

# 量子メス用レーザー駆動イオン加速入射器開発の現状

## CURRENT STATUS OF THE LASER-DRIVEN ION INJECTOR

榊泰直<sup>#A)</sup>, 小島完興<sup>A)</sup>, 諏訪田剛<sup>B)</sup>, ゼンタンフン<sup>A)</sup>, 筒井裕士<sup>C)</sup>, 戸内豊<sup>C)</sup>, 大友清隆<sup>C)</sup>,  
井上典弘<sup>D)</sup>, 黒木宏芳<sup>D)</sup>, 松本悠椰<sup>A,E)</sup>, 青木宜篤<sup>A,E)</sup>, 大石沙也加<sup>A,F)</sup>, 石井邦和<sup>F)</sup>, 畑昌育<sup>A)</sup>,  
山本洋一<sup>A)</sup>, 伊東富由美<sup>A)</sup>, 錦野将元<sup>A)</sup>, 白井敏之<sup>G)</sup>, 近藤公伯<sup>A)</sup>

Hironao Sakaki<sup>#A)</sup>, Sadaaki Kojima<sup>A)</sup>, Tsuyoshi Suwada<sup>B)</sup>, Thanh-Hung Dinh<sup>A)</sup>, Hiroshi Tsutsui<sup>C)</sup>, Yutaka Touchi<sup>C)</sup>,  
Kiyotaka Ohtomo<sup>C)</sup>, Norihiro Inoue<sup>D)</sup>, Hiroyoshi Kuroki<sup>D)</sup>, Haruya Matsumoto<sup>A,E)</sup>, Nobuatsu Aoki<sup>A,E)</sup>,  
Sayaka Oishi<sup>A,F)</sup>, Kunikazu Ishii<sup>F)</sup>, Masayasu Hata<sup>A)</sup>, Yoichi Yamamoto<sup>A)</sup>, Fuyumi Itou<sup>A)</sup>, Masaharu Nishikino<sup>A)</sup>,  
Toshiyuki Shirai<sup>G)</sup>, Kiminori Kondo<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> QST Kansai, <sup>B)</sup> KEK, <sup>C)</sup> Sumitomo Heavy Industries, <sup>D)</sup> Kanadevia,

<sup>E)</sup> Kyushu Univ., <sup>F)</sup> Nara Women's Univ., <sup>G)</sup> QST inage

### Abstract

We report that a commissioning status of a compact ion injector for heavy-ion radio therapy (Quantum Scalpel).

### 1. はじめに

レーザーとプラズマの相互作用によってイオン加速する手法が発見されて、今年で 25 年となった。この現象は、現代の小型イオン加速器を構築するうえで重要な技術となるため、世界的に基礎研究だけでなく応用研究も重要視されている。日本では過去に、この技術を医療分野での応用を目指し、いくつかのプロジェクトを立ち上げてきたが、それらのプロジェクトでは『レーザーエネルギーをイオン加速エネルギーへ変換するメカニズムを探索』という基礎研究に重点が置かれており、システム全体のバランスを踏まえた工学的開発が十分に行われなかったため、進展は緩やかであった。

現在、量研にて進行中の「量子メス・プロジェクト」[1]においては、産学官を連携させてレーザーとプラズマ相互作用の効率的なエネルギー変換に関する基礎研究に加え、発生したイオンビームを余すところなく利用するシステムを完成させることを目指している。この技術の確立で、医療応用のみならず、今までにない特徴をもつビーム特性を作り出すことを考え実験装置(量子メス・入射器原型機)を作りあげ、工学的最適化を目的としたビーム試験を実施している。今回は、この試験において行ったエネルギー圧縮によるバンチ長圧縮の評価を 1 次元モデルによって行った結果を主として報告する。

### 2. 位相回転によるエネルギー圧縮

2024 年度の本学会の発表[2]では、実用におけるレーザー駆動イオン加速の一つの解決課題である「ブロードなエネルギー分散」制御を『位相回転空洞によるエネルギー圧縮を行うことを開始し、壁電流モニタにて計測に成功した』ということ速報として説明した。

レーザー駆動イオン手法のエネルギー分散を小さくするための制御に関しては、レーザーがイオンエネルギーへの変換エネルギー効率を高くすることが求められ、変換効率が向上するという手法[3]が多数提案されている

が、それらの手法はイオン発生用ターゲットがナノメートル級の厚さが求められ、ターゲット製作やハンドリング方法等の点において、実用化の障壁が高いものである。そこで、イオン発生後に位相回転にてエネルギー圧縮[4]を行うほうが効果的となる。

デバンチャーの周波数は、レーザーショットタイミングと高周波電場との同期をとるためにバンチレーザー発振のマスターオシレーター周波数である 80.0 MHz を採用する。この空洞は 2 ギャップを有する 1/4 波長共振型空洞であり、ある瞬間での 2 つのギャップの電場は 180 度位相がずれているモードが立つ。陽子 2 MeV が空洞を通過する際の加速効率が最大になるようにギャップ間距離を最適化している。そのため、ビームが加速空洞を通過する間に受ける実効的なエネルギー効率(Transit-Time Factor: TTF)は、空洞に到達する陽子エネルギーで異なる。ここで TTF は、ビームの径方向  $r$ 、デバンチャーの共振周波数  $\omega$ 、陽子速度  $\beta$ 、光速  $c$  による  $k = \omega(c\beta)$  を用いて、

$$TTF(r, k(\omega, \beta)) = \frac{1}{v_0} \left| \int_{-L/2}^{L/2} E_z(r, z) \cdot e^{-jkz} dz \right|, \quad (1)$$

