

NIRS-PIG におけるガスのパルス化試験 STUDY OF GAS-PULSING METHOD AT NIRS-PIG

井博志^{#, A)}, 白石直浩^{A)}, 高橋勝之^{A)}, 山本貢^{A)}, 佐々野利信^{A)}, 高杉亘^{A)}, 川島祐洋^{A)}
岩田佳之^{B)}, 村松正幸^{B)},

Hiroshi Ii^{#, A)}, Tadahiro Shiraishi^{A)}, Katsuyuki Takahashi^{A)}, Mitsugu Yamamoto^{A)}, Toshinobu Sasano^{A)}
Wataru Takasugi^{A)}, Masahiro Kawashima^{A)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Masayuki Muramatsu^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

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

Abstract

Three ion sources produce various ions for medical use and biological and physical experiment at Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC). NIRS-PIG is operated pulsed mode for production of highly charged ion and to extend life time of ion source. However ionization gas is injected continuously, in addition PIG need a lot of ionization gas for production of H_2^+ and He^+ ions. The gas is flowing out to the Low Energy Beam Transport (LEBT) line, which is shared with other two ion sources. The transmission efficiency of the beam transport from other ion sources at LEBT become worse with vacuum deteriorate due to the gas from ion sources. So gas-pulsing method using piezo-electric type gas valve (piezo-valve) is necessary to improve the vacuum at LEBT. Piezo-valve operable is under the conditions of strong magnetic field and high voltage for production of pulsed gasdischarge that solenoid-type gas valve is inoperable. Producing H_2^+ ion by PIG source with gas-pulsing reduce, the beam loss of highly charged ions from LEBT to around 5 %. The gas pulsing method and preliminary result are described in this paper.

1. はじめに

重粒子がん治療装置(HIMAC)の入射器は 10 GHz ECR イオン源(NIRS-ECR)[1]、18 GHz ECR イオン源(NIRS-HEC)[2]、PIG イオン源(NIRS-PIG)[3]、100 MHz RFQ 線形加速器、100 MHz DTL で構成されている。Figure 1 に HIMAC 入射器の概略図を示す。

HIMAC では、治療供給の他に生物・物理実験の為に様々なイオンを生成し同時に供給している。したがって HIMAC の入射器は 3 台のイオン源から 1 台の線形加速器に対して加速タイミングをずらして別々の核種のビームを導入しており、イオン源はパルスの様に運転していることになる。

NIRS-PIG イオン源において H_2^+ 及び He^+ の生成には多量のガスを必要とするが、イオン化されなかったガスは線形加速器手前にある共通のビーム輸送ラインである LEBT(Low Energy Beam Transport)に流れ出している。現在までに見つかっている影響として NIRS-HEC で Xe^{22+} または Xe^{21+} を供給している際に Xe ビームの強度が低下することが解っている。

そこで NIRS-PIG のビーム生成に必要なガスをパルスの様に導入することでビーム輸送ラインに流れ出すガス量を削減し、ビーム輸送効率の向上を図った。また、ガスをパルスの様に導入することで上記の他に、消費ガスの削減も可能となる。NIRS-PIG では 2003 年 9 月にソレノイドバ

ルブを用いてガスのパルス化を行い、多価のイオンを生成する実験を行っている[3]。しかし、電磁石の磁場の影響でソレノイドバルブが動作しなくなってしまうことが課題となった。

今回はガスのパルス化により他のイオン源からの供給に影響を与えないことを目的とし、上記の経験を踏まえ、磁場の影響を受けにくいピエゾバルブを既設のガス供給ラインに設置した。外部トリガによる開閉制御を行うことでイオン化ガスをパルスの様に導入する手法を検討し、主に H_2^+ 供給におけるガスのパルス化について調査を行った。

