利用技術

超伝導技術を用いた重粒子線 がん治療用回転ガントリー



白井 敏之 Shirai Toshiyuki (量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所)

1 はじめに

放射線治療における回転ガントリーとは、治療台 上の患者に対し、360度任意の方向から放射線を照 射するための装置であり、X線・陽子線がん治療に おいては必須のものとなっています。しかし、陽子 線より磁場で約3倍曲がりにくい重粒子線(炭素線) の場合、電磁石が大型になるため、従来の重粒子線 がん治療では、回転ガントリーではなく、固定ビー ムラインで治療が行われてきました。そのため、放 医研では正常組織の障害を避けるために、図1に見 えるように、患者を治療台の上で回転させて治療を 行っています¹⁾。このように回転させた場合、患者 の負担が増すだけでなく、臓器の移動・変形への考 慮や、特殊な患者固定具の作成など、手間とノウハ



図1 既存治療室(治療室 B)における照射

ウが必要となるため、重粒子線がん治療の普及への 障害にもなっていました。

こうした中で、世界で初めて建設されたハイデル ベルグ大学の重粒子線回転ガントリーは、大型電磁 石のため長さ25m、重量 670t にもなり、非常に巨 大なものでしたが²⁾、実際に実現できたことで、重 粒子線がん治療においても回転ガントリーに注目が 集まることになりました。回転ガントリーを用いる ことにより、単に患者負担が軽減し、治療効率が上 がるだけでなく、3次元スキャニング照射技術と併用 することで、図2のような多方向からの強度変調治 療も可能となり、腫瘍に近接した正常組織を避けら れるなど、線量集中性が高い重粒子線がん治療のメ リットを、より活かすことができるようになります。 量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所



図 2 脊髄を模した正常組織(中央の円)を取り囲む扇形腫 瘍への,5方向からの強度変調照射

(以下, 放医研) では, 重粒子線がん治療装置 HIMAC を建設し、1994年より臨床研究を実施して きました。図3にあるように、現在までに治療件数 は10,000 件近くに達しており³⁾,多くの腫瘍におい て良好な成績を得るとともに、手術不能な骨・軟部 腫瘍については、保険診療が認められています。こ うした臨床研究と並行して、筆者らは2006年から 次世代の重粒子線治療装置開発に着手しました。こ の中では、従来は困難だった体幹部への照射が可能 な高速3次元スキャニング照射装置とともに、一般 医療施設にも設置可能な小型回転ガントリー装置も 開発テーマに掲げていました。2010年には既存の 重粒子線棟の隣に、この装置を設置する新治療研究 棟が竣工し(図4参照),2011年より固定ビームラ インを使用する一部治療室(治療室 E)で治療が開 始されました。一方、小型回転ガントリーは、要素



図3 放医研病院における疾患別治療患者数



図4 重粒子線棟と新治療研究棟。右下は E 治療室

技術開発の進展を受けて、2012年より本格的な建 設が開始されました。

2 超伝導回転ガントリー

ハイデルベルグ大学の重粒子線回転ガントリーが 巨大すぎて他施設に普及しなかったことから,筆者 らはビームラインに超伝導電磁石を採用することで 小型軽量化し,一般に普及している陽子線回転ガン トリーに近いサイズにすることを目指しました。 図5はその小型回転ガントリーの模式図で,回転体 の上に超伝導電磁石を含むビームラインが固定され ており,治療室内に突き出た先端部には,高速3次 元スキャニング照射ノズルが取り付けられていま す。この全体が2.5分間に1回転の速度で回転し,患 者に対し最適な方向から照射することができます。

超伝導電磁石



治療台 スキャニング電磁石

図 5 小型重粒子線回転ガントリーの模式図



図 6 小型重粒子線回転ガントリーのビームライン図

図6は10台の超伝導電磁石を含む、このビーム ラインを示しています⁴⁾。スペースを節約するため に、それぞれの電磁石は、偏向磁場と四重極磁場の 両方が出せる2重巻きコイルになっています。また、 途中に設置されたスキャニング電磁石により、その 下流には広がった照射野が形成されるため、下流側 の4台の電磁石は上流に比べ大口径になっています。

図7は上流側小口径電磁石と下流側大口径電磁石 を示しています⁵⁰。コイルは炭素線の曲率に合わせ た巻き枠の上に,NbTiの超電導線材をサーフェイ ス・ワインディング法と呼ばれる方法で巻いて作っ ています。この方法は,超伝導線材を巻枠表面に配 置し,樹脂で固定し,更にその上から絶縁シートを 重ね,同様の過程を繰り返すことによりコイルを製



図 7 小口径超伝導電磁石 (BM2, 左) と大口径超伝導電磁石 (BM10, 右)

