

小型 ECR イオン源における多価イオン生成試験

PRODUCTION OF HIGHLY CHARGED ION AT KEI3 SOURCE

村松正幸^{#, A)}, 加藤裕史^{B)}, 高橋勝之^{C)}, 鈴木太久^{C)}, 大内章央^{C)}, 北川敦志^{A)}
Masayuki Muramatsu^{#, A)}, Yushi Kato^{B)}, Katsuyuki Takahashi^{C)}, Taku Suzuki^{C)}, Fumihisa Ouchi^{C)}
and Atsushi Kitagawa^{A)}

^{A)} National Institutes for Quantum Radiological Science and Technology, National Institute of Radiological Sciences

^{B)} Osaka University

^{C)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

A prototype compact electron cyclotron resonance ion source, named Kei3, based on Kei series has been developed for production of various ions at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). We investigated basic performance of the Kei3 source at previous experiment with gas mixing method, plate tuner and two-frequency-heating method. In order to increase a beam current of highly charged argon ion, we tested two-frequency-heating method with gas mixing method. Two Traveling-Wave-Tube (TWT) amplifiers were used for this experiment. Microwave frequency of TWT1 and TWT2 are 9.75-10.25 and 10-18 GHz, respectively. Mixing gas was Oxygen. As a result, beam current of Ar⁹⁺ was increased from 12.3 μ A to 40.0 μ A.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所(QST-NIRS)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、複数のイオン源を専有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設計と既存のイオン源を用いた開発を行っている[7]。

永久磁石のみで閉じ込め磁場を形成する小型 ECR イオン源の Kei3 は、様々なイオン種を供給するイオン源の試験機として開発された。治療用に開発された Kei シリーズと同じ磁場分布を採用しているため、炭素 4 価以外のイオンの生成が困難である。特に炭素より重いイオンの生成は困難である。これまでにガスミキシング法や、プレートチューナーを用いたマイクロ波導入の変更を行い、多価イオンのビーム強度増強を図ってきた[8,9]。

今回は、マイクロ波 2 重加熱法とガスミキシング法を組み合わせ、Ar の多価イオンのビーム強度増強を図った。

2. 実験方法

2.1 イオン源の構成

Figure 1 にイオン源の概略図を示す。Kei3 では、永久磁石の上流側にある真空箱から、WR-90 の矩形導波管を通してマイクロ波が導入される。マイクロ波源には NEC 社製の進行波管アンプ(LD79X75A1)を使用している。周波数が 9.75-10.25 GHz、最大出力が 750 W である。WR-75 導波管は、上流側真空箱の上部から導入され、既存の WR-90 導波管の上部に設置される。2重加熱用のマイクロ波源には Xicom 社製の進行波管アンプ(XTRD-300IJ)を使用した。周波数が 10-18 GHz、最大出力が 300 W である。WR-90 導波管の先端(上流側ミラー磁場ピーク)にプレートチューナーを設置し、駆動装置を使用して遠隔操作でその位置から上流側に 30 mm 動かすことができる。ガスも同様に上流真空箱から導入される。今回の実験ではアルゴンと酸素のガスを使用するため、2 つのマスフローコントローラーを用いてガスの流量を調整する。永久磁石とプラズマチェンバー、上流側真空箱、TWT1 はビーム引出のために 10 kV の電圧が印加される。引出電極からとりだされたイオンは、インツェルレンズで収束された後、90 度の分析電磁石で分析され、ファラデーカップで計測される。

2.2 2 重加熱試験

マイクロ波 2 重加熱の効果を確認するために、アルゴンでのビーム試験を行った。Kei3 は C⁴⁺生成を目的とした磁場分布なため、アルゴンなどの多価イオンの生成が困難である。今回の試験では 9 価のイオンに注目した。マイクロ波源を 2 台使用するため、NEC 社製の LD79X75A1 を TWT1、新たに設置した Xicom 社製の XTRD-300IJ を TWT2 とした。まず、TWT1 のみで Ar⁹⁺ が多く得られるようにパラメータ(ガス流量、マイクロ波パワー、引出電極位置)を調整した。そこに TWT2 のマイク

