	2.8

3. バリアバケットによるビーム閉じ込め

3.1 リング内における自由周回

LEBT を通過した炭素イオンは S1 に設置してある静電入射キッカー[9]によってリングへ蹴り込まれる。周回するビームの重心位置とビーム電流は S4, S8 に存在する静電ビームモニターで測定された。Table 2 にビーム・マシンパラメータを示す。Figure 4-6 は周回時間-ターン数平面へ射影したビーム電流信号を示す。色分けはビーム強度を示す。Figure 4-6 の結果は周回するビームの進行方向における拡散を如実に示している。特に、ビームエッジに相当する部分の移動に着目すれば、入射したイオンビームの最大運動量拡がり が評価できる。理屈は単純である。理想粒子からの momentum deviation $\Delta p/p$ を持った粒子は周回毎に以下の関係式に従って初期値から離散して行く。

$$t_{n+1} = t_n + T_0 \eta \frac{\Delta p}{p} \quad (1)$$

ここで n は周回数、 t は時間、 T_0 は理想粒子の周回時間、 η は Slippage factor である。イオンビームバンチの outer edge を示す図中の実線から炭素ビームの最大運動量拡がり は C⁶⁺: $|\Delta p/p| = 0.18\%$ 、C⁵⁺: -0.41% 、 $<\Delta p/p < 0.34\%$ 、C⁴⁺: $|\Delta p/p| = 0.15\%$ と評価された。

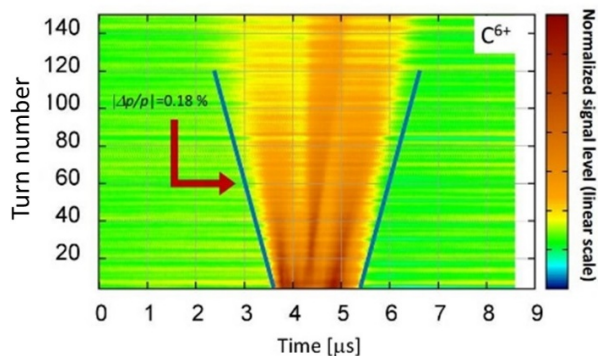


Figure 4: Time-turn plane view of free-run of C⁶⁺.

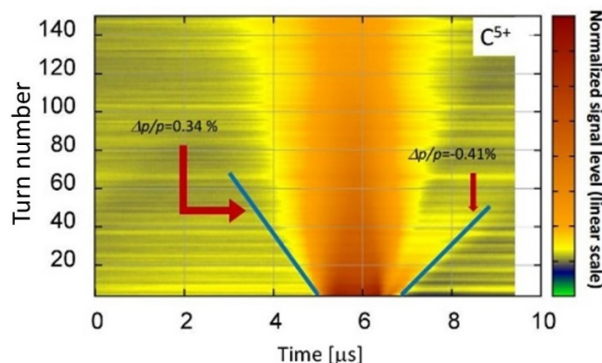


Figure 5: Time-turn plane view of free-run of C⁵⁺.

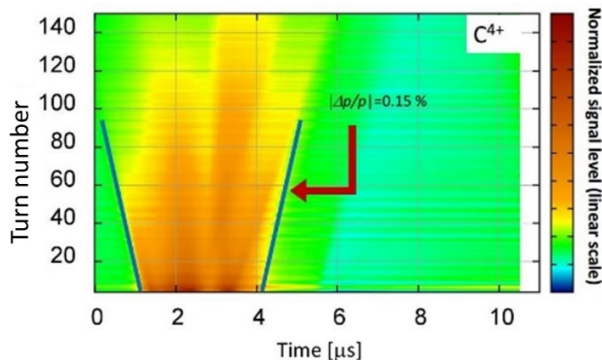


Figure 6: Time-turn plane view of free-run of C⁴⁺.

Table 2: Beam/ Machine Parameters

	C ⁶⁺	C ⁵⁺	C ⁴⁺
Mass to charge ratio A/Q	2	2.4	3
Relativistic $\beta \times 10^{-2}$	1.46	1.33	1.19
Revolution period T_0 [μs]	8.6	9.4	10.6
Magnetic flux density of main magnet [Gauss]	279	303	339

3.2 バリヤーバケットによる閉じ込め

誘導加速シンクロトロンは加速と閉じ込め機能が分離されている。今回の実験では閉じ込めのみを行った。ビームを閉じ込めるために用いた誘導電圧パルス波形を周回時間-ターン数平面に射影したものを Figure 7 に示す。正負対の電圧パルスがビームの縦方向に閉じ込めるバリヤー電圧である。カラースケールはバリヤー電圧の大きさを反映している。バリヤー電圧の最大電圧は±500 V、パルス幅は 2 μs であった。又、閉じ込め時間幅は C⁶⁺, C⁵⁺: 2 μs , C⁴⁺: 3.5 μs であった。

