

山形大学医学部東日本重粒子センター建設の現状 (3)

CONSTRUCTION STATUS OF EAST JAPAN HEAVY ION CENTER, FACULTY OF MEDICINE, YAMAGATA UNIVERSITY (3)

岩井岳夫^{#, A)}, 想田 光^{A)}, 金井貴幸^{A)}, 宮坂友侑也^{A)}, Lee Sung Hyun^{A)}, 柴宏博^{A)}, 勝間田匡^{B)}, 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^{A)}, Yuya Miyasaka^{A)}, Lee Sung Hyun^{A)}, Chai Hongbo^{A)}, Masashi Katsumata^{B)}, Hiraku Sato^{B)}, Shinya Sato^{B)}, Yoshiyuki Ueno^{B)} and Kenji Nemoto^{B)}

^{A)} Faculty of Medicine, Yamagata University

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

Abstract

Faculty of Medicine, Yamagata University began a construction project of a carbon ion therapy facility in 2017. The main accelerator is 430 MeV/u carbon-dedicated synchrotron based on the design of the compact carbon ion therapy system similar to the former facilities. It has two treatment rooms: a fixed horizontal irradiation room and a rotating gantry room. The brand-new feature is the short-length scanning system developed by NIRS and Toshiba Energy Systems and Solutions. This contributes not only to compact building design but also to compact gantry design itself. Another new feature is 600 steps' range control by the acceleration energy within a spill without any physical range shifter. Shortened pole gap of dipole magnets of the synchrotron contributes to much lower power consumption. After several delays due to refabrication of a superconducting magnet and shortage of specification of coolant system, prostate cancer treatment began in the fixed horizontal room in February 2021. Reservation of prostate cancer patient treated in the room is steadily increasing. Commissioning of the rotating gantry with superconducting magnets is under way toward the treatment of other cancer types until this winter.

1. はじめに

山形大学医学部による重粒子線治療施設の設置プロジェクトは、2004年に嘉山孝正医学部長(当時)が、がん治療を医学部の研究および診療の柱に据え、重粒子線治療施設を設置することを教授会で決定したところからスタートした。重粒子線治療施設はまだ放医研と兵庫県立粒子線医療センターの2箇所だけで、今ほど注目を浴びていない時代に敢えて陽子線ではなく重粒子線治療に絞った理由としては、低酸素状態のがん細胞にも効果を発揮すること、細胞周期依存性が小さいこと、幹細胞にも効果が期待できること、が挙げられている。資金面の問題ですぐには実現には至らなかったが、2012年に当時の学長が、大学として重粒子線治療設置に取り組むことを宣言し、学長の号令の下で本格的な設置活動を開始した。その結果、2015年度~2018年度に装置導入および建屋建設のための補助金を文部科学省から受けられることになり、2015年度からプロジェクトは建設フェーズに入った。治療装置は(株)東芝、建物の設計は(株)日本設計、施工は(株)竹中工務店がそれぞれ受注し、2017年4月に建屋の建設が開始された。建設作業と並行して装置の搬入が進められ、2019年5月に建屋が竣工し、同年8月には装置の搬入も完了した。施設の特徴は下記に示す5点である。

- 世界最小の設置面積による総合病院接続型施設
- 世界最小の超伝導回転ガントリー
- レンジシフタ不要のエネルギースキニング方式
- 医療ネットワークによる遠隔治療討議

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

- 省エネルギー性能の向上
センターの詳細な諸元については[1]を参照されたい。

2. 施設の概要と運用状況

2.1 施設の概要

本センターは群馬大学で実現した普及小型炭素線用シンクロトロンを主加速器としており、加速粒子は炭素6価、加速エネルギーは公称50~430 MeV/uである。イオン源および入射器の基本構成は先行施設と同様であるが、高周波増幅器の真空管が半導体方式に徐々に置き換わっている。入射器および加速器は地下約10mの地下室に配置され、2つの治療室のある2階まで高エネルギービーム輸送系(HEBT)でビームを搬送し、水平ビームで治療を行う固定照射室と、360°回転する回転ガントリー照射室にビームを輸送する。照射方式はスキニング方式になっており、ビームはミニリッジフィルタによりブラッグピークを少し上げた状態でXY方向にスキニングし、奥行き方向、つまり飛程の変更は加速器のエネルギーのみで行う。物理的なレンジシフタやマルチリーフコリメータのようなビーム成形デバイスを搭載していないため、ビームノズルは他施設に比べて小型簡略化されている(Fig. 1)。飛程は0.5mmステップで設定するため、600段の粒子エネルギー設定を加速器側で行う。エネルギー変更はスパイル毎ではなく、スパイル内で変更可能であり、変更直後の質の悪いビームを遮断するシステム(プレヒートシステム)がHEBTに搭載されている。また、ビームサイズの回転ガントリー角度依存性を小さくするため、HEBT途中で薄膜を通過させてエミッタンスを対称



