

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

Toward Realizing High-Efficiency and High-Accuracy Irradiation System for Heavy-Ion Radiotherapy and Reducing Burden on Patients

井関 康 埴 勝詞 来栖 努

■ ISEKI Yasushi ■ HANAWA Katsushi ■ KURUSU Tsutomu

東芝は、重粒子線治療装置の次世代照射システムとして高速スキャン照射システムを実用化した。照射の高精度化を図るために加速器出射ビームエネルギーの直接制御（多段制御）やビーム位置の制御技術を開発し、3次元的に患部形状に合致させて照射することができる。また治療具の製作や取付けが不要になるなどの利点があり、治療時間の短縮を図ることができる。

更に次の技術として、照射部を360°回転できビームを多方向から照射可能な回転ガントリを開発している。ガントリのビームラインに超電導電磁石を搭載してガントリの小型化を実現することで、医療施設への普及が期待できる。

Toshiba has developed a high-speed scanning irradiation system as a next-generation irradiation system for heavy-ion radiotherapy equipment, equipped with both multistage energy control of the accelerator and beam-position feedback control in order to perform more highly precise irradiation. This system makes it possible to deliver radiation conforming to the three-dimensional shape of the target area affected by cancer, and shortens the treatment time by eliminating the need to manufacture and install treatment implements.

We are also developing a rotating gantry that can irradiate from many directions by rotating in a 360° circle. By realizing miniaturization of the gantry using a superconducting electromagnet in the beamline, we expect heavy-ion radiotherapy equipment incorporating this system to be introduced in private-sector hospitals in the near future.

1 まえがき

重粒子線治療とは、加速器で高エネルギー（光速の約70%）に加速した炭素ビームを照射し、がん組織を死滅させるものである。

東芝は、患部形状に3次元的に合致させて照射できる次世代の高速スキャン照射システムを実用化した。これにより、高精度な照射ができるとともに、治療時間を短縮できる。また、照射部を360°回転でき患者の任意の方向から照射可能な回転ガントリを開発している。

ここでは、実用化した高速スキャン照射システムと現在開発中の超電導回転ガントリについて述べる。

2 スキャン照射による高精度で高速の照射

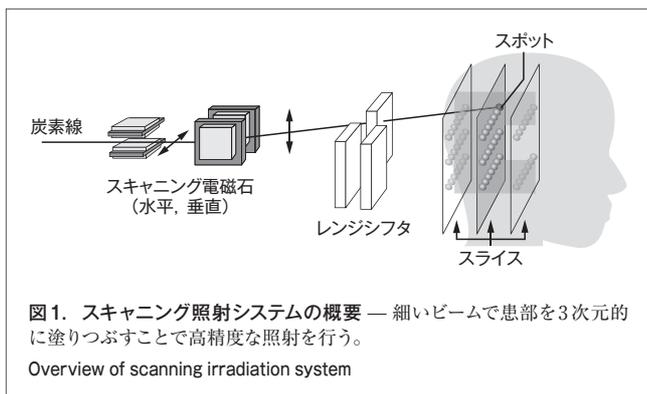
従来の重粒子線治療施設で提供されている照射システムは、散乱体などを用いてビームを患部サイズより大きく広げた後にコリメータ（水平及び垂直方向の調整）を通してがんの形状に合わせる方法（拡大ビーム法）である。この方法では補償フィルタと呼ばれる照射野形成具でビーム進行方向端部（深い側）の照射形状を患部に合わせるが、体表側（浅い側）では患部形状に合致させて照射することは困難である。また、拡大したビームの一部を切り出して患部に照射するため、ビーム利用効率も悪くなっている。

一方、スキャン照射法では、患部を小さなスポットの集まりとみなしてその一つひとつのスポットに照射することが可能であり、患部全体を細いビームで塗りつぶすことで照射形状を患部形状に3次元的に合致させることができる。その結果、骨軟部のように複雑な患部形状であっても正常組織への線量投与を抑えながらビームを効率良く患部に照射することが可能になる。

従来の拡大ビーム法に対する利点として、コリメータなどの機器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。