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

ロ波を導入し、 Ar^{9+} の周波数依存性を確認した。この時の TWT1 の周波数は 10 GHz で、TWT2 の周波数範囲は 12-18 GHz、パワーは 72 W である。次に、TWT1 のパワー依存性を確認した。この時の TWT1 の周波数は 10GHz、パワーの範囲は 76-700 W で、TWT2 の周波数は 15.5 GHz、パワーは 72 W である。プレートチューナーの位置は導波管の先端(上流側ミラー磁場のピーク)である。

同様の確認を、酸素を用いたガスマキシングの状態でも行った。TWT1 の周波数は 10 GHz、TWT2 の周波数範囲は 12-18 GHz、パワーは 72 W (周波数依存性)。TWT1 の周波数は 10GHz、パワーの範囲は 76-700 W で、TWT2 の周波数は 15.2 GHz、パワーは 72 W である(パワー依存性)。

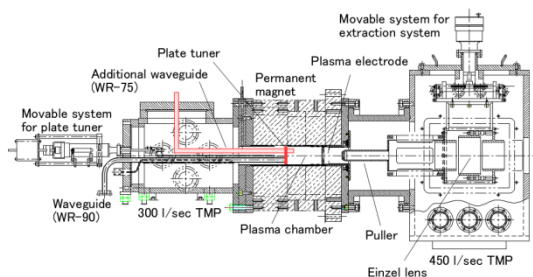


Figure 1: Schematic view of Kei3 source with additional waveguide.

3. 実験結果

3.1 TWT2 の周波数依存性

Figure 2 に Ar^{9+} のマイクロ波周波数依存性を示す。TWT1 の周波数を 10 GHz で固定とし、TWT2 の周波数を 12-18 GHz まで 0.1 GHz ステップで変化させたときの Ar^{9+} の電流値を確認した。プラズマの密度が変わった時のふるまいの変化を確認するために、TWT1 のパワーを 289, 547 W とした時の周波数依存性を確認している。TWT1 が 547 W、TWT2 の周波数が 15.5 GHz のときに、 Ar^{9+} のビーム電流が最大となり、12.3 μA であった。TWT2 の周波数が高い領域(16-18 GHz)で、ビーム電流が下がっており、また大きく変わっていることが確認された。前回の 2 重加熱試験では、TWT2 単体でこの周波数領域ではプラズマを点火することができなかった[9]。Kei3 は 10 GHz 付近で性能が出るように磁場が設計されているため、高い周波数では共鳴点が壁に近いことからプラズマが不安定になっていると考えられる。マイクロ波の出力を変えた時の、周波数依存性に大きな違いは見られなかった。

Figure 3 にガスマキシング時の Ar^{9+} のマイクロ波周波数依存性を示す。アルゴンガス単体の時と比較して、 Ar^{9+} の電流値が大きく上がっているのがわかる。TWT1 が 547 W、TWT2 の周波数が 15.2 GHz のときに、 Ar^{9+} のビーム電流が最大となり、40.0 μA であった。マイクロ波のパワーが 289 W の時は、アルゴンガス単体の時と同様に周波数の高い領域で不安定な状態が確認された。しか

しパワーが高いときは、比較的に安定であった。マイクロ波の出力が高いときに、ビームが多く得られる周波数領域が、低い方へシフトしているように見えた。

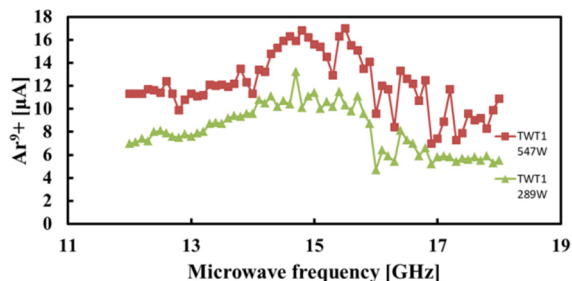


Figure 2: Dependence of Ar^{9+} current and microwave frequency of TWT2.

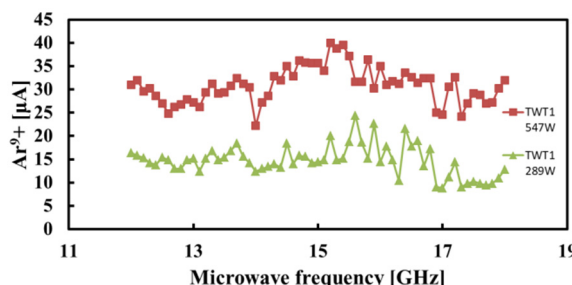


Figure 3: Dependence of Ar^{9+} current and microwave frequency of TWT2 with gas mixing method (Oxygen).

