

粒子線治療装置の技術革新

築島千尋*
大谷浩司**

Technological Innovation of Particle Therapy System

Chihiro Tsukishima, Hiroshi Otani

要旨

身体的負担が少なく、がん患部を集中的に治療できる粒子線治療への期待が高まっている。三菱電機では次世代対応の高線量率ブロードビーム照射（格子照射）と高精度スキャンニング照射の開発に取り組んでいる。前者は、高線量率ブロードビーム照射として線量率を従来の3倍以上に高めることができ、治療時間を短縮することができる。陽子線タイプの治療装置を岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センターに納入し、既に治療が開始されている。後者は、精密に患部に線量を集中させ、正常組織のダメージを最小限にできる。陽子線タイプでは単一照射室で複数の照射法が使用できる照射ノズルを照射室ごとに備えるメリットがあり、スキャンニング照射との切替えが可能な“セレクトビームノズル”としてステップアップする予定である。一方、炭素線タイプでも、放射線医学研究所主導で開発された重粒子線治療装置の小型化技術を用いた民間普及機を、九州国際重粒子線がん治療センターに納入した。既に稼働中のブロードビーム用治療室2室に加え、現在高精度スキャンニングが可能な新治療室の稼働を準備中である。

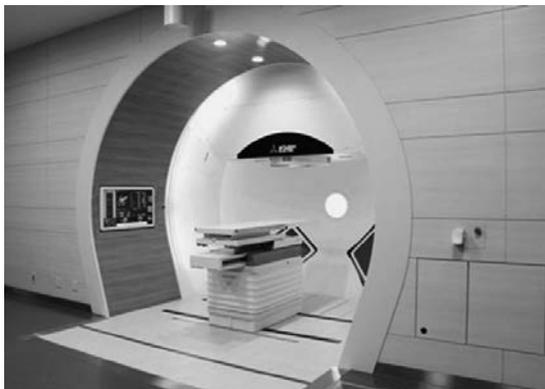
陽子線タイプでは単一照射室で複数の照射法が使用できる照射ノズルを照射室ごとに備えるメリットがあり、スキャンニング照射との切替えが可能な“セレクトビームノズル”としてステップアップする予定である。一方、炭素線タイプでも、放射線医学研究所主導で開発された重粒子線治療装置の小型化技術を用いた民間普及機を、九州国際重粒子線がん治療センターに納入した。既に稼働中のブロードビーム用治療室2室に加え、現在高精度スキャンニングが可能な新治療室の稼働を準備中である。



岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター



九州国際重粒子線がん治療センター



陽子線回転ガントリー治療室
(画像提供：津山中央病院)



炭素線スキャンニング治療室(薬機未承認)
(画像提供：公益財団法人佐賀国際重粒子線がん治療財団)

技術革新が進む粒子線治療装置

粒子線治療装置は、最新の技術の導入が進んでいる。小型回転ガントリー及び高線量率照射機能を搭載する陽子線治療装置を岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センターに納入し、高精度スキャンニング照射用治療室の整備が進む炭素線治療装置を九州国際重粒子線がん治療センターに納入した。

1. ま え が き

がんは、1981年から日本での死因の第1位であり、2010年には年間35万人が亡くなり、生涯のうちに約2人に1人ががんにかかると推計されている⁽¹⁾。放射線治療は、外科治療、化学治療と並び、がん治療の中心を担っているが、患者への身体的負担が小さく、社会復帰が容易でQOL (Quality Of Life) に優れていることから今後の更なる普及が期待される。放射線治療の中でも粒子線治療は、従来のX線を用いた治療と比べ、線量の集中性に優れ、患部形状に合わせた照射が可能なることから、国内外への導入が進み、国内の粒子線治療施設は15施設を数える⁽²⁾。当社は15施設のうち、8施設の建設に参画して装置を納入し、現在2施設が建設中である。粒子線治療装置は普及が進んでいるものの、今後も更なる進化が求められている。

本稿では、粒子線治療装置での当社の技術開発状況について述べる。

2. 粒子線治療装置の最新技術

粒子線治療装置は、陽子線を用いるタイプと炭素線を用いるタイプの2種類が普及している。陽子線は水素イオン、炭素線(重イオン線とも呼ばれる)は炭素イオンを加速し、患部に照射する。陽子線、炭素線とも、物理的に体内で吸収される線量の分布特性に特徴を持っている。粒子線治療はこの特徴を活用し、患部に集中的に照射することができる。従来使われているX線、 γ 線は体表付近で吸収線量がピークとなり徐々に減衰するのに対し、陽子線、炭素線は身体表面から深部にあるがん病巣で最大値をとる(図1)。これをブラッグピークと呼び、この特性によって線量の集中性が実現される。

