

HIMAC 加速器の現状報告 PRESENT STATUS OF HIMAC

水島康太^{A)}, 阿部康志^{A)}, 稲庭拓^{A)}, 岩田佳之^{A)}, 浦田昌身^{A)}, 片桐健^{#,A)}, 北川敦志^{A)}, 早乙女直也^{A)},
佐藤眞二^{A)}, 高田栄一^{A)}, 野田悦夫^{A)}, 原洋介^{A)}, 古川卓司^{A)}, 村松正幸^{A)}, 李聖賢^{A)}, 白井敏之^{A)},
大内章央^{B)}, 川島祐洋^{B)}, 小林千広^{B)}, 田久保篤^{B)}, 中島猛雄^{B)}, 藤本哲也^{B)}, 若勇充司^{B)}
Kota Mizushima^{A)}, Yasushi Abe^{A)}, Taku Inaniwa^{A)}, Yoshiyuki Iwata^{A)}, Masami Urata^{A)}, Ken Katagiri^{#,A)},
Atsushi Kitagawa^{A)}, Naoya Saotome^{A)}, Shinji Sato^{A)}, Eiichi Takada^{A)}, Etsuo Noda^{A)}, Yousuke Hara^{A)},
Takuji Furukawa^{A)}, Masayuki Muramatsu^{A)}, Lee Sung Hyun^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)},
Fumihisa Ouchi^{B)}, Masahiro Kawashima^{B)}, Chihiro Kobayashi^{B)}, Atsushi Takubo^{B)}, Takeo Nakajima^{B)},
Tetsuya Fujimoto^{B)}, Mitsuji Wakaisami^{B)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences, National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

Heavy-ion radiotherapy with the Heavy ion Medical Accelerator synchrotron in Chiba (HIMAC) has been administered to more than 12,000 patients since 1994. We started the heavy-ion radiotherapy with a 3D scanning irradiation system in 2011 and using a superconducting-rotating gantry in 2017, at a new treatment research facility in NIRS. We have continued some R&Ds on HIMAC to enhance the treatment quality and to improve the treatment results. Since 2016, we have started developments of a compact superconducting rotating gantry and synchrotron to be applied for a newly started project of a “quantum scalpel” that is a next generation of the heavy-ion radiotherapy machine. This paper outlines those R&Ds as well as the present status of HIMAC facility.

1. はじめに

放射線医学総合研究所(放医研)は、1993年に重粒子線がん治療用加速器 HIMAC (Fig. 1)を建設し、炭素イオンを用いた重粒子線がん治療を行ってきた[1, 2]。1994年の治療開始から今年で26年目を迎え、現在までの重粒子がん治療の登録患者数は延べ12000人以上となっている。2010年にはHIMACの既存施設に連結する形で新治療研究棟を建設し、複雑な腫瘍形状や治療期間中における腫瘍形状の変化にも対応可能な三次元スキニング照射法[3]を適用した治療を2011年から開始している。

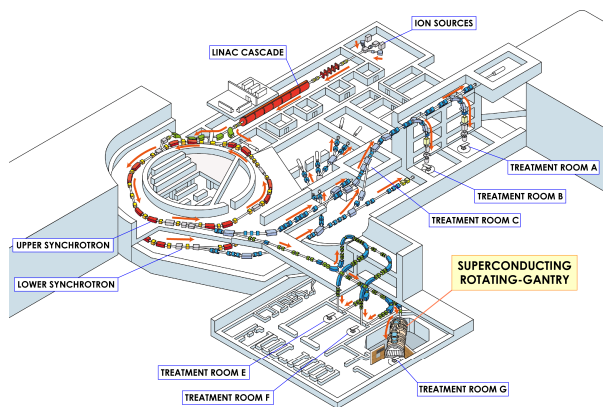


Figure 1: The HIMAC and new treatment research facilities.