[#] acc2g@qst.go.jp

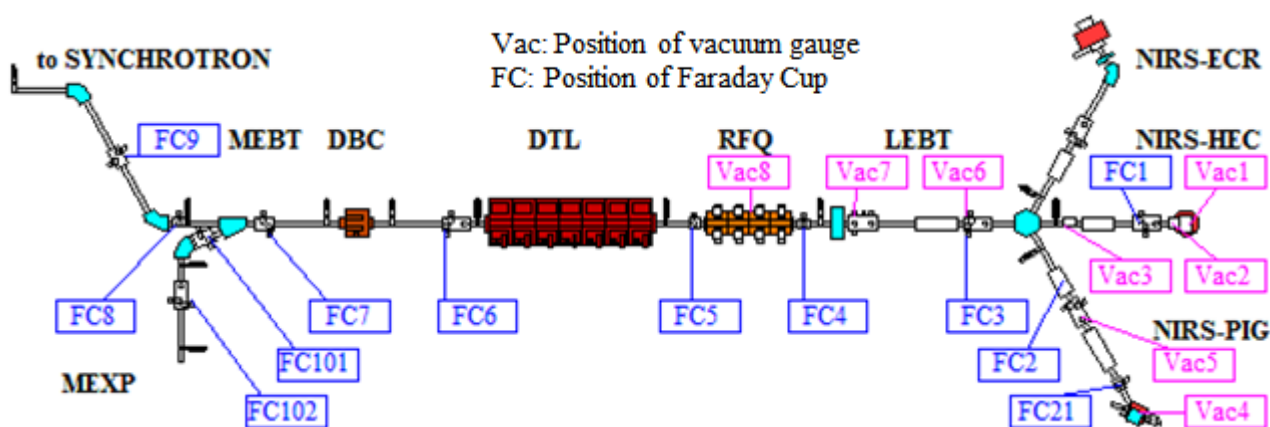


Figure 1: Layout of HIMAC injector.

2. イオン化ガスのパルス化実験

NIRS-PIG はアーク電源をパルス運転しており、それと同様に外部トリガによってピエゾバルブの開閉制御を行った。ガス導入遅延時間及びピエゾバルブ開閉時間を設定することで、イオン源内にガスを導入するタイミング及びガス量を調整している。まずは、実際にイオン化ガスがパルスのようにイオン源内に導入され、イオン源の運転に必要な条件が作れるか調査を行った。使用したピエゾバルブはリンテック社製のマスフローコントロールバルブ(MFC)で最大流量(Ar 換算)が 0.1 SCCM である。

次に H_2 ガスを用いて H_2^+ ビームの生成を試みた。通常供給の場合、アーク電圧を掛けるタイミングでイオン源内の真空度を $2.0E-03$ Pa 付近にする必要があり、パルス運転時においても減圧弁の圧力、ピエゾバルブを開閉するタイミング及び時間を調整して、通常供給と同等のイオン源直後のビーム強度が確保出来るか調査を行った。

イオン源でのビーム強度が確保出来たところでビーム輸送ラインにビームを供給し、通常供給運転時とガスパルス運転時とでビーム輸送ラインの真空度及び輸送効率にどれだけ改善がみられたか確認を行った。

3. 実験結果

3.1 ガスのパルス化

Figure 2 にガスをパルス化した時の真空度の変化を示す。それぞれ CH1 はピエゾバルブの開閉指令を示し、High で開、Low で閉となる。CH2 はイオン源内の真空度を示す。通常供給時は連続的にガスを導入しているため真空度は $2.0E-03$ Pa でほぼ一定である。Figure 2 からピエゾバルブが開閉することで実際に真空度が変動していることが確認できる。

イオン源内の真空度及び真空度変動開始のタイミングを調整するには、減圧弁の二次圧、ピエゾバルブの開閉時間が効果的であった。

上記の方法でプラズマ生成に必要な真空度である $2.0E-03$ Pa 付近に調整することが出来たがパルス毎の

真空度変動が不安定であった (Figure 3)。不安定な要因として、設定した開閉時間にピエゾバルブの動作が追いつかず正常に開閉出来ていないことが考えられる。ピエゾバルブを安定に動作させる為に、開閉時間と圧力の調査を行った。最も安定してガスの導入が行えたのは減圧弁の二次圧が 0.1 MPa で、開閉時間が 30 msec の時であった。またピエゾバルブの開閉時間を 60 msec 以上長くすると、インターロックでターボ分子ポンプが停止してしまう真空度になる為、今後は本調査で使用したピエゾバルブより応答性の良いピエゾバルブを使用して調査を行う予定である。

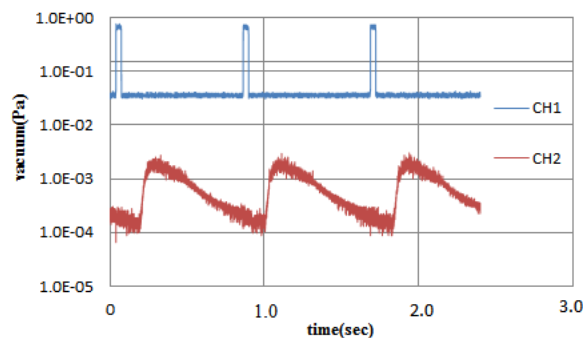


Figure 2: Vacuum pressure at NIRS-PIG source (gas pressure : 0.1 MPa, pulse width : 30 msec).

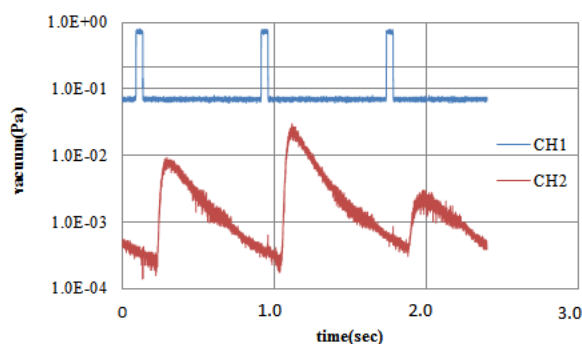


Figure 3: Vacuum pressure at NIRS-PIG source (gas pressure : 0.1 MPa, pulse width : 40 msec).

