

マルチイオン照射のための小型 ECR イオン源のビーム試験

BEAM TEST OF NEW COMPACT ECR ION SOURCE FOR MULTI-ION RADIOTHERAPY

村松正幸^{#, A)}, 片桐健^{A)}, 野村真史^{B)}, 坪松悟史^{B)}, 楠岡新也^{B)}, 藤原正^{B)}, 戸内豊^{B)},
橋正則^{B)}, 鈴木太久^{C)}, 高橋勝之^{C)}, 白石直浩^{C)}, 佐々野利信^{C)}, 岩田佳之^{A)}
Masayuki Muramatsu^{#, A)}, Ken Katagiri^{A)}, Shinji Nomura^{B)}, Satoshi Tsubomatsu^{B)}, Shinya Kusuoka^{B)},
Tadashi Fujiwara^{B)}, Yutaka Touchi^{B)}, Masanori Tachibana^{B)}, Taku Suzuki^{C)}, Katsuyuki Takahashi^{C)},
Tadahiro Shiraishi^{C)}, Toshinobu Sasano^{C)}, and Yoshiyuki Iwata^{A)}

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

^{B)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

^{C)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

The multi-ion radiotherapy with dose distribution and Liner Energy Transfer optimization is being studied at QST. Helium, carbon, oxygen, and neon ions are considered as ion species for multi-ion radiotherapy. We developed new compact ECR ion source with all permanent magnets named MIK (Multi-Ion production at Kei5) for multi-ion radiotherapy. Ionization gases were helium, methane, oxygen, and neon to produce He^{2+} , C^{4+} , O^{6+} and Ne^{7+} ions. Requirement values of beam current were 940 μA correspond to He^{2+} , 290 μA to C^{4+} , 330 μA to O^{6+} , and 245 μA to Ne^{7+} , respectively. This value was obtained from the number of particles required for the cancer treatment and the transmission efficiency of the accelerator in the HIMAC. The MIK source was installed to the HIMAC facility in February 2022.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(QST)の重粒子線がん治療装置(HIMAC)では、治療用炭素を生成する 10 GHz ECR イオン源(NIRS-ECR)[1]の他、生物・物理実験に於いて様々なイオン種の供給を行う 18 GHz ECR イオン源(NIRS-HEC)[2]、小型 ECR イオン源(Kei2)[3]、PIG イオン源[4]の 4 台のイオン源が稼働している。現在、NIRS では数種類のイオンを標的に照射することで理想的な LET および線量分布を形成するマルチイオン照射を推進している[5, 6]。想定されるイオン種は He, C, O, Ne の 4 種類で、HIMAC のように複数のイオン源を利用すれば比較的容易に切り替えが可能となるが、普及型の治療施設では、コストと運転・メンテナンスの観点から、永久磁石型の ECR イオン源 1 台で対応することが望まれる。現在普及型施設で使用されている永久磁石型 ECR イオン源の Kei シリーズでは、ネオンの多価イオン生成には十分な閉じ込め磁場が得られていないため、我々は新規イオン源の開発を行っている。

新イオン源の設計のために、NIRS-HEC で行われたビームテストの結果、 He^{2+} , C^{4+} , O^{6+} , Ne^{7+} のビーム電流において目標値が達成されている。この時のミラー磁場の値は 1.14/0.475/0.9 T (上流側ピーク値: Binj/ミラー磁場最小値: Bmin/下流側ピーク値: Bext)となっている[7]。この時の磁場分布を再現させるように、磁場計算コード POISSON/SUPERFISH を用いて永久磁石の形状を決定した。

マルチイオン照射用小型 ECR イオン源(MIK: Multi-Ion production at Kei5)は住友重機械工業株式会社と量

研機構の共同研究によって設計・製作された。これまでの Kei シリーズと同様に永久磁石のみで閉じ込め磁場を形成する。2022 年 2 月に HIMAC に設置されて、現在はイオン源のコンディショニングを兼ねてビーム調整を行っている。

2. MIK の構成

MIK は上流側真空箱、永久磁石とプラズマチェンバー、下流側真空箱、で構成されている。これらイオン源部と、マイクロ波源、ガス供給システム、制御系に最大 30 kV のビーム引出のための高電圧(引出電圧)が印加される。入射器である線形加速器の入射エネルギー(10 keV/n)に合わせるため、イオン種によって引出電圧を変える必要がある。 He^{2+} の場合は 20 kV, C^{4+} : 30 kV, O^{6+} : 26.7 kV, Ne^{7+} : 28.6 kV となる。MIK から引き出されたビームは、低エネルギービーム輸送系(LEBT)にあるファラデーカップで検出される。LEBTには分析電磁石、2つのモニターボックス、3連静電4極レンズ、2連静電4極レンズで構成されている。

