

RI ビームがん治療用 ISOL システムに用いる 1 価イオン源のイオン生成効率 ION PRODUCTION EFFICIENCY OF SINGLY CHARGED ION SOURCE FOR HEAVY-ION CANCER THERAPY WITH RADIOACTIVE IONS

片桐 健, 野田 章, 涌井崇志, 北條 悟, 白井 敏之, 野田耕司

量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

Ken Katagiri,* Akira Noda, Kotaro Nagatsu, Takashi Wakui, and Koji Noda

QST/NIRS

Abstract

Ion production efficiency of an electron impact singly charged ion source (SCIS) has been investigated. The SCIS has been developed to be employed for an ISOL (Isotope Separation On-Line) system, which provides ^{11}C ions to treatment rooms for heavy-ion cancer therapy simultaneously with real-time verification of an irradiation field using PET (Positron Emission Tomography). To provide sufficient ^{11}C ions to the treatment rooms, the SCIS has to realize ionization efficiency of 1% for production of singly charged ^{11}C ions. In previous work, the SCIS was designed based on particle in cell simulation [1]. With the fabricated SCIS, we measured the ion production efficiency for CO_2^+ ion production from CO_2 molecules and that for C^+ ion production from CH_4 ions. We found that the SCIS achieved the efficiency of $\varepsilon_{\text{C}^+} = 5 \times 10^{-3}$ (0.5%) for the C^+ production, and $\varepsilon_{\text{CO}_2^+} = 5.5 \times 10^{-2}$ (5.5%) for CO_2^+ production [2].

1. はじめに

放射線医学総合研究所の HIMAC 加速器を用いた重粒子線治療は、1994 年の治療開始から今年で 23 年目を迎え、10,000 人以上もの患者に治療が適用されてきた [3]. より高精度な治療照射を行う為に、細い炭素ビームでがんの病巣を塗りつぶすように照射を行うスキヤニング照射法による治療が 2011 年より開始された [4]. さらなる高精度化のために、照射野をリアルタイムに検証する技術の実現が期待されている。現在治療に用いている安定核の ^{12}C ビームの代わりに、陽電子放出核である ^{11}C ビームを用いることができれば、体内での停止位置から放出される消滅 γ 線を PET 装置により測定することで、随時ビーム位置を検出することができ、その結果として、リアルタイムに照射野を検証することが可能となる。我々は、この重粒子線治療のための照射野検証技術の実現のために、Isotope Separation On-Line (ISOL) 法により ^{11}C ビーム生成し、HIMAC で加速し治療室へと供給することを検討している。この計画の概念図を Fig. 1 に示す。HIMAC シンクロトロンにおける一度の入射-加速-供給シーケンスにて、 10^9 個の ^{11}C イオンを治療室に供給することを想定すると、上流のイオン源からは 10^{10} 個の供給が必要となる。この 10^{10}

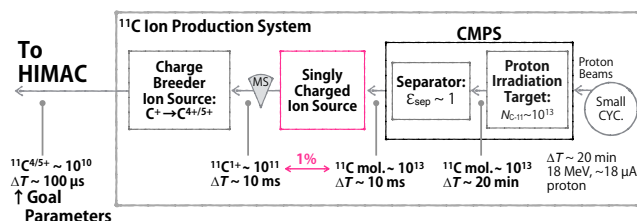


Figure 1: One of the possible schemes for ^{11}C ion production.

* katagiri.ken@qst.go.jp

個の ^{11}C イオンの生成・加速を目指して ISOL システムの開発を進めている。この ISOL システムは、小型サイクロトロン、 ^{11}C 分子生成分離装置 (CMPS)、1 価イオン源 (SCIS) と荷電増幅用 EBIS イオン源から構成される。CMPS では、ターゲットにプロトン照射を行い、生成された ^{11}C 分子と混入した不純物分子の分離を行う。この CMPS の特徴は、混入する不純物量を可能な限り低減するために、プロトン照射から分離プロセスまでを真空中で行うことである。そのため、プロトン照射のターゲットは固体である必要がある。これまでに、固体のホウ素化合物を照射ターゲットとして使い、プロトン照射 (18 MeV, 18 μA) を 20 分間照射することにより、 $\approx 5 \times 10^{12}$ 個の $^{11}\text{CH}_4$ 分子を効率的に生成・回収できることが明らかになった [5]. また、CMPS の分離性能評価実験も行われ、不純物と混合した CH_4 分

