

普及型がん治療装置用新小型 ECR イオン源開発のための基礎実験

BASIC EXPERIMENT FOR DEVELOPMENT OF NEW COMPACT ECR ION SOURCE

Katsuyuki Takahashi ^{A)}, Keita Fukushima ^{A)}, Taku Suzuki ^{A)}, Toshinobu Sasano ^{A)},

Tadahiro Shiraishi ^{A)}, Wataru Takasugi ^{A)}, Masahiro Kawashima ^{A)},

Yoshio Noda ^{B)}, Yoshiyuki Iwata ^{B)}, Masayuki Muramatsu ^{B)}, Masayuki Sekiguchi ^{B)}, Atsushi Kitagawa ^{B)},

Hirohiko Murata ^{C)}, Nobuaki Takahashi ^{C)},

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

^{B)} National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

^{C)} Sumitomo Heavy Industries

Abstract

A compact accelerator for high energy carbon-ion radiotherapy (C-ion RT) has been studied in Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC) at National Institute of Radiological Sciences (NIRS) since 2004. Compact accelerator for Gunma University (Gunma University heavy ion medical center: GHMC), Saga C-ion RT facility (Saga Heavy Ion Medical Accelerator in Tosu: SAGA HIMAT) and Kanagawa C-ion RT facility (Ion-beam Radiation Oncology Center in Kanagawa: i-ROCK) has been operated for medical use. The Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) with all permanent magnets (Kei series) are used at these C-ion RT facilities. The magnetic field of Kei series are optimized for production of C⁴⁺ under an experiment of 10 GHz ECRIS (NIRS-ECR). We studied production of C⁵⁺ for design of new compact ECRIS at existing 18 GHz NIRS-HEC.

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台のイオン源が供給を行っている。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]。これらのイオン源で様々なイオン種(H⁺ - Xe²¹⁺)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。

粒子線治療施設の普及を推進する上では、装置の小型化とともに、施設の建設費や運転維持費の低コスト化が重要な課題となっている。現在では群馬、佐賀、神奈川の 3 か所において実機が製作され治療運用されている。これらの治療施設では、装置の小型化・低コスト化のために、永久磁石だけで閉じ込め磁場を形成する ECR 型イオン源(Kei シリーズ)が使用されている。Kei シリーズで採用されている磁場は、NIRS-ECR の実験において、C⁴⁺が多く得られた時の値となっている。今後は入射器の運用コスト削減のため、5 価、6 価のようなさらに多価の炭素イオンが生成可能なイオン源が求められる。6 価の場合は同じ質量電荷比(q/A=1/2)の窒素や酸素のような他核種が混入する可能性がある。したがって、治療用として供給するのであれば、C⁵⁺イオン生成が現実的と考えられる。普及型を考える場合は、電源や冷却水の維持などの運用コスト削減のため、永久磁石で閉じ込め磁場を形成するのが望ましい。しかしながら、永久磁石は固定磁場のため、C⁵⁺が最も多く得られる磁場構造をあらかじめ調査する必要がある。

2. 実験条件

今回は NIRS-ECR より高磁場・高出力のイオン源である NIRS-HEC を用いて、C⁵⁺の実験を行い、その結果得られた磁場構造を永久磁石で再現させることとした。NIRS-HEC のミラー磁場は、二次元磁場解析コード「poisson/superfish^[5]」を用いて計算した。Figure 1 に上流側と下流側のコイルの電流値がそれぞれ 840 A、500 A の時の計算結果を示す。

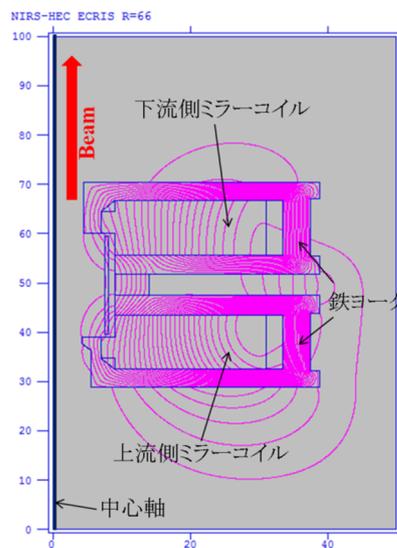


Figure 1: Mirror magnetic field of NIRS-HEC.

