

# 重粒子線治療のための ISOL システムに用いる 1 価イオン源の開発

## ISOL ION SOURCE FOR HEAVY ION CANCER RADIOTHERAPY

片桐 健,\* 野田 章, 中尾政夫, 北條 悟, 永津弘太郎, 鈴木 和年, 涌井崇志, 野田耕司  
放射線医学総合研究所

Ken Katagiri Akira Noda Masao Nakao Hojo Satoru Kotaro Nagatsu Kazutoshi Suzuki Takashi Wakui Koji Noda  
National Institute of Radiological Sciences

### Abstract

A new singly charged ion source using electron impact ionization has been developed to realize an ISOL (Isotope Separation On-Line) system for a PET imaging simultaneously with the heavy-ion cancer therapy using radioactive  $^{11}\text{C}$  ion beams. Because the singly charged ion source is required to have high ionization efficiency, effective flight paths of the electrons emitted from the cathode have to be extended. For that reason, magnetic field is applied in the ionization region of the ion source and its direction is set parallel to that of the ion extraction. To decide the geometric parameters of the ion source, ionization efficiency was estimated considering balance among inflow of molecules and outflow of molecules/ions from the ionization region. Based on those considerations, the electron bombardment ion source was designed and fabricated. Details of the design and experimental results showing its fundamental performances are to be presented.

## 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 20 年目を迎え、9000 人以上もの患者に治療が適用されてきた。<sup>[1]</sup> 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ニング照射法による治療が 2011 年より開始された。<sup>[2]</sup> さらなる高精度化のために、照射野を PET 装置によりリアルタイムに検証する技術の実現が期待されている。我々は、重粒子線治療における照射野検証技術の実現のために、Isotope Separation On-Line (ISOL) 法により  $^{11}\text{C}$  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  $^{11}\text{C}$  イオンを治療室に供給<sup>[3]</sup> 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  $10^{10}$  個の  $^{11}\text{C}$  イオンの生成・加速を目指して ISOL システムの開発に取り組んでいる。この ISOL システムは、小型サイクロトロン、 $^{11}\text{C}$  分子生成分離装置 (CMPS), 1 価イオン源と荷電増幅用 EBIS/ESIS イオン源 (イオン源システム) 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  $^{11}\text{C}$  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、可能な限り混入する不純物量を

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としては固体である必要がある。これまでに、この固体ターゲットが実験により検討された。ホウ素化合物である  $\text{NaBH}_4$  を照射ターゲットとして用いることで、18 MeV, 18  $\mu\text{A}$  のプロトンビームを 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。<sup>[4]</sup> また、CMPS の分離性能評価実験も行われ、不純物と混合した  $\text{CH}_4$  分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。<sup>[5]</sup>

このような背景のもと、次のステップとして 1 価イオン源の開発を現在進めている。この 1 価イオン源には、(1) 限られた  $^{11}\text{CH}_4$  分子の生成量 ( $\sim 10^{12} - 10^{13}$ ) から要求量を賄うために高いイオン化効率であること、また (2) 後段に EBIS/ESIS 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。熱陰極から放出される電子の実効的な飛行距離を延ばすためにソレノイドにより磁場を印加し、その磁場の向きはイオンの取出しと同方向とした。これまでに、必要な放出電子電流量とイオン源の幾何パラメータを決めるために、流入/流出するメタン分子、及びメタンイオンのバランスを考慮したイオン化効率の評価を行い、その結果を元に設計を行った。さらに製作したイオン源を用いて、基礎的な性能評価のための実験を行った。本発表ではこれらの設計、実験の結果を元に 1 価イオン源の性能を議論し、今後の方針を考察する。

## 2. 電子衝撃型 1 価イオン源の設計

Fig. 2(a) に 1 価イオン源の模式図を示す。 $\text{CH}_4$  分子の電子衝突による 1 価イオン生成断面積はおよそ 70 eV にピークがある。そのため、イオン化効率の向上を狙って低いエネルギー ( $\sim 100$  eV 程度) の電子ビームを用いる。イオン化効率の向上を狙って、ドリフトチューブ内で電子にらせん運動、往復運動させるために、ソレノ

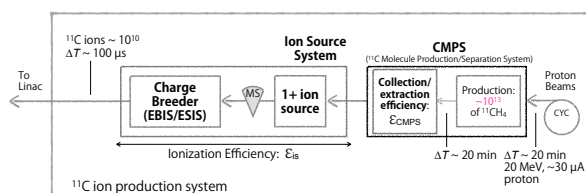


Figure 1: One of the possible schemes for  $^{11}\text{C}$  ion production.