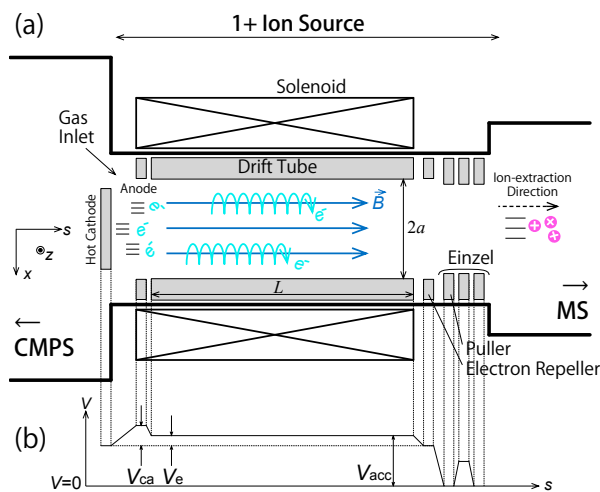


Figure 2: (a) Schematic diagram of the prototype 1+ ion source. (b) Voltage distribution of the ion source.

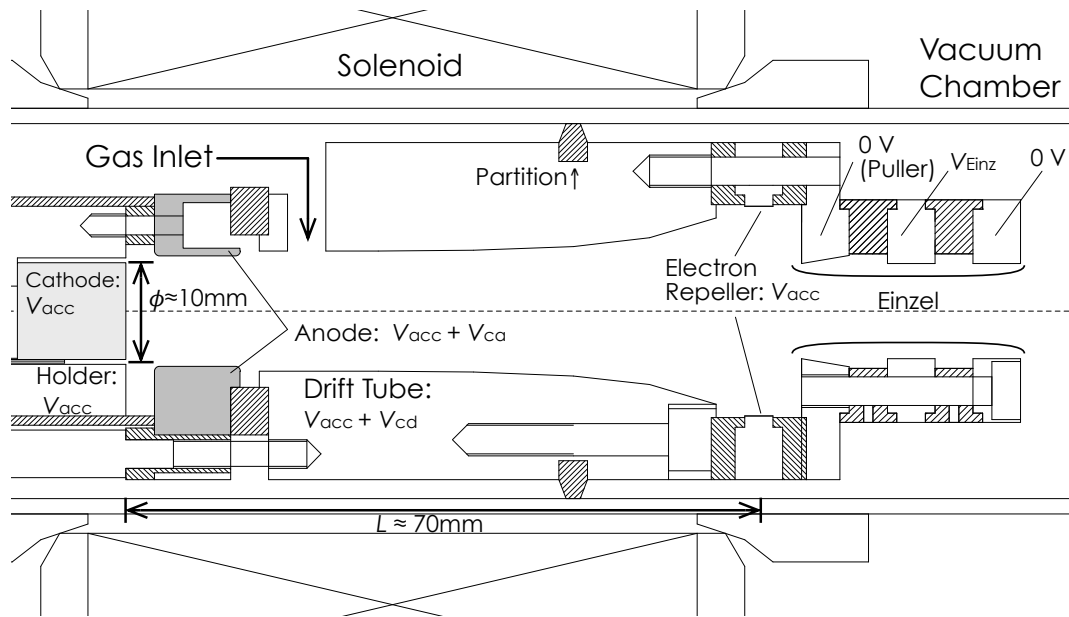


Figure 3: Assembled SCIS.

子を高い効率で回収・取出しできることが明らかになった [6].