コイルとヨークは軸対称になっており、縦軸を中心軸としている。Figure 1 はその片側を表しており、下部が上流、上部が下流を示している。実験では上流側コイルの電流

acc2g@qst.go.jp

値を 610、670、720、780、840 A とした時に下流側コイルの電流値を変えて C⁵⁺が最大になる値を調査した。

NIRS-HEC は μ 波源として、周波数 18 GHz、出力 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 (TWTA) の 2 台が使用されているが、今回の実験は TWTA を別途用意して行った。使用した TWTA は Xicom 製 XTRD-300IJ で、周波数帯域は 10 - 18 GHz、出力は 300 W である。新小型イオン源の μ 波の周波数は、六極磁場が形成する ECR ゾーンとプラズマチェンバ壁面との距離の関係から 14 GHz 付近とした。ミラー磁場の調査の他に、 μ 波周波数依存性、 μ 波パワー依存性についても調査した。

3. 実験結果

3.1 ミラー磁場の調査

C⁵⁺のミラー磁場の調査は、導入するガスを CH₄ とした時と CO₂ とした時でそれぞれ行った。CH₄ の時のデータを Figure 2 に、CO₂ の時のデータを Figure 3 にそれぞれ示す。この時の μ 波周波数は 14.6 GHz、パワーは 300 W、引出電圧は 30 kV とした。

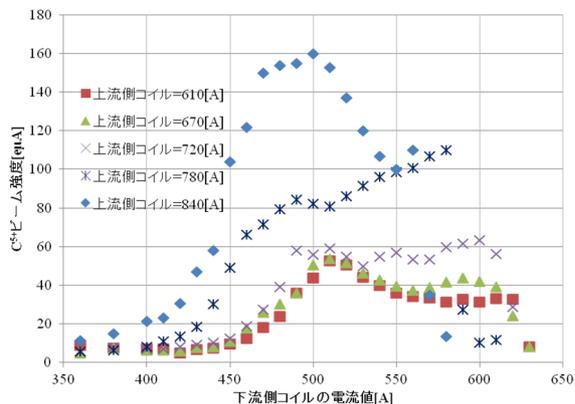


Figure 2: Mirror magnetic field dependence under CH₄ gas.

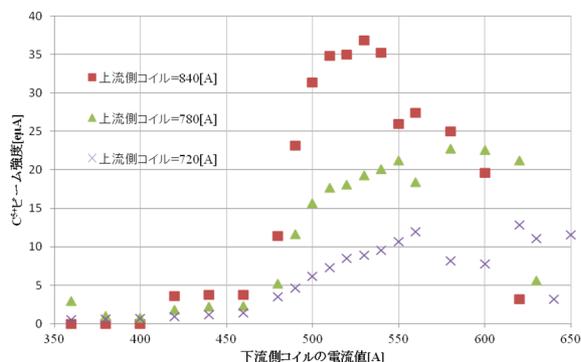


Figure 3: Mirror magnetic field dependence under CO₂ gas.

CH₄ の時の C⁵⁺は、上流側と下流側のコイルの電流値がそれぞれ 840 A、500 A の時最大となり 160 e μ A となった。CO₂ の時は上流側と下流側のコイルの電流値がそれぞれ 840 A、530 A とした時が最大となった。しかし、C⁵⁺は CH₄ の時よりも低かった。C⁵⁺を増やすには、上流ミ

ラー磁場が強い方が適していると考えられる。下流ミラー磁場は上流ミラー磁場の強さによって多少の差はあるが、概ねコイルの電流値が 500 A 付近が適しているという結果となった。

3.2 μ 波周波数依存性

Figure 4 に μ 波周波数依存性を示す。下流側コイルの電流値は、上流側コイルの電流値をそれぞれ 610、670、720、780、840 A の時に C⁵⁺が最大となる値とした。 μ 波周波数は 14 - 15 GHz の範囲である。

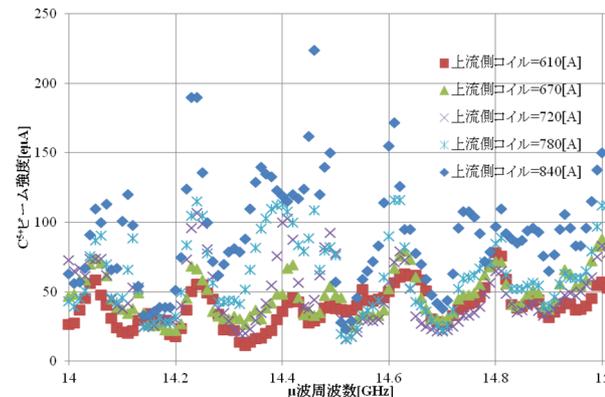


Figure 4: Micro wave frequency dependence.