上側が超伝導電磁石の外観で、下側が NbTi 線材を使用した超伝導コイル



図8 BM10を治療を模して磁場変化させた場合の, コイルの温度変化

作するもので,このような小さな曲率のコイルも作 ることができます。

また,この超電導コイルは励磁状態で回転させる ため,液体ヘリウムを使用することができず,図7 の超伝導コイルを冷凍機で伝導冷却しています。液 体ヘリウムを使用していませんが,現在まで回転中 のクエンチは発生していないなど,良好な結果を得 ています。

一方,この超伝導電磁石において、もう1つの課 題は、超伝導電磁石が苦手とする高速な磁場変化で した。3次元スキャニング照射では、腫瘍を体内の 奥から表面に向かって照射するため、照射中にビー ムエネルギーが数10段階にわたって変化し、それ に合わせて磁場も変化させる必要があります。その ために、超伝導線材には、低ACロスのものが使用 されています。図8はBM10を治療を模して繰り 返し磁場変化させたときの温度の測定結果です。こ の場合でも、コイル温度は4K以下に収まっており、 クエンチが起きないことを確認できました。

このように回転ガントリーで使用できる超伝導電 磁石の開発に成功したことにより,回転ガントリー の長さは13mと従来の約半分となり,陽子線回転 ガントリーに近い,一般医療施設に設置可能なサイ ズを実現することができました。

3 回転ガントリー治療室

炭素線は回転ガントリー治療室(治療室G)内の 照射ノズルを通して照射されます(図9参照)。こ こで使用される3次元スキャニング照射法は,加速 器からの細いビームを使い,腫瘍の形に合わせて塗 りつぶしていく照射法です。スキャニング電磁石で



図9 回転ガントリー治療室(G治療室)



図 10 3 次元スキャニング照射の原理図

スキャニング電磁石で重粒子線を平面方向に掃引しながら、加速器のエ ネルギーを変化させることで深さ方向位置を制御している

重粒子線を平面方向に最大 100mm/msec の速度で掃 引させながら,加速器のエネルギーを最大 200 段階 に連続的に変化させることで深さ方向位置も変化さ せて,標的に照射しています(図 10 参照)。。複雑 な形状の標的に対しても照射が可能であるととも に,日々変化する腫瘍の形や位置に対応できるなど 優れた特徴を持っています。この照射方法は,従来 呼吸性移動を伴う体幹部の臓器への適用は困難でし たが,この照射装置は高速に重ね塗り照射をするこ とで,適用が可能になりましたⁿ。また,G治療室 の照射装置は,これまでのE,F治療室よりもビー ムサイズが小さく,正常組織の被ばくも低減できま す[®]。

照射ノズルの両横には2つのX線フラットパネ ルディテクタが設置されており,照射前にX線撮 影を行って,正確な患者の位置合わせが可能になっ ています。また,同じX線撮影システムを使用し, 照射中にX線透視によって臓器の位置をモニター し,腫瘍を追跡をすることも可能になっています⁹。 この装置は,図11に示されているように,治療計 画で設定した標的があらかじめ決められた照射範囲 内に来た時だけ,炭素線を照射します。



図 11 X線装置を用いた 3 次元スキャニング照射時の制御 画面

左上画面には X 線透視画像上に標的(黄色)と照射範囲(橙色)がリア ルタイムに描画されており、左下画面には呼吸波形が、右側画面はスキ ャニング照射モニターの出力が表示されています

4 最後に

新治療研究棟における固定ビームラインの3次元 スキャニング照射装置を用いた治療件数は,2011 年以来1,000件を超えています(図3参照)。この 臨床経験を踏まえ,小型回転ガントリーの運用試験 を,設置が終わった2015年9月以来実施してきて おり,2017年度からは小型回転ガントリーを用い た治療が始まる予定です。

参考文献

- 1) Tsujii, H., et al., Carbon-Ion Radiotherapy Principles, Practices, and Treatment Planning, Springer (2016)
- ハイデルベルグ大学ホームページ https://www.klinikum.uni-heidelberg.de/Gantry.112987.0.html
 放射線医学総合研究所ホームページ
- http://www.nirs.qst.go.jp/hospital/index.shtml
- 4) Iwata, Y., et al., Phys. Rev. STAB, 15, 044701 (2012)
- 5) Iwata, Y., et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24 (2014)
- 6) Furukawa, T., et al., Med. Phys., **37**, 5672–5682 (2010)
- 7) Furukawa, T., et al., Med. Phys., 37, 4874–4879 (2010)
- Iwata, Y., et al., NUCL INSTRUM METH A, 834, 71-80 (2016)
- 9) Mori, S., Br. J. Radiol., 87, 20140001 (2014)