

がん治療の未来をひらく 粒子線がん治療装置

Particle Beam Cancer Therapy System

西村 直哉

Nishimura Naoya

平本 和夫

Hiramoto Kazuo

竹内 一浩

Takeuchi Kazuhiro

高速に加速した陽子線や炭素線などの重粒子線を腫瘍に照射することで治療する設備が、新しい放射線治療として注目されるようになってきている。日立グループは、これまで培ってきた加速器技術を基に、粒子線がん治療装置を国内外の医療施設に納入してきた。

現在、「最先端研究開発支援プログラム」に採択された北海道大学のプロジェクトにおいて、新型陽子線がん治療システムの共同開発に着手している。これは、日立グループが開発し、治療の場で実際に使用されているスポットスキャン照射技術と、同大学の動体追跡技術とを組み合わせるものである。

今後、加速器・照射システムの小型化、簡素化を進め、国際的に競争力を高めたシステムを実現し、陽子線がん治療の世界的な普及をめざしている。

1. はじめに

がん治療には、外科治療・抗がん剤治療・放射線治療などが、単独あるいは組み合わせられて使用されている。粒子線がん治療はこの放射線治療の一つの方法であり、粒子線を高速に加速し、これを腫瘍の形状に合わせて照射することで治療効果を得るものである。

粒子線としては水素原子核である陽子やイオン化した炭素などの重粒子が、現在は広く一般的に使用されている。

ここでは、粒子線治療の特徴と設備の概要、日立グループのスポットスキャン照射技術、および将来の展望について述べる。

2. 粒子線治療の特徴

これまで放射線治療では、X線（光子：フォトン）が主に利用されていた。X線が人間に照射されたときには、体表面の人体組織に対して最大の線量（エネルギー）を与え、その後人体内を進むにつれて線量が次第に減少していくという特徴がある。このため、標的とする腫瘍組織だけでは

なく、X線が通過するその前後の健全な人体組織に対しても相当な線量が与えられることになる。この健全組織に対する線量をできるだけ抑えながら腫瘍に対して必要な線量を与えるために、腫瘍に対して多方向から照射するIMRT（Intensity Modulated Radiation Therapy：強度変調放射線治療）などもすでに開発され、実際の治療で使用されている。

これに対して、陽子線や炭素線は、体内に入った段階では低い線量を維持しながら、粒子の加速されたエネルギーの強さによって決まる深さで線量を放出し（ブラッグピーク）、その後急激に線量が減少するという性質を持っている（図1参照）。

このため、目標とする深さに合わせてエネルギーを調整し、腫瘍の形に粒子線を成型して照射することにより、健全な周囲の人体組織への影響を抑制しつつ腫瘍を治療することができると期待されている。

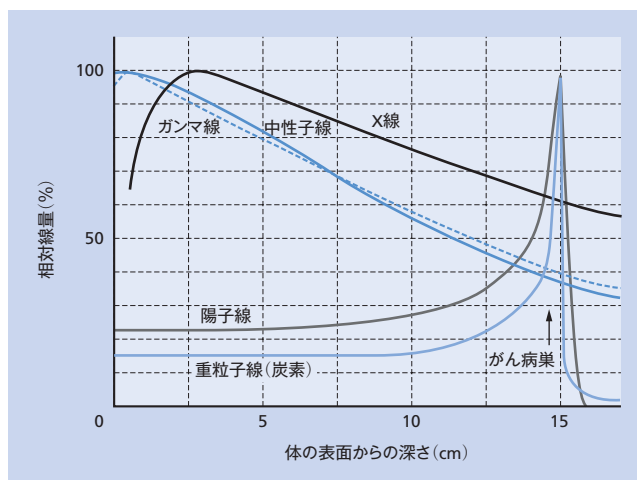


図1 | 放射線の種類による体内での線量分布比較

ガンマ線、X線などは体の表面付近に最大のエネルギー（線量）があるが、陽子線や炭素線などはエネルギーの大きさによって最大エネルギーを与える深さが変わってくる。

3. 粒子線治療の歴史と設備の普及

粒子線治療の歴史は比較的浅く、1950年代に欧米の研究機関で加速器技術の医療への適用が検討され始め、一般的な病院としては米国ロマリダ大学で1990年に最初の陽子線治療が開始された。その後、米国内では陽子線治療施設の建設が進められ、現在では9施設で陽子線治療が行われている。さらに複数の施設が建設中ないしは計画中であり、今後数年間で着実に増加するものと考えられる。

日本においても、1970年代から加速器技術の医療への適用が開始された。本格的な施設として、1994年に独立行政法人放射線医学総合研究所の重粒子医科学センター病院に重粒子線治療施設が完成し、主として炭素線による治療を実施している。日立グループが加速器の主要設備を納入したこの施設での重粒子線による治療は世界に先駆けて進められ、すでに治療患者数は5,500人に達している。