また、補償フィルタを使用せずにすむのは作業上及び運用上の利点大きい。治療室で補償フィルタ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低減させるだけでなく、患者が治療室に滞在する時間（治療時間）が短縮できる。これは、治療室で多方向から続けて照射を行う場合に特に時間の短縮効果大きい。このため、将来の回転ガントリによる治療ではスキャン照射が前提である。更に、補償フィルタは多くの施設では外注で製作され、治療計画で形状を決めた後に1週間程度掛かるため、それに伴う治療待ち期間が必要になるが、補償フィルタを用いないスキャン照射では治療計画を完了したら、すぐに治療に移行することが可能である。

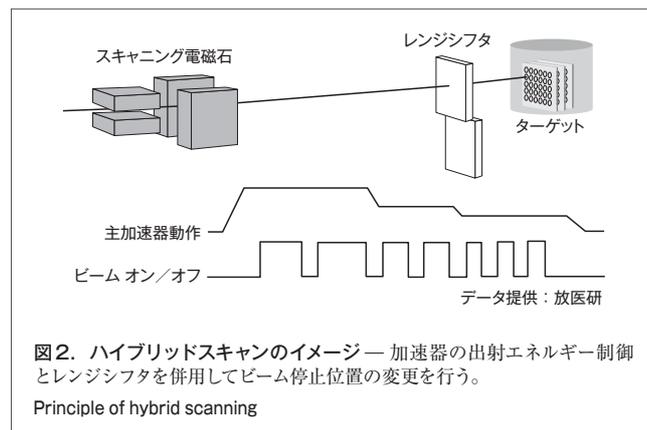
当社のシステムでは、照射スポットを移動するときもビームを



止めないラスタースキャンニング方法を採用し、照射速度の高速化を図っている。スポットの走査は、ビームの垂直方向には電磁石システムによって、ビームの進行方向（体内の深さ方向）にはレンジシフタと呼ばれる飛程調整装置によって制御する（図1）。照射の高速化にはビーム走査の高速化がキーポイントであり、そのための電磁石及び電磁石電源システムと高速制御システムを開発した。また、高精度かつ高速に照射線量とスポットビーム位置を管理しながら照射することが要求されるため、ビーム線量モニタの時間応答についても改善を図った。呼吸とともに移動する臓器に対する治療を行ううえで、照射制御の高速化は重要な技術であり、頭頸（けい）部、子宮、直腸、前立腺、頭蓋底部のほか、肝臓、骨軟部、肺など、広範囲に対応したがん治療装置の提供が可能になった。

2.1 高精度スキャンニング照射の実現

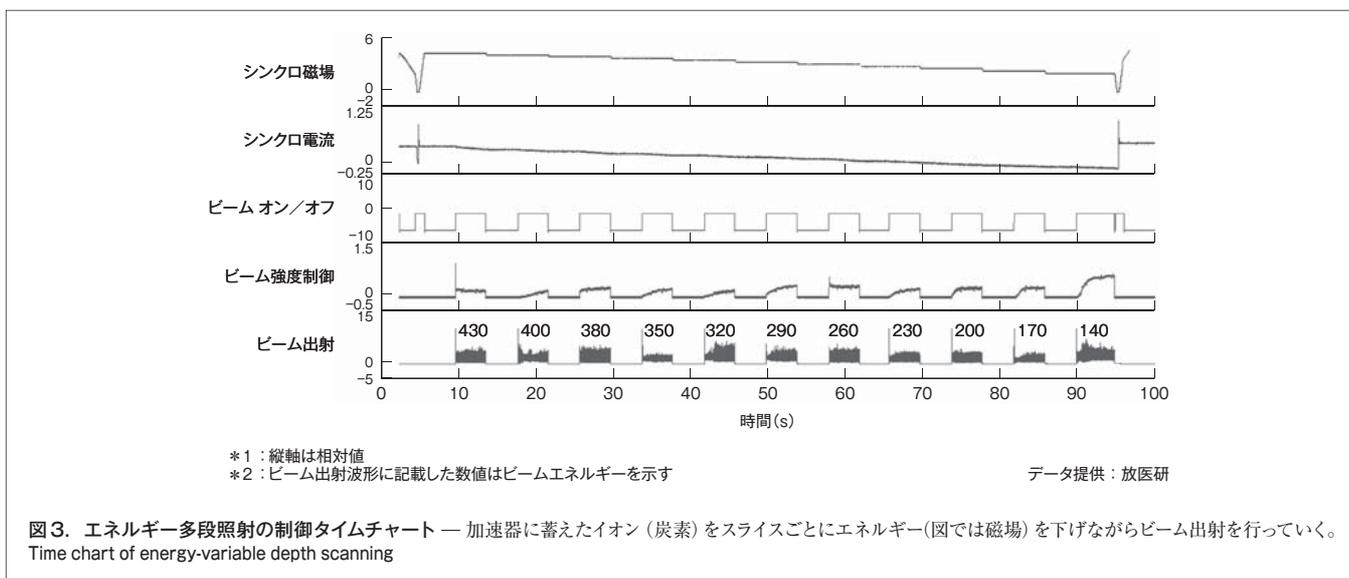
スキャンニング照射において、いかにビームを細く絞ったまま患部に照射するか、及びそのビーム位置を高精度に管理するかが照射の高精度化のうえで重要である。ここでは、独立行政法人 放射線医学総合研究所（以下、放医研と略記）と共同で開発した二つの技術について述べる。