当社では粒子線の特性を踏まえ、照射の高度化を目指すために、次の3つの技術開発を進めている。

- (1) 治療時間を短縮するための高線量率照射
 - (2) 複雑な患部形状を照射するための高精度スキヤニング
 - (3) 患部に最適な照射法を提供するセレクトビームノズル
- 次にそれぞれについて、述べる。

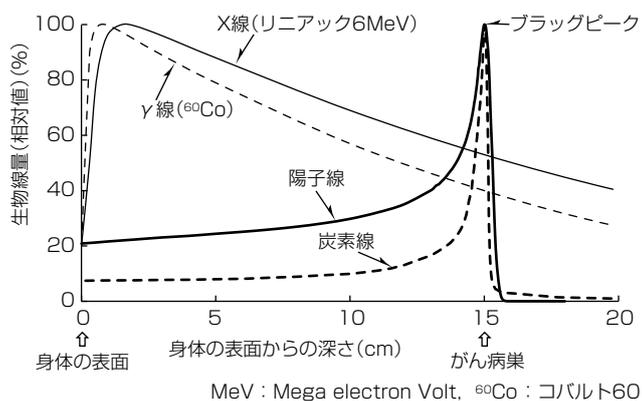
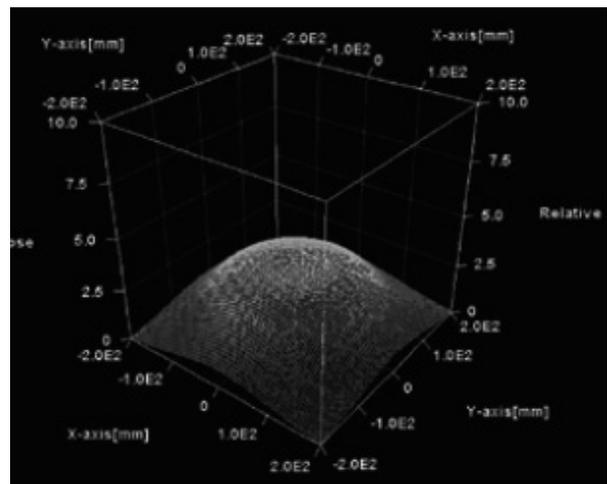


図1. 各種放射線の線量分布特性

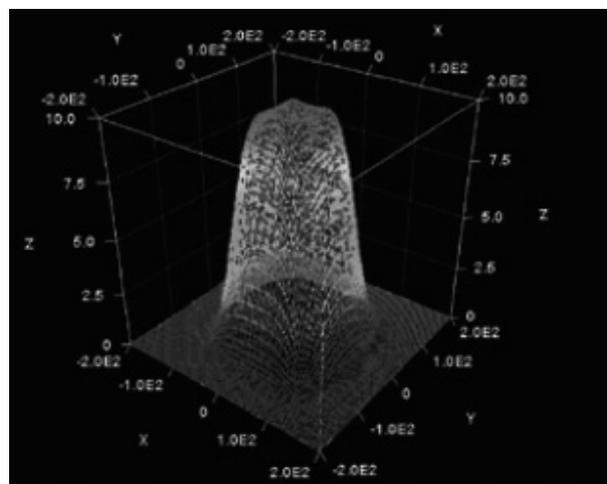
2.1 高線量率照射

粒子線の良好な線量集中性を活用してがん患部に放射線投与を行う。粒子線の特性を活用して精度よく患部に高い線量を集中させるために、患部は粒子線の照射位置に対してミリ単位であらかじめ位置決めされる。患者は治療台と呼ばれるベッドの上で固定具を装着するなどして照射を行う数分の間、動きを抑える工夫がとられている。したがって、粒子線の強度(線量率)を向上させて、照射時間を短縮することは、より高精度に照射するための重要な要素であり、さらには、患者の負担を軽減することにつながる技術となる。

当社はこの課題を解決するため照射方法の改善を図り、最新型の陽子線治療装置“MELTHEA-V”では“格子照射法”と呼ぶ新たな照射方法を開発した。格子照射法では比較的細く絞ったビームを格子点状に走査し、照射野を均一に塗りつぶす方法である。この方法は従来に比べて、ビームを拡大するための散乱体を薄くできるため、照射野外のビームが大幅に削減され、線量率が向上する。図2に計算による従来照射法と格子照射法の比較を示す。従来のブロードビーム照射法に比べて格子照射法では所定の照射野に線量を集中できる特徴がある。



