

HIMAC 加速器の現状報告 (2018) PRESENT STATUS OF HIMAC (2018)

片桐 健,^{A)} 稲庭 拓,^{A)} 岩田 佳之,^{A)} 早乙女 直也,^{A)} 佐藤 眞二,^{A)} 皿谷 有一,^{A)} 高田 栄一,^{A)} 丹正 亮平,^{A)}
野田 悦夫,^{A)} 原 洋介,^{A)} 古川 卓司,^{A)} 村松 正幸,^{A)} 水島 康太,^{A)} 白井 敏之,^{A)}
鈴木 太久,^{B)} 高橋 勝之,^{B)} 川島 祐洋,^{B)} 勝間田 匡,^{B)} 小林 千広,^{B)} 若勇 充司^{B)}

^{A)} 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所, ^{B)} 加速器エンジニアリング株式会社

Ken KATAGIRI,^{*A)} Taku INANIWA,^{A)} Yoshiyuki IWATA,^{A)} Naoya SAOTOME,^{A)} Shinji SATO,^{A)}

Yuichi Saraya,^{A)} Eiichi TAKADA,^{A)} Rhohei TANSHO,^{A)} Etsuo NODA,^{A)} Yousuke HARA,^{A)}

Takuji FURUKAWA,^{A)} Masayuki MURAMATSU,^{A)} Kota MIZUSHIMA,^{A)} Toshiyuki SHIRAI,^{A)}

Taku Suzuki,^{B)} Katsuyuki Takahashi,^{B)} Masahiro Kawashima,^{B)}

Masashi Katsumata,^{B)} Chihiro Kobayashi,^{B)} Mitsuji Wakaisami^{B)}

^{A)}QST/NIRS, ^{B)}Accelerator Engineering Corporation, Ltd. (AEC)

Abstract

Heavy ion cancer therapy with the Heavy ion Medical Accelerator synchrotron in Chiba (HIMAC) has been administered to more than 10,000 patients since 1994. We started the heavy-ion cancer therapy using a 3D scanning irradiation system in May 2011, at New Particle Therapy Research Facility in NIRS. To enhance the treatment quality by achieving a precise dose control, we have continued some R&Ds on HIMAC and its irradiation system including a superconducting-rotating gantry. Since 2016, we have started developments of a compact superconducting rotating gantry and a compact superconducting synchrotron to be applied for a newly started project of a “quantum scalpel” that is a next generation of the heavy-ion cancer therapy machine. We also started R&Ds for the intensity modulated multi-ion therapy that is applied to improve outcomes of the refractory cancer treatment. This paper outlines those R&Ds as well as the present status of HIMAC accelerator facility.

1. はじめに

放射線医学総合研究所 (放医研) での HIMAC 加速器による重粒子線がん治療は、1994 年の開始から今年で 22 年目を迎え、11000 人以上もの患者に治療が適用されてきた [1, 2]。これまでの拡大ビーム法による治療に加えて、複雑な腫瘍形状や治療期間中における腫瘍患部の形状・大きさの変化に合わせた照射が可能となる、3

次元スキニング照射法 [3] による治療が新治療研究棟 (Fig. 1) にて 2011 年 5 月より開始された。さらなる照射精度の向上を目指して、2015 年度までに、高速エネルギースキニング照射法の開発 [4, 5]、呼吸位相に合わせて腫瘍に重ね塗りを行う呼吸同期スキニング照射法の開発、超伝導ガントリーの開発/建設 [6] が進められてきた。超伝導ガントリーは、2016 年度にコミッションが行われ、2017 年 5 月より治療利用が開始された。

2016 年度に量研機構にて新たに開始された“量子メス”プロジェクト [7] は、治療施設の普及のために、重粒子線治療装置のさらなる小型化を目指すものである。こ

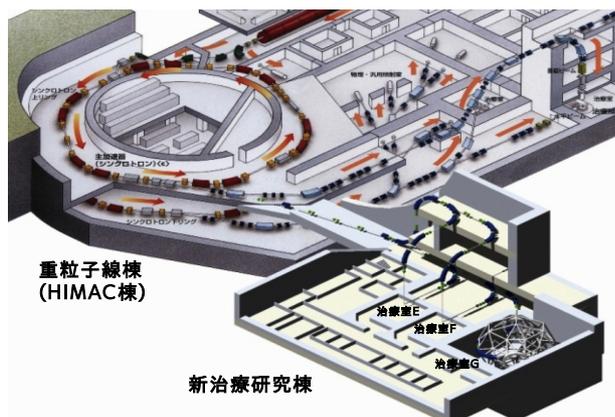


Figure 1: HIMAC accelerator and the new particle therapy research facility.

