

最新粒子線治療装置の開発状況

三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部
磁気応用先端システム部
生産システム部

大谷 利宏
築島 千尋
伊藤 慶子

抄録

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。当社では次世代対応の高線量率ブロードビーム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。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。これらの照射法を患者の症例によって使い分けるためには照射ノズルを照射室毎に備える必要があった。当社は複数の照射法を1つの照射ノズルで実現できるユニバーサルノズルを開発している。これにより単一照射室で複数の照射法が使用できる。社内に設置した陽子線タイプの検証設備により、上記の最新照射法の検証試験を行っている。また、放射線医学研究所殿主導で開発された重粒子線治療装置の小型化技術により民間普及機の開発を進め、九州国際重粒子線がん治療センター殿に納入した。その他当社の取組みを紹介する。

1. はじめに

がんは、1981年より日本での死因の第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さら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、患部形状にあ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11施設を数える²⁾。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りさらなる進化を求められている。本稿では、粒子線治療装置における当社の技術開発状況を紹介する。

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ち、粒子線治療

はこの特徴を活かし患部に集中的に照射することができる。従来から使われている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、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、この特性により線量の集中性が実現される。

当社では粒子線の上記特性を踏まえ、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
- ③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

以下それぞれについて、説明する。

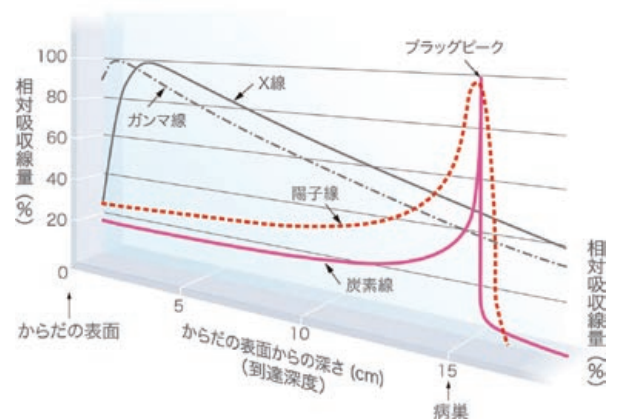
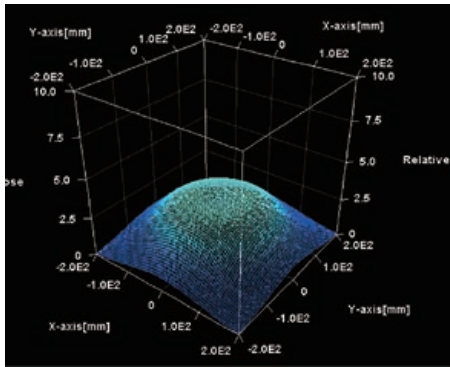


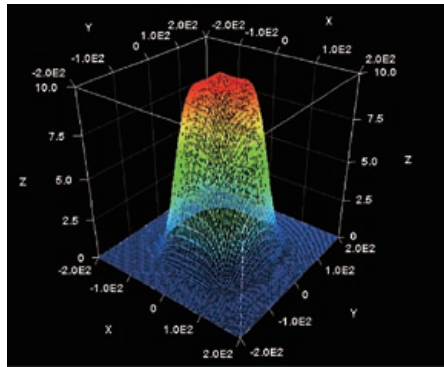
図1 各種放射線の線量分布特性

1) 厚生労働省 がん対策推進基本計画(平成24年6月) http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/dl/gan_keikaku02.pdf

2) 公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団 http://www.antm.or.jp/05_treatment/04.html



(a) 単円ワブラー法



(b) ユニフォームスキニング

図2 線量集中性の比較

2.1 高線量率照射

前述のように粒子線はその良好な線量集中性を活かしてがん患部に放射線投与を行う。粒子線の特性を活か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、身動きが出来ない状態となる。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して、一度の照射における照射時間を短縮し、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。ユニフォームスキニングと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に比べて、中性子となって損失する粒子が少なく。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ニングは所定の照射野に線量を集中できる特徴がある。線量率は従来の3倍以上の15～20Gy/分を得ることができる。これにより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 高精度スキニング

