

人にやさしい重粒子線がん治療装置の普及に向けた最新技術

(株)東芝 ヘルスケア社
ヘルスケア医療推進部
粒子線治療事業開発部
小野 通隆



【はじめに】

高齢化社会の進行と医療診断技術の向上に伴い、がんと診断される患者が増加を続けるなか、高度がん治療への要望は益々増大して来ている。種々ある治療方法のうち、放射線治療の日本での適応率は、欧米のレベルには至っていないものの、身体的負担を患者に掛けず、高い生活の質(QOL:Quality of Life)を実現することができるものとして、年々その適応は増加して来ている。その中でも陽子線治療や重粒子線治療は、X線治療に比べ正常組織への影響が少ない。さらに、重粒子線治療においては、治療効果の高さ、照射回数を大幅に減らすことができることから、X線と陽子線では治療の難しい患部への適応、QOLのさらなる向上の観点から、関心の高まりと共に重粒子線治療を導入検討する施設も国内外で増えつつある。

本稿では、重粒子線がん治療装置の小型化、普及実現に向け当社が国立研究開発法人 放射線医学総合研究所(以下、放医研と略記)と開発に取り組んで来た最新技術である、高速・高精度3次元スキャンニング照射、呼吸同期スキャンニング照射、超伝導回転ガントリについて技術解説を行う¹⁾⁻⁴⁾。

【高速・高精度 3次元スキャンニング照射】⁵⁾

重粒子線がん治療施設の一例として、放医研の重粒子線棟(HIMAC: Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)並びに新治療研究棟の見取り図を図1に示す。重粒子線棟の主加速器で光速の約70%まで加速された重粒子線は、ビーム輸送ラインを経て各治療室に導かれる。

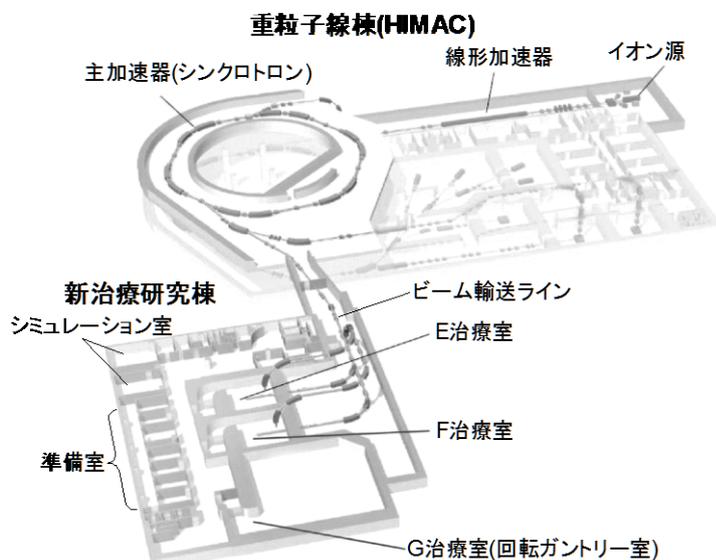


図1 放医研の重粒子線棟と新治療研究棟



新治療研究棟正面玄関

新治療研究棟の治療室では、従来のビームを広げた後コリメータ(水平及び垂直方向の調整)やボーラス(補償フィルタ：深さ方向の調整)を用いて形状を合わせるブロードビーム法(拡大照射法、図2)ではなく、数mm程度の細かいビームを高速に動かし、患者のがん病巣の形に合わせて塗りつぶすようにビームを照射する高速3次元スキャンニング法(図3)で治療している。スキャンニング法は照射スポットを移動する時にビームを止めるスポットスキャンニング法とビームを止めずに連続的に走査するラインスキャンニング法に大別されるが、その中間のスポット移動時にもビームを止めないでスポットごとに照射線量を制御するラスタースキャンニング法を採用し、線量分布の品質向上と照射速度の高速化を図っている。

