

動体追跡とスポットスキニング技術を融合した陽子線治療システム



梅垣 菊男
Umegaki Kikuo



白土 博樹
Shirato Hiroki

(北海道大学大学院 医学研究科)

1 はじめに

2010年3月、内閣府に設置されている総合科学技術会議において、大型国家プロジェクトである「最先端研究開発支援プログラム（以下最先端プログラム）」の「中心研究者及び研究課題」が最終的に決定された。このプログラムは、全国から応募があった中から日本の科学技術の将来を担う30件を決定したもので、北海道大学大学院医学研究科 白土博樹教授を中心研究者とし、京都大学大学院医学研究科 平岡真寛教授を共同提案者とした「持続的発展を見据えた分子追跡放射線治療装置の開発」が採択された。放射線医療分野としては唯一の採択であり、今後の日本の放射線医療・がん治療技術の発展に貢献できるように、関係者が一丸となって開発を進めている。最先端プログラムでは、北海道大学（以下北大）が(株)日立製作所（以下日立）と共同で「分子追跡陽子線治療装置」を開発し、京都大学が三菱重工(株)と共同で「分子追尾X線治療装置」を開発して、連携して次世代の放射線治療システムの構築を進めている。本報告では、北大と日立が2014年3月の治療開始を目指して進めている「分子追跡陽子線治療装置」の開発プロジェクトの概要

と進捗状況を紹介する。

2 プロジェクトの概要

最先端プログラムでは、北大がX線治療で培った「動体追跡技術」と、日立が初めて臨床に応用した（米国MD Anderson病院にて）「スポットスキニング型陽子線照射技術」を融合し、動きのある体内深部臓器の大型腫瘍でも正確に照射できる世界初の「分子追跡陽子線治療装置」を完成させることを目標としている。陽子線はX線よりも線量分布の集中性に優れるため、動体追跡技術を前記の陽子線照射技術と組み合わせると、治療効果が最大限に引き出され、正常組織への無駄な照射量は大幅に削減されて、治療率と安全性が共に格段に向上すると予想している¹⁾。この「分子追跡陽子線治療装置」は、本プログラム終了後も最先端医療を継続的に提供するべく、薬事承認を取得し、北海道におけるがん治療の中心を担うべく維持していく予定である。

プロジェクトのスタートから約2年半余りが経過し、新しい陽子線治療へのチャレンジが着々と進んでいる。関係者の努力により、動体追跡とスポットスキニング照射という、世界

最先端技術の融合を特徴とした高性能陽子線治療装置の設計，主要機器の製作，施設建屋の建設が完了し，機器の搬入が始まっている。新しい技術への挑戦と同時に，装置の小型化，建屋の最適な遮蔽設計により，従来の敷地面積を大幅に縮小し，次世代の総合病院におけるがん陽子線治療普及を目指した施設を実現した²⁾。2013年の春にはビーム試験が予定されている。

3 研究進捗状況

3.1 スポットスキャン陽子線治療システムの設計

治療に利用する陽子線ビームについては，ビームを広げて削り取るといった従来の散乱体/コリメータ利用方式を用いず，スポットスキャン照射方式に特化した。その結果，体内飛程（陽子線到達深さ）確保に必要な最大加速エネルギーを約10%低減すると共に，加速器の蓄積電荷を大幅に低減することが可能になった。スキャン方式によって陽子ビームの利用効率を大幅に向上することで，被ばくにつながる中性子等の漏洩放射線量を大幅に抑えたと共に，シンクロトロン加速器，ガントリーのサイズを従来に比べて小型化することに成功した（図1，2）。

3.2 建屋施設の設計

治療施設については，建屋全体を3次元でモデル化し，3次元モンテカルロ法計算に基づく最適遮蔽設計により，設置面積を従来の7割程度に縮小した最もコンパクトでかつ十分な遮蔽能力を有する建屋構造を実現した。その結果，敷地面積を1,000 m²以下として北大病院既存敷地内（旧駐車場）に建設することが可能になった。このような設計により，小型化した陽子線治療施設を総合病院の一角に設置し，総合的がん治療の一翼を担う環境にするための道が開けたと考えている。分子追跡陽子線治療施設の平面図と内部の装置模型を図3に示す。