\* tag410@nirs.go.jp

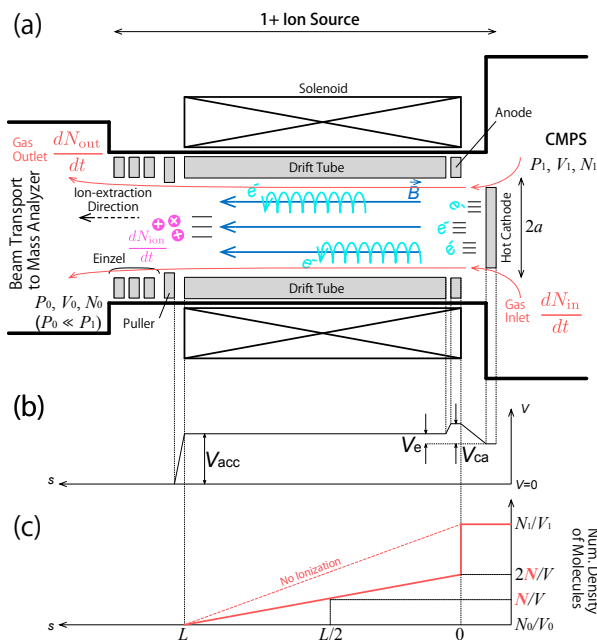


Figure 2: (a) Schematic diagram of the electron impact 1+ ion source. (b) Voltage distribution of the ion source. (c) Assumed density distribution of neutral particles in the drift tube;  $d(N/V)/ds = \text{constant}$ .

イドにより磁場 ( $\sim 100-1000$  G) を印加できるようにした。また、ソレノイド磁場の向きをイオン取出し方向と平行 (軸方向取出し) にし、ドリフトチューブ長を長く得られるようにした。2 個以上のイオンが生成されることにより、目的の 1 個イオンの生成効率は低下すると思われるため、現状では逐次電離を生じるイオン閉じ込めは行わない方針である。熱陰極-アノード間の距離、ドリフトチューブ-引き出し電極間距離は、チャイルドラングミュアの式より決めた。熱陰極には、仕事関数が低く、比較的低い温度で大きな電子放出電流を得ることが可能なバリウム含浸型タングステンカソードを用い

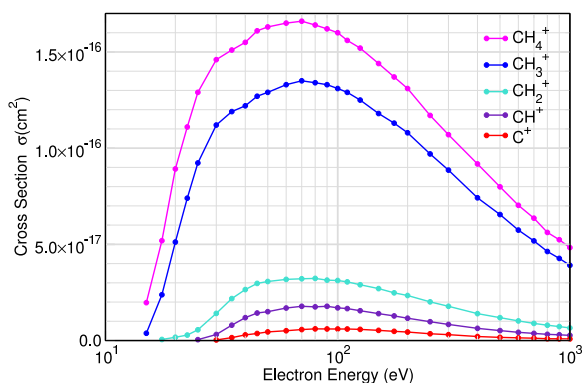


Figure 3: Partial cross sections for electron impact ionization for  $\text{CH}_4$ .<sup>[8]</sup>

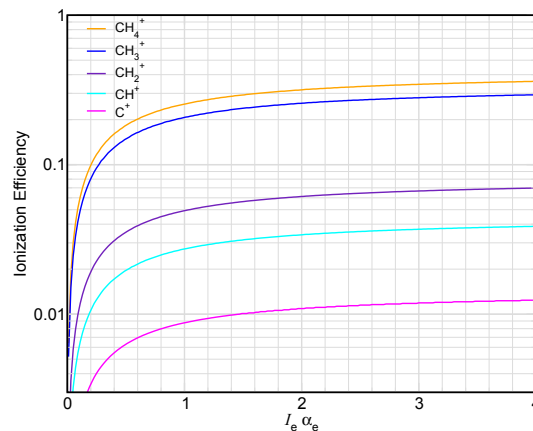


Figure 4: Calculation results of the ionization efficiency:  $L=50$  mm,  $E_{\text{ele}}=70$  eV,  $2a=10$  mm.

