

マルチイオン照射のためのガスパルシング法を用いたイオン種の切替

SWITCHING TECHNIQUE OF ION SPECIES WITH GAS PULSING METHOD AT NIRS-HEC ION SOURCE FOR MULTI-ION IRRADIATION

高橋勝之^{#, A)}, 鈴木太久^{A)}, 大内章央^{A)}, 白石直浩^{A)}, 佐々野利信^{A)}
村松正幸^{B)}, 水島康太^{B)}, 岩田佳之^{B)}

Katsuyuki Takahashi^{#, A)}, Taku Suzuki^{A)}, Fumihisa Ouchi^{A)}, Tadahiro Shiraishi^{A)}, Toshinobu Sasano^{A)}
Masayuki Muramatsu^{B)}, Kota Mizushima^{B)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

^{B)} National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

Various ions are produced for medical use as well as biological and physical experiments by the four ion sources in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) at the National Institute of Radiological Sciences (NIRS). The multi-ion irradiation is being studied to further optimize dose and Liner Energy Transfer distributions on a tumor in a patient. In the multi-ion irradiation, several kinds of ions, such as helium, carbon, oxygen and neon ions, as produced by those ion sources, are to be accelerated by the HIMAC and directed to a tumor. It is trivial to produce various ion species by using more than one ion sources. However, we proposed the switching method to provide various ions only with one ion source. In this method, ionization gases of helium, carbon dioxide and neon are mixed and used to produce He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} and Ne^{4+} ions, simultaneously. The required intensity of He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} and Ne^{4+} are 500 μA , 150 μA , 230 μA and 300 μA , respectively. Initially, we tested production of He^{2+} , C^{2+} and O^{3+} ions with mixing gases of helium and carbon dioxide by using the 18 GHz NIRS-HEC. Then, we measured the switching time of different ion species with the gas-pulsing method. As a result, we found that the switching time with the gas-pulsing method was shorter than that of the conventional method. This switching technique of different ion species with the gas-pulsing method as well as preliminary results of beam tests is described in this paper.

1. はじめに

放射線医学総合研究所(NIRS)の重粒子線がん治療装置(HIMAC)では、4 台のイオン源を用いてビーム供給を行っている。電磁石で閉じ込め磁場を形成する 10 GHz ECR イオン源(NIRS-ECR) [1]と 18 GHz ECR イオン源(NIRS-HEC) [2]、永久磁石で閉じ込め磁場を形成する小型 ECR イオン源(Kei2) [3]、PIG 型イオン源[4]が稼働しており、これらのイオン源で様々なイオン種(H^+ - Xe^{21+})を生成している。治療に必要な炭素イオンは NIRS-ECR で生成している。治療は火曜日から金曜日までの昼間 8:30~19:30 の時間帯に行っている。一方、平日夜 21:00~7:00 の時間帯と週末は生物・物理実験が行われている。生物・物理実験では様々なイオン種の実験が行われる。それらのイオン種は主に NIRS-HEC と NIRS-PIG イオン源から供給している。

現在、NIRS では数種類のイオンを標的に照射することで、がん治療における生物学的効果比が理想的な 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]。マルチイオン照射では、ユーザーからの要求に応じて、1 照射ごとにイオン種を切り替える必要があるため、迅速なイオン種切替が要求される。想定されるイオン種はヘリウム、炭素、酸素、ネオンの 4 種類で、複数のイオン源を専有すれば比較的容易に切替可能となるが、今後の普及展開を見据えて 1 台のイオン源で行うことが望ましい。また、マシンタイム編成上、複数台の