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ニング法(以下スキニング法という)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り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)。

スキニング法を適用することにより、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徴である良好な線量集中性をより高めることができる。

前述のとおり、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ニング法の特徴である。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。

当社はビームサイズ拡大を抑えるために加速器並びに照射系の物理設計および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。

さらにビームの走査速度を従来機の約5倍である100m/秒とした。これにより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。

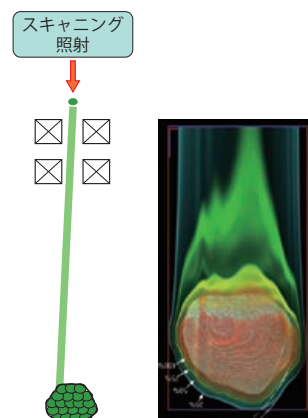


図3 スキニング法による線量分布の例

2.3 ユニバーサルノズル

当社の粒子線治療装置は、前述の高線量率照射（ブロードビーム照射及び積層原体照射）と高精度スキヤ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ひと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にて自動で装置構成が切り替わることにより、ブロードビームとスキヤニングをシームレスに切り替えることができる。ユーザが重量物を脱着するなどの手間は不要である。ユーザは症例により照射法をすばやく変更できる。精密な照射が必要な部位にはスキヤニングを適用し、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り、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。

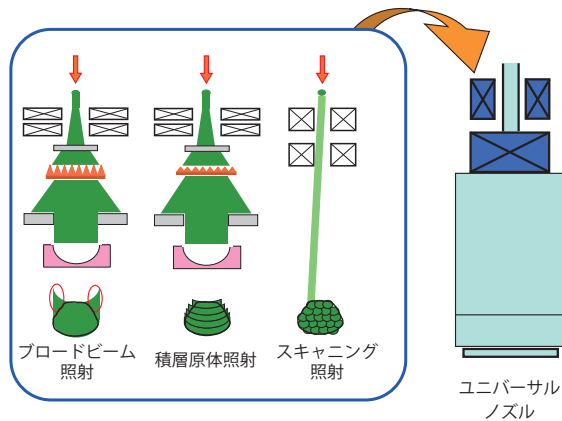


図4 開発したユニバーサルノズル

2.4 自社検証設備

前述の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新型シンクロトロン加速器（図5）、検証用ビームライン（図6）および照射ノズルを設置した。またここでは模擬治療室（図7）が設けられ患者へのビーム照射状態がイメージできるようにしている。

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。そのためユーザの治療開始が大幅に遅延することとなり、ユーザに機会損失を強いる問題がある。当社は本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、ユーザに引き渡す前に薬事承認を取得することでユーザの早期治療開始と費用回収に貢献する。

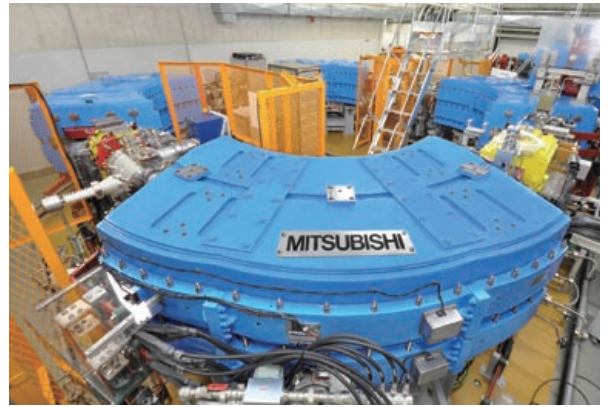


図5 自社検証設備の新型シンクロトロン加速器

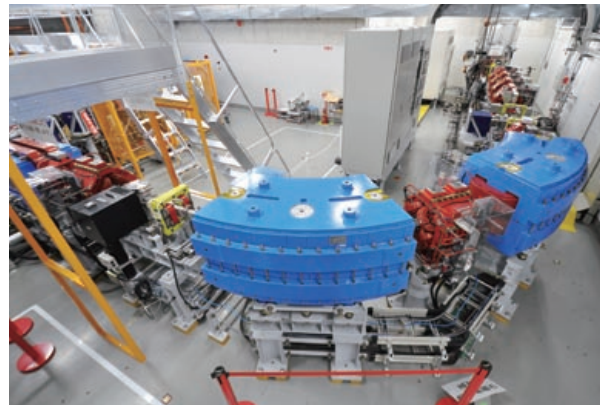


図6 自社検証設備の検証用ビームライン



図7 自社検証設備に併設された模擬治療室

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、水素イオンを用いる陽子線タイプと炭素イオンを用いる炭素線タイプ、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、陽子線タイプと炭素線タイプについて、当社の最新の取り組みを紹介する。