た。また、電子電流を増やした際に空間電荷効果によるドリフトチューブ内での電圧降下 (バーチャルカソードの発生)<sup>[6]</sup>を防ぐために、熱陰極として口径の太いもの ( $\sim 10$  mm) を選択し、電子ビーム径が大きくなるようにした。イオン衝突による熱陰極のダメージを低減するため、及び電極の熱負荷低減のために、アノードの電位を制御することでパルス運転 ( $f \sim 1-10$  Hz,  $\Delta T \sim 10-100$  ms) を行う。Fig. 2(b) に 1 個イオン源の電位分布を示す。  $V_e$  は電子ビームの加速電圧、  $V_{ca}$  はカソード-アノード間電圧である。  $V_{acc}$  はイオンの加速電圧である。

この 1 個イオン源には、上流の CMPS により  $\sim 10$  ms 程度にパルス化されたガスを供給する計画である。このパルス化ガスの時間幅を鈍らせないために、CMPS から 1 個イオン源のドリフトチューブに繋がる導管には、大きいコンダクタンスが必要となる。また、残留ガスに起因する不純物を低減するために、CMPS と 1 個イオン源の体積は小さい方が好ましい。これらの理由から、1 個イオン源は可能な限り小型化し、CMPS のフランジに直接接続出来る構造にした。

### 3. イオン化効率の見積り

イオン化効率を向上させるためには、電子の実効的な走行距離  $l_e$  と電子電流  $I_e$  を増加させる必要がある。これらの値がどの程度必要であるかを調べる為に、イオン化効率の見積りを行った。ここではイオン化効率を、イオン源に入射した分子数  $N_{in}$  に対する生成された各イオン ( $\text{CH}_4^+$ ,  $\text{CH}_3^+$ , ...,  $\text{C}^+$ ) の数の割合として定義する。イオン源ドリフトチューブ内に流入する中性分子の数  $N_{in}$ 、イオン化されずにドリフトチューブ下流より排気される分子の数  $N_{out}$ 、及び、ドリフトチューブ内にてイオン化されるイオンの数  $N_{ion}$  のバランスから計算を行った (Fig. 2(c)):

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dN_{in}}{dt} - \frac{dN_{out}}{dt} - \frac{dN_{ion}}{dt}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{in}}{dt} = C_{IS} \frac{N_1}{V_1}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_{out}}{dt} = C_{IS} \frac{2N}{V}, \quad (V=\pi a^2 L) \quad (3)$$

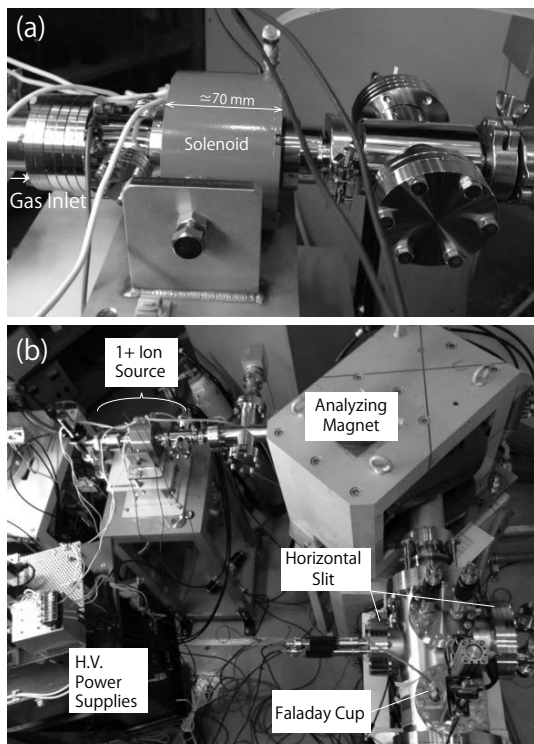


Figure 5: (a) 1+ ion source. (b) Analyzing system.

$$\frac{dN_{\text{ion}}}{dt} = \frac{I_e l_e \sum_i \sigma_i N}{e V} = \frac{I_e \alpha_e L \sum_i \sigma_i N}{e V}. \quad (4)$$

$(i = \text{CH}_4^+, \text{CH}_3^+, \dots, \text{C}^+)$

ここで、 $N$  はイオン源ドリフトチューブに滞留する中性分子の数、 $C_{\text{IS}}$  はドリフトチューブのコンダクタンス、 $V_1, N_1$  はそれぞれイオン源上流にある CMPS の体積および入射される分子数、 $V, L$  はそれぞれドリフトチューブの体積、長さを示す。また、 $\alpha_e$  は  $\alpha_e = l_e/L$  であり、電子の実効的走行距離がドリフトチューブの何倍であるかを示す。式 (3) 及び式 (4) では、導管における分子数密度の変化は一定であること [7] を仮定している； $d(N/V)/ds = \text{const.}$ 。Fig. 3 にこの計算にて使用したメタンガスの電離断面積を示す。[8]