Figure 1: Fixed horizontal irradiation room mainly used for prostate cancer treatment. Operational since Feb. 25, 2021.

化させるエミッタンス補償装置を装備している[2]。

2.2 固定照射室

固定照射室は主に前立腺癌の治療に使われ、左右対向2門の12回照射で2021年2月から患者への治療を実施している。床下に設置された2台のX線管からアイソセンターに向けて斜め方向にX線を照射して撮像した骨の透過像と、治療計画時のCT画像から再構成した透過像とを端末上で照合し、位置の偏差を自動計算してロボットアーム型寝台を動かし、高速・高精度に患者の位置決めを行う[3]。照射時間を含めて前立腺癌患者の入室から退室までは平均で12分間程度であり、効率よく治療を遂行できている。前立腺癌治療の予約も予想以上に伸びており、9ヶ月間で既に350を超えている。約8割が山形県内、次に宮城県で、ほとんどが東北地方+新潟県からの患者で占められている。

2.3 回転ガントリー照射室

回転ガントリー照射室(Fig. 2)の方は現在主にメーカーによるビーム調整が続けられている。600段全てのエネルギー、360°全ての角度で調整を実施するのは現実的でないので、エネルギー、角度ともに代表的な点のみ調整を実施し、調整点と調整点の間は補間により運転パラメータを決定している[4]。現在はこのエネルギー・角度ごとの運転パラメータ決定に時間を要しており、全角度で治療可能になるのは2022年初頭を見込んでいる。また、肺や肝臓のような呼吸性移動する臓器には、臓器の位置が標的位置に来たときだけビームをONする呼吸同期照射を実施する。呼吸同期照射時には高速のリスキャンによってInterplay effectと呼ばれる線量の不均一を防ぐ[5]。

3. 省エネルギー

1.で述べたように、本センターは省エネルギー性能の向上による低ランニングコスト化を特徴としており、いくつかの工夫がなされている。まず治療装置では、



Figure 2: Rotating gantry irradiation room. It will be operational in early 2022.

- ① シンクロトロン偏向電磁石磁極間隙の短縮化
 - ② 同電源の加速・減速勾配の低減
 - ③ 治療装置のオンデマンド運転
- が挙げられる。

①については、二極電磁石磁場が磁極間隙にほぼ反比例することから、磁極間隙が20%短縮できれば80%の電流値で同等の磁場が発生可能であり、電力にすれば $0.8^2=0.64$ つまり64%の電力で済むため、省エネルギー効果は大きい。②については、加速・減速時の勾配を小さくすることによってピーク電力が低下するため、受変電設備の容量を抑え、ワット数で決まる電力会社への基本料金の低減、単極性電源による電源の小型化、低価格化が実現している。ただし、トレードオフとして加速時間と減速時間が先行施設より長くなるため、1患者あたりの照射時間が長くなり、現状前立腺で2分程度である。ただし、現状ではスピンル内でエネルギー変更直後にプレヒートシステムでビームを破棄する時間を長めにとってビーム品質を高く保っており、この最適化により照射時間を短縮する余地はあると考えている。③についてはまだ適用しておらず、基本的には電磁石はパターン運転を常時継続している。安定的に治療が施行できる段階になってくれば③の運用を開始することを考えている。