また、2017年からは超伝導電磁石を用いた回転ガントリ照射装置[4] (Fig. 2)による治療も開始され、0-360度の角度範囲から任意の方向を選択して照射できるようになり、より良い治療成果が期待されている。

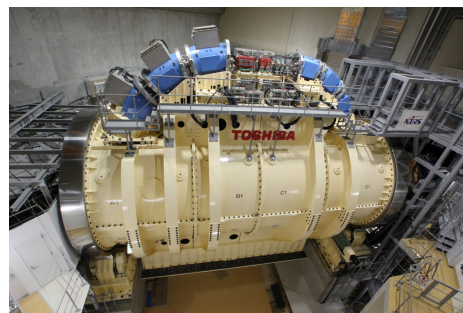


Figure 2: Photograph of the superconducting rotating gantry installed in NIRS.

放医研は2016年4月に日本原子力研究開発機構の一部と統合し、量子科学研究開発機構(量研機構)となった。現在、量研機構では、レーザー駆動イオン加速技術を用いた入射器やシンクロトロンへの超伝導電磁石技術の適用などによって実現される次世代の小型重粒子線治療装置「量子メス」(Fig. 3)の研究開発を進めている。この「量子メス」プロジェクトでは、複数のイオン種を組み合わせるマルチイオン照射法[5]の確立による難治性がんの治療成績向上や治療期間の短縮などの治療高度化も目指しており、それに関連した研究開発もあわせて進められている。ここでは、HIMACで行われた最近の研究開発の概要について紹介する。

katagiri.ken@qst.go.jp

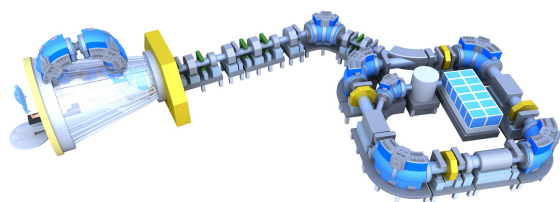


Figure 3: Schematic view of the quantum scalpel consisting of a laser-driven injector, a compact synchrotron and a rotating gantry with superconducting magnets.

2. 研究開発

2.1 小型 ECR イオン源における多価イオン生成試験 [6]

放医研ではこれまで炭素線を用いたがん治療を行ってきたが、さらなる治療成績の向上を目指して、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可能なマルチイオン照射法の研究開発を推進している。使用されるイオン種は、He、C、O、Ne の 4 種類を想定しており、複数のイオン源を専有すれば、容易にそれらを切り替えて供給することが可能となるが、運転・メンテナンスの観点から、イオン源 1 台で対応することが望ましい。そのため、我々は様々なイオンの供給を行える永久磁石型 ECR イオン源の開発を行なっている。試験用に開発されたイオン源 Kei3 は、既存の炭素線治療装置用小型 ECR イオン源 (Kei シリーズ) と同様の閉じ込め磁場を採用しているため、 C^{4+} に近いイオンを生成することが可能となる。しかし、Ne やそれより重い核種の多価イオン生成はまだまだ困難であった。Kei3 ではこれまでに、バイアスディスク法、ガスミキシング法、マイクロ波 2 重加熱などを用いて、多種イオンの生成試験を行っており (Fig. 4)、これらの手法を組み合わせ、調整パラメータの少ない永久磁石型 ECR イオン源での多価イオン生成に適した状態を調査している。

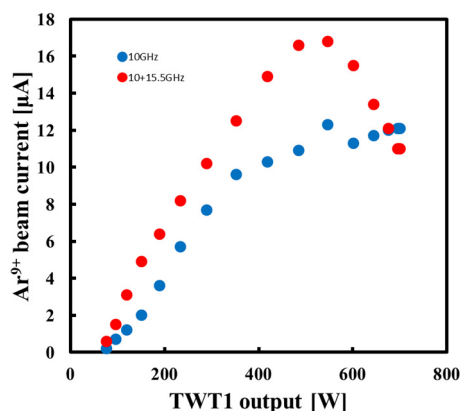


Figure 4: Dependence of Ar^{9+} current and microwave power of TWT1. Compared with the single frequency (10 GHz) heating, the beam current was increased by using two frequency (10 +15 GHz) heating.