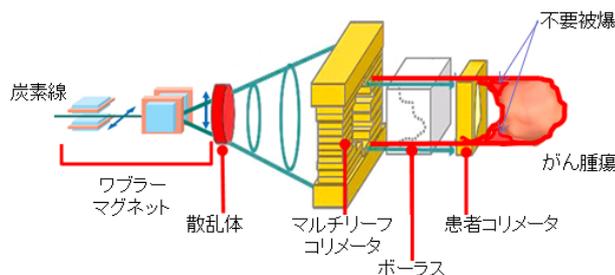


図2 ブロードビーム照射方式の概要

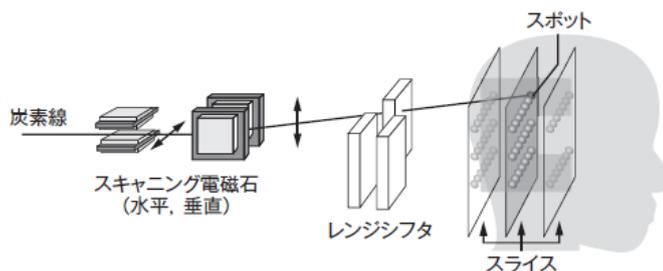


図3 3次元スキャンニング照射方式の概要

スキャンニング法では、コリメータやボーラスなどが不要になるためビーム出射部(照射ポート)が小型化でき、患者の圧迫感を低減したり、放射線技師の作業スペースを確保したりできる。ボーラスを使用せずにすむことから、ボーラス製作の手間が省けるだけでなく、治療室でボーラスを照射ポートに取り付ける作業がなくなり、放射線技師の負担を軽減できる。また、患者が治療室に滞在する時間(治療時間)が短縮できるとともに、ボーラス製作による治療待ち期間をなくすことができる。合わせて、ビーム利用効率が高いので加速器に要求されるビーム電流が少なくてすみ、中性子の発生を抑制するとともに、コリメータやボーラスも使用しないので廃棄物の発生も抑制できるなど、作業上及び運用上の利点も大きい。

その反面、スキャンニング法では、ビーム照射する際に患者体内の深さ方向距離(飛程)を調整する必要があり、レンジシフタのリーフを抜き差しして調整する手法を用いているが、ビームが多少散乱する欠点がある。そこで、最新の方式では、飛程の差が一定以上になる場合は入射エネルギーを変化させることでレンジシフタに挿入するリーフ厚をビームサイズに影響しない範囲に抑えたエネルギー多段制御とレンジシフタを併用するハイブリッドスキャンを採用することにより、ビームの散乱を抑え、質の高いビームを得ている(図4、図5)。

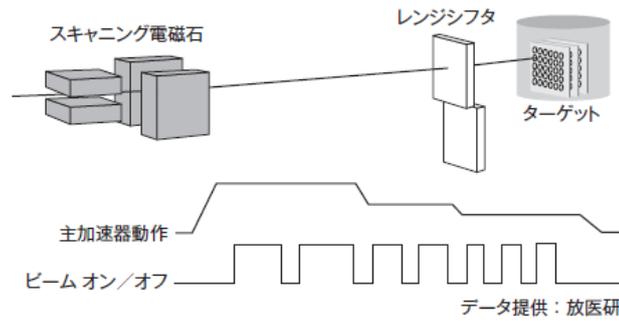


図4 ハイブリッドスキャンのイメージ図

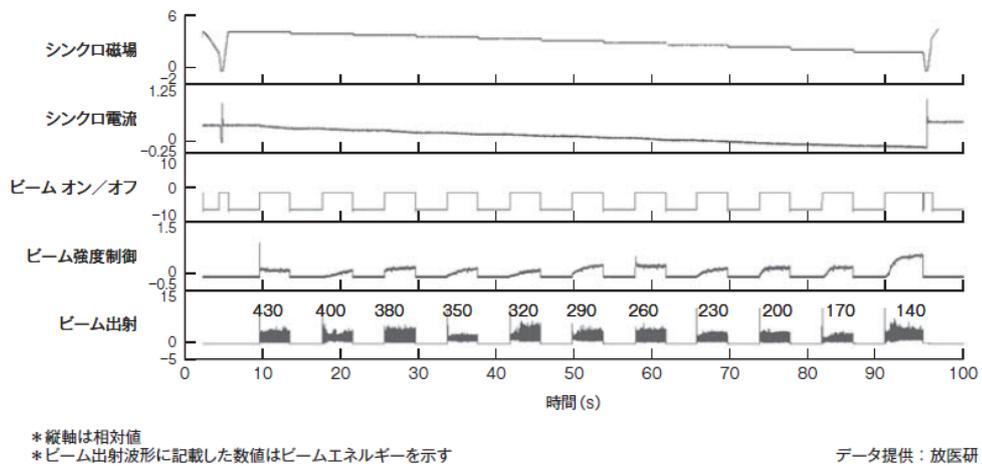


図5 エネルギー多段照射の制御タイムチャート

照射ビームは加速器やビーム搬送機器が不安定になるとビーム軌道が変化する場合があります、このような場合に備え、位置モニタで照射ビーム位置のずれ量を検出してスキャンニング電磁石電源システムにフィードバックし、ビーム位置補正を行っている。