(a) 従来照射法



(b) 格子照射法

図2. ブロードビーム照射法の線量集中性の比較

2.2 高精度スキャンニング照射

近年、最先端の粒子線照射方法として注目されているのがスキャンニング照射法である。ブロードビーム照射法は、加速器から取り出したビームを各種照射系機器によって散乱、拡大し、均一に塗りつぶした一様照射野から患部形状にマッチした必要な領域だけを切り出して患部に照射する方法である。一方、スキャンニング照射法は、加速器から取り出したビームを散乱させずにビーム径を細いまま患部に照射する技術である。患部がビーム径に適合した小さな領域(スポット)に分割され、スポットごとに患部を塗りつぶしていく(図3)。

スキャンニング照射法では、ブロードビーム照射法に比べて患部に合わせて三次元的に線量分布を最適化できるので粒子線の特徴である良好な線量集中性をより高めることができる。

高精度な照射を実現するためにはスポットのサイズをなるべく小さくすることが有利である。これによって精密に患部形状を塗りつぶすことで患部周囲の重要臓器などの正常細胞への被ばくが抑えられる。一方で、スポットサイズの縮小は患部を塗りつぶすために必要なスポット数が増加し、結果的に照射時間が長くなることにつながるため、1つ1つのスポットを高速で移動させる技術が必要となる。

当社ではこのビームの移動速度(走査速度)を従来機の約5倍である100m/秒とし、スポットごとの移動時間を最小化した。さらに、これによって照射時間を延ばすことなく照射を数回に分割して高速で繰り返す照射(リピート照射)が可能となり、肺など患者の呼吸に伴って動く臓器

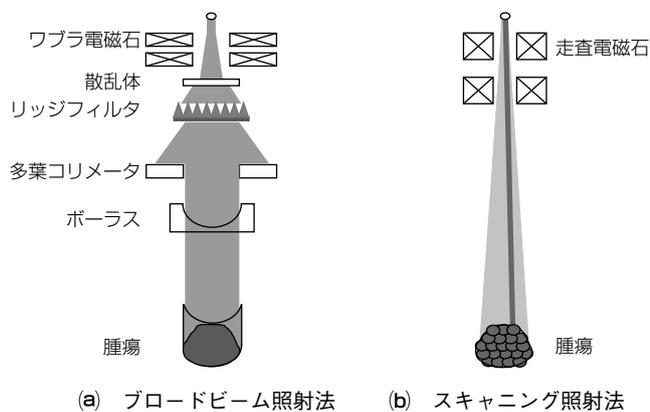


図3. 照射法の比較

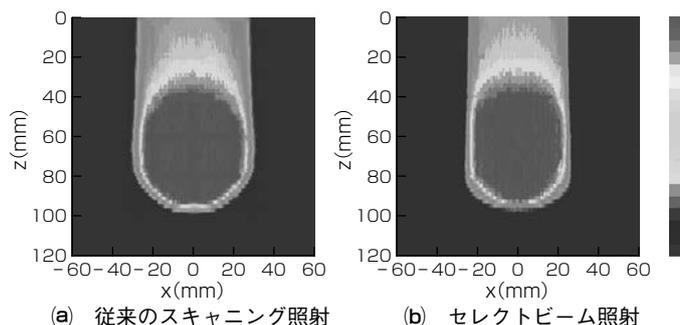


図4. 線量分布の比較

に対しても均一な照射を実現することが可能である。

2.3 セレクトビームノズル

陽子線治療装置用に、先に述べた高線量率照射(格子照射)と高精度スキャンニング照射の2つのレパートリーを単一の照射ノズルで実現可能とするのがセレクトビームノズルである。単一のノズルの内部で装置構成を切り替える機構を設け、高線量率照射と高精度スキャンニング照射をシームレスに切替え可能な設計とし、治療する症例ごとによって照射法を素早く変更できる。精密な照射が必要な部位には高精度スキャンニング照射法を適用し、高線量率を活用して短時間で照射したい部位には格子照射法を用いるなどによって、治療の効率化と治療品質の向上の両立を図ることができる。陽子線では上流の照射系機器の散乱によってビームサイズが比較的大きくなる(〜5mm)ため、スキャンニング照射に多葉コリメータを併用することで側面の線量分布(ペナンプラ)を向上させることも可能である。図4に計算による線量分布の比較を示す。セレクトビームでは側面の端部分布をよりシャープに形成できている。