一方、陽子線治療については、独立行政法人国立がん研究センター東病院の陽子線治療施設が1998年に治療を開始しており、現在、国内で稼働している陽子線・重粒子線がん治療施設は合わせて8施設である。

このほか欧州やアジアなども含めた全世界の約30施設で、これまでに6万件を超える治療が行われてきた。

日立グループが設備を納入した施設としては、国内では財団法人若狭湾エネルギー研究センターの重粒子や陽子の加速ができる多目的シンクロトロン・タンデム加速器施設、2室のガントリー治療室を有する筑波大学陽子線医学利用研究センターがある。また、海外の施設としては、US ニューズ&ワールド・レポート社が選ぶ全米第1位のがん病院である米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターがあり、2006年から治療を実施している。ここでは4室の治療室で毎日100人を超える患者の治療が行われており、開院から4年余りで約2,000人の治療が行われた。日立グループは、MDアンダーソンがんセンターへの納入に合わせ、医療機器としてのFDA (Food and Drug Administration : 米国食品医薬品局) の認可を取得している。

現在、2013年の治療開始を予定している名古屋市が進める「クオリティライフ21城北」の陽子線がん治療施設と、2014年の治療開始を予定している北海道大学の「最先端研究開発支援プログラム」での陽子線治療施設の建設を進めている。

4. 標準的な設備構成

陽子線施設も重粒子線施設も基本的な設備構成はほぼ同じであるが、加速される粒子の重さの違いにより重粒子線施設の設備のほうが大きくなる。以下に、陽子線を主体として標準的な設備構成について述べる。

4.1 治療ノズル

加速した粒子を腫瘍に対して照射する設備をノズルと呼び、大きく分類すると2種類の方式がある。

一つは散乱体法と呼ぶ方式で、散乱体や電磁石を用いて粒子の進行方向とそれに直交する方向に粒子を散乱させて三次元的な広がりを作り出し、これをコリメータとポーラスと呼ばれる器具で腫瘍の形に成型する方法である。コリメータは真鍮(ちゅう)製の板に腫瘍の形に合わせて穴を開けたものであり、ビームを平面的に腫瘍の形に成型する。ポーラスは人体と等価なアクリルなどの材質で、腫瘍の深さ方向の形を成型するものである。

もう一つはスキャニング法と呼ぶ方式であり、粒子線を散乱させることなく細いビームとして照射する方式である。粒子線のエネルギーを変更することによって体内の到達深度を調整し、ノズル内に設置した2台の直交する電磁石によって平面的に走査することで腫瘍を三次元的に照射する。

また、スキャニング法には、ビームを切って点状にして照射するスポットスキャニング法と、連続して照射する連続スキャニング法があるが、日立グループは照射精度を高めるためにスポットスキャニング法を採用している。実際の照射では、腫瘍を深さ方向にレイヤと呼ぶ薄い層に分割し、まず最深部にある最初のレイヤを小さな点状のビームで位置を変えながら連続的に照射することで層全体に対して均一な照射を行う。その後、ビームのエネルギーを変更して順次浅いレイヤを照射する。このように数多くの点状のビームを三次元的に照射することで、腫瘍全体に対して均一な線量を与えることができる(図2参照)。

日立グループがMDアンダーソンがんセンターに納入したスポットスキャニング方式はすでに数多くの治療実績

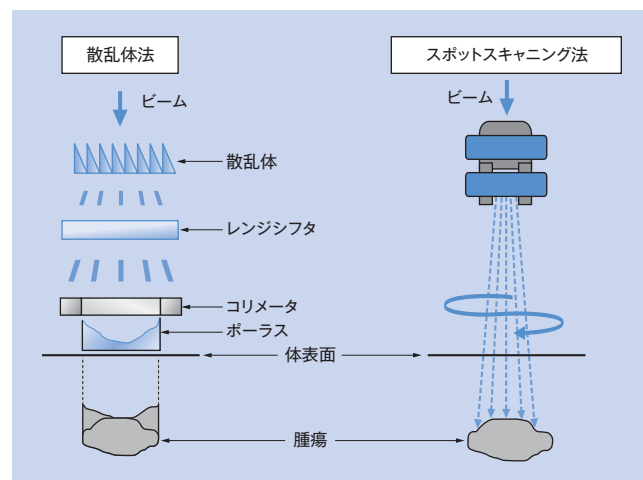


図2 | 照射方式の比較

散乱体を用いてビームを三次元的に拡散する散乱体法と、ビームを平面上で走査し、エネルギーを変えることで三次元的な照射を実現するスポットスキャニング法の原理を示す。

を上げており、現在建設中の名古屋市「クオリティライフ21城北」ならびに北海道大学病院の陽子線がん治療施設にも導入される予定である。

4.2 患者位置決め装置

実際の治療に先立ち、患者のCT (Computed Tomography) 画像に対してビームシミュレーションを実施し、どの方向からどのような強さで照射するかという治療計画を立案する。ここで腫瘍部分に対して必要な線量を照射しながら、周辺の健全組織、特に放射線への感受性が高い組織への照射を少なくするように計画される。