このような進展のもとに、次のステップとしてCMPSの下流に置かれる1価イオン源の開発を進めてきた。この1価イオン源には、(1)限られた ^{11}C 分子の生成量から要求量を賄うために高いイオン化効率であること($\sim 1\%$, Fig. 1), また(2)後段にEBISイオン源を用いるために高い真空度で動作可能であることが要求される。これらの理由から、イオン源は電子ビームを用いた電子衝撃型とした。この1価イオン源の模式図をFig. 2に示す。熱陰極から取り出された電子は、ドリフトチューブに入射する。1価イオンの生成効率を上げるために、電子ビームのエネルギーが1価イオンへのイオン化断面積のピークに近い $E_{\text{EB}} \sim 100 \text{ eV}$ となるように、ドリフトチューブの電位を設定する。イオン生成効率を向上させるためには、ドリフトチューブ内の実効電子電流を増加させる必要が有る。そのために、ドリフトチューブを通過した電子ビームは、電子リペラーにて反射されて、再度ドリフトチューブを通過する。これらのドリフトチューブを運動する電子によって、1価イオンは生成される。

このSCISにより高いイオン生成効率を得ることを目指して、電子ビーム・取り出しイオンビームの軌道をPIC法によるシミュレーションで解析し、その結果をもとに内部電極形状の検討・設計が行われた [1]。今回、このSCISを製作し、非放射性的の $^{12}\text{CH}_4$ ガス、 $^{12}\text{CO}_2$ ガスを用いて、1価イオンである $^{12}\text{C}^+$ 、及び $^{12}\text{CO}_2^+$ の生成効率の測定を行ったので報告する。

2. 方法

Figure 3はシミュレーションによって設計されたSCISである [1, 2]。陰極には、バリウム含浸型ディスプレイカソードを用いている。パービアンスの向上を狙って、陰極-陽極間距離を3 mmまで狭めたため、電子銃として

一般的なPierce型とは異なった形状となっている。これまでの実験・シミュレーションの両結果では、 $P = 20 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ ものパービアンスを得られることが確認できている [1]。陰極-陽極間の電位差は $V_{\text{ca}} = 500 \text{ V}$ であり、陰極-ドリフトチューブ間の電位差は $V_{\text{cd}} = 400 \text{ V}$ である。陰極-陽極間の電位差を陰極-ドリフトチューブ間のものより少し高めにする事で、引き出し電子電流の向上を狙うと共に、カソードへのイオンの流れを防ぐ。ソレノイドにより、軸方向に磁場が印加される。軸上の中心における最大の磁場強度は0.1 Tである。ソレノイドの中心から軸方向に離れるに従って磁場強度が低下するために、ドリフトチューブを通過する電子ビームの径は広がる。この径の変化に合わせて、ドリフトチューブの内径を広げている。電子ビームは電子リペラーによって反射され、再びカソード側に進んで行く。電子リペラーのさらに下流には、引き出し電極が備わる。引き出されたビームは、Einzelレンズにより収束されて、下流のドリフトチューブへと輸送される。

Figure 4はSCISを駆動する電源システムである。陰

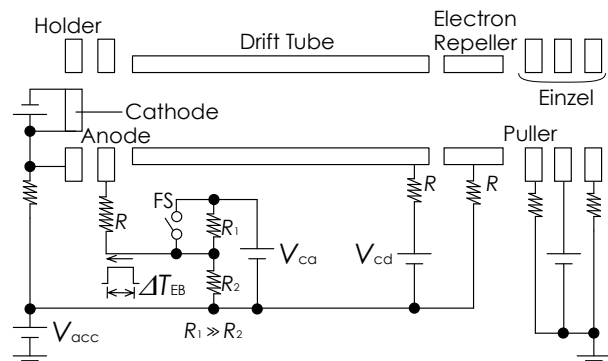


Figure 4: Circuit of SCIS.