2.2 マルチイオン照射のための小型 ECR イオン源の開発 [7]

小型 ECR イオン源 (Kei2) では Ne の多価イオン生成には十分な閉じ込め磁場が得られないため、18 GHz ECR イオン源 (NIRS-HEC) を用いてマルチイオン照射で使用する 4 種類 (He、C、O、Ne) のイオン生成試験を行い (Fig. 5)、そこでの磁場分布を永久磁石で再現する新たなイオン源の設計を行っている。イオン価数としては普及型重粒子線治療施設で使用されている線形加速器で運用可能となる多価イオンを目指し、 He^{2+} 、 C^{4+} 、 O^{6+} 、 Ne^{7+} を目標としている。また、マルチイオン照射にかかる治療時間を短縮するため、イオン源から供給するイオン種の高速な切り替え制御の実現も同時に目指しており、ガス配管を工夫することで、従来装置から大幅に時間短縮し、約 1 分でのイオン種切り替えが可能になることを確認している。

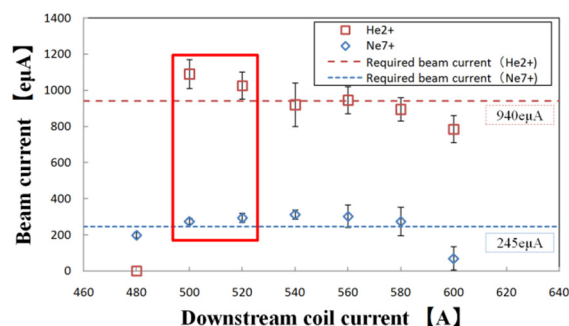


Figure 5: Dependence of the magnetic field strength (the coil current) and He^{2+} and Ne^{7+} beam current.

2.3 重粒子線がん治療用小型 EBIS の particle-in-cell 解析による設計 [8]

普及型小型治療装置を備えた重粒子線がん治療施設にマルチイオン照射法を展開するためには、4 種類の軽イオン (He、C、O、Ne) の生成とそれらの切り替えが素早く行える小型のマルチイオン生成システムが必要となる。そのシステムのために、3 次元 PIC 解析をもとに、治療に必要な量 ($\sim 1e+10$ 個/pulse) の軽イオンの生成が可能で、普及型小型治療装置用 ECR イオン源の 1/4 程度の大きさの小型電子ビーム型イオン源 (EBIS) の開発を進めている (Fig. 6)。

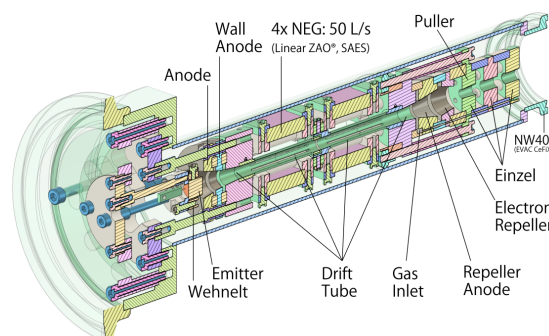


Figure 6: Structural drawing of the compact EBIS designed for heavy-ion cancer therapy.

小型化、軽イオンの多量生成を実現するために、これまでに世界中で開発された EBIS と比較しても類の無い特異なパラメータ(エネルギー、電流密度、ソレノイド磁場強度)を採用した。今秋より電子ビーム試験を開始し、来年度からイオン生成実験を開始する予定である。

2.4 マルチイオン照射のためのイオン種切り替え運転手法の実験的検証

マルチイオン照射適用時も、シンクロトロンは現在の炭素線治療と同様にパルス内エネルギー可変型運転方式を採用する[9]。シンクロトロンに入射されるマルチイオンの質量電荷比 A/Z はすべて 2 であるため、電磁石の励磁パターンを共通化することが可能であり、イオン種切り替え制御を簡略化できる。同様に、高エネルギービーム輸送系の運転パターンも共通化でき、コミッションングや調整時間の短縮にも非常に有効である。共通化した運転パターンによるマルチイオン運転手法の検証を行っており、照射ビームのイオン種を切り替えながら、連続して三次元スキャンニング照射することに成功している (Fig. 7)。試験では概ね期待通りの結果を得ることができ、イオン種切り替え運転手法の有効性を確認することができた。

