

# 最新の粒子線治療装置

大谷利宏\*  
鳥羽 順\*

## Latest Particle Beam Treatment Systems

Toshihiro Otani, Jun Toba

### 要 旨

近年の急激ながん患者の増加に伴い、患者への身体的負担が少なく、社会復帰が容易でQOL(Quality of Life)に優れている粒子線治療への期待が高まっている。粒子線治療は、従来のX線を用いた放射線治療に比べて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、国外での導入が進んでいる。三菱電機は次世代粒子線治療に対応した最新照射技術として次の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照射
- ③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

これら最新照射技術を実用化するため、社内に自社検証設備を設置した。

当社が提供する粒子線治療装置は炭素線タイプと陽子線タイプがある。炭素線タイプの最新機は2013年治療を開始した九州国際重粒子線がん治療センター向け重粒子線治療装置である。この装置は“普及小型重粒子線治療装置”の初の民間向け普及機であり、既設装置の経験を生かして加速器システムの高性能化、運転の省人化、デザインの改善などを図っている。

陽子線タイプは、都市部の狭い敷地への導入要望に対応するため敷地面積の小型化を図った。小型化にもかかわらず、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、自在なノンコプラナ照射が可能である。



### 粒子線治療装置

粒子線治療装置は、粒子線の線量集中性を生かしてがん患部に放射線投与を行う。

(上段)九州国際重粒子線がん治療センター重粒子線治療装置 (左) 炭素線シンクロトロン (右) 治療室

(下段)陽子線治療装置自社検証設備 (左)陽子線シンクロトロン (右)治療室を模擬したショールームが併設されている。

## 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<sup>(1)</sup>。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に優れていることから今後の更なる普及が期待されている。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て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、国内外での導入が進んでいる。国内の粒子線治療施設だけでも11施設を数える<sup>(2)</sup>。当社は11施設のうち、8施設の建設に参画し装置を納入している。

粒子線治療装置は普及が進んでいるものの、今後も研究開発による更なる進化が求められている。本稿では、粒子線治療装置における当社の技術開発動向について述べる。

## 2. 粒子線治療装置の最新技術

粒子線治療装置は、炭素線を用いるタイプと陽子線を用いるタイプの2種類が普及している。炭素線(重イオン線とも呼ばれる。)は炭素イオン、陽子線は水素イオンを加速し、患部に照射する。炭素線、陽子線とも、物理的に体内で吸収される線量の分布特性に特徴を持ち、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、ガンマ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、炭素線、陽子線は体表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できる。

当社では粒子線のこの特性を踏まえ、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ャンニング照射
- ③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

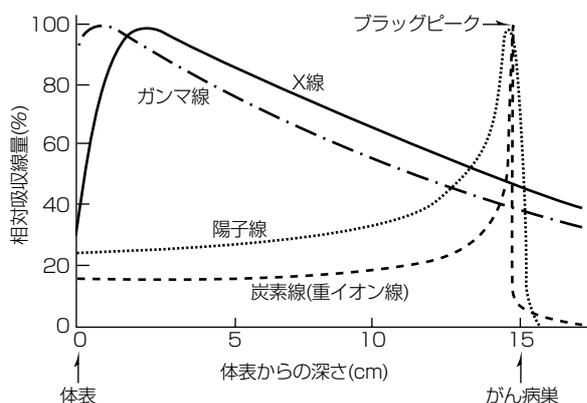


図1. 各種放射線の線量分布特性

### 2.1 高線量率照射

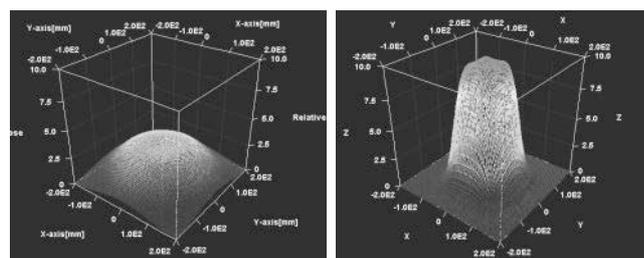
先に述べたように粒子線はその良好な線量集中性を活用してがん患部に放射線投与を行う。粒子線の特性を活用して精度よく患部に高い線量を集中させるために患部は粒子線の照射位置に対して数ミリ単位で位置決めされる。そのため、患者は治療台と呼ばれるベッドの上に固定具を使用して拘束され、数分の間、身動きができない状態となる。このことは患者、特に高齢者や小児にとっては苦痛となる。そこで、できるだけ粒子線の線量率を向上させて、一度の照射での照射時間を短縮し、患者の身体的及び精神的負担を軽減することが求められている。