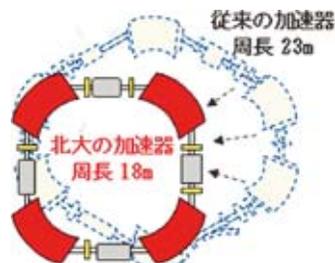


図1 シンクロトロン加速器の小型化
(周長23 m → 18 m)

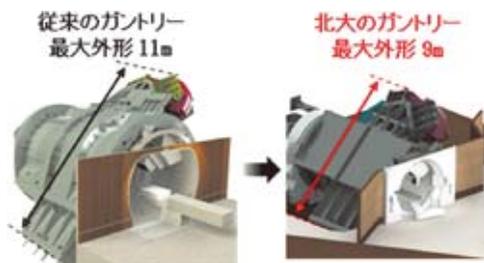


図2 回転ガントリーの小型化
(回転直径11 m/165 t → 9 m/100 t)

3.3 動体追跡技術とスポットスキャン照射技術の融合

動体追跡装置を小型ガントリー内に搭載するための設計が完了し，世界初となる陽子線スポットスキャンと動体追跡の融合が具体化した（図4）。動体追跡技術との相補的な臨床価値の向上を目的に，ガントリー搭載のX線撮像系によるコーンビームCT撮影機能及び高精度位置精度六軸ロボット寝台を中心とする高精度画像誘導位置決めシステムを開発し，治療装置としての大幅な性能向上が実現した。装置開発と並行して，過去の動体追跡治療で得られた体動データに基づき，最適なシンクロトロン制御方法や動体追跡時のスポットスキャン照射における線量分布の一様性，照射効率の向上の研究を実施している³⁾。