ビーム照射の様子は通常見えないが、当社の照射システムでは、位置モニタで検出したビーム位置をサンプリング時間 $5\mu\text{s}$ 、遅れ時間 $15\mu\text{s}$ でアナログ出力し、治療制御室の画面で可視化することで、リアルタイムで照射ビームが描く軌道を見ることができる。さらに、位置モニタではスポットビームの分布を逐次スタックし、患部 1 スライスを照射する度にその積算線量分布画像を画面に表示することで、医療スタッフが治療計画と実際の照射の状況を“その場、その場”で確認しながら、安心して、安全に治療を進めてもらえるようにしている。

【呼吸同期スキャンニング照射】

肺や肝臓など呼吸に伴って移動する患部に対しては、正常組織への影響を抑えるため患部が所定の位置に来た場合にのみ照射する呼吸同期照射(待ち伏せ照射(ゲーティング照射))が利用されている。呼吸同期照射では、患者の対表面に取り付けたセンサで呼吸に伴う動きを信号化し、しきい値以下のときにビーム照射する外部呼吸同期照射法と患者の体内にマーカを挿入し、X線透視画像でマーカの動きを検知しながら照射を行う内部呼吸同期照射法がある。スキャンニング照射では照射対象の患部が呼気位相にあるときにビーム照射するが、ビームのスキャン速度が遅いと塗りつぶす最中に患部

が動いてしまうため、重粒子線の当たり方が不均一になってしまう(図6a)。そこで、放医研の照射システムでは、ビームのスキャン速度を呼吸周期に比べ十分高速化することで、1回の呼気のタイミングで1つのスライスを8程度重ね塗り(リスキャンング)することにより、線量分布の均一性を確保している(図6b)⁶⁾⁷⁾。

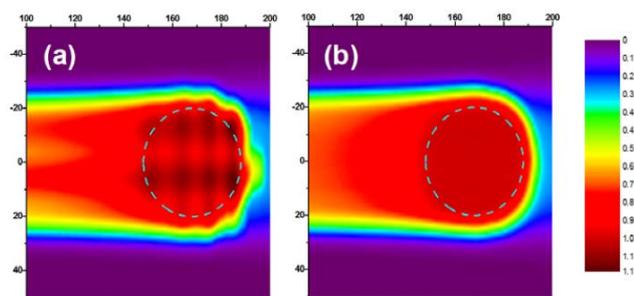


図6 呼吸性移動を模擬して移動標的に対する3次元スキャンング照射の線量計算シミュレーション

従来の呼吸同期照射は体表面の動きやマーカを基にビーム照射を行っているが、体表面の動きは患部の軌跡の変化や患者の姿勢の変化により呼吸位相が同じでも患部の位置が異なる場合があり、また、マーカ挿入は経皮的にマーカを患者の体内に留置することから患者に負担がかかる上、マーカがずれることもある。そこで、患者にマーカを挿入しないで体内の動きをX線透視画像で検知しながら照射するマーカーレス照射を放医研と開発している。ここでは、事前に登録したテンプレートとの2D-3Dマッチングなどによる追跡を行うが、追跡ミスの原因となる肋骨などの骨の影響を高速に抑制する前処理技術にも取り組み、2015年3月より臨床試験を開始している。

【超伝導回転ガントリ】

回転ガントリは、患者の患部への照射アイソセンターに対して 0° から 360° の任意の方向から重粒子線を照射できるようにするもので、従来の固定方向(水平、垂直、 45°)からの照射に比べて治療範囲が格段に広がり、患者の負担軽減、治療対象部位の拡大、固定具などの製作時間の短縮も含め施設運用の効率向上が期待できる。

回転ガントリは、陽子線を用いた治療施設では普及が進んでいるが、重粒子は陽子と比べ質量が大きいので、粒子を照射ポートに導くビームラインの軌道半径が大きくなり、ガントリの大型化を伴うこともあって実用化が進んでいなかった。

