

マルチイオン治療用小型 ECR イオン源の改良と調整

COMMISSIONING ON AN ECR ION SOURCE FOR THE MULTI-ION RADIOTHERAPY

片桐 健^{*,A)}, 村松 正幸^{A)}, 岩田 佳之^{A)}, 白井 敏之^{A)},
坪松 悟史^{B)}, 高橋 伸明^{B)}, 野村 真史^{B)}, 佐々野 利信^{B)},
鈴木 太久^{C)}, 高橋 勝之^{C)}, 白石 直浩^{C)}
Ken Katagiri^{*,A)}, Masayuki Muramatsu^{A)}, Yoshiyui Iwata^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)},
Tsubomatsu Satoshi^{B)}, Nobuaki Takahashi^{B)}, Shinji Nomura^{B)}, Toshinobu Sasano^{B)},
Taku Suzuki^{C)}, Katsuyuki Takahashi^{C)}, Tadahiro Shiraishi^{C)}

^{A)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST),

^{B)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd. (SHI),

^{C)} Accelerator Engineering Corporation (AEC)

Abstract

A new treatment method using several light ions, called “multi-ion treatment,” was proposed to enhance the treatment effect by controlling the distribution of linear energy transfer (LET) as well as the dose distribution. The use of four ion species, i.e., helium, carbon, oxygen, and neon ions, has been planned for the multi-ion treatment. For this treatment, a new 14-GHz electron cyclotron resonance ion source (ECRIS) has been developed to produce those four ion species and to enable to quickly change those providing ions. In this paper, we present results of the commissioning on the newly developed ECRIS.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構 (QST) の HIMAC 加速器を用いた重粒子線がん治療は、1994 年の治療開始から 14000 人以上もの患者に治療が適用されてきた。これまでの高い治療効果が認められ、放医研を含め全国 7 か所 (千葉・兵庫・群馬・佐賀・神奈川・大阪・山形)、海外 2 か所 (台湾・韓国) にて治療施設が建設されて治療が行われており、また、新たに 4 か所 (中国: 2・韓国: 1・アメリカ: 1) で施設建設計画が進んでいる。重粒子線治療の更なる治療効果の向上のために、数種類のイオンを用いて治療を行うマルチイオン治療 [1] が提案されている。この方法では、低酸素領域を含む腫瘍中心部には高 LET の酸素やネオンイオン、腫瘍中心部の周辺領域には炭素イオン、正常組織周辺には障害の低減のために低 LET のヘリウムイオンを用いて照射を行い、適切な LET 分布を形成することでより高い治療効果を狙う。

このマルチイオン治療は、QST で現在開発を進めている、超伝導シンクロトロンを用いた量子メス [2] でも実施される。量子メスにてマルチイオン治療を実施するために、

1. 量子メスへの導入のためにコンパクトであり、
2. メンテナンスフリー性が高く、
3. He^{2+} , C^{4+} , O^{6+} , Ne^{7+} の 4 種のイオンを要求量 (see, Sec. 2) 生成でき、それらの切り替え時間が 1 分程度であること

の 3 つの要求を満たすイオン源が必要となった。そのため、QST と住友重機械工業 (SHI) との共同研究により新たな 14-GHz ECR イオン源 (マルチイオン源) の設計・開発が進められてきた [3, 4]。1. 及び 2. の特徴を実現す

るために、軸方向・動径方向磁場の形成に永久磁石が用いられ、マイクロ波の発生には半導体増幅器が採用された。また、3. のイオンの素早い切り替えの実現のために、パルスバルブによるガス切り替え法が用いられた。このマルチイオン源は、2022 年度に製作され、2022 年 3 月に HIMAC に導入された。その後、これまでに、3. で示されるイオン種に関して、その要求電流の達成を目指して、調整と改良、R&D が進められてきた。本発表では、本イオン源にて生じた問題、それらのために講じた調整・改良、及びこれまでに得られた性能の概要を報告する。