粒子線のビームはアイソセンターと呼ばれる中心点をめざして照射されるため、腫瘍の位置がこのアイソセンターと一致するよう、治療計画での位置と実際の患者の位置を調整する必要がある。患者は治療台上でX線画像を撮り、ここで得られた画像が治療計画の画像と同じ位置に来るように治療台の位置を調整して正確な位置決めを実現する。この位置決めを精度よく短時間で実現することが望まれている。

治療ノズルの設置方式としては、水平方向や垂直方向に固定する方式と、ガントリーと呼ばれる回転装置にノズルを搭載することで360度どの方向からでも照射を可能にする方式がある。ガントリーを用いた治療室の例を図3に示す。

筑波大学陽子線医学利用研究センターとMD アンダーソンがんセンターの治療室の例では従来方式の治療台を同

図に示しているが、最近ではロボットアームを使用した治療台が開発されており、北海道大学の陽子線がん治療システムにも採用が予定されている。

また、ガントリーも従来型の大型のものだけでなく、回転半径を小さくしたコンパクトタイプや、回転角度を180度に限定し、治療台の回転と合わせることで360度の治療を可能とするものも現在導入が計画されている。

4.3 加速器

粒子線の加速器としては、日立グループが採用している複数の電磁石の磁場強度を加速粒子の速度に合わせて変化させ加速していくシンクロトロン方式と、一つの大きな電磁石の磁場強度を一定にして粒子の加速に伴い次第に回転半径が大きくなり、外周に向かって進んでいくサイクロトロン方式がある。特に、炭素などの重粒子を加速するためにはシンクロトロン方式が優れていると言われている。

シンクロトロン方式では、イオン源から取り出された荷電粒子はまずライナックと呼ばれる線形加速器で加速され、リング状に電磁石を並べたシンクロトロンに送られ、この中で所定の速度まで加速されてから各治療室に送られる。シンクロトロンでは、この加速・ビーム取り出し・減速が繰り返される(図4参照)。

また、肺などの呼吸によって移動する臓器内の腫瘍を照射する場合には、腫瘍が所定の位置に来たときのみ照射することにより、周辺の健全な組織への影響を抑えることができる。日立グループは、患者の動きを検知した外部からの信号によって照射する技術を開発している。

5. 将来技術の展望

粒子線治療の将来技術として期待されているもののうち、粒子線の照射に関するものと、患者の位置決めに関する

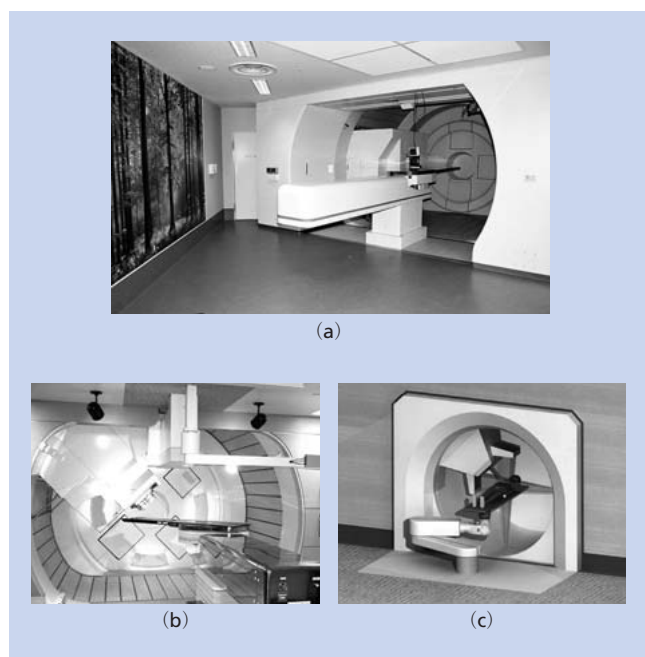


図3 | ガントリーを用いた治療室の例

筑波大学陽子線医学利用研究センターを(a)に、米国テキサス州立大学MD アンダーソンがんセンターを(b)に、北海道大学の陽子線がん治療施設を(c)にそれぞれ示す。