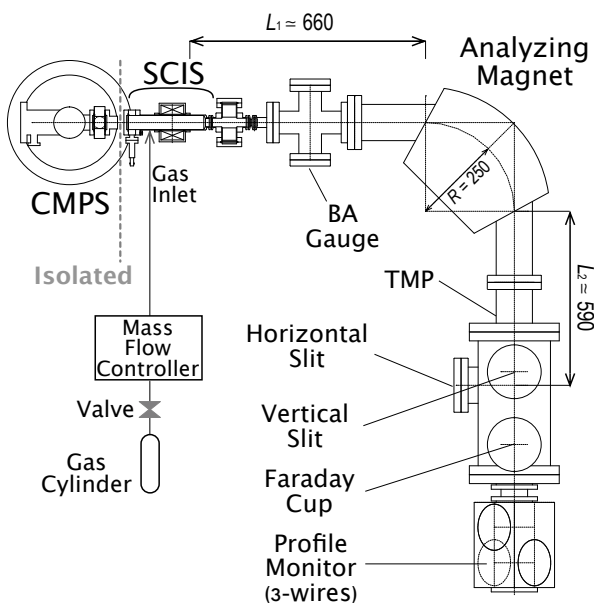


Figure 5: SCIS and mass separation system

極-陽極間にはパルス電圧 ($\Delta T_{EB} \sim 10\text{--}100\text{ ms}$) が印加され、熱陰極からはパルス化された電子ビームがドリフトチューブに供給される。ドリフトチューブ内で電子ビームにより生成されたイオンは、加速電圧 $V_{acc} = 2\text{--}4\text{ kV}$ で引き出される。電子ビームはパルス化されているので、取り出されたイオンもパルスイオンビームとなる。

Figure 5 は、荷電分布の測定に用いた質量分析系である。今回、イオン生成効率の測定は、 $^{12}\text{CO}_2$ 及び $^{12}\text{CH}_4$ ガスを用いて行った。 $R \geq 4.5 \times 10^{14}\text{ s}^{-1}$ ($1 \times 10^{-3}\text{ sccm}$) の流量で定量化が行えるマスフローコントローラー (LINTEC, MC-3102L) を用いて、SCIS へ供給する分子数の定量化を行った。SCIS により生成されたイオンは、分析電磁石と水平方向スリットにより質量分析されて、

最終的にファラデーカップに到達する。ファラデーカップに流れる電流を $1\text{ M}\Omega$ の終端抵抗により、高速データロガー (YOKOGAWA, SL1000) により測定を行った。なお、Figure 5 のシステムには、別の目的で製作された分析電磁石を流用しており、SCIS から得られるビームに対して $M/q = 43$ ($^{11}\text{CO}_2$) と $M/q = 44$ ($^{12}\text{CO}_2$) の分離には十分な質量分解能を持たない。実際の ISOL システムを構築する際には専用の質量分析システムの製作を行う。

3. 結果

Figure 6 に CH_4 分子を供給して生成されたイオンの価数分布を示す。 CH_4 分子は、流量 $R = 4.5 \times 10^{14}\text{ s}^{-1}$ で供給した。また、イオンの加速電圧は $V_{acc} = 4.0\text{ kV}$ である。この価数分布の測定は、分析電磁石の磁場強度を増加させながら、パルス運転により得られた波形を収集することで行っている。残留ガスの影響を考慮に入れるために、バックグラウンド測定も行っている。このバックグラウンド測定は、マスフローコントローラーの上流のバルブを閉じ、マスフローコントローラー内部のバルブを全開にすることで行っている。質量分解能が十分でないために、特に CH_4^+ ($M/q = 16$) と CH_3^+ ($M/q = 15$) のスペクトルは完全に分離できていない。このように、隣接するスペクトルの寄与を考慮に入れるために、得られた価数分布の波形を 5 つのガウス関数によりフィットした。この結果により、 C^+ スペクトルの波高に関するフィッティングエラーは 6% 程度であり、 CH^+ スペクトルの C^+ スペクトルに及ぼす影響は十分に小さいことが判明した。また、このフィッティングにより、 C^+ の生成効率は $\epsilon_{\text{C}^+} = 5 \times 10^{-3}$ (0.5%) であることが分かった。この結果は、ISOL システムにおいて、この SCIS により $^{11}\text{CH}_4$ 分子から $^{11}\text{C}^+$ イオンの生成を行う場合には、プロトン照射により生成される $^{11}\text{CH}_4$ 分子の量を 2×10^{13} にまで増やす必要があることを示す (Fig. 2)。

Figure 7 に CO_2 分子を供給して生成されたイオ

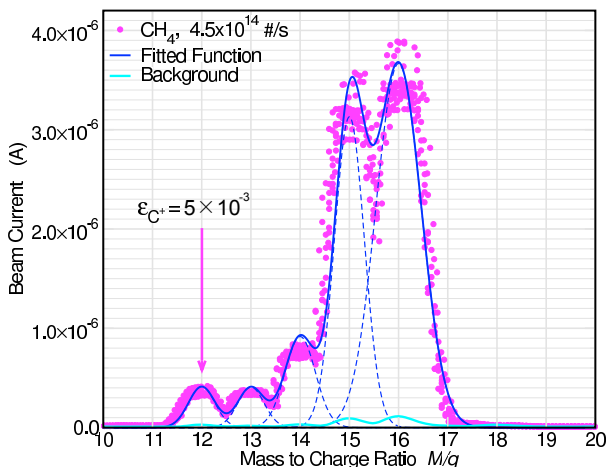


Figure 6: Charge state distribution and the production efficiency of C^+ ions from CH_4 molecules. The ion acceleration voltage was $V_{acc} = 4.0\text{ kV}$.