Figure 1 に MIK を示す。リングマグネットと 6 極磁石を用いて、軸方向と径方向の閉じ込め磁場を形成する。永久磁石には信越化学社製の、信越ネオジウム磁石 N シリーズを使用した。円筒状の永久磁石の内部にプラズマチェンバーを設置し、内部でプラズマを生成する。プラズマチェンバーの材質は、冷却を考慮し銅製としている。永久磁石の上流側と下流側に真空箱を配置し、そこに 450 l/sec のターボ分子ポンプを設置して、プラズマチェンバーの真空排気を行う。上流側、下流側真空箱の到達真空度は、 $7.4\text{e-}6$, $1.3\text{e-}5$ Pa となっている。

上流側真空箱には、WR-62 の矩形導波管、同軸ケーブル、ガスパイプ、バイアスディスクが配置されている。

[#] muramatsu.masayuki@qst.go.jp

WR-62 導波管は、13.75-14.25 GHz の半導体アンプ (SSPA: solid-state power amplifier, R&K 社製)からの出力を伝送する。SSPA の最大出力は 1000 W、パルス運転のみで最大パルス幅が 100 msec、繰り返しが 1 Hz である。同軸ケーブルは、10-18 GHz の進行波管アンプ (TWTA, Xicom 社製)からの出力が伝送される。TWTA の最大出力は 250 W である。同軸線先端はアンテナの形状をしており、アンテナ長は 15 GHz の 1/4 波長となっている(5 mm)。マルチイオン源は4種類のガスを切り替えてイオンの生成を行うが、真空内に4本のガスパイプがあるのではなく、大気側で1本に合流しプラズマチャンバーにガスを導入する。バイアスディスクは直径 8 mm で、モリブデン製である。

下流側真空箱には引出電極とアインツェルレンズが配置されている。引出電極は発熱と真空を考慮し、冷却水での間接冷却とし、タングステン製とした。引出電極は手動での位置調整が可能で、引出電極先端とプラズマ電極の間隔(dext)を 0-50 mm とすることができる。

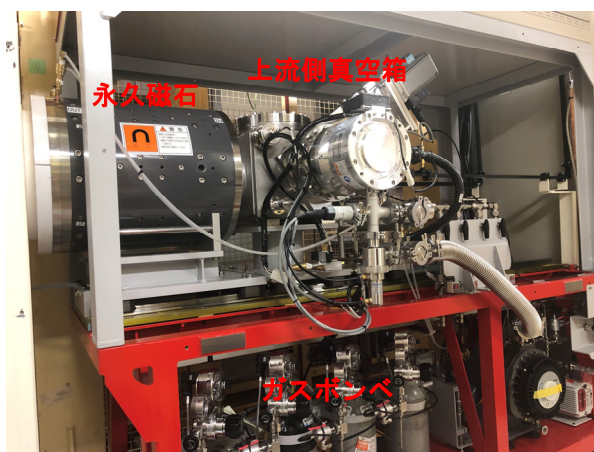


Figure 1: Photograph of the MIK source.

3. ビームテスト

3.1 ヘリウムのビームテスト

初めにイオン源内部のクリーニングを兼ねて He のビーム試験を行った。ヘリウムの価数分布は2価までしかないため、真空リークやアウトガスの判断が容易となる。Figure 2 にヘリウムの価数分布を示す。横軸が分析電磁石 (BM) の電流値で、縦軸が分析電磁石直後にあるファラデーカップで検出されたビーム電流値である。イオン源のパラメータは He²⁺が最大になるように調整した。Table 1 に He²⁺に調整したときと C⁴⁺に調整したときの、イオン源のパラメータを示す。ガスの調整はパルスバルブ (ソレノイドバルブ)を用いるため、制御パラメータとしてガスの圧力とバルブの開時間となる。今回のビーム調整で、目標値 (940 μA) を上回って、He²⁺で 1040 μA 得られた。価数分布内に、炭素、窒素、酸素などのイオンが観測されていないため大きなリークが存在しないことが分かった。しかしながら全体的に真空度が悪いので、今後クリーニングが進めば He²⁺の電流値がさらに増えることが期待できる。マイクロ波の出力を上げることによって、He²⁺の電

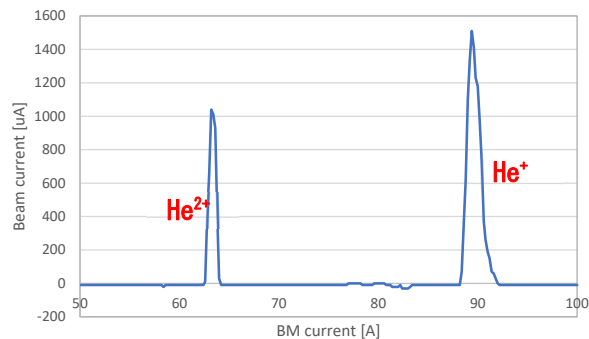


Figure 2: Charge state distribution of helium. Parameters of ion source were optimized for He²⁺ production.