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。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。当社では敷地のさまざま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を図った。また立体モデル(図8)は、加速器を地下、治療室をその上階に配置することにより、敷地面積を当社従来モデルの70%にすることができる。

両モデルとも前述の高線量率照射、高精度スキャンング、ユニバーサルノズル等の最新機能を具備する構成としている。なお装置自体を小さくしたにも関わらず、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、自在な照射が可能である。

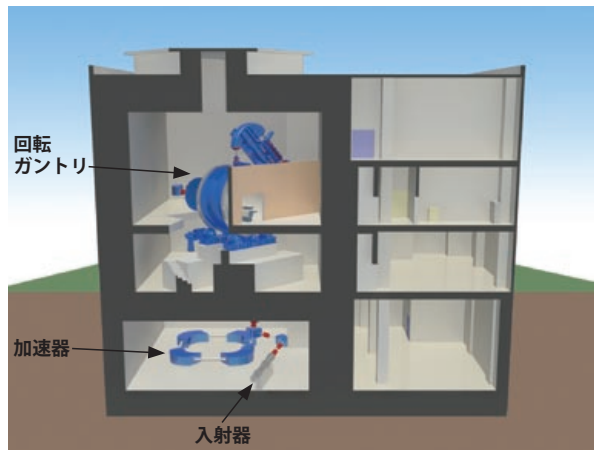


図8 装置配置を工夫した立体モデルのレイアウト例

3.2 炭素線タイプ

当社は炭素線タイプの装置を九州国際重粒子線がん治療センター殿より受注納入し、今年治療が開始された。

炭素線治療が可能な施設としては国内で4箇所目であるが、民間施設としては最初となる(図9)。独立行政法人放射線医学総合研究所主導で開発された「普及小型重粒子線治療装置」は大型な重粒子線治療を一般に広く普及させるためによりコンパクトにしたものである。当社はその「普及小型」の実証機の納入実績を有するが、九州国際重粒子線がん治療センター殿の装置には、その実証機で得られた知見を反映しており、これが初の民間普及機となった。

装置は3治療室(内、1室は将来設置予定)で構成され、いずれの治療室も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加速器システムの改善

将来実装される予定のスキャン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制御システムの改善(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り統合を図り、少ない人数での運転を可能とした。

③治療室のデザインの改善

治療室の照明・画像情報を工夫し、患者が少しでもリラックスして治療を受けられるように、デザインを刷新し



(a) 建屋外観



(b) シンクロトロン加速器



(c) 治療室

図9 九州国際重粒子線がん治療センター殿向け重粒子線治療装置の概観
「公益財団法人 佐賀国際重粒子線がん治療財団殿で提供」

た。また、ユニバーサルデザインを取り入れることにより、医療スタッフが効率よく操作・運用できる表示画面や操作器を開発した。

4. 知財活動

上述のとおり、がん人口の増大とともに粒子線治療装置等の先進医療装置の需要は益々大きくなっている。その中で当社では前述した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ング、③患部に最適な照射法を提供するユニバーサルノズル