イオン源を占有することは非常に困難となる。従って、1 台のイオン源で 4 種類のイオンを供給する必要がある。この場合のイオン種切替時間は数分以内とした。

4 種類のイオンを生成するため、イオン源に導入するガスはヘリウムガス、 CO_2 ガス、ネオンガスの 3 種類とした。また、生成するイオンは質量電荷比が重ならず、かつビーム電流を確保できる He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} , Ne^{4+} とし、ビーム電流の目標値はそれぞれ 500 μA , 150 μA , 230 μA , 300 μA とした。試験は治療供給に支障を出さず、かつ普及型イオン源と同じ ECR 型である NIRS-HEC を用いた。イオン源でイオン種を切り替える場合は、目的のイオンのガスを混ぜて同時に生成する場合と、単一のガスを導入してイオン種切替の度にガス切替を行う場合が考えられる。前者の場合は、分析磁場と加速ギャップ電圧のみ変更すればイオン種切替が可能のため、切替時間が短くて済む。しかし、イオン種毎に適したパラメーターにできないため、ビーム電流の目標値を達成することが困難になる。後者の場合は、イオン種毎に適したパラメーターとすることは可能だが、ガスを切り替える必要があるため、イオン源が安定になるまでビーム電流が変動し、切替に時間がかかる。ここでは、ガスをミキシングした場合と、ガスパルシング法を用いてイオン種切替を行った時の試験を実施したので報告する。

2. ガスミキシング試験

2.1 条件

NIRS-HEC はマイクロ波源として、周波数 18 GHz、出

[#] acc2g@qst.go.jp

力 1400 W のクライストロンアンプと、周波数 17.10 - 18.55 GHz、出力 1200 W の進行波管アンプの 2 台が使用されているが、今回の試験はクライストロンアンプのみで実験を行った。ガス流量制御にはリンテック社製のマスフローコントロールバルブ (MFC) が使用されており、最大流量 (Ar 換算) が 0.1 SCCM である。Figure 1 にガスキッキング試験時のガス配管構成を示す。

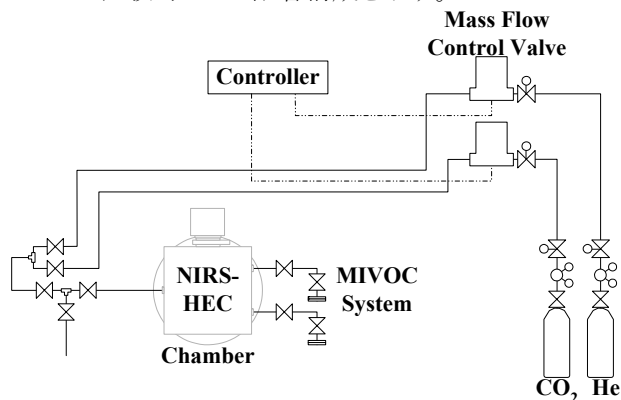


Figure 1: The gas piping diagram with mass flow control valve for NIRS-HEC.

ガスキッキング試験では、NIRS-HEC を用いて CO₂ ガスとヘリウムガスを同時に導入し、He²⁺、C²⁺、O³⁺の生成量の調査を行った。ただし、各イオン生成時のパラメーターは分析磁場と加速ギャップ電圧以外は同様とした。各イオンが目標電流値を達成するためのパラメーターを調査するため、マイクロ波パワー、CO₂ ガス量、上流側ミラー磁場それぞれを変化させた時の各イオンのビーム電流値を調査した。この調査を行った時のヘリウムガス量は 0.075 cc/min、引出電圧は 27 kV、下流側ミラーコイルの電流値は 500 A とした。

2.2 マイクロ波パワーの調査

Figure 2 にマイクロ波パワーを変化させた時の He²⁺、C²⁺、O³⁺の変化を示す。この時の CO₂ ガス量は 0.016 cc/min、上流側ミラーコイルの電流値は 840 A とした。マイクロ波パワーを上げていくと、He²⁺は増加するが、O³⁺、C²⁺は減少する傾向となった。これより He²⁺を増やす為にはマイクロ波パワーを上げる必要があるが、C²⁺、O³⁺を増やす為には下げる必要があることがわかった。

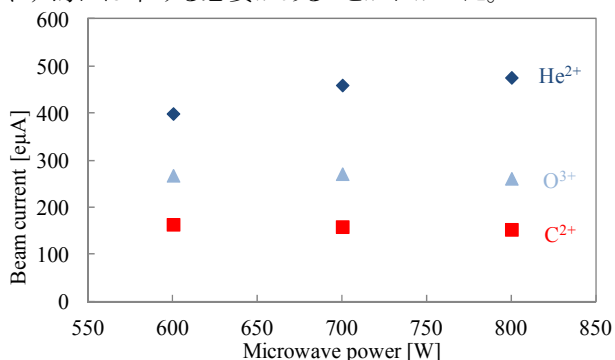


Figure 2: The dependence of microwave power.