流値を容易に上げることが期待できるが、炭素、窒素、酸素のような、残留ガスや真空リークでヘリウムガスに混ざった場合に、フルストリップのイオンができてしまうため少ないパワーでの調整を行っている。

3.2 炭素のビームテスト

次に CH₄ ガスを用いて炭素イオン生成試験を行った。Figure 3 に価数分布を示す。Figure 2 と同様に横軸が BM の電流値で縦軸がファラデーカップで検出されたビーム電流値である。運転パラメータは C⁴⁺に調整された (Table 1)。C⁴⁺の電流値は 230 μA となり、目標値には達していない。価数分布内に観測されている窒素と酸素が原因で、炭素の多価イオンの生成が困難な状態になっていると考えられる。ヘリウムの試験時には窒素、酸素がみられなかったため、イオン源本体のリークが原因ではなく、CH₄ のガス配管にリークがあると考えられる。また窒素より酸素が多いのは、プラズマチャンバーなどの真空部品に水もしくはアルコールが残っているため、CH₄ が乖離した水素や炭素と再結合し、イオン化されビームとして検出されていると考えられる。ヘリウムと同様にクリーニングを進めることにより、炭素の多価イオンの電流値が上がることを期待される。

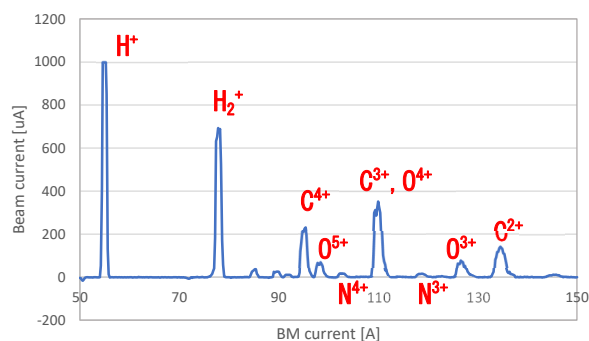


Figure 3: Charge state distribution of carbon. Parameters of ion source were optimized for C⁴⁺ production.

Table 1: Operation Parameters of MIK for Production of Helium and Carbon Ions

Item	Helium	Carbon
Gas		
Material	Helium	Methane
Gas pressure	0.031 MPa	0.0021 MPa
Pulse width	0.21 ms	0.22 ms
Microwave		
Frequency	14.16 GHz	14.025 GHz
Power	200 W	610 W
Pulse width	50 ms	50 ms
Repetition	1 Hz	1 Hz
High voltage		
Extraction voltage	20 kV	320 kV
Extraction current	6.64 mA	8.3 mA
Einzel voltage	12.5 kV	23.85 kV
Einzel current	1.08 mA	0.4 mA
Biased disk voltage	-90 V	-100 V
Vacuum pressure		
Upstream box	1.5e-4 Pa	3.2e-4 Pa
Downstream box	2.0e-4 Pa	4.0e-4 Pa
LEBT	1.0e-4 Pa	1.2e-4 Pa

4. まとめと今後の予定

住友重機と量研機構の共同研究で、マルチイオン照射に向けた、全永久磁石型小型 ECR イオン源の設計・製作を行った。初めのビーム確認として、ヘリウムガスとメタンガスを用いてそれぞれ He^{2+} と C^{4+} の生成試験を行った。ヘリウムでは目標値が達成できたが、炭素は目標値に届かなかった。しかしながらイオン源立ち上げ直後であり、クリーニングが十分でないため今後ビーム電流が増えることが期待できる。

今後は酸素、ネオンの生成を行う予定である。ほかに、イオン切り替え試験、長時間安定度試験などを行い、イオン源の性能の評価を行う。また、マイクロ波2重加熱法やガスミキシング法などを用いて、多価イオンの電流値増強を図る。

参考文献

- [1] A. Kitagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 65, 1087 (1994).
- [2] A. Kitagawa *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 69, 674 (1998).
- [3] M. Muramatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 76, 113304 1-6 (2005).
- [4] T. Miyata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 75, 1863 (2004).
- [5] T. Inaniwa., N. Kanematsu., Phys. Med. Biol. 61 542-550 (2016).
- [6] T. Inaniwa *et al.*, Phys. Med. Biol. 62 5180 (2017).
- [7] F. Ouchi *et al.*, PASJ2019, WEPI037.