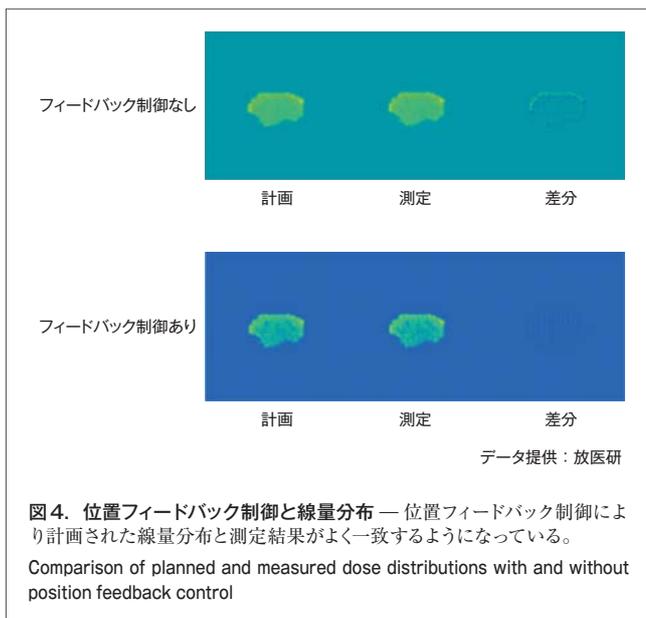


スキャンニング照射装置の開発当初はレンジシフタで照射ビームの停止位置（飛程）を制御していたが、レンジシフタを通過するときにビームが散乱しビームサイズが大きくなるのが避けられなかった。そこで照射中に加速器から射出されるエネルギーを直接制御するエネルギー多段制御を併用する照射技術を開発した。

照射中の飛程調整、すなわち患者への入射エネルギーの調整は、レンジシフタのリーフの抜差しで行うが、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の挿入するリーフ厚をビームサイズに影響のしない範囲に抑えた。この照射方法はエネルギー多段制御とレンジシフタを併用することからハイブリッドスキャンと呼ばれる。ハイブリッドスキャンのイメージを図2に、エネルギー多段照射の制御タイムチャートを図3に示す。

次に、ビーム位置のフィードバック制御について述べる。照射ビームは加速器やビームを輸送する機器が不安定になるとビーム軌道が変化する場合がある。このような場合に備えて、位置モニタで照射ビーム位置のずれ量を検出して電磁石及び