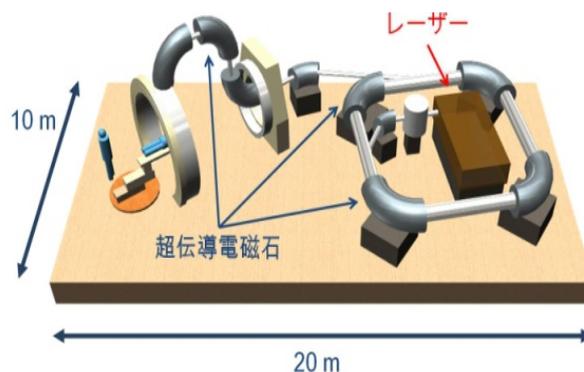


Figure 2: Quantum scalpel including a laser injector a compact superconducting synchrotron and a compact superconducting gantry.

* katagiri.ken@qst.go.jp

の“量子メス”(Fig. 2)は、超小型超伝導ガントリー、超小型超伝導シンクロトロン、レーザー加速を用いた入射器もしくはコンパクト ECR イオン源と小型線形加速器から構成される。昨年度より、これらの“量子メス”関連研究の開発が本格的に開始された。また、炭素線だけでなくヘリウム線、酸素線、ネオン線を組み合わせて照射を行うことで、正常組織への線量付与を低減し尚かつ腫瘍への治療効果をこれまで以上に高める強度変調マルチイオン照射法 [8] のために、様々なイオンを素早く切り替え入射・加速・取り出しを行うシンクロトロン運転技術、ECR イオン源のイオン種切り替え技術に関する研究も開始されている。

本発表では、現在量研機構/放医研で行われている、超伝導ガントリー、量子メス、強度変調マルチイオン照射法に関連した研究開発について紹介する。

2. 研究開発

2.1 回転ガントリーのためのビームアライメント手法とその検証 [9]

三次元スキャンニング照射法ではビーム位置のずれが照射野のずれを引き起こすため、治療室内の基準点とビームの位置を合わせることが重要である。加えて、2015年よりビームコミッショニングを開始した、回転ガントリー照射装置においては、複数のガントリー角度において治療室内の基準点とビームの位置を合わせることが求められる。コミッショニング時のビームの位置合わせと、治療運用開始後の定期的なビームの位置合わせを円滑に行うため、我々は簡便なビームのアライメント手法を開発した。加速器から取り出されたビームは、輸送ライン中に設置された蛍光膜モニターの中心を通るように、位置合わせが行われているが、電磁石の据え付け誤差などにより、ビーム位置と磁石の中心にはずれが生じる。加えて、ガントリーを回転させた際の構造体の歪みによって、回転角度毎にビーム位置と磁石の中心にずれが生じる。治療室内の基準点は、予め金属球を内部に配置したファントムによって定義されており、治療室に設置された蛍光膜モニターにより、基準点とビーム位置の

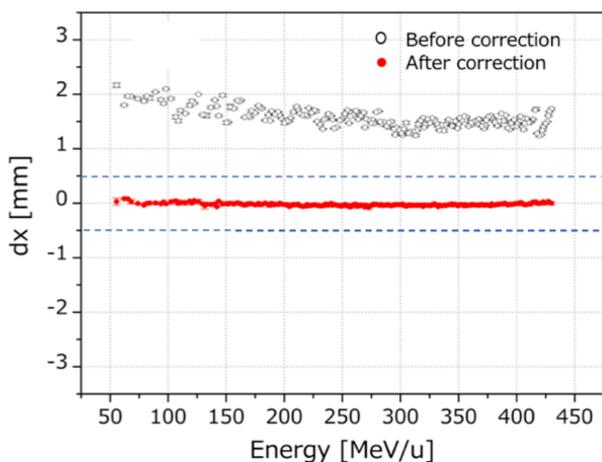


Figure 3: Measurement results of the beam misalignment along the horizontal axis.