3.4 治療計画シミュレーション

分子追跡陽子線治療装置の臨床試験の準備として，陽子線治療のプロトコル原案を作成している。また，治療開始へ向けての臨床検討と

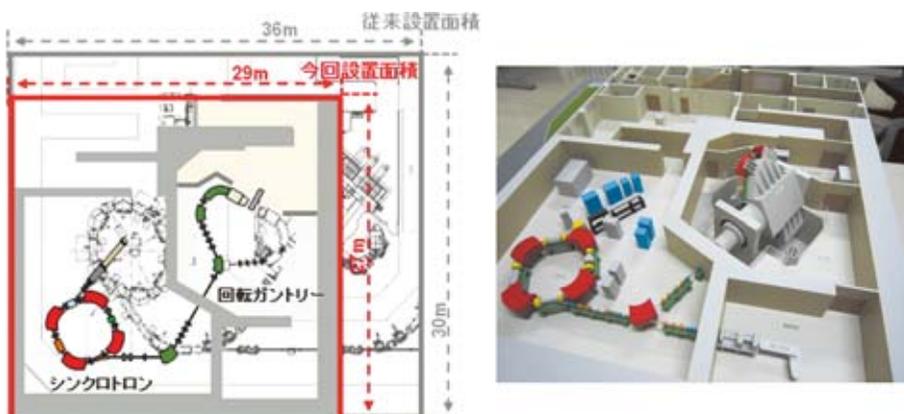


図3 陽子線治療施設のコンパクト化（設置面積を約7割に低減）

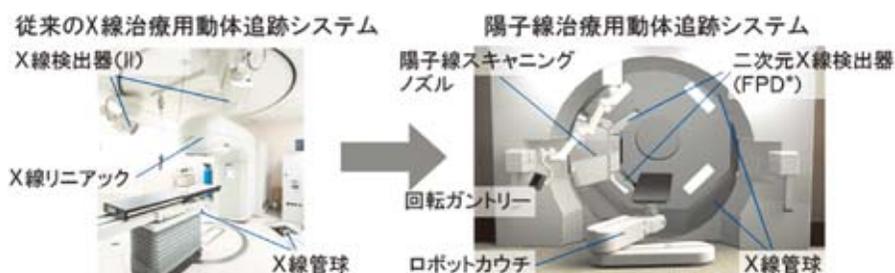


図4 陽子線治療用ガントリー内部と動体追跡システム（*FPD：フラットパネルディテクター）

して、分子追跡陽子線治療装置向け照射シミュレーションシステムを開発し、X線治療で経験した実症例に基づいて陽子線治療のシミュレーションを実施し、線量分布の比較評価を行うと共に、医師、医学物理士による治療計画のレビューを治療開始に向けて継続して実施している（図5）。

4 おわりに

プロジェクトの残り期間は1年半を切り、装置建屋はほぼ完成した（図6）。呼吸等で動く腫瘍を正確に狙い撃つ動体追跡システムを装備し、スポットスキャンング照射で腫瘍のみに線量を集中させる最先端の機能を有する陽子線治療システムが着々と完成に近付いている。本装置の開発と臨床への適用を実現して、今後の日本の放射線医療・がん治療技術の発展と世界の

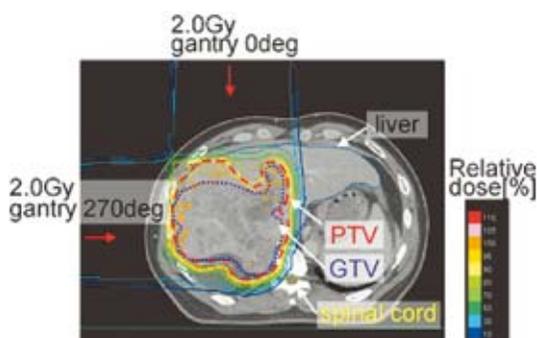


図5 大型の肝臓癌に対する陽子線照射シミュレーションの例

粒子線治療技術の普及⁴⁾に貢献していきたいと考えている。

本プロジェクトの目的やより詳細な進捗状況については、最先端研究開発支援プログラム「持続的発展を見据えた分子追跡放射線治療装



図6 完成した分子追跡陽子線治療建屋の概観

置の開発」のホームページ (<http://rtpbt.med.hokudai.ac.jp>) で紹介しているので、一度ご覧いただきたくお願いいたします。

【謝辞】

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより、日本学術振興会を通して助成されたものです。関係各位、機関に感謝いたします。

参考文献

- 1) Shirato, H., Onimaru, R., Ishikawa, M., Kaneko, J., Takeshima, T., Mochizuki, K., Shimizu, S. and Umegaki, K., Real-time Four-dimensional Radiotherapy for Lung Cancer, *Cancer Science*, **103**(1), 1-6 (2012)
- 2) Shirato, H., Umegaki, K., Shimizu, S., Matsuura, T., Miyamoto, N., Toramatsu, C., Takao, S., Nihongi, H., Hiramoto, K. and Nakamura, F., Development of Spot Scanning Proton Beam Therapy System With Real-Time Tumor-Tracking Technology, PTCOG 51, Seoul, Korea (2012)
- 3) Matsuura, T., Maeda, K., Sutherland, K., Takayanagi, T., Shimizu, S., Takao, S., Miyamoto, N., Nihongi, H., Toramatsu, C., Nagamine, Y., Fujimoto, R., Suzuki, S., Ishikawa, M., Umegaki, K. and Shirato, H., Biological effect of dose distortion by fiducial markers in spot-scanning proton therapy with a limited number of fields: a simulation study, *Medical Physics*, **39**(9), 5584-5591 (2012)
- 4) Riboldi, M., Orecchia, R. and Baroni, G., Real-time tumor tracking in particle therapy: technological developments and future perspectives, *Lancet Oncol.*, **13**, e383-391 (2012)