



写真1 山形大学医学部東日本重粒子センター

## 山形大学医学部東日本重粒子センター 訪問記

松崎 浩之  
Matsuzaki Hiroyuki

「山形大の重粒子センターへは、東北中から患者さんが来るんですよ。ここでしか治療できないからね。嘉山先生を乗せたこともあるんですよ。」とタクシーの運転手さんが誇らしげに語った。今回訪問する山形大学医学部東日本重粒子センター（以下、重粒子センター）は地元でも有名で、誇りに思われているらしい。この重粒子センターは2021年2月に治療を開始したばかりだが、その構想は2004年に遡る、という。当時、山形大学において、「がん」を研究・診療の柱と決め、先進医療設備の導入検討を開始したのは、嘉山孝正医学部長（現・名誉センター長）であった。以後、重粒子センターの構想・建設から治療開始に至るまで、指導的な役割を果たされ、市井の人々にまでその名前が知れわたっているということだろう。

粒子線治療とは、加速器で生成したイオンビームをがん細胞に照射し、がんを殺していく治療法である。放射線治療で用いられるX線とは、生体へのダメージの与え方が違う。図1は放射線が生体中でどのようにエネルギーを物質側に与えていくかを示した「ブラッグカーブ」というものである。エネルギーを与える、ということは、その分生体へダメージを与えていると考えて良い。図1を見ると、陽子線や炭素線（荷電粒子）は表面付近ではあまりエネルギーを与えず、ある深さで急速にエネルギーを失っていることが分かる（これをブラッグピークという）。

つまり、生体表面付近にはあまりダメージを与えず、ある深さの部分にだけ集中的にダメージを与えることができる。すなわち、ブラッグピークをがん細胞の位置に合わせることができれば、選択的にがん細胞にだけダメージを与えることができるということである。同じ粒子線でも陽子線に比べると炭素線の方が、この選択性が高い（ブラッグピークがよりシャープ）。炭素線のことを陽子線と区別して「重粒子線」という。概して、炭素線による治療の方が陽子線による治療より、優れている、ということが言えそうだが、炭素線にもデメリットがある。例えば、取回しが難しいということがある。加速器で生

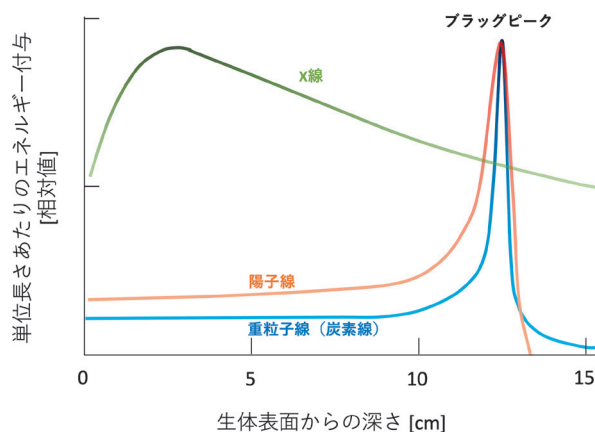


図1 放射線の種類の違いによる、物質中（生体中）でのエネルギー付与の違い

表1 我が国の重粒子線治療施設

治療開始年	施設名	主な特徴
1994	放射線医学総合研究所(量研機構) HIMAC	世界初の治療用重粒子線施設 小型化技術開発 (-> 各施設へ引き継がれる) 呼吸同期3次元スキャニング 2018年回転ガントリー開発 with 東芝
2002	兵庫県立粒子線治療センター	陽子線と重粒子線両方利用可能 固定照射2室3ポート(水平, 垂直, 45°) (陽子線用ガントリー-2)
2010	群馬大学重粒子線医学センター	HIMAC 小型化技術導入1号機 固定照射3室4ポート照射(水平, 垂直)
2013	九州国際重粒子線治療センター SAGA HIMAT	HIMAC 小型化技術導入2号機 固定照射3室6ポート(水平, 垂直, 45°)
2015	神奈川県立がんセンター重粒子線治療施設 i-ROCK	がんセンター併設型 HIMAC 小型化技術導入3号機 高速3次元スキャニング照射法 固定照射4室6ポート(水平, 垂直)
2018	大阪重粒子線治療センター OSAKA HIMAK	HIMAC 小型化技術導入4号機 都心型治療施設 固定照射3室6ポート(水平, 垂直, 45°, 動体追跡)
2021	山形大学医学部東日本重粒子センター East Japan HIC	HIMAC 小型化技術導入5号機 固定照射室 重粒子線用回転ガントリー

成したイオンビームは照射室で患者さんに照射することになるが、腫瘍の部位や形状によって、色々な方向から照射できる方が良い。そのためイオンビームを曲げることが必要になってくるのだが、炭素線の方が陽子線よりも粒子が重いことも一因となって、強い磁場が必要である。患者さんの体の軸に対して360度の方向から照射することのできるガントリーという装置があるが、炭素線のためのガントリーは陽子線のそれに比べてとても重くなる。2017年に当時の法医研(放射線医学総合研究所)が東芝と炭素線のためのガントリーを開発し、導入したのが、国内初である。すなわち、一般に炭素線の方が陽子線に比べて装置が大がかりになる傾向があり、陽子線の治療施設の方が建設コストは低く済む。