2.3 CO₂ ガス量の調査

Figure 3 に He ガス量を固定して CO₂ ガス量のみ変化させた場合の He²⁺、C²⁺、O³⁺の変化を示す。この時のマイクロ波パワーは 800 W、上流側ミラーコイルの電流値は 840 A とした。CO₂ ガス量を増加させると、O³⁺、C²⁺は増加するが He²⁺は減少傾向となった。これより He²⁺を増やす為には CO₂ ガス量を少なくする必要があるが、C²⁺、O³⁺を増やす為には多くする必要があることがわかった。

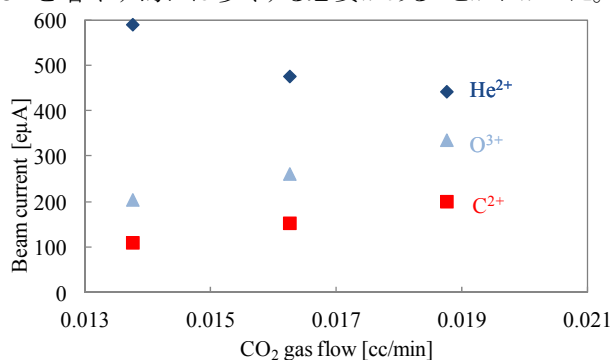


Figure 3: The dependence of CO₂ gas flow.

2.4 ミラー磁場の調査

Figure 4 に上流側ミラー磁場を変化させた場合の He²⁺、C²⁺、O³⁺の変化を示す。この時のマイクロ波パワーは 800 W、CO₂ ガス量は 0.016 cc/min とした。上流側ミラー磁場依存性はコイル電流が 740 A、790 A、840 A の時の各イオンのビーム電流値をそれぞれ取得した。コイル電流が 740 A の時と 790 A の時を比較すると、各イオン全てにおいて 790 A の時の方が多かった。しかし、840 A まで上げても各イオンのビーム電流値にほとんど変化がなかった。これより上流側ミラーコイル電流値は 790 A 程度で十分と思われる。

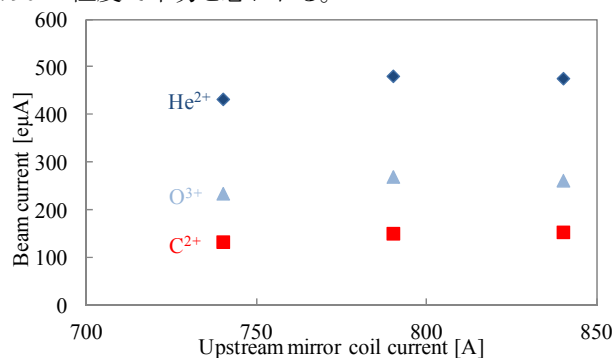


Figure 4: The dependence of upstream mirror magnetic field.

2.5 結果

マイクロ波パワー依存性と CO₂ ガス量依存性では He²⁺と C²⁺、O³⁺で逆の傾向を示すことがわかった。上流側ミラー磁場依存性は各イオンであり変化は無く、各イオン全てにおいて電流値は 790 A の時が最も多かった。今回の試験では、最も目標値に近づいた時で He²⁺、C²⁺、O³⁺がそれぞれ 481 e.u.A、150 e.u.A、270 e.u.A であり、He²⁺がわずかに目標値である 500 e.u.A に届かなかったが概

ね目標を達成できた。しかし、マイクロ波パワー依存性とCO₂ガス量依存性がHe²⁺とC²⁺, O³⁺で逆の傾向を示したため、調整が非常に困難であった。さらにネオンガスを追加するとすれば、より各イオンの挙動は複雑さを増し、目標値を達成することは困難になると考えられる。

3. ガスパルシング法を用いたイオン種切替試験

3.1 条件

ガスパルシング法とは、流量制御装置等を用いて常時ガスを流す手法と異なり、ゲート信号等を利用し、ガスをパルス的に導入する手法である。2003年[4]、2017年[7]にNIRS-PIGで試験が実施されており、主な目的は導入ガスを削減し、真空度を改善することにあつた。しかし、ここではガスを即座に導入・遮断できる点に着目し、残留ガスを減らすことでイオン種の切替時間がどの程度短縮されるのか試験を実施した。