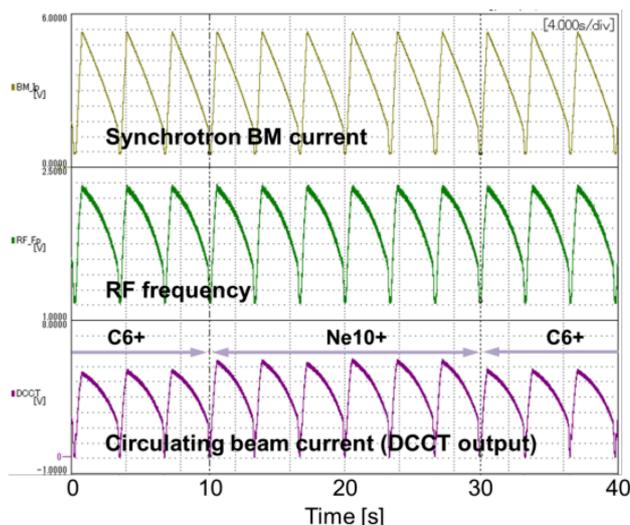


Figure 4: Operation test of multi-ion acceleration switching ion species of injection beams between $^{12}\text{C}^{6+}$ and $^{20}\text{Ne}^{10+}$.

ずれが測定される。本手法では、基準点におけるビーム位置のずれから上流のビーム位置のずれを算出しステアリング電磁石により補正を行う (Fig. 3)。本手法を適用することで、ビームの位置精度を損なうことなく、全ての角度からの照射が可能になり、2017年より治療を開始している。本講演では、開発した手法とその結果について報告を行う。

2.2 次世代重粒子線治療に向けた量子メス治療装置の設計 [7]

重粒子線治療は、高い QOL を維持でき、放射線抵抗性のがんに対しても高い腫瘍制御を実現するなど、優れた成果を出しており、量研機構だけでも 10,000 人以上の治療実績がある。量研機構では、この重粒子線治療の治療費を低減し、腫瘍制御をさらに向上させた次世代の重粒子線治療装置の開発を開始しており、量子メス (Fig. 2) と呼んでいる。量子メスは、1 台のイオン源でフルストリップに近い複数のイオン (He, C, O, Ne) を生成する、多価・多核種・コンパクト ECR イオン源と小型線形加速器、またはレーザー駆動イオン加速器を入射器として用いる。シンクロトロンは、4T Combined Function 超伝導電磁石を用い、10m 角の部屋に設置可能であるとともに、高速にイオン種・ビームエネルギーを変化させることができる。そして回転ガントリーは、超伝導電磁石でビームを輸送し、複数のイオン種を組み合わせる治療用照射野を形成する。本発表では、この量子メスの全体設計の現状について報告する。

2.3 強度変調マルチイオン照射のためのシンクロトロン運転の検討 [10]

放医研ではこれまでに、シンクロトロンによる高速な可変ビームエネルギー制御方法と照射ビームの高速スキャン装置を開発し、現在はそれらを組み合わせた高速三次元スキャンニング照射システムを用いて治療を行っている。2017 年度からは回転ガントリー照射装置を用い

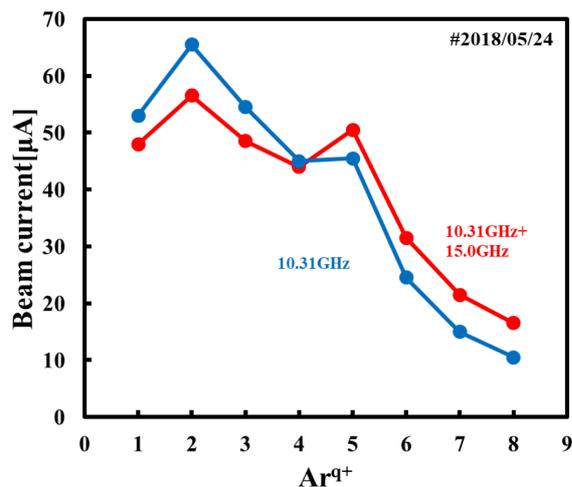


Figure 5: Charge state distributions of argon. Comparison between single heating (10.31 GHz) and two heating (10.31 + 15.0 GHz).