C⁶⁺, C⁵⁺, C⁴⁺の閉じ込め結果が周回時間-ターン数平面に示される (Figure 8-10 参照)。明らかにイオンビームバリヤ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。この現象は以前の実験においても確認されていた[10]。Momentum deviationの極めて小さなイオンの運動がバリヤ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ヤーバケット構造が歪められる。

Figure 11 に任意の 1 周期の閉じ込め電圧プロファイルを示す。負のバリヤ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ヤ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 12 はバリヤ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。明らかにバリヤーバケットが内部構造を持つことが判る。小さい momentum deviation 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 momentum deviation 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 13 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。

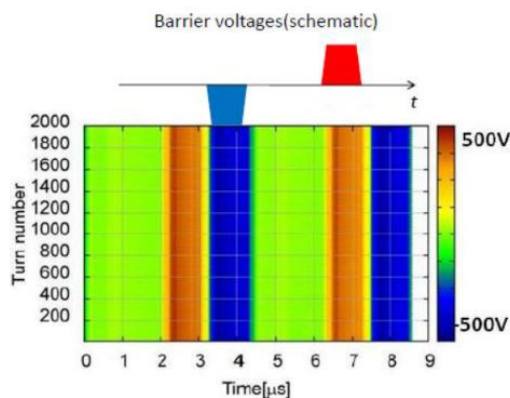


Figure 7: Barrier voltage pulses used for C⁶⁺ confinement.

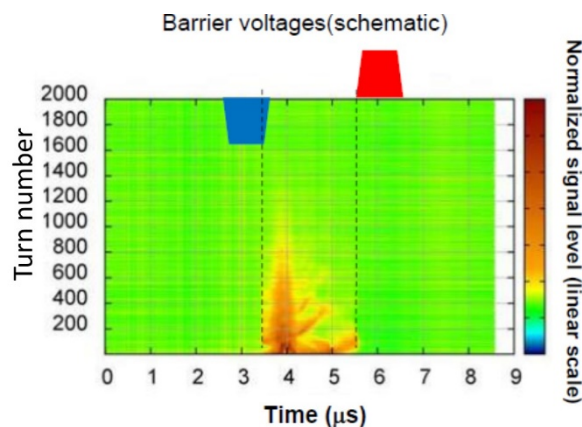


Figure 8: Time-turn plane view of the trapped C⁶⁺ beam.

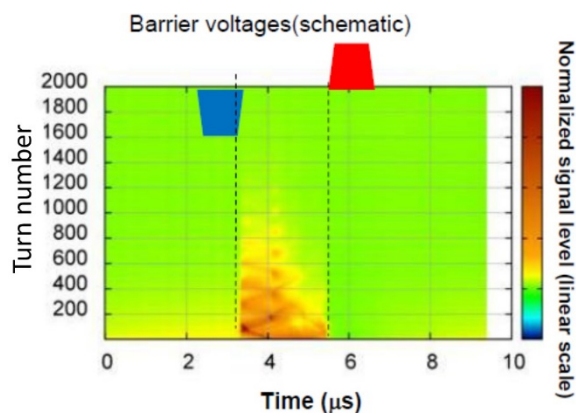


Figure 9: Time-turn plane view of the trapped C⁵⁺ beam.

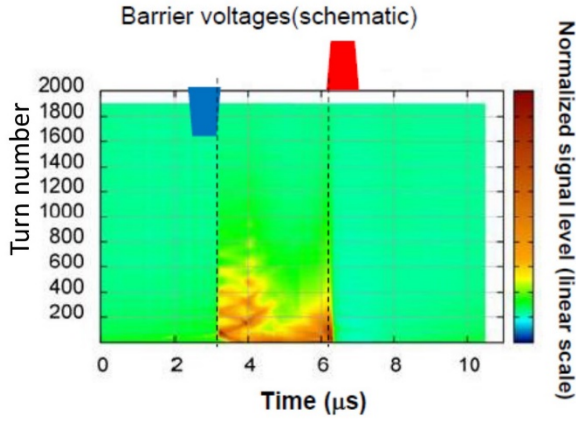


Figure 10: Time-turn plane view of the trapped C⁴⁺ beam.