2. マルチイオン源

マルチイオン源を Fig. 1 に示す。イオン源系の専有面積は 3.1 m × 0.8 m 程であり、HIMAC に既設の 18-GHz ECR イオン源 (HEC) のおよそ 1/5 程までに小型化された。図に示された高電圧デッキ上には、マルチイオン源本体、診断箱、4 種のイオン生成に用いるガスボンベ及びパルスバルブ系、2 系統のマイクロ波信号源・アンプ、それらの制御系が備わる。この高圧デッキの下流には、グラウンド電位の puller チェンバーがあり、それに続く低エネルギービームトランスポートには、Einzel レンズ、分析電磁石、水平・垂直スリット、ファラデーカップが備わる。

マルチイオン源の軸方向磁場用のリングマグネット、及び動径方向磁場用六極磁石には、NdFeB 磁石 (信越化学工業製) が用いられる。リングマグネットは、軸方向磁場をミラー電磁石により調整可能な HEC イオン源を用いて、4 種のイオンの要求量を達成する軸方向磁場分布を実験的に決定し、その磁場分布を再現するように設計されている [3, 5]。Figure 2 にマルチイオン源の軸方向磁場分布の測定値を示す。 B_{inj} はマイクロ波入射側の軸方向磁場の最大値、 B_{ext} はイオン引き出し側の軸方向

* katagiri.ken@qst.go.jp

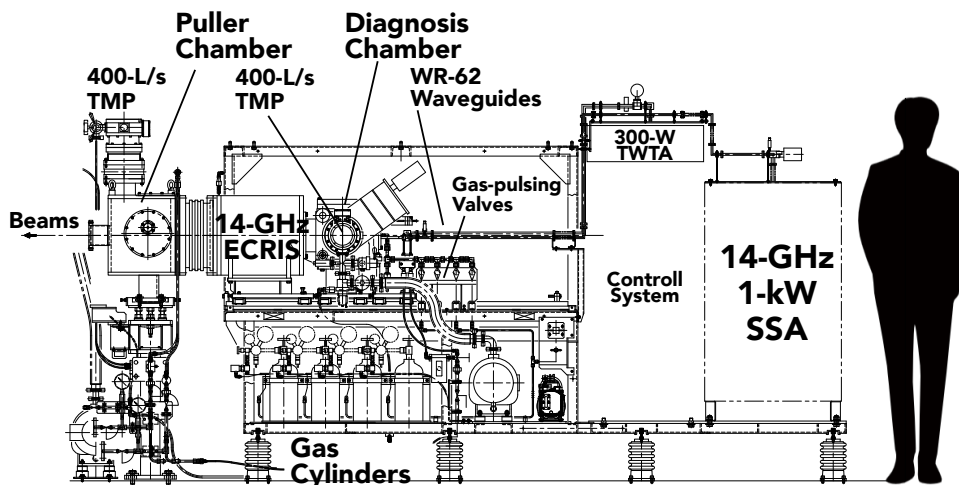


Figure 1: Multi-ion source.

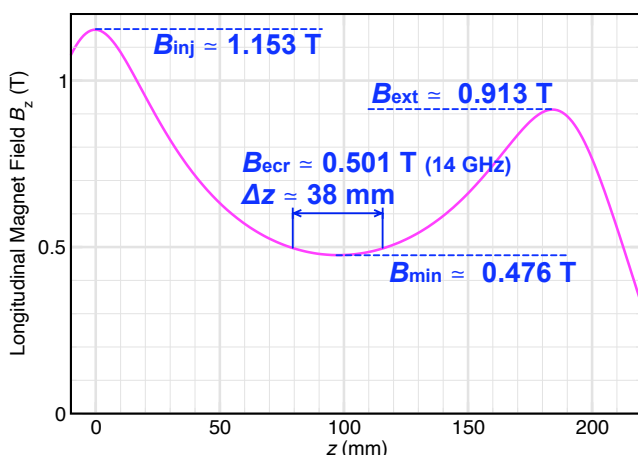


Figure 2: Measured results on an axial field distribution for the ring magnets.