た治療も開始され、360度の範囲から任意の照射角度を選択できるようになり、より良い治療成果が期待される。現在放医研では、さらなる治療効果の向上を目指し、複数のイオン種を用いたマルチイオン照射法の研究が進められている。この照射法では、強度変調した複数種のイオンビームで三次元線量分布を形成することで、照射領域の生物効果をこれまで以上に制御することが可能となる。マルチイオン照射法の実現に向けて、加速器システムでは、治療照射の中で供給するイオン種とエネルギーの素早い切り替えを実現する運転制御 (Fig. 4) を目指している。本発表では、そのような目的のもと検討したシンクロトロンでの運転制御方法と、HIMACで行ったビーム試験結果について報告する。

2.4 小型 ECR イオン源におけるマイクロ波 2 重加熱試験 [11]

現在、世界的に粒子線治療施設の建設が予定されている。それらの計画の中では炭素以外のイオンを加速し、研究などに用いることが計画されている。これらの要求を達成するために、様々なイオンの供給を行える ECR イオン源 (Kei3) の開発を行なっている。Kei3 は、既存の炭素線がん治療装置用の小型 ECR イオン源と同様の閉じ込め磁場を採用しているため、C⁴⁺ に近いイオンを生成することが可能となる。Kei3 ではこれまでに、バイアスディスク法、ガスミキシング法などを用いて、多種イオンの生成試験を行ってきた。Kei3 のマイクロ波源には、周波数帯域が 8–10 GHz、最大出力が 350 W の xicom 社製の進行波管アンプ (TWTA) が使用されている。マイクロ波は、WR-90 の矩形導波管により、イオン源内に軸方向から導入される。今回は TWTA をもう 1 台追加し、マイクロ波 2 重加熱試験を行った。追加した TWTA の周波数帯域は 10–18 GHz で、最大出力は 250 W である。こちらは WR-75 の矩形導波管を用いており、WR-90 と同様に軸方向から導入される。ビーム試験の結果、TWTA が 1 台の時の Ar⁷⁺ の電流値は 16.5 μA

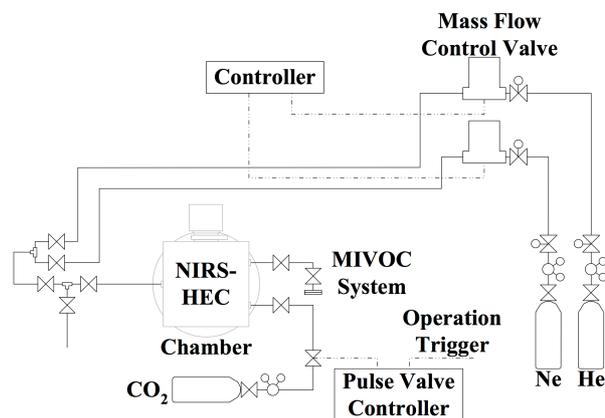


Figure 6: Gas-pulsing system for multi-ion production.

となり、2 重加熱とすると 23.5 μA となった (Fig. 5)。この時のマイクロ波の周波数は、10.33 GHz (既存 TWTA) と 14.4 GHz (追加 TWTA) である。

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 [12]