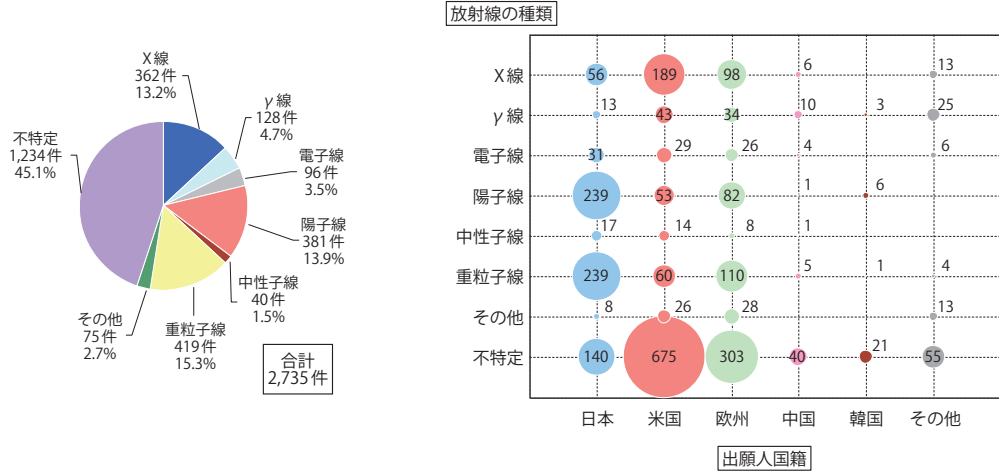


図10 放射線治療装置の出願件数（日米欧中韓への出願、出願年（優先権主張年）：2001 - 2008年、1出願に該当する複数の分類を付与）³⁾

等の技術を中心に特許出願活動を行ってきた。

図10は日米欧中韓における放射線治療装置関連特許の出願を放射線の種類で分類し、出願人の国籍で件数比較した結果である³⁾。日本は、放射線の代表であるX線治療装置に関する出願件数で欧米に後れを取っているものの、当社等日本メーカーが先行して開発する陽子線、重粒子線治療装置のそれについては優位にある。

しかし当社を含めた日本メーカーはまだ海外出願件数が少なく、国際競争力を高めていくにはさらに陽子線、重粒子線治療が行われる市場国を中心とした国々で有効特許を取得していく必要がある。また装置、機器等のハードウェアに関わる出願だけでなく制御方法、治療方法・計画等ソフトウェアの観点からの出願の充実化も必要となる。

粒子線治療装置は、装置が大型で各病院施設のニーズに合わせた受注生産となるが、人命にかかわる装置を顧客に長期に安全に安心して使っていただくためには、高度な技術開発とともに開発技術をしっかりと知的財産権で護ることが不可欠となる。

今後もトレンドを的確に見極めながらグローバルに技術開発を進めるとともに、知的財産面でも国内外で戦略的な活動を展開し、日本が誇る粒子線治療装置の国際競争力を高めていきたい。

5. おわりに

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状況を紹介した。粒子線治療の高度化に応えるために、当社は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れば、装置の信頼性・安全性が最重要であることは言うまでもなく、

継続的に向上・改善を行う必要がある。今後も、社会の要請に対応した粒子線治療装置を提供してゆく所存である。

profile

大谷 利宏（おおたに としひろ）

三菱電機株式会社 電力システム製作所磁気応用先端システム部 専任
平成9年 三菱電機株式会社入社。神戸製作所にて研究用並びに粒子線治療用加速器の設計に従事。
平成13年 日本原子力研究所（現 日本原子力研究開発機構）に出向。研究用加速器の設計に従事。
平成16年 三菱電機株式会社 電力システム製作所に復職。粒子線治療装置の設計に従事。
現在に至る。

profile

築島 千尋（つきしま ちひろ）

三菱電機株式会社 電力システム製作所磁気応用先端システム部長
昭和62年 三菱電機株式会社入社 中央研究所（現先端技術総合研究所）にて研究用ならびに産業用加速器の研究開発に従事。
平成21年 三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 次長。粒子線治療装置事業に従事。
平成24年 三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 部長。
現在に至る。

profile

伊藤 慶子（いとう けいこ）

三菱電機株式会社 電力システム製作所生産システム部知的財産課課長
昭和57年 三菱電機株式会社入社。生産技術研究所にて研究に従事。
平成10年から同社先端総合研究所知的財産センターにて特許技術を担当。
特許技術マネージャーを経て平成25年4月より現職。弁理士。

3) 特許庁 平成22年度特許出願技術動向調査報告書（概要）先端癌治療機器（平成23年4月）