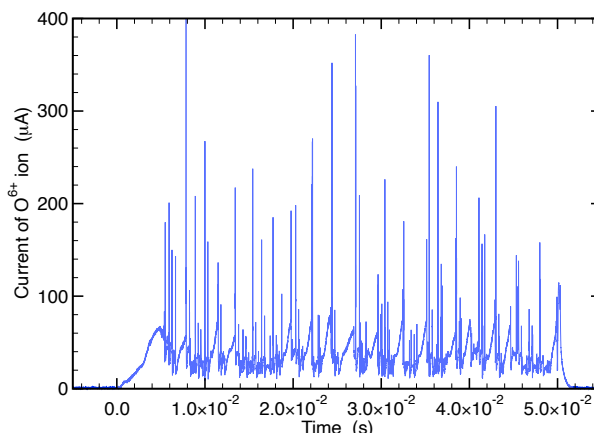


Figure 4: Temporal evolution of O^{6+} -ion current. Strong instability was observed for the single-frequency heating with 14.0-GHz, 460-W microwave.

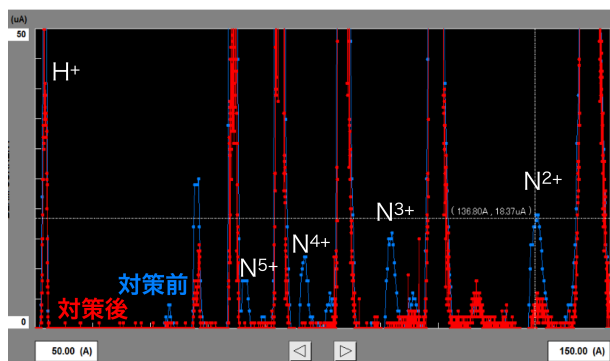


Figure 3: Comparison of charge state distribution of oxygen ions between before and after vacuum improvement. Spectrums for nitrogen ions were successfully suppressed.

磁場の最大値、 B_{min} は磁気ミラー間の軸方向磁場の最小値、 B_{ECR} は電子サイクロトロン共鳴の磁場の値を示す。この図の値より、次の通りに求まる： $B_{inj}/B_{ECR} \approx$

2.3, $B_{ext}/B_{ECR} \approx 1.8$, $B_{min}/B_{ECR} \approx 0.95$.

マルチイオン源のマイクロ波の周波数は、 O^{6+} 、 Ne^{7+} イオンの生成のために、従来の炭素イオン生成用 10-GHz ECR イオン源 [6] よりも高い 14 GHz と決められた。コンパクト化と高いメンテナンスフリー性を狙って、メインのマイクロ波アンプには GaAs パワートランジスタを用いた 1-kW (pulsed, duty: 5%)、 14 ± 0.25 GHz の半導体アンプ (SSA, R&K 製) が採用され、また two-frequency heating 用のサブのマイクロ波アンプとして 300W、10–18 GHz の進行波管アンプ (TWTA, Xicom 製) が用いられる。メインのマイクロ波は WR-62 導波管により、サブのマイクロ波はイオン源直近で導波管から同軸線に変換されて 1/4 波長 (≈ 5 mm) のアンテナにより、プラズママチェンバーに導入される。プラズママチェンバーのマイクロ波入射側の RF シールド中心からは、バイアスディスクが挿入される。ディスクの直径は 7 mm であり、材質はモリブデンである。