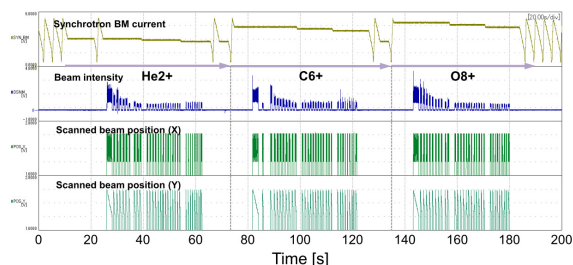


Figure 7: Three-dimensional irradiation with multiple-ion beam operation. The irradiation ion species were switched from helium ions to carbon ions and to oxygen ions.

2.5 レーザー加速イオンの超伝導シンクロトロンへの直接入射の検討[10]

量研機構で進められている「量子メス」プロジェクトの開発テーマの一つに、超伝導技術とレーザー加速を用いた重粒子線がん治療装置の小型化が挙げられている。その一環として、レーザー加速イオンのシンクロトロンへの直接入射に関するフィジビリティスタディを現在進めている。これまでの研究で、プラズマ生成点からシンクロトロンまでのビーム輸送ライン、および、超伝導シンクロトロンに入射した後のビーム軌道を計算し、最終的な入射粒子数を調べた。4 MeV/u ± 6% の加速イオンを、位相回転により約 1/10 にエネルギー圧縮した後、ビーム成形してシンクロトロンに入射した結果、1照射あたり、 2×10^8 個のイオンが入射可能で、垂直方向のエミッタンスが治療に使用できる値となるのは、 1×10^8 個であることを確認した。

本年度はさらに研究を進めて、ビーム輸送ラインとパルス圧縮以降のレーザー装置とビーム発生チャンバーをシンクロトロンの内側に設置することを想定して、ビーム輸送ラインの検討を行った。シンクロトロンの内側の空間を $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 、レーザーとチャンバーの設置面積を

$1.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ とすると、ビーム輸送ラインが使える空間は $3.5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 以下となる。設置面積がこれ以下となるようにビーム輸送ラインの設計を行い、最終的にシンクロトロンに入射できた粒子数を計算した (Fig. 8)。さらに、空間電荷、イオンエネルギー広がり、レーザーによる生成粒子のバラツキ等が、入射粒子数に与える影響についても検討を行った。

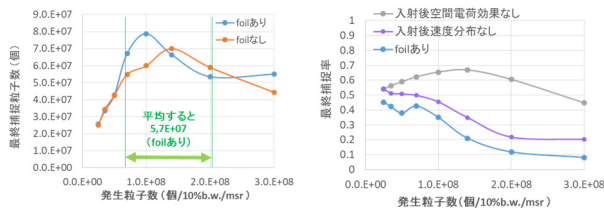


Figure 8: Dependence of the captured ion numbers and the capture rate on produced ion numbers.

2.6 重粒子線シンクロトロン用超伝導電磁石の設計 [11]

普及型と呼ばれる重粒子線がん治療施設が国内に普及しつつあるが、専用の建屋を必要とする巨大で高コストな装置であり、これが普及の妨げとなっている。そこで量研機構では、更なる装置の小型化、低コスト化を実現する「量子メス」の開発を進めている。

「量子メス」プロジェクトの一つは超伝導技術を用いたシンクロトロンの開発であり、その超伝導電磁石の磁場設計を現在進めている。シンクロトロンの周長を短くするため、二極、四極コイルを同位置に巻く機能結合型を採用し、二極磁場の起磁力を下げるため、楕円形状のコイル配置とした (Fig. 9)。最大二極磁場は 4 T とし、従来型シンクロトロンの半分以下の周長 28 m で、炭素イオンを最大 430 MeV/u まで加速することを目標とした。

超伝導線には $\phi 1 \text{ mm}$ の NbTi モリブデン線を採用し、シンクロトロンに要求される磁場安定度が得られるようにコイル配置を決定した。また、本シンクロトロンにおいてはコイルエンドに生じる六極磁場成分が大きなビームロスを起こす要因になることから、この低減に関する検討も行った。

