

マルチイオン照射のための小型 ECR イオン源の設計

DESIGN OF COMPACT ECR ION SOURCE FOR THE MULTI ION DADITHERAPY

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

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

^{A)} National Institutes for Quantum Radiological Science and Technology, National Institute of Radiological Sciences
(QST-NIRS), Japan

^{B)} Accelerator Engineering Corporation, Japan

Abstract

The multi-ion radiotherapy with dose distribution and Liner Energy Transfer optimization is being studied at QST-NIRS. Helium, carbon, oxygen and neon ions are considered as ion species for multi-ion radiotherapy. A basic experiment using these ion beams has been carried out at the HIMAC. We have developed the new ECR ion source with all permanent magnets for multi-ion radiotherapy. Ionization gases were helium, methane, oxygen, and neon to produce He^{2+} , C^{4+} , O^{6+} and Ne^{7+} ions. Requirement values of beam current were 940 μA correspond to He^{2+} , 290 μA to C^{4+} , 330 μA to O^{6+} , and 245 μA to Ne^{7+} . We did some beam tests for design of compact ECR ion source at existing the 18 GHz NIRS-HEC ion source. In order to reproduce the magnetic field during experiments of NIRS-HEC, the structure of the permanent magnet was examined using the POISSON/SUPERFISH code. As a result of the calculation, it was found that a sufficient magnetic field could be obtained. Therefore, the structure of the ion source such as plasma chamber, extraction electrode, introduction of microwave and gas was injection examined according to the structure of the permanent magnet.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所(QST-NIRS)の重粒子線がん治療装置(HIMAC)では、治療用炭素を生成する 10 GHz ECR イオン源(NIRS-ECR)[1]の他、生物・物理実験に於いて様々なイオン種の供給を行う 18 GHz ECR イオン源(NIRS-HEC)[2]、小型 ECR イオン源(Kei2)[3]、PIG イオン源[4]の 4 台のイオン源が稼働している。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]。想定されるイオン種は He、C、O、Ne 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り替えが可能となるが、普及型の治療施設では、コストと運転・メンテナンスの観点から、永久磁石型の ECR イオン源1台で対応することが望まれる。現在普及型施設で使用されている永久磁石型 ECR イオン源の Kei シリーズでは、ネオンの多価イオン生成には十分な閉じ込め磁場が得られていないため、我々は新規イオン源の設計と既存のイオン源を用いた開発を行っている。これまで NIRS-HEC で行われたビームテストの結果、 He^{2+} , C^{4+} , O^{6+} , Ne^{7+} のビーム電流において目標値が達成されている。この時のミラー磁場の値は 1.14/0.475/0.9 T (上流側ピーク値: B_{inj} /ミラー磁場最小値: B_{min} /下流側ピーク値: B_{ext})となっている[7]。この目標値を達成させるために、磁場計算コード POISSON/SUPERFISH を用いて永久磁石の形状を検討した。計算の結果、十分な磁場が得られることが解ったため、永久磁石の形状に合わせてプラズマチェン

バー、引出電極、マイクロ波とガスの導入などのイオン源の構造検討を行った。

2. 永久磁石の形状検討

2.1 軸方向閉じ込め磁場の計算

Figure 1 に計算を行った時の磁石形状を示す。リングマグネットの①～⑤を用いて、軸方向の閉じ込め磁場を形成する。プラズマチェンバーの内径が 50mm となるように磁石の内径を決める。マイクロ波導入側リングマグネット(リングマグネット①)では内径 47mm。プラズマ生成室では内径 56mm (6 極磁石の位置)。ビーム引出側では引出電極との間に高電圧がかかるため、できるだけ内径を大きくするように、リングマグネット④が内径 62mm。最下流側(リングマグネット⑤)では内径 70mm となっている。リングマグネット②、③の内側には、径方向の閉じ込め磁場と形成する 6 極磁石が配置される。磁石の外側には、磁場が外に漏れ出さないように鉄ヨークを配置してある。また、鉄ヨークはリングマグネットを支えるために、厚さが 20 mm 以上となる。鉄ヨークを含めたマグネット全体の外径は 400mm で、長さが 357mm である。Figure 2 に計算結果のミラー磁場分布を示す。計算には信越化学社製の N50H-MF のデータを利用した。計算結果として、上記磁石の配置では、1.235/0.488/0.969 T ($B_{inj}/B_{min}/B_{ext}$)となった。これまでの経験により、実際に磁石をつくる場合はここから 5~10%程度下がるので、おおむね目標値に達すると考えられる。14.6GHz の共鳴点($B_{crr}=0.521$)も存在する。6 極磁石を配置するスペースも十分確保できている。

