

山形大学医学部東日本重粒子センター建設の現状 (4)

CONSTRUCTION STATUS OF EAST JAPAN HEAVY ION CENTER, FACULTY OF MEDICINE, YAMAGATA UNIVERSITY (4)

岩井岳夫^{#,A)}, 想田 光^{A)}, 金井貴幸^{B)}, 宮坂友侑也^{A)}, Lee Sung Hyun^{A)}, 柴宏博^{A)}, 勝間田匡^{C)}, 佐藤啓^{A)}, 佐藤慎哉^{A)}, 上野義之^{A)}, 根本建二^{A)}

Takeo Iwai^{#,A)}, Hikaru Souda^{A)}, Takayuki Kanai^{B)}, Yuya Miyasaka^{A)}, Lee Sung Hyun^{A)}, Chai Hongbo^{A)}, Masashi Katsumata^{C)}, Hiraku Sato^{A)}, Shinya Sato^{A)}, Yoshiyuki Ueno^{A)}, Kenji Nemoto^{A)}

^{A)} Faculty of Medicine, Yamagata University

^{B)} Tokyo Women's Medical University

^{C)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

As reported in the previous PASJ meeting, East Japan Heavy Ion Center, Faculty of Medicine, Yamagata University began carbon ion therapy for prostate cancer with the horizontal port in February 2021. Preparation of another irradiation port, a 360° rotating gantry, needed almost one year after the horizontal port, but eventually it became operational in March 2022. This paper describes the present status of carbon ion therapy at the center, energy consumption, and startup process of rotating gantry.

1. はじめに

山形大学医学部東日本重粒子センターは、2004年の構想開始から約17年の年月を経て、2021年2月に重粒子線治療を開始した[1]。国内で7番目、世界的にも15番目以内の重粒子線施設施設である。東北地方の粒子線治療施設はこれまで福島県郡山市に南東北がん陽子線治療センターだけが稼働しており、首都圏や関西圏に比べて東北地方は粒子線治療施設へのアクセスが十分でなかった。当センターは東北地方を広域にカバーし、地域全体のがん治療に貢献することを目指して建設された。

当センターの治療システムとしては、群馬大学で実現した小型普及型炭素線専用装置の延長線上にあると言えるが、当センターが初となるいくつかの新しい技術的なチャレンジもある[2]。例を挙げると、

- ① 治療室と加速器を上下に配置したことによる世界最小の設置面積
- ② 世界最小の超伝導回転ガントリー
- ③ 世界最小・最短のスキヤニング照射装置
- ④ レンジシフト不要のエネルギースキヤニング方式
- ⑤ 省エネルギー性能の向上

などである。いずれも今後重粒子線治療が世界で普及していくために必要な技術開発として当センターの仕様に盛り込み、メーカーである東芝エネルギーシステムズ株式会社がそれらを実現した。②の回転ガントリーは、超伝導電磁石を使用して量子科学技術研究機構に設置された先行機[3]の技術をベースにして、③の世界最短スキヤニング照射装置により途中のビームラインを高磁場化することにより、全体を約2/3に小型化した新モデルである[4]。また、④は物理的なレンジシフトが無くなることでビーム品質の向上やノズルの小型化・簡素化に繋がる利点は大きい、先行施設同様に0.5 mm単位で

[#] iwai@med.id.yamagata-u.ac.jp

300 mmの飛程範囲をカバーするためには600段階の出射エネルギー全てを治療に十分な品質まで持つて行くことが必要になる[5]。これを回転ガントリーで治療に使用する各角度で実施する必要があるため、調整要素の数が莫大になることは避けられない。全数全部逐一調整しているとキリがないので、現実的には代表エネルギー・代表角度で調整し、間は補間する方法が選択される。この補間が機能すればいいのだが、容易ではなく、現状で使用可能なガントリー角度は30°毎の12角度にとどまっている。この角度数でも大部分の癌は治療できるので、2022年3月に回転ガントリーは治療を開始し、その後対象を広げ、2022年10月には眼球の癌を除く全ての対象疾患の治療受付を開始した。本稿では、当センターの重粒子線治療状況、エネルギー消費量の実績、回転ガントリーの準備状況を報告する。

2. 重粒子線治療の現状

治療装置の引き渡しは2回に分けて行われた。まず2021年2月に回転ガントリーを除く部分がメーカーから引き渡され、同月に固定照射室での前立腺癌の治療を開始した。10数名への治療によって安全性を確認した後、同年4月から前立腺癌の保険診療に移行した。基本的な週刊スケジュールは他施設と同様、月曜日はメンテナンス日に充て、火曜日から金曜日を治療日と設定している。ただし週の途中に祝日が入る週は月曜も治療を実施している。長期のメンテナンス期間(=治療停止期間)は設けず、週末を利用した分散点検にて装置の健全性を維持している。前立腺癌の場合、患者入室から位置決め、照射を経て退室までにかかる時間は平均して12分程度であるため、現在は1人15分の治療枠を設定している。重粒子線治療開始当初は週4名ペースで治療を施行してきたが、治療開始の報道が県内中心に広くなされたこともあって、予想を上回るペースで治療の申込があったため、8月には週9名の治療を実施するよう