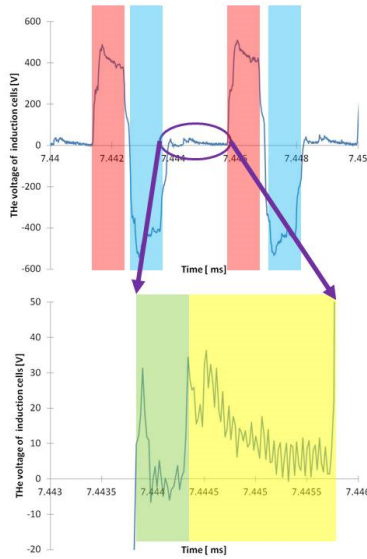


Figure 11: Barrier voltage pulse profile with fine structure.

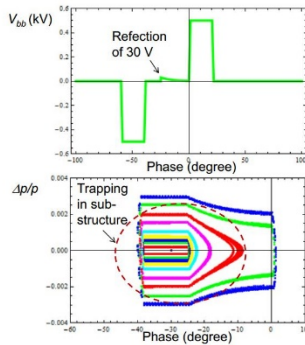


Figure 12: (upper) Model barrier voltage pulse with a reflection and (bottom) phase space structure if the barrier bucket disturbed by the reflection voltage.

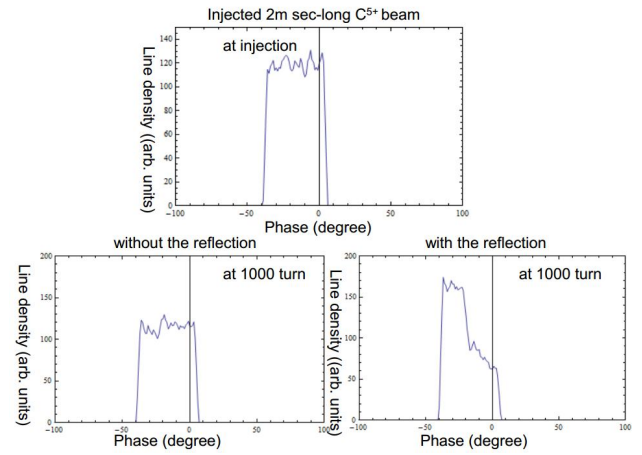


Figure 13: Multi-particle tracking simulation for a C⁵⁺ beam, (upper) the line density of an injected C⁵⁺ beam pulse uniformly direction and (lower) line density after 1000 turns.

3.3 ビーム寿命

閉じ込め実験からイオンビームの KEK-DA でのビーム寿命が評価出来る。Figure 14 は閉じ込めたイオン強度を閉じ込め時間に渡っての積分量(粒子数に比例する)を周回数の関数として示している。明らかに指数関数で減衰している事が判る。

KEK-DA の様に極端に低エネルギーで入射された重イオンビームの寿命を決定する大きな要因は残留ガスにビームが衝突する事によって発生する①電子吸着 ②電子剥離(C⁵⁺以上)が知られている。特に低速イオンの場合は電子吸着が支配的である[11]。ビーム寿命の評価を下記式(2)で算出してみる。

$$N(t) = N(0) \exp \left[-2.12 \times 10^{27} \cdot P(\text{Torr}) \cdot \int_0^t (\sigma_{cap} \beta) \cdot dt' \right] \quad (2)$$

$N(0)$ は初期のイオン数、 t は入射からの経過時間、 β は相対論的ベータ、 P は圧力(単位 Torr)、 σ_{cap} は電子吸着衝突断面積を表す。この方程式は周回回数 n を用いる事で簡略化される。

$$N(n) = N(0) \exp \left[-2.12 \times 10^{27} \cdot P(\text{Torr}) \cdot \sigma_{cap} \beta \cdot T_0 \cdot n \right]$$

$$= N(0) \exp \left(-\frac{n}{n_{life}} \right) \quad (3)$$

$$n_{life} = \frac{1}{2.12 \times 10^{27} \cdot P(\text{Torr}) \cdot \sigma_{cap} \beta \cdot T_0}$$

C⁵⁺のパラメーター $T_0=9.4\mu\text{s}$, $\beta=1.33 \cdot 10^{-2}$, $P=1.5 \times 10^{-8}$ を式(3)に代入すると、 $n_{life}=2.51 \times 10^{-13} / \sigma_{cap}$ となる。加速器リング真空路中の残留分子、原子は真空容器壁面とフェライト等の容器内構造体表面からのアウトガスである水素、窒素、酸素分子と考えられる。これら分子、原子の電子捕獲断面積は概ね $\sigma_{cap}=6 \sim 8 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ であることは知られている。この値を式(3)に代入し、Figure 14 に実験結果に重ねてプロットすると実験結果を良く再現する。

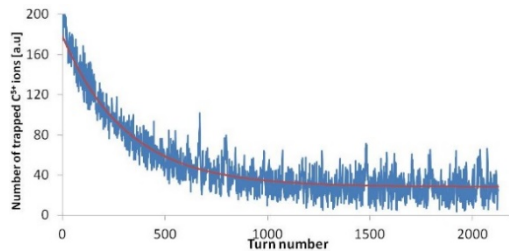


Figure 14: Beam survival of C^{5+} .