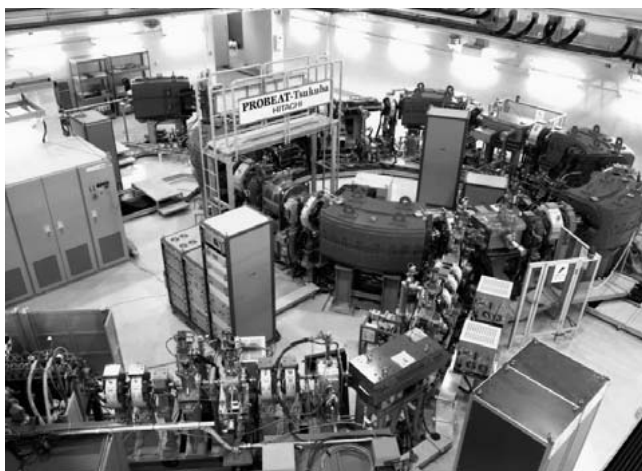


図4 | シンクロトロン加速器の例

筑波大学陽子線医学利用研究センターの加速器の外観を示す。手前左手のライナックで陽子を加速した後右奥のシンクロトロンに入射する。

るものについて以下に述べる。

5.1 照射技術

最近では、これまで広く利用されていた散乱体法に比べて周辺の健全組織に対する影響が少ない方式として、細い径の粒子線をそのまま腫瘍に対して照射するスポットスキニング方式が注目されている。さらに、このスポットスキニング方式を発展させたものとして、IMPT (Intensity Modulated Proton Therapy: 強度変調陽子線治療) が将来の治療として期待されている。これは、ガントリーで照射角度を変えながらスポットスキニング方式で複数照射する方式で、複雑な形状の腫瘍に照射をしながら周辺の健全な組織に対する照射をさらに低く抑えることができる方式である。日立グループが開発したスポットスキニング方式は、すでにこのIMPTに対応できる機能を持っており、適切な治療計画と組み合わせることで、近い将来、実際の治療に活用できるものと期待されている。

粒子線治療は、腫瘍の種類や粒子の種類に応じて数回から40回程度に分けて照射する方式がとられている。このため、治療に伴って腫瘍の大きさが小さくなる様子を適切にとらえ、腫瘍に集中して照射する目的で、粒子線治療室内にCT設備を導入し、腫瘍の形状を確認する方式も現在検討されている。

また、呼吸などによって移動する臓器内の腫瘍に対しては、より正確に照射するための方法についても各種の検討がなされている。北海道大学で開発された、移動する腫瘍近傍に刺入した金マーカーの位置をX線透視画像で自動的に把握し、予定位置に腫瘍が来たときにのみ放射線を照射する「動体追跡」技術と陽子線のスポットスキニング照射技術を組み合わせたものは、このための技術として期待されている。

5.2 患者位置決め技術

粒子線治療で実際に粒子線を照射している時間は長くても数分程度であるが、治療前の位置決めにかかる時間を要している。

患者を治療室の外で治療台の上に固定して治療室に搬送し、治療後も同様に治療室外に搬出することで、特に小児患者など麻酔を必要とする患者の治療時間を短縮する方式がすでに幾つかの医療機関で実用化されている。

また、前述の治療室内にCT設備を設置する方法や、位置決め用のX線透視装置を利用してCT画像を得ることによって正確な位置決めをする方式についても検討が進められている。

6. おわりに

ここでは、粒子線治療の特徴と設備の概要、日立グループのスポットスキニング照射技術、および将来の展望について述べた。

陽子線や重粒子線などを利用した粒子線治療は、従来の放射線治療と同等以上の効果を得ながら、周辺の健全な人体組織に対する影響を低く抑えることができるがん治療として近年注目されてきている。

日立グループは、今後も粒子線治療施設を通じてがん治療に貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 西村, 外: 世界最大の陽子線治療センターの稼動, 日立評論, 88, 9, 716~719 (2006.9)
- 2) 松田, 外: 世界初の商用スポットスキニング照射装置, 日立評論, 91, 3, 314~319 (2009.3)

執筆者紹介



西村 直哉

1979年日立製作所入社、電力システム社 放射線治療推進本部 放射線治療ソリューション部 所属
現在、粒子線治療システムのマーケティング・事業拡大に従事
日本機械学会会員



平本 和夫

1978年日立製作所入社、電力システム社 エネルギー・環境システム研究所 所属
現在、粒子線治療システムの開発に従事
工学博士
日本加速器学会会員、日本医学物理学会会員



竹内 一浩

1985年日立製作所入社、電力システム社 日立事業所 医療・核装置生産本部 放射線治療システム設計部 所属
現在、粒子線治療システムおよび研究用加速器の設計に従事
日本加速器学会会員、プラズマ・核融合学会会員、日本原子力学会会員、低温工学協会会員