徐々に治療枠を増やしていった。前立腺癌の場合、照射回数は一人数 12 回と決まっているので、週 9 名の治療を施行するためには 1 日あたり 27 人の患者への照射が必要となる。したがって固定照射室は 9 時から 17 時まで治療運用に供している。治療申し込みと完了人数の月別推移を Fig. 1 に示す。治療の申込は圧倒的に山形県内が多数であり、80%を超えている。県外は宮城県を中心に東北各県や隣接する新潟県から治療の申し込みが来ており、ある程度広域に利用されている。しかし東北全体をカバーするという当初の構想からは少し物足りない数字であるのは否めないもので、もっと県外での知名度を上げて県外からの申し込みを増やしていくのがセンターの一つの課題である。

また、前立腺癌以外のがんについては、回転ガントリーを使用して重粒子線治療を施行する。回転ガントリーはビームの調整に難航したが、当初の予定より半年以上遅れて 2021 年 12 月にメーカーから引き渡された。その後クリニカルコミッションを経て 2022 年 3 月に前立腺癌の治療を開始した。その後 5 月に頭頸部癌、7 月に骨盤部、10 月からは胸腹部も含む全ての対象疾患への治療を開始した。ただし、眼球の癌は特殊な照射装置を必要とするため対象外としている。

2021 年の加速器学会にて、運用開始当初に起こった重大なトラブル事例を報告した[1]が、治療を 1 日止めざるを得ないようなトラブルはその後には発生していない。治療開始以降の治療時における装置稼働率は 96.5 % である。装置のトラブルマネジメントは本学独自の管理システム PT-DOM を整備し、効率的に進めている[6]。

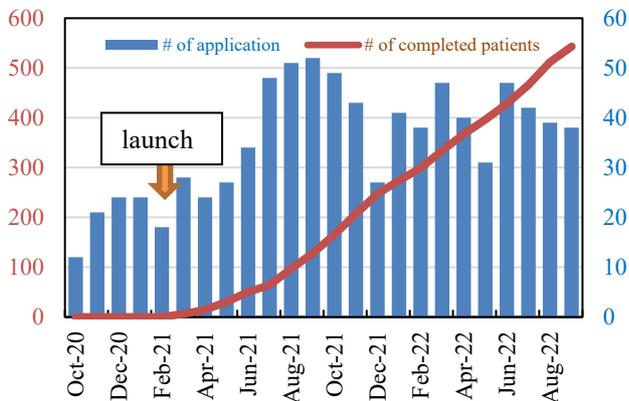


Figure 1: Accumulated number of completed patients and monthly therapy application.

3. エネルギー消費量

前述した通り、当センターにおいて省エネルギーは一つの施設コンセプトである。昨今のエネルギー価格の高騰により、省エネルギー性能は今後益々重要になっていくと予測される。当センターにおける省エネルギー・省コスト方を列挙すると[1]、

- ① シンクロトロン偏向電磁石磁極間隙短縮化
- ② シンクロトロン加減速勾配低減によるピーク電力の抑制
- ③ シンクロトロンのオンデマンド運転

④ 自然換気の導入による冬季の加速器室冷却などである。③と④については、治療装置の精度を維持できるかどうかの検証が未実施のため現時点では運用していないが、①②は装置構成で既に適用されている。加速器運転開始以来の重粒子センター全体における月ごとの電力量を Fig. 2 に示す。2021 年は回転ガントリーの早期立ち上げのために加速器の 24 時間運転を実施したため、当該月は 700~800 MWh の消費量であった。それ以外の月においては、500~600 MWh 程度であり、この値が治療時(プラス土日中運転)におけるベースラインの電力量と捉えることができる。先行施設との比較では、九州国際重粒子線がん治療センターにおいては、夏場は 700 MWh 程度であり[7]、センター全体としての省エネルギー性能がそれなりに発揮されていると言えよう。③や④の方策についても今後順次実施し、省エネルギーモデルとしての実績を今後積んでいく計画である。

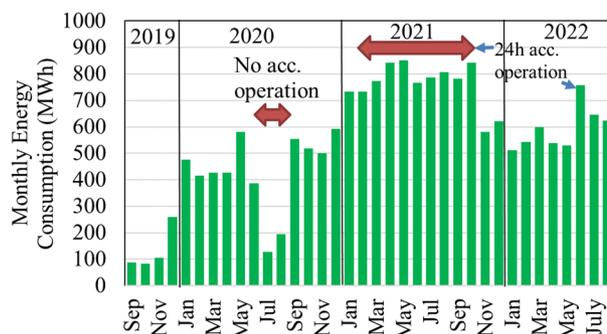


Figure 2: Monthly electric energy consumption of the whole center.