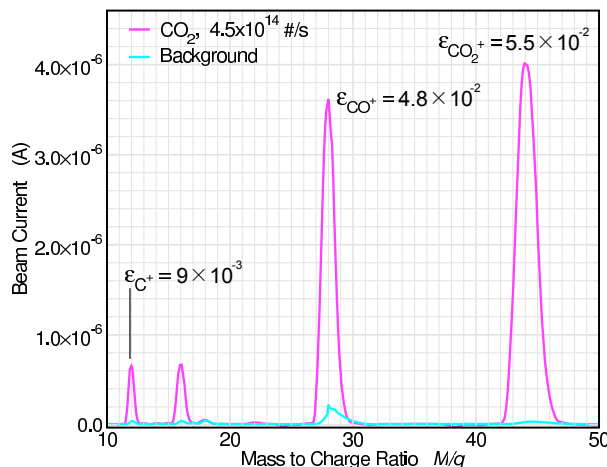


Figure 7: Charge state distribution and the production efficiency of CO_2^+ , CO^+ , and C^+ ions from CO_2 molecules. The ion acceleration voltage was $V_{acc} = 4.0\text{ kV}$.

ンの価数分布を示す。CO₂ 分子の流量は同様に $R = 4.5 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$ である。測定の方法は、Fig. 6 と同様である。CO₂ 分子からの CO₂⁺ の生成では、 $\epsilon_{\text{CO}_2^+} = 5.5 \times 10^{-2}$ (5.5%) もの効率を得ることができた。この効率は、想定していた 1%(Fig. 2) よりも 5 倍程度大きいために、この SCIS により ¹¹CO₂ 分子から ¹¹CO₂⁺ イオンの生成を行うことで、後段の荷電増幅器に要求される効率を 10% から 2% 程度にまで下げることが可能となる。

4. 結論

今回開発した SCIS により CH₄ 分子から C⁺ イオンの生成を行う場合には、 $\epsilon_{\text{C}^+} = 5 \times 10^{-3}$ (0.5%)、CO₂ 分子から CO₂⁺ イオンの生成を行う場合には $\epsilon_{\text{CO}_2^+} = 5.5 \times 10^{-2}$ (5.5%) もの効率を得られることが実験により明らかになった。この結果より、¹¹CH₄ 分子から ¹¹C⁺ イオンの生成を行う場合には、プロトン照射により生成される ¹¹CH₄ 分子の量を 2×10^{13} にまで増やす必要があり、一方で ¹¹CO₂ 分子から ¹¹CO₂⁺ イオンの生成を行う場合には、後段の荷電増幅器に要求される効率を 10% から 2% 程度にまで下げることが可能となる。

現在、Figure 5 に示す分析系には、スリットとワイヤースキャナーからなるエミッタンスモニターが備えられている。このシステムを用いて、今後エミッタンスの評価を行う予定である。また、放医研サイクロロン施設の RI 照射ポートにて、プロトン照射によりオンラインで ¹¹C の 1 価イオンを生成する実験の準備を現在進めている。来年度早々にこのオンライン実験が開始される予定である。

謝辞

本研究は、公益財団法人三菱財団の助成により行われたものです。

参考文献

- [1] K. Katagiri *et al.*, "Singly charged ion source designed using three-dimensional particle-in-cell method", submitted to Rev. Sci. Instrum..
- [2] K. Katagiri *et al.*, "Ion production efficiency of singly charged ion source for radioactive carbon ion production", to be submitted.
- [3] K. Noda *et al.*, Nucl. Instrum. And Meth. B, 6 (2014) 331.
- [4] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys., 37 (2010) 5672.
- [5] K. Katagiri, K. Nagatsu *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 85 (2014) 02C305.
- [6] K. Katagiri, A. Noda *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 86 (2015) 123303-1-7.