今回の試験では、ガスパルシング法を用いるため、Parker社製のパルスバルブ(Series 9)とパルスバルブドライバ(IOTA ONE)を使用した。バルブの動作圧は真空~8.6 MPa、動作速度は160 μsecである。イオン種切替試験もガスマキシング試験と同様にNIRS-HECを用いて行った。NIRS-HECはパルスイオン源であり、マイクロ波源が0.05 sec ~ 0.825 sec周期程度でパルス運転している。試験ではNIRS-HECと同期させるためのゲート信号をパルスバルブドライバに入力し、パルスバルブの開閉制御を行った。

Figure 5にパルスバルブを用いたガス配管構成を示す。ガスパルシング法はCO₂ガスに用いることとし、パルスバルブにCO₂ガスを接続してヘリウムガス、ネオンガスはMFCで制御した。この時パルスバルブにかかるCO₂ガスの圧力は0.04 MPaとした。

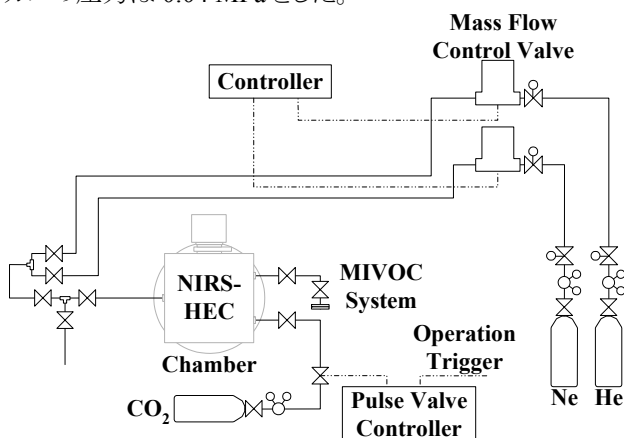


Figure 5: The gas piping diagram with gas pulsing method.

3.2 ガスパルシング法の有効性

イオン種切替試験は、まずFig. 1の状態ではMFCの設定値変更のみで行った。Figure 6にO³⁺からHe²⁺、He²⁺からO³⁺切替後のそれぞれのビーム電流値の変化を示す。縦軸はO³⁺、He²⁺それぞれのビーム電流値、横軸は経過時間を示しており、0が切替開始時間である。He²⁺

からO³⁺切替後は3分程度で電流値の急な変動は収まっているが、O³⁺からHe²⁺切替後は電流値の変動が収まるまで10分以上かかった。O³⁺からHe²⁺への切替に時間がかかる原因は、ガスマキシング試験のCO₂ガス量依存性の結果より、CO₂ガスがHe²⁺に影響を及ぼすことがわかっていたため、CO₂の残留ガスが影響していることが考えられる。そこで、Fig. 5のCO₂ガスにガスパルシング法を用いた構成にして、切替後CO₂ガスを即座に遮断できるようにした。

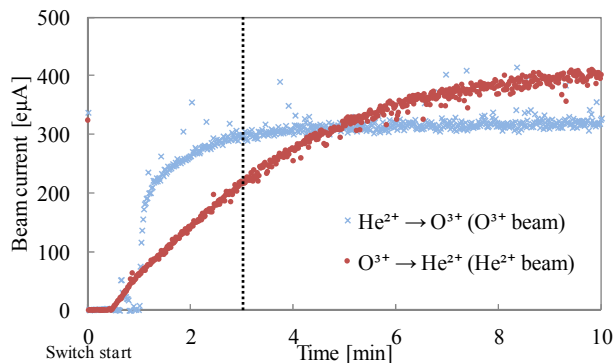


Figure 6: The reproducibility at the switching from O³⁺ to He²⁺ and He²⁺ to O³⁺.

Figure 7はパルスバルブへのパルス幅を0.22 msecから0 msecに変更した時と、MFCの流量設定値を0.016 cc/minから0 cc/minに変更した時のNIRS-HEC内の真空度変化を示している。横軸は時間で縦軸は真空度を示しており、縦軸は対数表示になっている。Figure 1と5で構成が異なるためか、到達真空度は若干ガスパルシング法を用いた時の方が悪くなった。しかし、圧力の減少速度は明らかにガスパルシング法の時の方が早く、圧力が減少を始めてから約1分で1.0 E - 5 Paに達している。一方MFCの時はそのままで達するのに約3分かかっている。これより、ガスパルシング法を用いた方が残留ガスを早く減らせると考えられる。