4. 回転ガントリーの運用開始まで

回転ガントリーは、当初は 2021 年 4 月にメーカーから引き渡される予定であったが、アクセプタンス試験の完了が遅れたため、最終的には 2021 年 12 月末に引き渡された。

当センターでは当初から 2 つの照射室のビームモデルを共通化する方針であり、先に運用開始した固定照射室と同じ品質(サイズとしては ±20 % 以内)のビームを回転ガントリー照射室でも使用可能な状態にする必要がある。これを 600 段階のエネルギー全てにおいて満たせないと、治療に使用することは難しい。600 段階の調整としては、全てのエネルギーで逐一調整するのではなく代表段で調整を実施し、間のエネルギーは補間によって運転パラメータを作成一実際にビームを出してみても基準に収まらなかったエネルギーは調整段を追加して補間一この iteration を全てのエネルギーが基準内に収まるまで繰り返す方針であった。実際にこの方法を適用したところ、調整段を追加しても新たに基準外のエネルギーが出るなどして収束せず、この方法では調整が完了しなかった。一つの原因として考えられるのは、先に運用開始した固定照射室を治療可能な状態に仕上げるため、回転ガントリーと共通のビーム輸送系における運転パラメータが設計値とかなり乖離した状態になっていたことが挙げられる。メーカーと対応を協議し、回転ガントリーのビームライン

に分岐してからガントリー入口までのビームラインも調整要素に加えて、一つ一つ使用可能な角度を増やしていき、引き渡しおよび治療の早期実施を目指す方針を取ることとなった。また、この運転条件を最終なものとして、加速器出射から全ての輸送系運転パラメータを最適なものとしていく作業をメーカー—大学間共同研究の形で進めることとなった。この共同研究は土日を使って進められており、2022 年度中には最適な運転パラメータを導出し、角度補間により使用可能な角度を大幅に増やす予定としている。

5. 結語

山形大学医学部東日本重粒子センターでは、2022 年 10 月に保険診療及び先進医療として実施できる全ての部位への重粒子線治療が可能な状態となった(眼球のがんは除く)。治療の申込は山形県内からは当初の見込みよりかなり多い状況だが、今後は県外からの申込増加を図る必要がある。施設のコンセプトの1つである省エネルギー性能についてはそれなりに発揮していると言えるが、電気料金の上昇分を吸収できるほどではない。回転ガントリーは利用可能角度が現状 30° 刻みに限られているので、これを増やしていくことが装置側の課題である。

謝辞

本施設の整備にあたっては、文部科学省施設整備費補助金および平成 24 年度文部科学省補正予算「次世代型重粒子線装置の開発に向けた革新的技術開発」、山形県「次世代型重粒子線がん治療装置開発整備補助金」や多数の寄附によるご支援をいただきました。また、建屋の建設に関して、株式会社日本設計、株式会社竹中工務店の皆様のご尽力に感謝いたします。治療装置の設置、調整、運転にあたっては、東芝エネルギーシステムズ株式会社、株式会社ビードットメディカル、加速器エンジニアリング株式会社の皆様のご尽力に感謝いたします。また、困難な時に貴重なご助言をいただいた量子科学技術研究機構の皆様にも深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Iwai *et al.*, “山形大学医学部東日本重粒子センター建設の現状 (3)”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Web, Aug. 9-12, 2021, pp. 10-12; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/PDF/MO0A/MO0A02.pdf
- [2] H. Souda *et al.*, “山形大学医学部東日本重粒子センターの建設”, 加速器, 17, 2020, pp. 144-150.
- [3] T. Iwata *et al.*, “炭素線治療用超伝導回転ガントリーの研究開発”, 加速器, 14, 2017, pp. 58-65.
- [4] S. Takayama *et al.*, “Design and Magnetic Field Measurement of the Superconducting Magnets for the Next-Generation Rotating Gantry”, IEEE Trans. Appl. Superconductivity, 32, 2022, 4401204.
- [5] H. Souda *et al.*, “重粒子線治療用シンクロトロン多段エネルギースキンの運用実績”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Web, Aug. 9-12, 2021, pp. 603-606; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2021/proceedings/

- PDF/WEPO/WEPO02.pdf
- [6] H. Souda *et al.*, “粒子線治療装置運転・維持管理データベース PT-DOM の開発”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Web, Japan, Oct. 18-21, 2022.
 - [7] M. Kanazawa *et al.*, “SAGA-HIMAT 立ち上げの現状とスキニング照射室整備”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 2014, pp. 874-877; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP1/SAP122.pdf