4. まとめ

LAIS で生成した完全電離炭素イオンビームが KEK-DA に直接入射され、バリアー電圧により閉じ込められた。入射器無し次世代ガンセラピーの炭素線ドライバー[12]として想定される速い繰り返し誘導加速シンクロトロンで必要とする炭素線仕様として見た場合、今回 LAIS で生成した C^{6+} のビームの運動量拡がり $\Delta p/p$ は 10^{-3} より十分小さいが、まだ強度が十分ではない。ビーム価数、強度ともにターゲット上のレーザー強度密度に依存しているため、現在使用しているレーザーよりパルス幅が短くエネルギーの高いレーザーを用いる事で、目標である 10^8 個/pulse は容易に達成する事は可能だろう。

バリアー電圧を用いたビーム閉じ込め実験の結果、次世代ガンセラピードライバーとして必要な真空レベルを知る事が出来た。速いビーム加速により C^{6+} の電子捕獲によるロス緩和することが可能であるが、少なくとも 10^{-7} Pa 台の真空レベルが必要であることが示された。

KEK-DA では取り出しキッカー等アウトガス源となる装置を取り外す事により、真空環境の改善が今夏実施される予定である。これまで固定の離散パルス電圧によって誘導加速されていた。有限 ($D=1.6$ m) な運動量分散関数の存在とあいまってシンクロベータカップリングによりビームセンター振動が誘起され、エミッタンス増大につながっていた[13]。これを抑制するため誘導加速システムに可変型 DC 電源を実装する予定である。

謝辞

KEK-LAIS 開発のため岡村昌弘博士(BNL)、岩田康嗣博士(AIST)には多くの助言、装置の供与をして頂いた。LAIS の物理現象に関して堀岡一彦教授(東工大)には多くの議論をして頂いた。ここに感謝いたします。この研究は科研費・基盤研究 A (23240082) の助成を受けた。

参考文献

- [1] T. Iwashita *et al.*, "KEK Digital Accelerator", Phys. Rev. ST - AB 14, 071301 (2011).
- [2] K. Takayama and J. Kishiro "Induction Synchrotron", Nucl. Inst. Meth. A451, 304 (2000).
- [3] K. Takayama *et al.*, "Induction Acceleration of Heavy Ions in the KEK Digital Accelerator: Demonstration of a Fast Cycling Induction Synchrotron", Phys. Rev. ST - AB 17, 010101 1-6 (2014).
- [4] X.Liu *et al.*, "Injection and induction acceleration of $A3+$ in

the KEK Digital Accelerator", *Laser and Particle Beams* **33**, 237 (2015).

- [5] T. Yoshimoto, Doctor Thesis, Tokyo Institute of Technology (2016).
- [6] N. Munemoto, K. Takayama, S. Takano, M. Okamura and M. Kumaki, "Development of the $C6+$ laser ablation ion source for the KEK digital accelerator", Rev. Sci. Instr. 85, 02B922 (2014).
- [7] N. Munemoto, S. Takano, K. Takayama, K. Okamura, K. Horioka, "Laser Ablation Ion Source for Highly Charge-State Ion Beams", in Proceeding of IPAC2016, WEPMY036.
- [8] N. Munemoto *et al.*, "Direct Injection of Fully Carbon Ions into a Fast-cycling Induction Synchrotron and Their Capture by the Barrier Bucket" published in Phys. Rev. Accel. And Beams (2017).
- [9] T. Adachi and T. Kawakubo, "Electrostatic Injection Kicker for the KEK Digital Accelerator", Phys. Rev. ST - AB 16, 053501 (2013).
- [10] M. Hirose *et al.*, "Beam Confinement Dynamics in a Barrier Bucket", in Proceeding of HIAT2015, MOPA22 (2015).
- [11] I. S. Dmitiev *et al.*, "Experimental electron loss and capture cross sections in ion-atom collisions", Atomic Data and Nuclear Data Tables 96, 85 (2010).
- [12] Leo Kwee Wah, T. Monma, T. Adachi, T. Kawakubo, T. Dixit, and K. Takayama, "A Compact Hadron Driver for Cancer Therapies using Continuous Energy Sweep Scanning", Phys. Rev. ST - AB 19, 042802 (2016).
- [13] T. Monma *et al.*, "Coherent Synchro-Beta Coupling in the KEK Digital Accelerator", Proc. of HIAT2015, MOPA16 (2016).