[#] muramatsu.masayuki@qst.go.jp

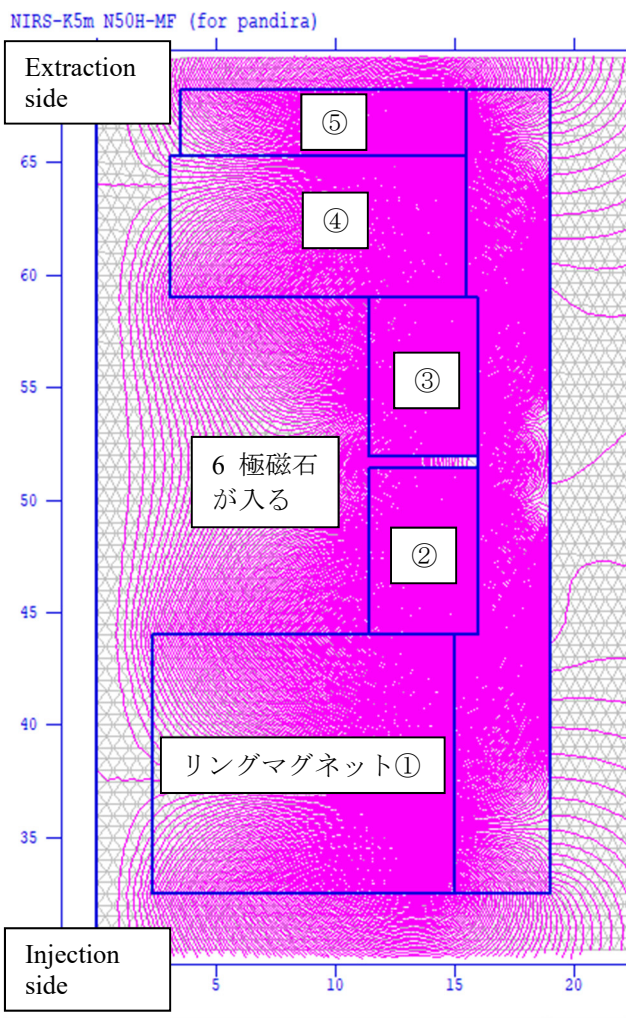


Figure 1: Structure of the ring magnets with iron yoke.

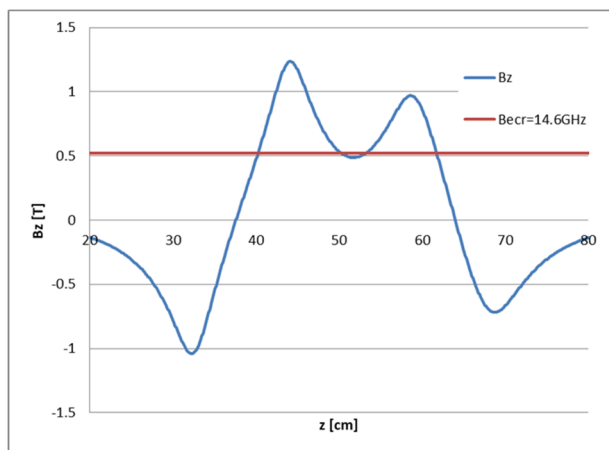


Figure 2: Result of calculation for the mirror magnetic field on the axis made by the ring magnets.

2.2 径方向の閉じ込め磁場の計算

リングマグネット②、③の内側に入るように径方向の閉じ込め磁場を形成する 6 極磁石の検討を行う。Figure 3 に 6 極磁石の形状を示す。プラズマチャンバーの冷却水路が配置されているところは内径を 62mm とし、極で

は内径を 56mm とした。Figure 4 に計算結果を示す。青い線が径方向の磁場となる。プラズマチャンバー内壁 (緑線) から共鳴点 ($B_{ocr}=14.6\text{GHz}$) までの距離が 8mm となり、十分な距離が得られている。

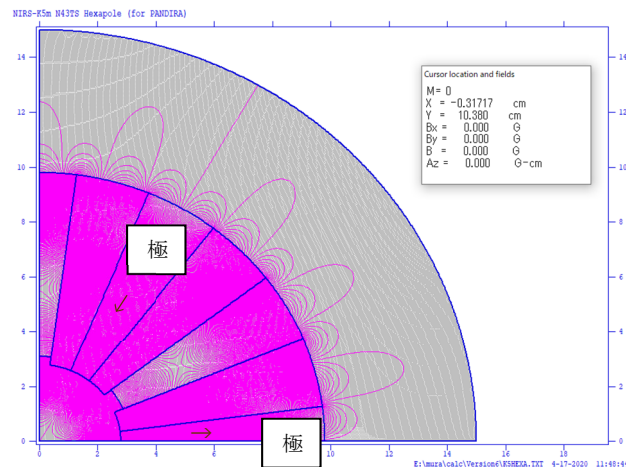


Figure 3: structure of the hexapole magnet.