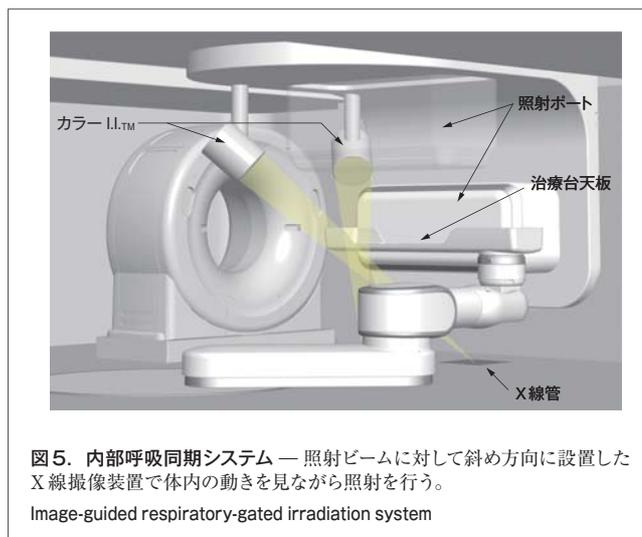
電磁石電源システムにフィードバックし、位置補正を行う技術を開発した。

図4は、一つのスライス上に2次元照射野を形成したときに得られた線量分布を比較したものである。フィードバック制御ありとなしの場合について、計画分布と測定分布及びその差分を見ると、フィードバック制御ありで測定された線量分布が計画分布によく一致するようになっていることがわかる。

ビーム照射のようすは通常見えないが、当社の照射システムでは、それを可視化することで医療スタッフに安心感を持って治療照射を進めてもらえるようにしている。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 μ s、遅れ時間15 μ sでアナログ出力し、治療制御室の画面に表示するので、医療スタッフは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。更に、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たびにその積算線量分布画像を画面に表示する。図4の2次元分布はその線量分布画像である。医療スタッフは治療計画と実際の照射の状況を、“その時、その場”で確認しながら治療を進めることができる。

2.2 呼吸同期スキミング照射の実現

肺や肝臓など呼吸に伴って移動する患部に対しては呼吸同期照射が行われる。呼吸同期照射は患者の体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が行われる。このようにしきい値で照射のタイミングを限定してもある程度は動いている患部を照射するため、患部の動きよりはるかに速いスピードでビームを繰り返して照射することが要求される。当社の照射システムは呼吸同期照射に対応することを目的に高速化を図ったものであり、動く患部に対しても照射領域中の線量均一性を確保する。呼吸同期照射の臨床試験は2013年度から放医研で実施される計画である。



現状の呼吸同期照射は体表面の動きを基にビーム照射を行うが、次世代の呼吸同期照射技術として、X線透視画像で体内の動きを検知しながら照射を行う内部呼吸同期照射法の開発を進めている。ここでは、治療照射中のX線動画から骨あるいはマーカの位置をリアルタイムに評価し、対象領域に患部が入ったことを判断して照射を行う。画像検出器としてはフラットパネルディテクタ (FPD) のほか、カラーイメージインテンシファイア (カラー I.I.™) を採用する。カラー I.I.™ を採用した内部呼吸同期システムの構成を図5に示す。カラー I.I.™ は従来のモノクロ I.I. と異なり、カラーシンチレータ (放射線により発光する蛍光物質) を用いて可視化しカラーカメラで撮影して表示するため、従来の6倍の感度がある。このため、X線曝射 (ばくしゃ) を続ける内部呼吸同期照射であっても投与線量を抑えて鮮明な画像を得ることができる。

3 超電導回転ガントリによる患者への負担軽減と治療時間の短縮化

回転ガントリは、照射部を360°回転させるための装置で、患部を任意方向から照射することができるため、患者の姿勢変更が不要になり、患者負担軽減と治療時間短縮化を図ることができる。

回転ガントリは、陽子線治療装置では実用化されているが、ビームエネルギーの大きい重粒子線では装置が大型化してしまうため、普及させるには回転ガントリを小型・軽量化するための技術が極めて重要になる。そこで当社は、ビームを曲げるための偏向電磁石及び集束させるための4極電磁石を超電導化し、コイル巻線部を従来の数十倍の高電流密度化することで高磁場化して、ビームをより強く曲げられるようにし、回転ガントリの重量を半減 (当社比) させる。