当社はこの課題を解決するために照射方法の改善を図った。最新型の装置ではユニフォームスキャンニングと呼ばれる照射方法を採用した。ユニフォームスキャンニングでは、比較的細く絞ったビームを走査し、照射野を均一に塗りつぶす方法である。この方法は従来の単円ワブラー法や二重散乱体法と呼ばれる方法に比べて、中性子となって損失する粒子線量が少ない。そのため線量率が向上する。

当社の従来タイプ装置は単円ワブラー法と呼ばれる照射法を用いていた。図2に示すように、単円ワブラー法に比べてユニフォームスキャンニングは所定の照射野に線量を集中できる特長がある。線量率は従来の3倍以上の15~20Gy/分を得ることができる。これによって照射時間は最大で従来の4分の1に短縮することができる。また中性子の発生を少なくすることができる。

### 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ペンシルビームスキャンニング法(以下“スキャンニング法”という。)である。従来照射法(単円ワブラー法、ユニフォームスキャンニングを含む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、その拡大ビームによって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に分割され、分割ごとに患部を塗りつぶしていく(図3)。



(a) 単円ワブラー法 (b) ユニフォームスキャンニング

図2. 線量集中性の比較

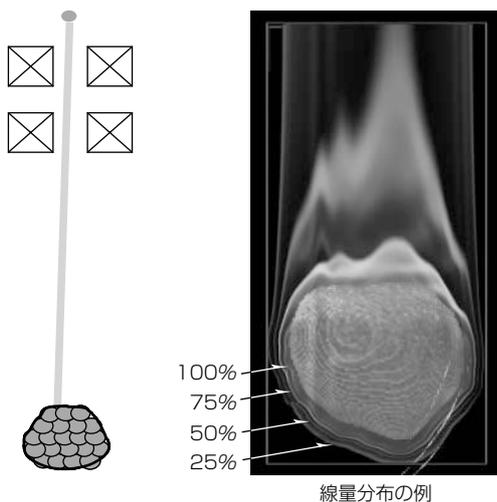


図3. スキャニング照射

スキャニング法を適用することによって、ブロードビーム法に比べて患部に合わせて線量分布を最適化できるので粒子線の特長である良好な線量集中性をより高めることができる。

このように、患部を分割領域単位で塗りつぶすことができるのがスキャニング法の特長である。そして、この分割領域のサイズをなるべく小さくした方が、より精密に患部形状を塗りつぶすことができ、患部周囲の重要臓器など正常細胞への被ばくが抑えられることは自明である。

当社はビームサイズ拡大を抑えるために加速器及び照射系の物理設計、装置の工夫を行った。ビームのスポットサイズは、後述するユニバーサルノズルの場合で従来の2分の1の約5mmとした。また、スキャニング専用装置の場合、約3mmまで高精細にすることが可能である。

また、ビームの走査速度を従来機の約5倍である100mm/msとした。これによって患者の呼吸位相に同期してビームを照射する方法である呼吸同期照射の際の線量集中性を従来機に比べて飛躍的に高めることができる。

2.3 ユニバーサルノズル

当社の粒子線治療装置は、2.1節で述べた高線量率照射(ブロードビーム照射及び積層原体照射)と2.2節で述べた高精度スキャニング照射のレパートリーを持つ。この複数の照射方法を一つの照射ノズルで実現可能とするのがユニバーサルノズルである(図4)。当社のユニバーサルノズルは単一のノズルの内部で自動で装置構成が切り替わることによって、ブロードビームとスキャニングをシームレスに切り替えることができる。医療スタッフが重量物を脱着するなどの手間は不要であり、症例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スキャニングを適用し、高線量率を活用して短時間で照射したい部位や呼吸同期照射が必要な部位にはブロードビームを用いることによって、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。

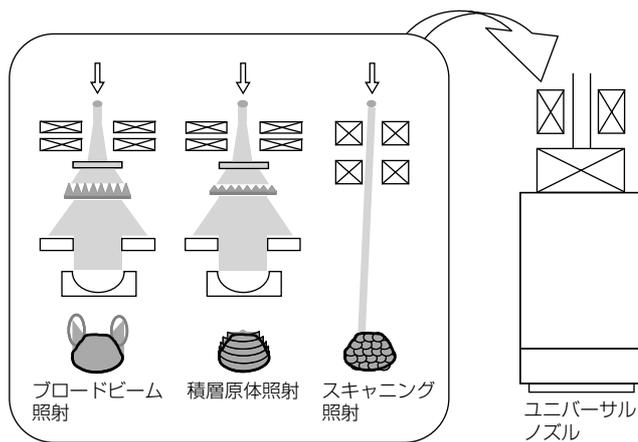


図4. ユニバーサルノズル



図5. 新型シンクロトロン加速器



図6. 検証用ビームライン

2.4 自社検証設備

最新技術を実用化するにあたり、新機能の品質の評価・検証を実施する目的で、社内に自社検証設備を建設した。装置は陽子線タイプである。専用建屋に陽子線を発生する加速器と検証用ビームラインを設置した(図5, 図6)。この装置を用いてビーム試験を実施し、新機能の検証を行う。粒子線治療装置は装置規模が大きいため、一般的には実用化前に装置性能に関する事前検証ができない例が多い。また、その場合の薬事承認申請は、納入機の完成後に必要なデータを取得することになる。そのため、ユーザーの治療開始が大幅に遅延することになり、ユーザーに機会損失を強いる問題がある。当社はこの検証設備を用いて薬事承認に必要なデータ取得を実施し、ユーザーに引き渡す前に薬事承認を取得することでユーザーの早期治療開始と費用回収に貢献する。