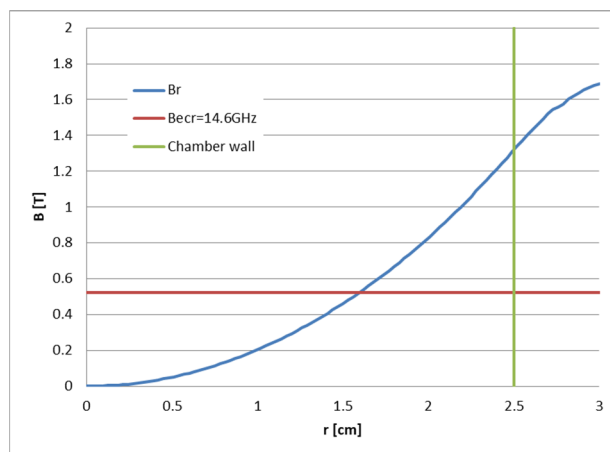


Figure 4: Result of calculation for the hexapole magnet. Blue line is magnetic field. Green line is the chamber wall ($r=25\text{ mm}$). Red line is $B_{ocr}=0.521\text{ T}$ for 14.6 GHz.

3. イオン源の構造検討

Figure 5 にマルチイオン照射用の新規イオン源の概略図を示す。前述のとおり、5 つのリングマグネットで軸方向の閉じ込め磁場を形成し、6 極磁石で径方向の閉じ込め磁場を形成する。永久磁石の内側にはプラズマチャンバーを配置し、磁石とチャンバーの間には 1 mm の隙間をあげ絶縁をする。プラズマチャンバーはこれまでの小型 ECR イオン源と同様に銅製とし、水冷により磁石へ熱が伝わらないようにする。プラズマチャンバー内の真空排気は、上流側と下流側真空チャンバーより行う。上流側真空チャンバー、永久磁石、プラズマチャンバーに高電圧を印加し、グランド電位の引出電極からビームが引き出される。下流側真空チャンバーには引出電極とアインツェルレンズを設置する。引出電極は可動とし、それぞれのイオンを引き出すときに最適な位置に

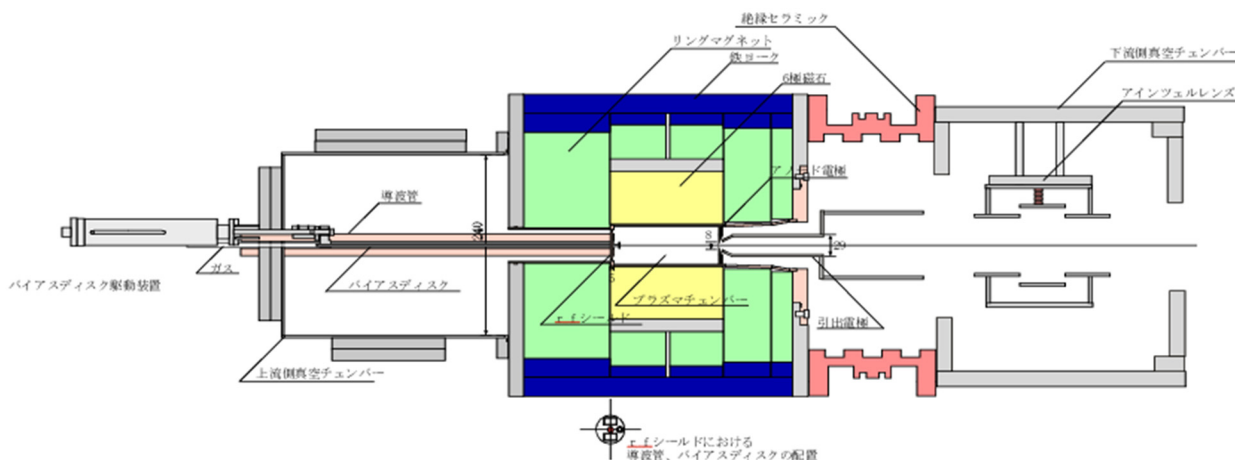


Figure 5: Schematic drawing of new compact ECR ion source with additional waveguide.

設置する。絶縁物にはアルミナセラミックを使用する。引出電極付近の放電を抑えるために、セラミックの内径を大きくし、コンダクタンスを上げ高真空が維持できるようにする。上流側真空チェンバーには、矩形導波管、ガスパイプ、バイアスディスクを設置する。導波管は WR-62 を使用する。Ne⁷⁺のような多価イオンを生成するため、マイクロ波 2 重加熱法が必須となり、導波管を 2 本用意する。4 種類のガスを切り替えてプラズマチェンバー内に導入するが、プラズマチェンバー内のスペースが小さいため、イオン源の外側で合流させて真空内ではガス管は 1 本とする。イオン源の軸上にバイアスディスクを設置する。ディスクの径は、ビーム試験を行った後に決定する。Rf シールドを可動とし、マイクロ波のチューナーとして利用する。

4. まとめと今後の予定

POISSON/SUPERFISH を用いて、目標磁場が達成できるように永久磁石の形状を検討した。計算の結果、1.235/0.488/0.969 T(Binj/Bmin/Bext)となるように磁石の形状を決定した。永久磁石の形状を基に、プラズマチェンバー、引出電極、マイクロ波とガスの導入などのイオン源の構造検討を行った。

今後は、ビーム引出の計算や、マイクロ波の導入について詳細な検討を行う予定である。

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] F. Ouchi *et al.*, PASJ2019 WEPI037.