ガスパルス化を行ったことにより、連続でガスを導入した時よりガスの消費を削減できることが出来た。Figure 4より、ビーム供給に必要な真空度 (2.0×10^{-3} Pa) に調整されていることが解る。したがって、塗り潰された部分が削減されたガス量となる。

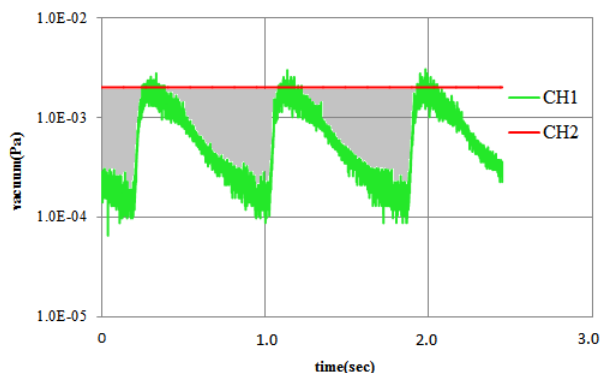


Figure 4: Vacuum pressure at NIRS-PIG source (CH1:gas pulsing、CH2:without gas pulsing).

3.2 ビーム引出試験

ガスのパルス化が達成された為、 H_2^+ のビーム引出試験を行った。Figure 5 に試験時のアーク電圧と引き出されたビーム電流値を示す。それぞれ CH1 が Arc 電流、CH2 がファラデーカップ (FC) で検出された電流値となる。尚、引出電圧は通常時と同じ 15.3 kV とした。

試験の結果、Arc 電圧は-75.21 V、ビーム電流値は 1.5 mA となり、通常時と遜色無い結果が得られた。

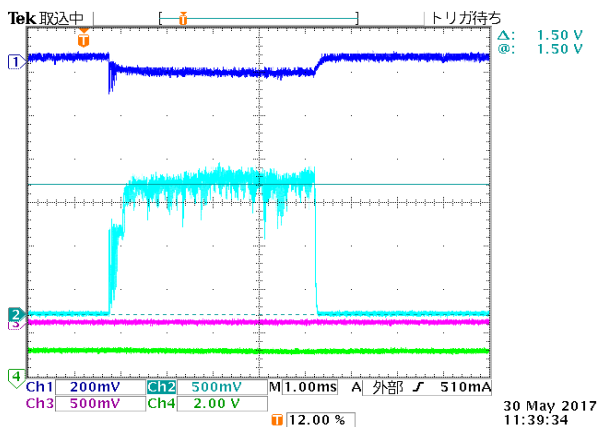


Figure 5: Beam pulse of H_2^+ . CH1:Arc voltage(200 mV/div), CH2:Beam current(0.5 mA/div)

3.3 他イオン源の供給に与える影響

Table 1 に HIMAC 入射器の真空度を示す。真空ゲージ (Vac) の位置とファラデーカップ (FC) の位置は Figure 1 を参照。NIRS-PIG をガスパルス化することによってビーム輸送ラインの真空度が改善された。その結果、Xe ビームの輸送効率を 5 %程度改善することが出来た。(Table 2)

Table 1: Vacuum Pressure at Beam Transport (Pa)

Gauge Position	HEC Only	HEC(PIG DC)	HEC(PIG GP)
Vac1	9.4E-05	9.4E-05	1.0E-04
Vac2	5.2E-05	6.0E-05	6.0E-05
Vac3	1.6E-05	3.6E-05	1.9E-05
Vac4	2.6E-03	2.6E-03	6.8E-04
Vac5	5.4E-04	4.3E-04	1.4E-04
Vac6	1.4E-05	8.3E-05	2.7E-05
Vac7	6.3E-06	2.1E-05	8.9E-06
Vac8	2.6E-06	3.6E-06	2.7E-06

Table 2: Beam Current at Beam Transport (μA)

	FC1	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC101	FC102
PIG DC	130	100	90	75	130	120	150	38
PIG Pulse	130	100	93	75	145	130	165	40
PIG 無し	130	105	100	85	165	155	195	47

4. まとめ

今回の実験でピエゾバルブを使用したガスパルス化が可能であることが確認された。また、ガスパルス化でのプラズマ生成と H_2^+ ビーム引出を行い、通常運転時同様のビーム電流が得られた。ガスのパルス化によってビーム輸送効率の改善及び消費ガス量の削減に成功した。しかし、パルス毎の真空度が不安定であるため、パルス毎にビーム強度が変動していた。今後はパルス毎の真空度変動を安定化させる方法と輸送効率の向上を検討する。また、他のイオン源でもガスのパルス化を検討し、希少ガスの消費量削減を目指す。

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] T. Miyata *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 75, 1863 (2004).