さて、重粒子センターでは、「次世代の重粒子線がん治療システム：山形モデル」を標榜し、性能に優れる炭素線(重粒子)を選んだ。重粒子センターは、重粒子線治療施設としては、国内で7番目となる重粒子センターである(表1)が、多くの新しい特徴を備えている。その1つが、空間の高効率化である。地下にビーム発生装置(イオン源、加速器)を置き、ビームを垂直に打ち上げて階上の照射室に導いている。このような立体構造により、建屋敷地



写真2 加速器制御室

面積を小さくしている。また、シンクロトロンとの最適化、ビーム取り出しシステムとの工夫により、加速器システム運転時の省電力化にも成功しているという。照射装置では、固定照射室に加えて、国内で2番目となる重粒子用ガントリーを備えた。これは、放医研で採用された重粒子用超電導回転ガントリーを更に小型化したものとなっている。

構想から16年、2020年に竣工した。残念ながら回転ガントリーは最終調整中とのことで、まだ実際の治療には用いられていないが、固定照射室では、2021年2月に前立腺癌の治療が始まった。

「重粒子センターへの訪問ですね」タクシーの運転手さんはよくわきまえたもので、病院のエントランスではなく、ちゃんと加速器のある建物の玄関前に降ろしてくれた。病院の敷地の一角で、柔らかなオレンジとグリーンのツートン(山形の自然を象しているという)があしらわれた落ち着いた建物であるが、玄関自体は意外とこじんまりしている、という印象を受けた(写真1)。患者さん自身は、立派な病院のエントランスからアクセスし、渡り廊下を渡って治療を受けに来る。重粒子線センター自体の玄関を使うのは、関係者のみ、ということなのであろう。

事務室長の矢口清さんに案内されて、まず3階の会議室へ。そこで簡単なブリーフィングを受けた後、副センター長の岩井岳夫先生に施設を案内していただいた。

2階に下り、病院からの渡り廊下の続きにある受付の前を通り、まず制御室に向かった。制御室もいたずらに広い部屋ではなく、加速器を制御する装置が効率良く配置されていた。加速器のあらゆる箇所



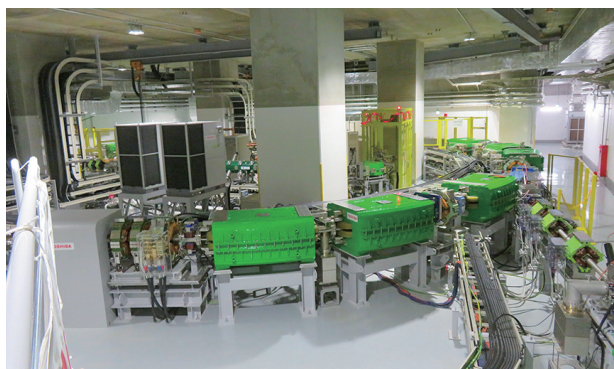


写真3 加速器とビームライン

の状態を表示する、多数のモニターやオシロスコープ等が目をつけた（写真2）。この後の加速器室の見学のために、ビームの発生を待っていただいた。

次に固定照射室を見学した。固定照射室は、重粒子ビームの射出位置は固定だが、ロボットアームを備えた治療台により、患者さんの体の方を動かして、最適な照射方向に設定できる。また、治療しようとする臓器の位置をモニターするためのX線照射装置もあり、その情報をもとに、治療台の位置決めをコンピュータにより瞬時に行う仕組みとなっている。先ほど述べたように、重粒子線は、体内の特定の深さに集中してダメージを与えることができるため、その位置を腫瘍の位置と合わせる必要がある。重粒子線の飛程は、エネルギーで決まるため、腫瘍の位置（深さ）によってエネルギーを変化させる必要がある。これには2通りの方法があり、1つは、レンジシフタを使用する方法、もう1つは、加速器側でビームのエネルギーそのものを変化させる方法である。レンジシフタとは、樹脂等の材質でできた板であり、照射前のビームを通過させることによって、エネルギー損失によってエネルギーを下げ、飛程を短くさせるものである。ただ、物質を通過させる際にどうしても散乱が起これ、ビームが広がったり、散乱線による意図しない照射を招く懸念がある。これを嫌い、山形大学重粒子センターでは、加速器側のエネルギー調節の方式をとった。加速粒子のエネルギーを変化させるためには、シンクロトロン磁場やビーム搬送用の磁場、レンズ等をすべて同期させて変化させる必要があり、高度なコンピュータ制御技術が要求される。実際には、飛程は0.5 mm間隔で600段の調整幅を持っているとのことだ。照