3. 粒子線治療装置のタイプ

現在普及している粒子線治療装置は、炭素イオンを用いる炭素線タイプと水素イオンを用いる陽子線タイプ、両方のイオンが可能なデュアルタイプに大別できる。ここでは、炭素線タイプと陽子線タイプについて、当社の最新の取組みについて述べる。

3.1 炭素線タイプ

当社が受注した炭素線タイプの最新装置である九州国際



(a) 九州国際重粒子線がん治療センター



(b) シンクロトロン



(c) 治療室

公益財団法人 佐賀国際重粒子線がん治療財団提供

図7. 九州国際重粒子線がん治療センター

重粒子線がん治療センター(SAGA HIMAT)は、2013年に治療を開始した。炭素線治療が可能な施設としては国内で4か所目であるが、民間施設としては最初となる(図7)。

(独)放射線医学総合研究所主導で開発した普及小型重粒子線治療装置は、重粒子線治療を一般に広く普及させるために従来装置をよりコンパクトにしたものである。当社はその普及小型の実証機として群馬大学に重粒子線治療装置を納入した。九州国際重粒子線がん治療センターの重粒子線治療装置は、実証機で得た知見を反映して改善した初号機である。

装置は3治療室(うち、1室は将来設置予定)で構成し、どの治療室も2方向の照射ポートを持つ(水平と垂直ポートの治療室が2室、水平と45度ポートが1室)。装置の特長は次の3点である。

(1) 加速器システムの高性能化

将来実装予定のスキニング照射に対応するため、加速器システムの高性能化を図った。

(2) 治療装置としての改善(省人化)

従来加速器と照射装置にはそれぞれ運転員が必要であったが、制御システムの改善によって統合を図り、少ない人数での運転が可能となった。

(3) 人に優しいデザインの実現

治療室の照明・画像情報を工夫し、患者が少しでもリラッ

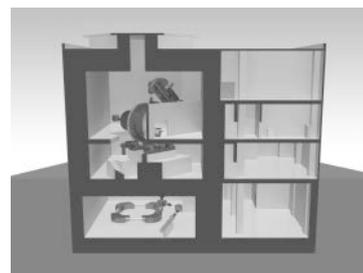


図8. 立体モデルのレイアウト

クスして治療を受けられるように、デザインを刷新した。また、医療スタッフが効率よく操作・運用できるように、ユニバーサルデザインを取り入れた表示画面・操作機を開発した。

3.2 陽子線タイプ

これまでは、複数の治療室を持つ大規模装置が導入されてきた。しかし最近では、都市部などの狭い敷地に設置するために、治療室が1室の装置にニーズが高まっている。当社では敷地の様々な制約に対応できるように、平面モデルと立体モデルの2種類を検討している。平面モデルは機器配置の最適化、遮蔽計算の高精度化による壁厚の見直しなどによって敷地スペースを削減した。立体モデル(図8)は、地下の掘削が容易な敷地であれば、加速器を地下に、治療室をその上階に配置することによって、当社従来モデルの70%に削減することができる。

機能的には、両モデルとも先に述べた高線量率照射、高精度スキニング照射、ユニバーサルノズルをサポートしており、最新の技術を備えている。また、装置自体を小さくしたにもかかわらず、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、自在なノンコプラナ照射が可能である。

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における技術開発動向について述べた。当社は粒子線治療の高度化要請に応えるために、照射法の技術開発に努める一方、粒子線装置の普及に向けて、装置の小型化・使いやすさの改善を進めている。加えて、医療機器の使命を鑑み、装置の信頼性・安全性が重要なことは言うまでもなく、継続的に改善を行う必要がある。今後とも、社会の要請に対応した粒子線治療装置を提供していく所存である。

参 考 文 献

- (1) 厚生労働省：がん対策推進基本計画 (2012)  
[http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/dl/gan\\_keikaku\\_02.pdf](http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/dl/gan_keikaku_02.pdf)
- (2) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団：切らずに治す粒子線治療  
[http://www.antm.or.jp/05\\_treatment/04.html](http://www.antm.or.jp/05_treatment/04.html)