Fig. 4 に、電子ビームのエネルギー  $E_{\text{ele}}$  が  $E_{\text{ele}} = 70 \text{ eV}$  の場合のイオン化効率の計算結果を示す。式 (4) の示す通り、電離のレートは電子ビーム電流と実効的な走行距離の積  $I_e \alpha_e$  に比例する。そのため、この  $I_e \alpha_e$  を横軸としてプロットした。全てのイオン種で  $I_e \alpha_e \approx 1$  程度までは急激な増加が見られるが、それ以上の領域ではプラトーとなることが分かる。この領域で全体の 60% 以上が  $\text{CH}_4^+$  と  $\text{CH}_3^+$  へとイオン化されることが分かる。しかし残念ながら、 $^{11}\text{CH}_4^+$  は  $^{12}\text{CH}_3^+$ 、 $^{11}\text{CH}_3^+$  は  $^{12}\text{CH}_2^+$  と質量電荷比が等しくなるため、 $^{11}\text{C}$  イオン生成の際にこれらの 1 価イオンを用いることは出来ない。従って、この ISOL システムにて  $^{11}\text{CH}_4$  ガスを用いる場合には、1 価イオンとして  $^{11}\text{C}^+$  を生成し下流の荷電増幅用イオン源に供給を行う。Fig. 4 からは、 $\text{C}^+$  イオンはプラトーにて 1% 程度のイオン化効率で生成されることが分かる。PIG

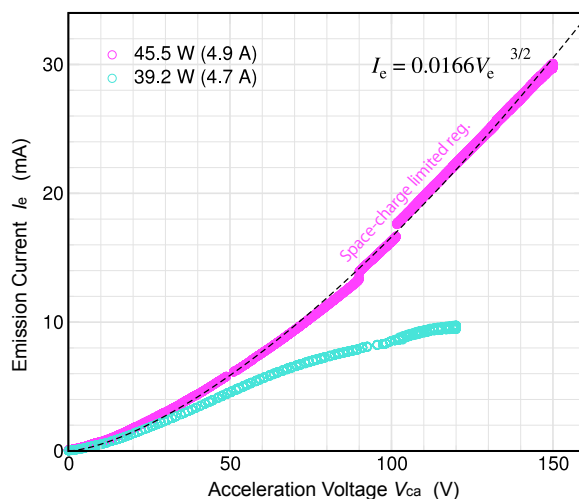


Figure 6: Dependence of the electron emission current on the cathode-anode voltage difference.

等の磁場を用いて感度を向上させる真空計では、電子の走行距離は磁場の無い場合に比べて  $\sim 1000$  倍のオーダーで延長されている。[7] 類似の構造であるこの 1 価イオン源においても、実効的な走行距離が同程度延長されているとすれば ( $\alpha_e \sim 1000$ )、要求される電子ビーム電流は  $I_e \sim 1/\alpha_e = 1 \text{ mA}$  と見積もられる。

#### 4. 電子衝撃型 1 価イオン源の性能評価

Fig. 5(a) に製作した 1 価イオン源を示す。ドリフトチューブ長は  $\approx 50 \text{ mm}$ 、ドリフトチューブの直径は  $\approx 10 \text{ mm}$  である。まず、電子引出し部の設計の妥当性を調べる為に、このイオン源の熱陰極から得られる放出電子電流量を測定した。この結果を Fig. 6 に示す。この測定は、 $V_e = 0 \text{ V}$  の状態でカソード-アノード間電圧  $V_{\text{ca}}$  を変化させ、アノードに流れる電子ビームの電流量を  $51 \Omega$  の抵抗を用いて測定した。45.5 W で熱陰極加熱した場合、空間電荷制限領域 (3/2 乗領域) が 0–150 V の加速電圧

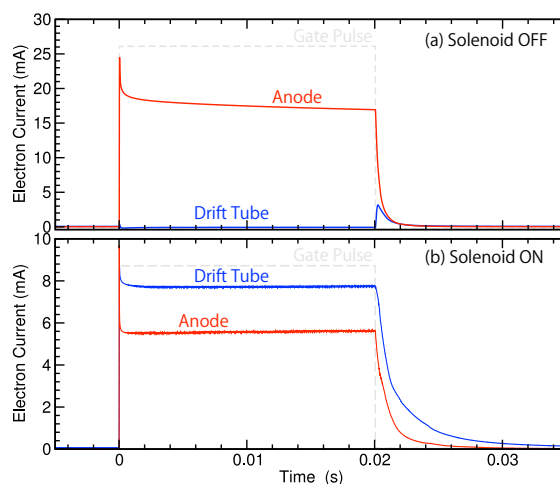


Figure 7: Electron beam current at the anode and the drift tube for (a) solenoid OFF and (b) solenoid ON.