当社が設計を行っている放医研の次世代照射システム用回

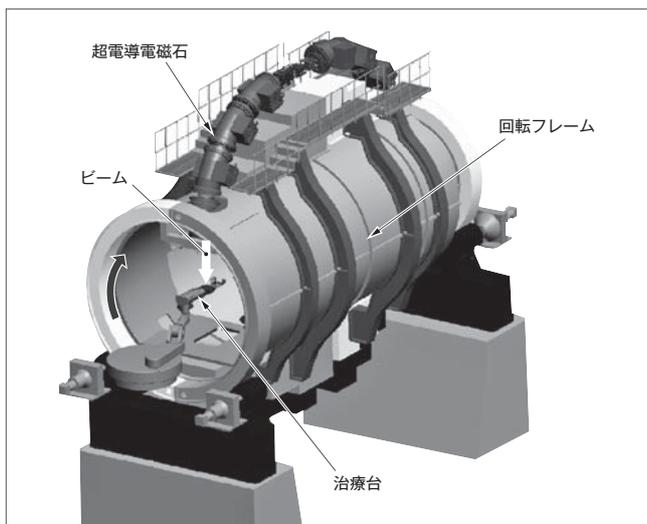


図6. 放医研次世代照射システム用超電導回転ガントリ装置 — 照射部を360°回転させるための装置で、患部を任意方向から照射することができる。
Superconducting rotating gantry for heavy-ion radiotherapy at National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

転ガントリ装置を図6に示す。回転フレームは、半径約5m、長さ約12mの円筒形状で、重量約200tの構造体が回転しても、ビーム位置精度±1mm以内を実現する構造になっている。ビームを誘引する超電導電磁石は、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。

超電導電磁石は小型冷凍機による伝導冷却タイプで、液体ヘリウムを不要にした。一つの真空容器内に、偏向電磁石と4極電磁石を一体化して収納するとともに、電磁石の主コンポーネントである超電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、コンパクト化した(図7)。

また、超電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電導電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。

試作した回転ガントリ用超電導電磁石を図8に示す。回転

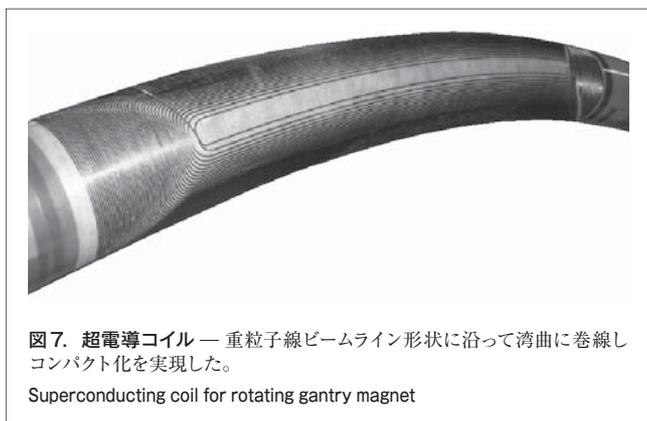


図7. 超電導コイル — 重粒子線ビームライン形状に沿って湾曲に巻線しコンパクト化を実現した。
Superconducting coil for rotating gantry magnet



図8. 試作した超電導電磁石 — 超電導回転ガントリ電磁石を試作して試験し、設計の妥当性を確認した。
Prototype of superconducting rotating gantry magnet

時の位置精度や冷却などが設計どおりであることを試験して確認した。

4 あとがき

当社が重粒子線治療の将来像として描くオンデマンド及びオンタイム治療には、補償フィルタなど治療具の製作が不要で、放射線技師の作業が簡略化できるスキヤニング照射は必須の技術である。また、照射の可視化を進めたり装置の操作性を高めたりすることなども重要である。

これら最先端の技術を取り入れ、医療スタッフにとって使いやすい照射システムを、更には患者が少しでも安心して治療を受けられる治療空間を提供していく。

文 献

- 鎌田 正. “世界最高速3次元スキヤニング照射法を用いた治療を開始 — 日本発の次世代型重粒子線がん治療、新たな展開へ —”. 放射線医学総合研究所ホームページ. <<http://www.nirs.go.jp/news/press/2011/06-22.shtml>>. (参照2012-12-14).



井関 康 ISEKI Yasushi, Ph.D.

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部主査, 博士(理学)。重粒子線治療装置の設計に従事。日本物理学会、日本医学物理学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



埴 勝詞 HANAWA Katsushi

電力システム社 府中事業所 原子力プロセス監視制御システム部主務。重粒子線治療装置の設計に従事。
Fuchu Complex



来栖 努 KURUSU Tsutomu, Ph.D.

電力システム社 原子力事業部 原子力技術部参事, 博士(工学)。超電導応用製品や加速器などの技術取りまとめ業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.