と定義できる。Figure 1 に今回用いた空洞の TTF を示す。この TTF を利用すると、ビームに対する加速ゲイン( $\Delta W$ )は、高周波電場の角周波数  $\omega$  と加速電場の位相オフセット  $\theta_0$ 、 $t$  を陽子がターゲットから空洞までに要した飛行時間により、最終的に 1 次元モデル[5]として

$$\Delta W(t) = q \cdot V_0 \cdot TTF(r, k) \cdot \cos(\omega t + \theta_0) \quad (2)$$

をターゲットでレーザー加速されたイオンのエネルギーに、この値を加えて最終的な運動エネルギーとする。

このモデルにおいて、イオンの空間電荷については、レーザー駆動イオン加速は電子とイオンが同じ方向に進行しながら共同電子として振る舞うことで空間電荷効果をキャンセルすることが知見として得られており無視できる[6, 7]。

Figure 2 に、0.8~1.5 MeV の範囲のエネルギーの陽子を輸送した実測(壁電流モニタによる計測)とシミュレーション結果の例を示す。実測値とシミュレーション結果の縦方向時間のサイズが異なるが、これはビームに

# sakaki.hironao@qst.go.jp

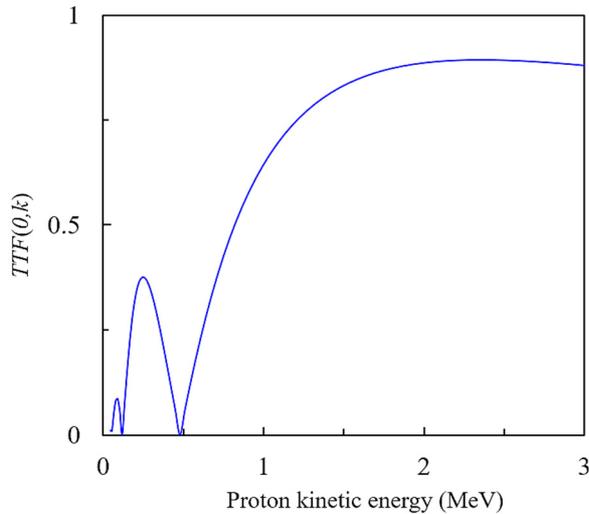


Figure 1: Value of TTF on Energy compress cavity.

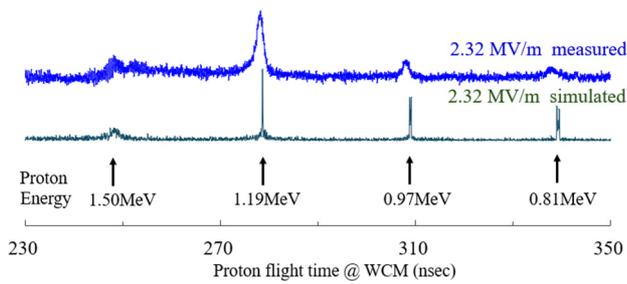


Figure 2: Measurement data and Simulation result [5].

よって壁に誘起される電場が、正規分布  $\sigma$  をもつ電場となっているためであり、実際のビームサイズより幅広く計測されているためである。両者は非常に一致しており、このモデルが量子メス入射器設計におけるシミュレーションモデルとして利用できる。

### 3. おわりに

我々は、重粒子線治療装置の入射器の小型化を目標としている第 5 世代の量子メスの早期実現を目指して、昨年構築された原型機に位相回転空洞を設置し、それを利用したビーム運転によって、エネルギー圧縮のモデルの構築を進めた。そして、モデルによって得られる知見をもとに、重イオン用高周波空洞の設計を進め、レーザー駆動イオン加速の特徴が活かせるような工学的要素技術の確立を進める。

### 謝辞

本研究は、JST、未来社会創造事業、JPMJMI17A1 の支援を受けて実施された。

### 参考文献

- [1] Y. Iwata *et al.*, “Design of a compact superconducting accelerator for advanced heavy-ion therapy”, Nucl. Inst. and Meth. A, 1053, 168312 (2023).
- [2] 榊泰直ら, “Beam commissioning for injector by laser driven ion acceleration”, 日本加速器学会年会 THOA09 (2024).
- [3] T. Esirkepov *et al.*, “Highly Efficient Relativistic-Ion Generation in the Laser-Piston Regime”, Phys. Rev. Lett. 92, 175003 (2004).
- [4] S. Nakamura *et al.*, “High-quality laser-produced proton beam realized by the application of a synchronous RF electric field”, Jpn. J. Appl. Phys. 46 L717 (2007).
- [5] H. Sakaki *et al.*, “Demonstration and Real-Time Non-Destructive Diagnosis of a High-Flux Laser-Driven Proton Bunch”, manuscript by accepted.
- [6] H. Matsumoto *et al.*, “Evaluating beam neutralization and transport dynamics in laser-driven ion accelerators”, in Proc. LINAC2024, Chicago, IL, USA, pp. 502-505 (2024).
- [7] M. Roth *et al.*, “Laser accelerated ions and electron transport in ultra intense laser matter interaction”, Laser Part. Beams, vol. 23, no. 1, pp. 95-100, (2005).