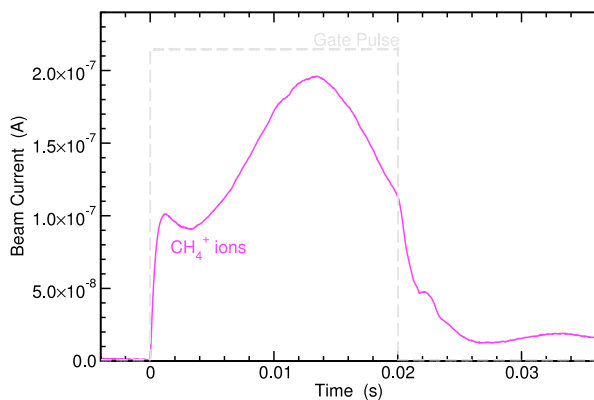


Figure 8: Beam pulse of  $\text{CH}_4^+$  ions:  $V_{ca}=140$  V,  $V_e=100$  V,  $V_{acc}=2$  kV.

区間に広がっていることが分かる。この状態での電子電流量はこの引出し部から得られる最大量を示し、最大 30 mA(150 V 時) もの値を得ることが確認できた。この値は上記の計算により得られた要求量を満たす値である。

Fig. 7 に、アノード及びドリフトチューブで観測される電子ビームの電流量を示す。この測定は、 $V_{ca}=150$  V,  $V_e=100$  V で行った。ソレノイドにより軸方向磁場を印加することで、熱陰極で発生する電子の数 10% がドリフトチューブ内に入射されていることが確認できる。この値は上記の計算からの要求を満たす値であるために、望ましいイオン化効率が得られると期待出来る。

この 1 価イオン源にメタンガスを供給し、1 価イオンの生成を試みた。質量荷電比により分離しイオン種ごとのビーム電流を計測するために、Fig. 5(b) に示した分析電磁石、スリット及びファラデーカップからなる分析システムを使用した。Fig. 8 に測定された  $\text{CH}_4^+$  イオンのイオン電流を示す。この測定において、供給するメタンガスは、1 価イオン源内の圧力が  $\approx 1 \times 10^{-4}$  Pa となるように調整した。また、熱陰極の加熱電力は 42 W とした。電子ビームを制御するアノード電圧パルスに同期した  $\text{CH}_4^+$  イオンパルスが生成・加速されることを確認できた。今後、この分析システムを用いて、パルス運転により荷電状態分布の測定と  $\text{C}^+$  のイオン化効率測定を行う。

## 5. 結論

重粒子線がん治療のための ISOL システムに用いる 1 価イオン源を設計し製作した。この 1 価イオン源は低エネルギー電子ビームを用いた電子衝撃型のイオン源である。電子ビームの測定試験を行い、イオン化領域であるドリフトチューブに  $\approx 8$  mA 程度の電子ビームが入射されることが確認できた。また、メタンガスを供給することで  $\text{CH}_4^+$  イオンを生成し、期待通りのパルスビームが得られることを確認した。今後、パルス運転により荷電状態分布の測定、 $\text{C}^+$  のイオン化効率測定を行う。

## 6. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 25790090 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] K. Noda, et al., Nucl. Instrum. And Meth. B, 6 (2014) 331.
- [2] T. Furukawa, et al., Med. Phys., 37 (2010) 5672.
- [3] Y. Iwata, et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 624 (2010) 33.
- [4] K. Katagiri, K. Nagatsu, et al., Rev. Sci. Instrum., 85 (2014) 02C305.
- [5] K. Katagiri, et al., submitted.
- [6] E. D. Donets, Rev. Sci. Instrum., 71 (2000) 810.
- [7] 熊谷寛夫, 真空の物理と応用, (裳華房, 2010).
- [8] H.C. Straub, D. Lin, B. G. Lindsay, K. A. Smith, and R. F. Stebbings, J. Chem. Phys., 106 (1997) 4430.