Figure 4 より μ 波周波数依存性は、傾向は似ているが、上流ミラー磁場が強い時程 C⁵⁺の変化が大きくなっている。C⁵⁺は 14.45 GHz の時が最大で 200 e μ A を超える値となった。しかし、その時のビーム波形は、リップルが大きく、パルス毎の安定度も非常に悪かった。そのため、次に示す μ 波パワー依存性は 14.6 GHz で取得した。

3.3 μ 波パワー依存性

Figure 5 に各ミラー磁場における μ 波パワー依存性を、Figure 6 にその時の炭素イオンの Mean Charge を示す。

各ミラー磁場における μ 波パワー依存性は、より強い上流ミラー磁場でより高い μ 波パワーである程、得られた C⁵⁺、Mean Charge は共に大きくなった。特に 100 W 付近までは大きな差は見られなかったが、 μ 波パワーを上げていくとその差は顕著になっていった。今回実験に使用した TWTA は最大出力が 300 W 程度であったが、300 W の時点で C⁵⁺は上昇傾向にあった。この事から、より出力の高い μ 波源を用いれば、C⁵⁺の増加が期待できる。

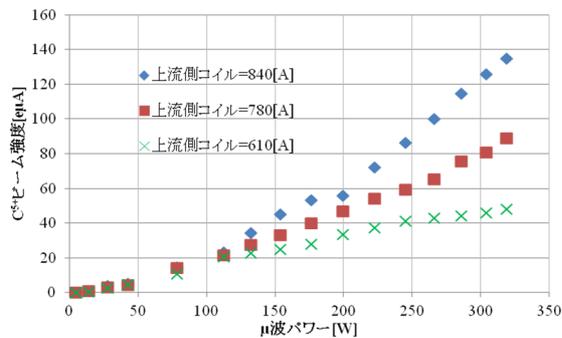


Figure 5: Micro wave power dependence.

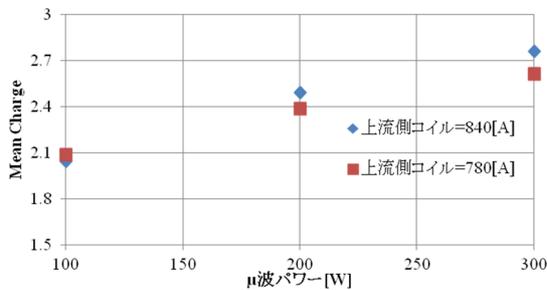


Figure 6: Mean Charge.

4. まとめ

C^{5+} が最も多く得られる磁場構造を調査するため、NIRS-HEC を用いて、ミラー磁場、 μ 波周波数依存性、 μ 波パワー依存性を調査した。以下に実験結果から分かったことを示す。

- ・ミラー磁場の調査より、上流ミラー磁場はより強い方が C^{5+} は増加することがわかった。今後は強いミラー磁場構造が永久磁石で再現可能であるか検討する。
- ・ C^{5+} を増やすには CO_2 より CH_4 の方が適していることがわかった。今後他の種類のガスを使用した実験を検討する。
- ・ μ 波周波数依存性より、 C^{5+} の変化はミラー磁場が強い程大きいことがわかった。 C^{5+} を増やすにはミラー磁場を強くする必要があるので、 μ 波周波数は可変式が適していることがわかった。
- ・ μ 波パワー依存性より、300 W の時点で C^{5+} は上昇傾向にあった。このことから、より高出力の μ 波源を用いれば、 C^{5+} の増加が期待できることがわかった。今後はより高出力の μ 波源を使用した実験を検討する。

今回の実験で得られた磁場構造を基に作成した永久磁石とプラズマチェンバのイメージ図を Figure 7 に示す。上流側は強いミラー磁場を必要とするため永久磁石の内径が小さくなると思われる。そのため、プラズマチェンバは上流側と下流側で径の異なる 2 分割構造を検討している。下流側のプラズマチェン

バは、端部を広くとることで引出電極との間で放電が起こりにくくなるような構造を検討している。

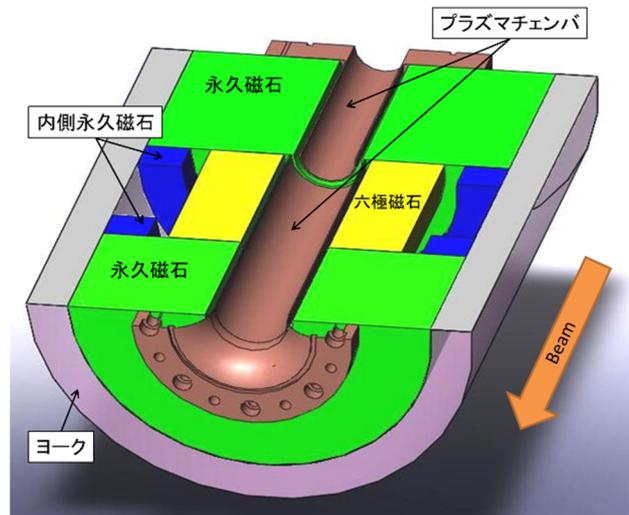


Figure 7: Image of permanent magnets and plasma chamber.

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] James H. Billen and Lloyd M. Young, "Poisson Superfish (version 6.28)" Rev. Nov. 6 (2002).