3.2 TWT1 のパワー依存性

Figure 4 に Ar^{9+} パワー依存性(TWT1)を示す。TWT1 単体の時は、400 W 以上のところで 10-12 μA と大きく増えることはなかった。TWT2 のマイクロ波(15.5 GHz, 72 W)を入れた時は、16.8 μA まで増えた。TWT1 のパワーが 547 W より高いところではビーム電流が下がっていき、696 W 以上ではプラズマが不安定になった。結果として、2 重加熱を行った場合、 Ar^{9+} のビーム電流を 3 割程度増やすことができた。

Figure 5 にガスマキシング時の Ar^{9+} の TWT1 パワー依存性を示す。TWT1 単体の時でも Ar^{9+} の電流値は大幅に増えて、38.4 μA となった。644 W より高いところでは、ビーム電流はほとんど増えなかった。TWT2 を加えた時は、アルゴンガス単体の時と同様に TWT1 のパワーが多いときに Ar^{9+} の電流値が下がる傾向が見られた。しかしプラズマが不安定になることは無かった。 Ar^{9+} の最大値は 547 W の時に 40.0 μA であった。

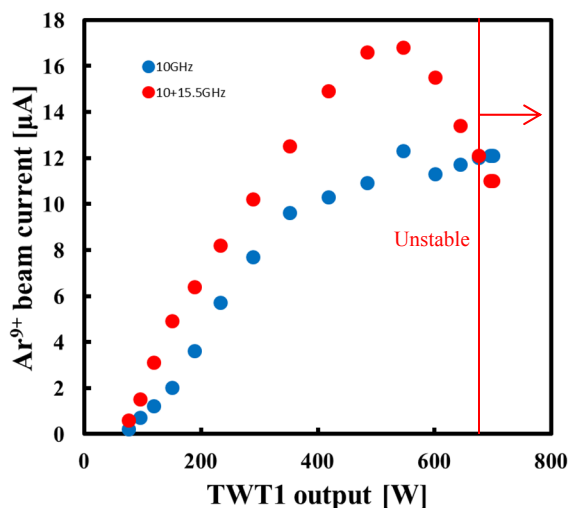


Figure 4: Dependence of Ar^{9+} current and microwave power of TWT1.

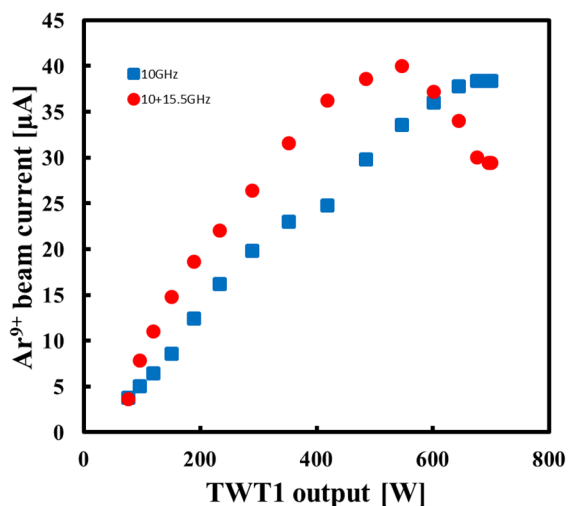


Figure 5: Dependence of Ar^{9+} current and microwave power of TWT1 with gas mixing method (Oxygen).