このマルチイオン源は超伝導シンクロトロンへのビームの供給を目的としているために、マイクロ波信号源の

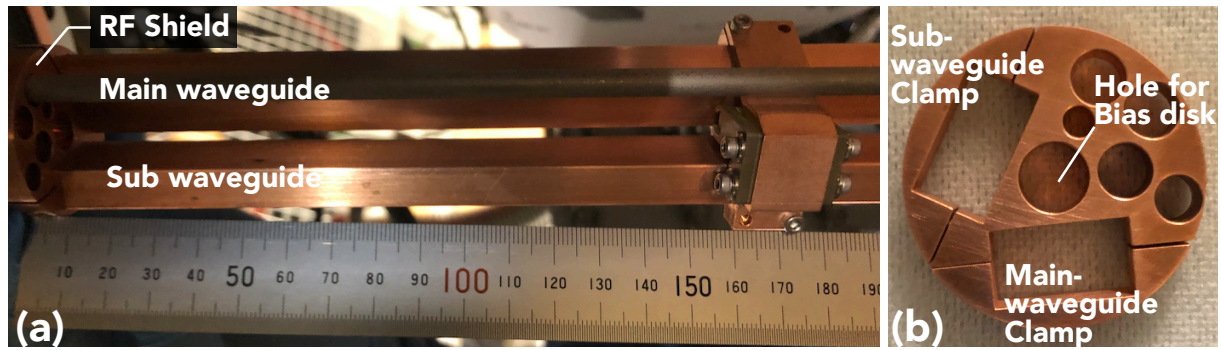


Figure 5: (a) Modified waveguide system for two-frequency heating, (b) microwave shield attached at the end of the modified waveguide system.

出力をパルス駆動することによって、プラズマ生成・イオン生成をパルス化している。コミッショニング中においては、パルス幅 50 ms、周期 1 Hz で運転を行った。プラズマチェンバーに各 4 種のガスを供給するパルスバルブも、同様に 1 Hz で駆動される。プラズマチェンバー内のガス圧力はパルスバルブの開時間によって調整される。イオン源プラズマチェンバーの上流側の診断箱、及び下流の引き出し電極真空箱は、各々 400 L/s(N₂) のターボ分子ポンプ (TMP) で排気される。

治療室へ供給する各イオンの線量率の要求、それより定まるシンクロトロン周回粒子数の要求より、マルチイオン源には次のイオンの強度が要求されている: He²⁺ は 940 μA、C⁴⁺ は 430 μA、O⁶⁺ は 330 μA、Ne⁷⁺ は 250 μA。

3. マルチイオン源の立ち上げ: 生じた問題、調整・改良の結果

3.1 真空の問題

マルチイオン源の立ち上げ当初は、プラズマチェンバー上流の診断箱の圧力は、 $P_{\text{diag}} \simeq 1.0 \times 10^{-5}$ 、プラズマチェンバー下流のプラーチェンバーの圧力は、 $P_{\text{puller}} \simeq 1.5 \times 10^{-5}$ 程度に留まった。多価イオン生成のための残留ガスの低減を目指して、四重極質量分析計での診断、及びヘリウムリークディテクターによる調査を度々実施し、その結果、ガスライン用継ぎ手、真空内引き出し電極冷却用水配管継ぎ手、マイクロ波窓 (カプトン膜を利用) からのリークを確認し対策を行った。Figure 3 に示す通り、これらのリークの対処後には、明確に窒素のスペクトルが低減し、最も良い時で $P_{\text{diag}} < 1.0 \times 10^{-6}$ 、 $P_{\text{puller}} \simeq 5 \times 10^{-6}$ にまで向上した。

3.2 不安定性の発生とその低減

マルチイオン源では、取り出したイオンの波形に $\Delta t \sim 1-10$ ms の周期でスパイクやバーストが生じ、著しく不安定となる現象が生じた。Figure 4 にこの状況の O⁶⁺ のイオン波形を示す。マイクロ波周波数、ガス圧力を調整しても安定化する条件は見つけるのは困難であった。この状況は、マイクロ波のパワーをある閾値から上げた場合に発生し、そのためマイクロ波パワーをそれ以上は上げられず、イオン電流の増強の妨げとなった。マルチイオン源では Sec. 2 で示した通り、 $B_{\text{min}}/B_{\text{ECR}} \simeq$

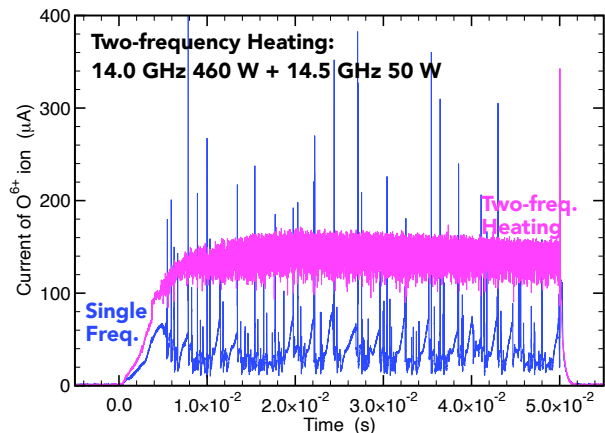


Figure 6: Temporal evolution of O⁶⁺-ion current, stabilized by the two-frequency heating with additional 14.5-GHz 50-W microwave.