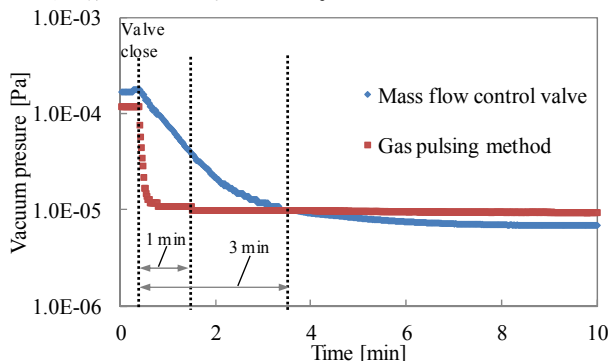


Figure 7: Vacuum pressure when the gas was stopped with mass flow control valve or gas pulsing method.

Figure 8にMFCの場合とガスパルシング法を用いた場合のO³⁺からHe²⁺切替後のビーム電流値変化を示す。MFCの場合のものはFig. 6と同じである。電流値の変動はガスパルシング法を用いた時の方が早く収まり、電流値が安定になるまでの時間は2~3分程度とMFCの時と比較して7分以上も早かった。これより、CO₂の残留ガスが与えるHe²⁺への影響は大きく、ガスを即座に遮断

可能なガスパルシング法はイオン種切替に有効と考えられる。

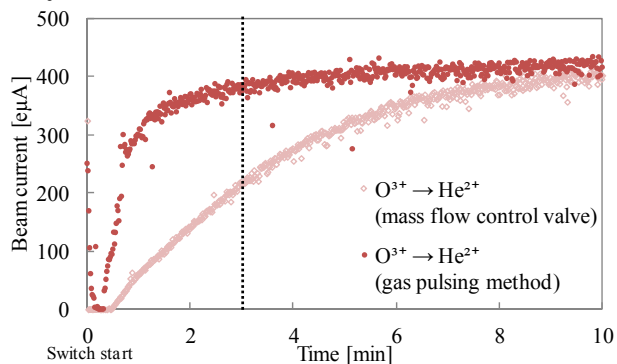


Figure 8: The reproducibility of He^{2+} at the switching of O^{3+} with mass flow control valve or gas pulsing method.

3.3 イオン種切替試験結果

Figures 9, 10, 11, 12 に He^{2+} から C^{2+} , O^{3+} , Ne^{4+} に切り替えた時、 C^{2+} から He^{2+} , O^{3+} , Ne^{4+} に切り替えた時、 O^{3+} から He^{2+} , C^{2+} , Ne^{4+} に切り替えた時、 Ne^{4+} から He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} に切り替えた時の各イオンの電流値の変化をそれぞれ示す。Figure 9 より、 He^{2+} から切替後、各イオンの電流値が安定になるまでの時間は 2~3 分程度であった。 He^{2+} は MFC で流量制御しているが、 He^{2+} からの切替時間は比較的短かった。これより、ヘリウムガスが C^{2+} , O^{3+} , Ne^{4+} に与える影響は小さいと考えられる。Figures 10, 11 はいずれも CO_2 ガスからの切替のため同様の傾向を示していた。 He^{2+} , Ne^{4+} への切替はいずれも 2~3 分程度、 C^{2+} と O^{3+} 間の切替に関しては分析磁場と加速ギャップ電圧以外は同様のパラメーターとしたため、切替時間は数十秒程度となった。Figure 12 はネオンガスから切り替えた場合であるが、イオン種の切替パターンの中では最も時間のかかる切替であった。この時は He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} いずれに切り替える場合でも 4~5 分程度かかった。これより、ヘリウムガスよりもネオンガスの方が各イオンに与える影響が大きいと考えられる。今後はまずネオンガスにもガスパルシング法を用い、将来的には 3 種全てのガスでガスパルシングが行えるよう検討する。

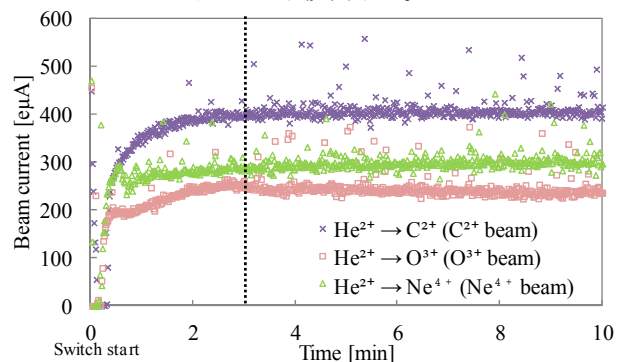


Figure 9: The reproducibility of C^{2+} , O^{3+} and Ne^{4+} at the switching of He^{2+} .