建屋に関しても外気取り入れによる空調コスト削減機能を備えているが、現状ではビームの安定性重視のためまだ使用しておらず、空調設備をフル稼働させている状況である。将来的には外気取り入れについても試行する計画である。また、装置エリアの冷房用の冷水温度は省エネルギー目的で高め(10°C)で設計されていたが、空調機での水蒸気の凝縮量が減ることから除湿機能があまり働かず、結果的に装置エリアの湿度が高い状態(真夏で25°C, 60%程度)になっていた。回転ガントリーでは超伝導コイルに接続される端子の表面温度が20°C以下になってしまうので、その状態では端子表面に結露も発生していた。この問題を解消するため、冷水温度を7°Cまで下げて空調機の除湿性能を向上させるとともに、回転ガントリーのエリアにはローカルの除湿機も追加で設置して、現状では真夏においても40%程度に制御できている。この状態で結露の発生は防止できている。

2021年4-6月はほぼ24時間フルに加速器を運転し

ていたが、センターの月当たり消費電力量は 800 MWh 前後であった(空調、冷却水設備含む)。ビーム調整とコミッションが完了して深夜運転を実施する必要がなくなり、前述のオンデマンド運転や自然換気を導入すれば、この値から相当量低減できると考えている。

4. 治療装置の初期トラブル

原稿執筆時点で治療開始から約 5 か月が経過した。装置稼働率としては 90%近い値になっているが、これまで数多くの初期トラブルを経験し、予定していた患者の治療が全くできなかった日も何回かあった。患者への誤照射は起きていないが、そのうちいくつかについて報告する。

4.1 プレヒートシステムの動作不良

2.で述べた通りプレヒートシステムはエネルギー変更直後の低品質のビームを遮断する装置であるが、これが正しく働いておらず、質の悪いビームがアイソセンターまで輸送された例が試射時に数回確認された。原因は動作ロジックの設計ミスであったため、誤動作しないようインターロックを追加した。この不具合のため、1 日分の照射が延期された。

4.2 スキャニング電磁石制御系の動作不良

スキャニング電磁石電源を制御する照射コントローラとの通信に失敗した場合、出力ゼロのまま照射が開始されることが判明した。また、この場合照射ログも正しく生成されず、継続照射ができないため、当日の治療は医師の判断で中止された。通信が成立しなかった場合は照射が開始されないよう、ロジックを改修して翌日から照射は再開した。

4.3 溶接ベローズの真空漏れ

HEBT の入口に設置されているビームモニタを出し入れするための溶接ベローズから真空漏れが起り、ビーム輸送できず 1 日治療は中止した。治療時に当該ビームモニタは使用しないため、当該部分を単管に置換して翌日から照射を再開した。原因はベローズの設計寿命を超えた回数 of 往復運動をしたことによるとみられる。

4.4 アインツェルレンズ電源故障

イオン源出口のアインツェルレンズ用直流高圧電源 (Spellman 社製 SL30*150) が制御不能、過電圧を出力、空気中で放電するようになった。代替品をメーカー倉庫から山形まで陸送に時間がかかり、半日程度治療が延期された。故障原因は電源メーカーにて調査中である。

この他、加速器室に設置されている PLC は全体的に誤動作の頻度が高く、中性子発生量が多いところに近いほど頻度が高くなっている印象を受けている。今後、何らかの対策(簡易的な遮蔽など)を施すことも視野に入れている。

5. まとめ

山形大学医学部東日本重粒子センターは、国内 7 施設目の重粒子線治療施設として 2021 年 2 月に前立腺癌の治療を開始した。回転ガントリーが準備出来次第、他の部位のがんも治療を開始し、2022 年には完全稼働する予定である。

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、建屋および装置の建設に関して、株式会社日本設計、株式会社竹中工務店、東芝エネルギーシステムズ株式会社の皆様の尽力に感謝いたします。

参考文献

- [1] 想田 光 他、”山形大学医学部東日本重粒子センターの建設”, 加速器 Vol. 17, 2020, pp. 144-150.
- [2] 藤本哲也 他、”散乱体を利用した遅い取り出しビームのエミッタンス整合”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Japan, Aug 8-10, 2016, pp. 671-674.
- [3] S. Mori *et al.*, “Development of fast patient position verification software using 2D-3D image registration and its clinical experience”, J. Radiat. Res., 56, 2015, pp. 818-829.
- [4] 岩田佳之 他、”炭素線治療用超伝導回転ガントリーの研究開発”, 加速器 Vol.14, 2017, pp. 58-65.
- [5] T. Furukawa *et al.*, “Moving target irradiation with fast rescanning and gating in particle therapy”, Med. Phys., Vol. 37, 2010, 4874-9.