0.95 であり、これは semi-empirical equations として示される、 $B_{\text{min}}/B_{\text{ECR}} \simeq 0.8$ の条件 [7] に比べて高い。近年の研究にて、 $B_{\text{min}}/B_{\text{ECR}} > 0.8$ である場合、つまり、ECR 面が磁場勾配の緩やかな B_{min} に周囲に近づく場合、電子の transverse 方向の速度が longitudinal 方向 (軸方向) の速度に比べて著しく増加し、電子の速度空間上の非等方分布によって電子サイクロトロン不安定性が引き起こされることが報告されている [7,8]。Figure 4 で見られる不安定性がこの電子サイクロトロン不安定性であった場合、それを抑えるためには、単純に B_{min} を下げるか、或いは B_{ECR} を上げることをまず最初に検討できるが、いずれの対処法も費用の面から実施することは困難であった。そこで、文献 [9] に示されている two-frequency heating で電子サイクロトロン不安定性を抑制する方法を試すことにした。マルチイオン源には、Sec. 2 に示した通り、two-frequency heating 用のサブのマイクロ波導入経路としてアンテナが備えられていたが、不具合が生じたために WR-62 導波管をもう 1 系統追加し、合計 2 系統の導波管を備えるように改造を行った。Figure 5(a) に two-frequency heating 用に改造した、2 系統の導波管を示す。左端には RF シールドが付き、プラズマチェンバーのマイクロ波入射側に挿入される。この RF シールドを Fig. 5(b) に示す。メインとサブの導

波管は、120度の位相差で配置している。温度変化による膨張・収縮の繰り返しにより緩みが生じないように、シールドに備えたクランプ状の治具で導波管を締め付けて固定する構造とした。

この入力系により、two-frequency heating を O^{6+} イオン生成時に行った結果を Fig. 6 に示す。不安定な Fig. 4 の条件に、500 MHz 程周波数の高いマイクロ波を僅か 50 W だけ加えることで、不安定性が抑制された。この安定化に伴って、 O^{6+} イオンの強度は大幅に増強されたことが確認できる。

4. 結論

2022年3月に HIMAC に導入されたマルチイオン源について、コミッショニング、性能向上のための改良と調整をこれまでに進めてきた。これまでに、真空系、マイクロ波導入系などの改良を実施し、また two-frequency heating により不安定性の抑制を試みた。これらの改良と調整により、これまでのところ目標の値に対して、 He^{2+} は 160%、 C^{4+} は 70%、 O^{6+} は 79%、 Ne^{7+} は 32% のイオン強度までを得ている [10]。今後は、さらなるイオン強度の増加を狙って、不安定性の抑制のた

めの調整を試み、また、永久磁石の調整機構による、磁気ミラー間の軸方向磁場最小値 B_{min} の低減を検討する。

参考文献

- [1] T. Inaniwa *et al.*, Phys. Med. Biol. 62, 5180 (2017).
- [2] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. A, 1053 (2023) 168312.
- [3] M. Muramatsu *et al.*, Phys. Conf. Ser. 2244 (2022) 012094.
- [4] M. Muramatsu *et al.*, Proc. of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, October 18 - 21, 2022, Online (Kyushu University), pp. 1051.
- [5] F. Ouchi *et al.*, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, July 31 - August 3, 2019, Kyoto, Japan, pp.550.
- [6] M. Muramatsu, A. Kitagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76 (2005), 113304.
- [7] O. Tarvainen *et al.*, Rev. Instrum. meth. 86 023301 (2015).
- [8] O. Tarvainen *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. 23, (2014) 025020.
- [9] V. Skalyga *et al.*, Phys. Plasmas 22, (2015) 083509.
- [10] K. Katagiri *et al.*, to be submitted to Nucl. Instrum. and Meth. A.