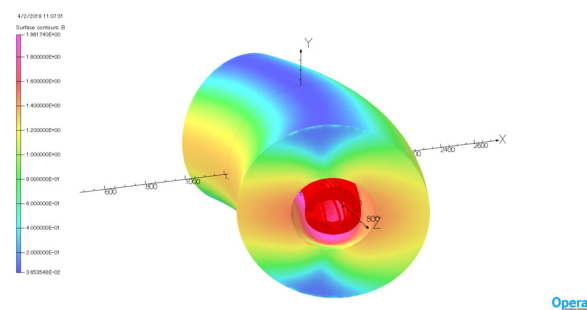


Figure 9: 3D magnetic field distribution of the superconducting magnet calculated by opera 3D.

3. まとめ

量研機構では、次世代の小型重粒子線治療装置「量子メス」の実現に向けた要素技術開発を進めている。「量

子メス」で適用されるマルチイオン照射のためのイオン源開発や加速器運転手法の確立を目指した研究開発がHIMACにて行われており、放医研での臨床試験に向けた準備も進められている。また、「量子メス」の装置設計に関連したレーザー加速器からのシンクロトロンへの入射方法やシンクロトロン用超伝導電磁石の設計についても検討が順次進められている。

参考文献

- [1] Y. Hirao, H. Ogawa, S. Yamada, Y. Sato, T. Yamada, K. Sato, A. Itano, M. Kanazawa, K. Noda, K. Kawachi, M. Endo, T. Kanai, T. Kohno, M. Sudou, S. Minohara, A. Kitagawa, F. Soga, E. Takada, S. Watanabe, K. Endo, M. Kumada, S. Matsumoto, Nucl. Phys. A 538 (1992) 541–550.
- [2] K. Noda, T. Furukawa, T. Fujimoto, Y. Hara, T. Inaniwa, Y. Iwata, K. Katagiri, N. Kanematsu, K. Mizushima, S. Mori, N. Saotome, Y. Saraya, S. Sato, T. Shirai, M. Takada, Y. Takei, R. Tansyo, S. Yonai, Nucl. Instrum. Methods Res. B 406 (2017) 374–378.
- [3] T. Furukawa, T. Inaniwa, S. Sato, T. Shirai, Y. Takei, E. Takeshita, K. Mizushima, Y. Iwata, T. Himukai, S. Mori, S. Fukuda, S. Minohara, E. Takada, T. Murakami, K. Noda, Med. Phys. 37 (2010) 5672–5682.
- [4] Y. Iwata, T. Fujimoto, S. Matsuba, T. Fujita, S. Sato, T. Furukawa, Y. Hara, K. Mizushima, Y. Saraya, R. Tansho, N. Saotome, T. Shirai, K. Noda, Nucl. Instrum. Methods Res. Sect. B 406 (2017) 338–342.
- [5] T. Inaniwa, N. Kanematsu, K. Noda, T. Kamada, Phys. Med. Biol. 62, (2017) 5180–5197.
- [6] M. Muramatsu, Y. Kato, K. Takahashi, T. Suzuki, F. Ouchi, A. Kitagawa, in these proceedings (FRPI043).
- [7] F. Ouchi, T. Suzuki, K. Takahashi, T. Shiraishi, T. Sasano, M. Muramatsu, Y. Iwata, K. Mizushima, A. Kitagawa, in these proceedings (WEPI037).
- [8] K. Katagiri, T. Wakui, K. Kawamura, M. Muramatsu, S. Hojo, D. Sato. N. Hayashizaki, in these proceedings (FRPI044).
- [9] K. Mizushima, T. Furukawa, Y. Iwata, Y. Hara, R. Tansho, N. Saotome, Y. Saraya, M. Muramatsu, T. Shirai, in: Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, 2018, 1210–1213.
- [10] E. Noda, T. Shirai, Y. Iwata, K. Mizushima, A. Noda, K. Noda, T. Fujimoto, in these proceedings (FRPH019).
- [11] T. Fujimoto, Y. Iwata, K. Mizushima, Y. Abe, M. Urata, E. Noda, T. Shirai, in these proceedings (THPH019).