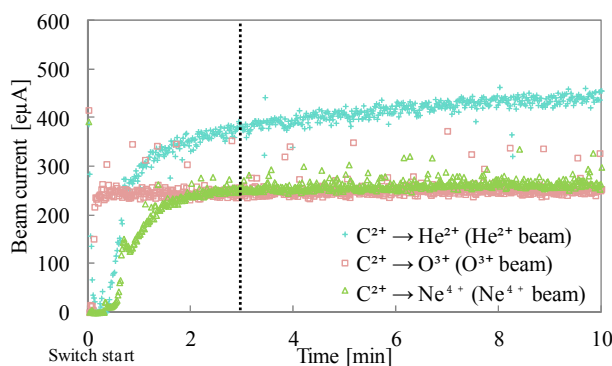


Figure 10: The reproducibility of He^{2+} , O^{3+} and Ne^{4+} at the switching of C^{2+} .

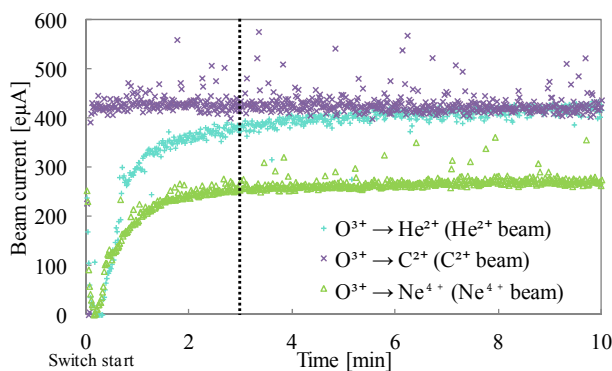


Figure 11: The reproducibility of He^{2+} , C^{2+} and Ne^{4+} at the switching of O^{3+} .

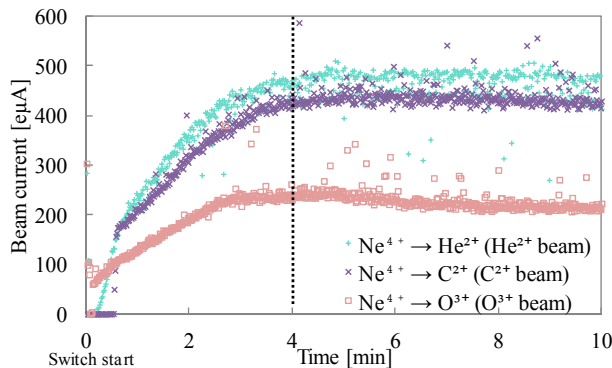


Figure 12: The reproducibility of He^{2+} , C^{2+} and O^{3+} at the switching of Ne^{4+} .

4. まとめ

ガスミキシング試験では、同じパラメーターで He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} がそれぞれ 481 e.u.A, 150 e.u.A, 270 e.u.A となり、ビーム電流の目標値を概ね達成できた。マイクロ波パワー、 CO_2 ガス量の調査では He^{2+} と C^{2+} , O^{3+} で反対の傾向を示すことがわかった。上流側ミラー磁場の調査では He^{2+} , C^{2+} , O^{3+} が最も多く得られたのは 790 A の時であった。

イオン種切替試験では、 CO_2 の残留ガスが He^{2+} への切替時間に影響していることがわかった。そこで、 CO_2 ガスにガスパルシング法を用いることで、切替時間を 7 分以上短縮させることに成功した。この状態で各イオンから

PASJ2018 WEP043

の全切替パターンを試験したところ、 He^{2+} 、 C^{2+} 、 O^{3+} から切り替える場合は 2~3 分以内であったが、 Ne^{4+} からの切替のみ 4~5 分程度と他より時間がかかった。今後はまずネオンガスにもガスパルス法を用い、将来的には 3 種全てのガスでガスパルス法が行えるよう検討する。

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] H. Ii *et al.*, PASJ2017 WEP113.