3. 粒子線治療装置のタイプ

陽子線は装置を小型化できるため都市部等への普及が望まれており、炭素線はより優れた線量分布や生物学的効果を活用し、広域での普及が望まれている。ここでは陽子線タイプと炭素線タイプについて装置の導入状況について述べる。

3.1 陽子線タイプ

これまで複数の治療室を持つ大規模装置が導入されてきたが、最近では、都市部などの狭い敷地にも設置できる1室タイプの装置ニーズが高まっている。当社では都市部での様々な敷地制約に対応できるように回転ガントリーの小型化、加速器ビームラインの小型化、遮蔽計算の高精度化による建屋壁厚の最適化を図り、新たな装置レイアウトを開発した。このレイアウトは岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター向けに採用され、この病院では2016年4月から治療が開始されている(図5)。さらに、加速器と治療室を階層構造とすることによって敷地面積を極小化した立体配置も可能となり、建設中の医療法人伯鳳会 大阪陽子線クリニック(仮称)、神戸ポートアイラ



図5. 岡山大学・津山中央病院共同運用がん陽子線治療センター



画像提供：津山中央病院

図6. 陽子線回転ガントリー治療室



画像提供：公益財団法人佐賀国際重粒子線がん治療財団

図8. 炭素線スキャンニング治療室(業機未承認)



図7. 九州国際重粒子線がん治療センター

ンドに建設される小児がん重点を置いた新粒子線治療施設向けに採用されている。3施設とも小型回転ガントリーに、先に述べたセレクトビームノズルの最新機能を具備する構成としている。装置を小さくする一方で治療室の開口径は従来モデルと同等の大きさを確保しており、自在な照射が可能である(図6)。なお、スキャンニング照射法は現在業機申請を準備中である。

3.2 炭素線タイプ

炭素線タイプでは、放射線医学総合研究所主導で開発された重粒子線治療装置を民間普及機として製品化し、九州国際重粒子線がん治療センターで2013年8月から治療が開始されている(図7)。このセンターでは年々治療患者数が増えてきている中、既に稼働中のブロードビーム用治療室2室に加え、今後更に見込まれる治療患者数の増加に対応するため、2014年から3か年計画で新治療室の稼働を整備中である。さらに、新治療室に高精度スキャンニングを導入し、機能アップを実現する(図8)。センターでは治療を止めずに整備を進めるため、工事のための休止期間は設けず、夜間、週末及び2週間の夏期保守期間に限定して工事を進めており、現在業機申請を準備中の状況である。

炭素線は陽子線よりもビームサイズを小さくできるため($\sigma < 2\text{mm}$)、精細な線量分布を形成しやすい特長がある。一方で、均一な照射野を形成するために、ペンシルビームの安定性と正確なスキャンニング走査量が要求される。

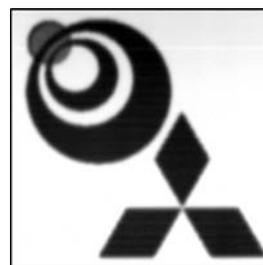


図9. スキャンニング照射デモ描画

九州国際重粒子線がん治療センターでの試験結果では、ビーム位置安定性 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下、走査精度 $\pm 0.3\text{mm}$ 以下とともに良好な装置性能が得られている。図9は245mm×245mmの平面領域に炭素線を用いてデモ描画した結果である。図形の円形、くさび形状部分など精彩に描画できていることが分かる。現在、治療計画装置を含めたビーム検証を実施中であり、治療に向けたコミッショニングを進める予定である。

4. むすび

がん治療の最先端治療装置である粒子線治療装置での技術革新状況を述べた。今後も照射法の技術開発に努める一方、粒子線治療装置の普及に向けて、装置の改善を進めていく。陽子線タイプのコミッショニングには、(株)ひょうご粒子線メディカルサポートの赤城 卓氏、清水勝一氏の支援を得た。また、炭素線タイプでは放射線医学総合研究所の古川卓司氏、水島康太氏、原 洋介氏の設計支援並びに九州国際重粒子線がん治療センターの溝田 学氏、網島義一氏、日向猛氏にコミッショニングの協力を得て進めている。本稿をむすぶに当たり各位に感謝申し上げる。

参考文献

- (1) 厚生労働省：がん対策推進基本計画(2012)
- (2) 公益財団法人医用原子力技術研究振興財団HP：切らずに治す粒子線治療
http://www.antm.or.jp/05_treatment/04.html