量子メスプロジェクトの一環として、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ージビリティスタディをすすめている。前回、その第一ステップとして、現状の普及型シンクロトロンを対象とした検討を行い、目標とする 1×10^9 個以上の粒子を蓄積できる可能性があることを報告した。今回は、本プロジェクトで現在検討されている超伝導シンクロトロンを入射対象とし、前回無視したベンディング効果を考慮に入れて、1 照射あたりに入射可能な粒子数を調べた。さらに、プラズマ生成点からシンクロトロンの入射点までの Beam Transport についても簡単な検討を行った。検討の結果以下のことが分かった。加速イオンを約 1.6 m 飛行させ、4 MeV/u \pm 6% のエネルギーの粒子を切り出し、位相回転により約 1/10 にエネルギー圧縮を行う。その後、ビームを成形してシンクロトロンに入射する。1 照射あたりシンクロトロンに入射される粒子数は空間電荷効果、イオンのエネルギー広がり、レーザーによる生成粒子のバラツキを考慮した結果、平均 2×10^8 個、このうち、垂直方向のエミッタンスが治療に使える値となるのは、約 1×10^8 個であった。これにより、10 Hz のレーザーで 20 回の多重回入射を行うことで 1×10^9 個以上の粒子を蓄積できると考えられる。

2.6 マルチイオン照射のためのガスパルシング法を用いたイオン種の切替 [13]

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。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替可能となるが、今後の普及展開を見据えて ECR イオン源 1 台でのイオン種切替を検討した。4 種類のイオンを生成するため、イオン源に導入するガスは He、CO₂、Ne の 3 種類とした。また、イオン源で生成するイ

オンは質量電荷比が重ならず、かつビーム電流を確保できる He^{2+} 、 C^{2+} 、 O^{3+} 、 Ne^{4+} とし、ビーム電流の目標値はそれぞれ $500 \text{ e}\mu\text{A}$ 、 $150 \text{ e}\mu\text{A}$ 、 $230 \text{ e}\mu\text{A}$ 、 $300 \text{ e}\mu\text{A}$ とした。試験は NIRS-HEC を用い、まず He ガスと CO_2 ガスをミキシングして He^{2+} 、 C^{2+} 、 O^{3+} のビーム試験を行った。次にガスパルシング法、ガス配管への電磁弁追加など不要なガスの混在を防ぐ工夫を行った上でガス切替試験を行い (Fig. 6)、目的のビーム電流が安定するまでの時間を測定した。結果、ガスパルシング法によりイオン種切替時間の短縮に成功した。ここではガス配管構成の検討や試験結果について報告する。

3. まとめ

超伝導ガントリーは、2016 年度にコミッショニングが行われ、本年度には治療利用が開始された。治療施設の普及のために、重粒子線治療装置のさらなる小型化を目指して、“量子メス”プロジェクトが開始された。このプロジェクトの一環として、小型超伝導ガントリー、小型超伝導シンクロトロン、コンパクトな多価イオン源の開発が開始されている。さらに、強度変調マルチイオン照射法のために、マルチイオン供給のためのシンクロトロン運転技術、ECR イオン源のイオン種切り替え技術に関する研究も開始されている。

参考文献

- [1] K. Noda *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. B 331 (2014) 6.
- [2] E. Takada, Nucl. Phys. A 834 (2010) 730c.
- [3] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 37 (2010) 5672.
- [4] T. Furukawa *et al.*, Med. Phys. 34 (2007) 1085.
- [5] K. Mizushima *et al.*, Nucl. Instr. And Meth. B 331 (2014) 243.
- [6] Y. Iwata *et al.*, IEEE trans. appl. supercond. 24 (2014) 4400505.
- [7] T. Shirai *et al.*, “次世代重粒子線治療に向けた量子メス治療装置の設計”, in these proceedings (WEP131).
- [8] T. Inaniwa, N. Kanematsu, K. Noda, T. Kamada, Phys. Med. Biol. 62, (2017) 5180–5197.
- [9] Y. Saraya *et al.*, “回転ガントリーのためのビームアライメント手法とその検証”, in these proceedings (WEP125).
- [10] K. Mizushima *et al.*, “強度変調マルチイオン照射のためのシンクロトロン運転の検討”, in these proceedings (THP125).
- [11] M. Muramatsu *et al.*, “小型 ECR イオン源におけるマイクロ波 2 重加熱試験”, in these proceedings (THP037).
- [12] E. Noda *et al.*, “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”, in these proceedings (THP126).
- [13] K. Takahashi *et al.*, “マルチイオン照射のためのガスパルシング法を用いたイオン種の切替”, in these proceedings (WEP043).