当社は、放医研施設で、偏向電磁石に超伝導磁石を採用し、磁場強度を高め軌道半径を小さくすることで、重粒子線回転ガントリ(図7)の実用化を進めている。回転ガントリ本体は直径10m、全長14m、重量約300tとドイツのハイデルベルグ重粒子線治療センター(HIT: Heidelberg Ion-Beam Therapy Center)で稼動している回転ガントリ本体(直径13m、全長25m、重量600t以上)より小型化、軽量化を図るとともに、ビーム位置精度 $\pm 1\text{mm}$ 以内を実現する構造としている。ビームを誘引する超伝導磁石は全10台で構成され、それぞれの設置場所に応じて2~3T(T: テスラ)の磁場を生成する。一つの真空容器内に、二極成分と四極成分を同じ位置に構成する機能結合型超伝導磁石(図8)として一体化して収納するとともに、磁石の主コンポーネントである超伝導コイルをビームライン形状に沿った湾曲形状にすることで、大幅に小型化・軽量化している。合わせて、超伝導磁石は冷媒として液体ヘリウムを全く使用せず、小型冷凍機による伝導冷却タイプを採用している。また、超伝導コイルの支持構造を工夫することで、ガントリが回転してもコイル位置が超伝導磁石内でずれることなく高精度で

磁場を発生できる構造にしている。

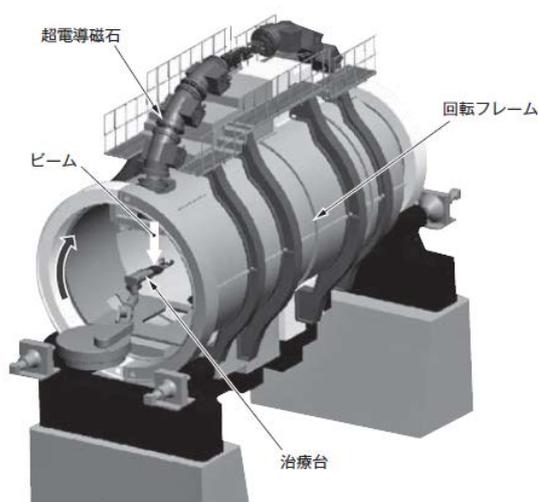


図7 放医研次世代照射システム用超伝導
回転ガントリ装置



図8 機能結合型超伝導磁石

【まとめ】

本稿で解説した最新技術は重粒子線がん治療装置の一部として実用化が進められているが、重粒子線がん治療装置を国内外へ普及させるためには、患者の心身にやさしく、治療室への入室から退室まで短時間で治療を受けることができることで治療スタッフにもやさしく、より安心して、安全で効率的な高度がん治療が行える重粒子線がん治療装置として、さらなる小型化とコストダウンが求められている。

【引用・参考文献】

- 1) 第12回重粒子医科学センターシンポジウム スキャンニング治療の現状と展望、放射線医学総合研究所ホームページ、<http://www.nirs.go.jp/publication/proceedings/pdf/proceedings_12th.pdf>
- 2) 小野 通隆、平田 寛、矢澤 孝、重粒子線治療施設に適応される東芝の先進技術、東芝レビューVol.68 No.1(2013)、7-10
- 3) 井関 康、埜 勝詞、米栖 努、重粒子線治療用照射システムの高効率・高精度化と患者負担の軽減への取り組み、東芝レビューVol.68 No.1(2013)、16-19
- 4) 小野 通隆、矢澤 孝、平田 寛、重粒子線がん治療装置の実現に向けた最新技術、東芝レビューVol.69 No.11(2014)、17-21
- 5) 原田 久、加速器医療応用 1 重イオンビーム 1、3-6、高エネルギー加速器セミナーOHO' 12
- 6) 鎌田 正、世界最速呼吸同期スキャンニング照射による治療を開始—呼吸で動く胸部・腹部のがんを狙い撃ち—、放射線医学総合研究所ホームページ、<http://www.nirs.go.jp/information/press/2015/04_16.shtml>
- 7) Shinichiro Mori, et al. Conformity and robustness of gated rescanned carbon ion pencil beam scanning of liver tumors at NIRS. Radiotherapy and Oncology 111(2014)431-436