3.3 価数分布の比較

Figure 6 にアルゴンガス単体時の価数分布を示す。TWT2 を加えた時(10.0 + 15.5 GHz)の価数分布は、TWT1 のみの時と比較して 1 価の電流値は少し増えているが、2~8 価までの電流値は下がっており、9~11 価は増えている。Figure 7 にガスミキシング時のアルゴンの価数分布を示す。酸素を混ぜているため、同じ電荷質量比のイオンは分析電磁石で分離できず、 Ar^{5+} は O^{2+} と、 Ar^{10+} は O^{4+} と重なっている。2 重加熱時の価数分布は、1 価は変わらず、2~7 価は減少して、8~11 価までは増える結果となった。また、この時の酸素の価数分布の確認をした。Figure 8 に酸素の価数分布を示す。Figure 7 と同様に O^{2+} は Ar^{5+} と、 O^{4+} は Ar^{10+} と O^{4+} は重なっている。アルゴンと同様に価数分布が多価にシフトしているのがわかる。これらの結果から 2 重加熱を行ったときは、価数分

布が多価にシフトする結果となった。

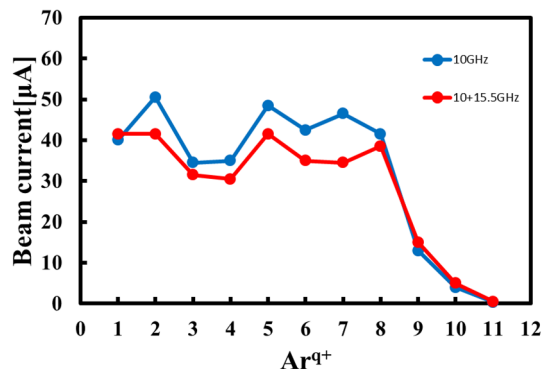


Figure 6: Charge state distributions of argon. Comparison between single heating (10.0 GHz) and two frequency heating (10.0 + 15.5 GHz).

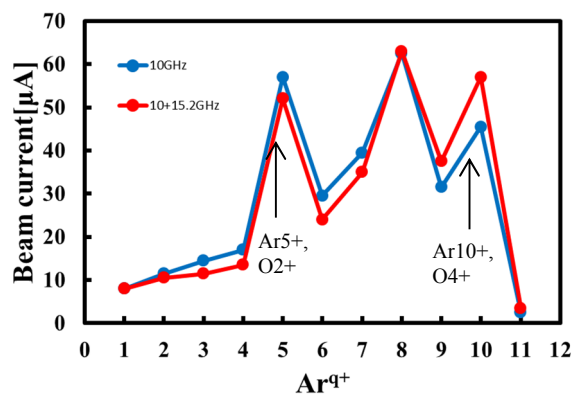


Figure 7: Charge state distributions of argon with gas mixing method (Oxygen). Comparison between single heating (10.0 GHz) and two frequency heating (10.0 + 15.2 GHz).

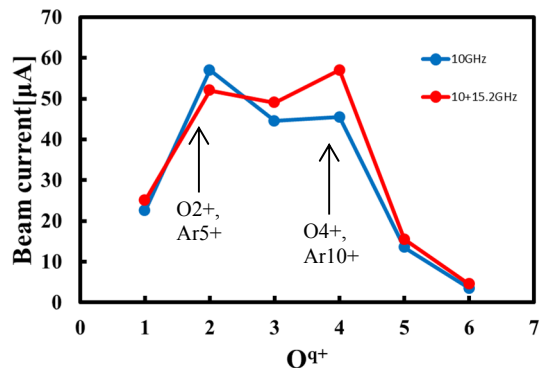


Figure 8: Charge state distributions of Oxygen with Argon gas. Comparison between single heating (10.0 GHz) and two heating (10.0 + 15.2 GHz).

4. まとめと今後の予定

小型 ECR イオン源 Kei3 においてガスミキシング法を
と組み合わせてマイクロ波2重加熱の試験を行い、アル
ゴンの多価イオンのビーム電流の増強を図った。この 2
つの手法を組み合わせることによって、 Ar^{9+} のビーム電
流は $12.3 \mu\text{A}$ から $40.0 \mu\text{A}$ まで増えた。また、マイクロ波
2 重加熱を行うと、価数分布が多価にシフトした。しかし
ながら、ガスミキシングの効果は観察できたものの、二重
周波数加熱についてはまだ最適なパラメータを求めるこ
とができていない。

今後は、He, C, Ne, Xe などのイオンで同様の結果が
得られるか確認する必要がある。また、プローブ法など
によるプラズマの状態を確認する予定である。

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.
- [8] M. Muamatsu *et al.*, PASJ2017 WEP114.
- [9] M. Muamatsu *et al.*, PASJ2018 THP037.