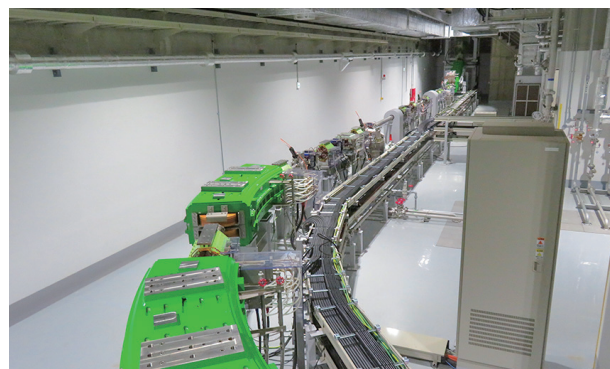


写真4 ビームラインが垂直に立ち上がっている様子（奥）

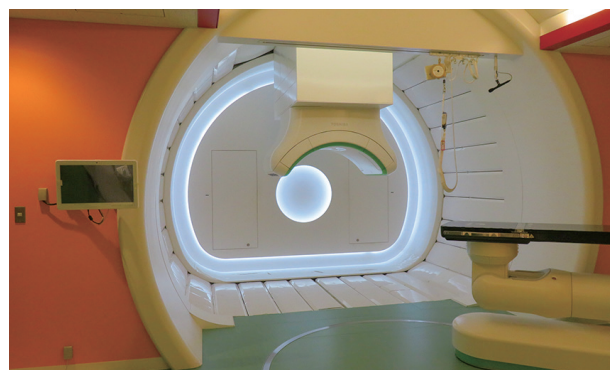


写真5 回転ガントリー照射室

射室にも、山形の自然をモチーフとするテーマカラーのオレンジとグリーンが所々に配され、落ち着いた雰囲気となっていた。

次に、地下に移動し、加速器を見学した。装置系は、ECR イオン源、線形加速器、シンクロトロンからなる。炭素のイオンビームは、メタンガスを材料に、ECR イオン源で生成される。生成したイオンビームは線形加速器で前段加速され、シンクロトロンで、最大430 MeV/uまで加速される。装置が置かれている空間自体は、天井はコンクリートむき出しで、治療室のような温かい雰囲気はない。しかし、加速器やビームラインが無駄な隙間無く設置されており、シンクロトロンを構成する電磁石のヨークははっきりとしたグリーンに、電源ケージ等はライムグリーンに塗られていて、統一感を醸し出している（写真3）。加速器室の、入り口のちょうど正反対のコーナーでは、ビームラインが垂直に立ち上がっており、そこからビームが照射室に搬送されていくことが分かる（写真4）。

加速器室を出て、再び階上に上がり、回転ガントリー照射室を見学した（写真5）。この時は、ビー



写真6 回転ガントリー本体外側

岩井岳夫副センター長（左）と筆者（右）

ム射出口は真上に位置していたが、実際に稼働すると、これが治療台を軸に360度回転する様は壮観であろう。この部屋もオレンジとグリーンの配色が落ち着いた雰囲気を出していた。基本的に患者さんが動く空間には、随所にこのテーマカラーを見ることができた。次いで、回転ガントリー照射室の背後から、ガントリー本体を外側から見た(写真6)。クリーム色の筐体上部から、ビームを治療台に向けて曲げるための超伝導電磁石のヨークがここでも緑色に塗られて覗いていた。実際の照射中は、この構造自体が、ぐるりと回転するのだろう。治療室以上に壮観な様が想像される（もっとも、照射中はここへは立ち入り禁止だろう）。

最後に、センター長の根本建二先生も交えて、重粒子センター全般についてざっくりばらんなお話を伺った。重粒子センターの当初の構想では、2020年3月に治療開始の予定であったが、ガント

リーの超伝導電磁石の不具合とシンクロトロン冷却の問題で1年近くの遅延を招くこととなった。いずれも、重粒子センターの「山形モデル」に必要な最先端技術に関わるものであり、意欲的な設計では想定外のトラブルもあるだろう。筆者も普段の仕事で静電加速器施設を預かっており、加速器のビームラインや電源、制御室等、なじみのある光景であった。しかし、重粒子センターでは、加速器そのものが「医療装置」と指定されているため、無闇に手を出してメンテナンスもできないらしい。どんな小さな故障でも、指定された業者しか作業ができないとのことだ。人の命を預かる装置だからこそ、万全の法体系の元に管理運営されていることは理解できるが、そのために、作業の効率が大きく制限されることもあるようだ。

訪問してみたの全体的な印象は、極めて空間効率が突き詰められた合理的なデザインである、というものである。見学後、病院区画の方へも立ち寄ってみたが、最新の放射線治療装置（X線）やSPECT、PETといった診断装置も備えているという。山形大学医学部が、先進医療で日本を、そして世界をリードしていこうとする意思が感じられた。重粒子センターはその象徴となる施設であった。1日も早いガントリーの稼働を期待したい。

最後に、今回の訪問についてお世話になった、事務室長の矢口清様、お忙しいところお時間を作っていただいたセンター長の根本建二先生、そして、施設を隅々まで案内してくださった岩井岳夫副センター長に心より御礼申し上げます。私ごとになりますが、岩井先生とは二十数年前、東京大学原子力研究総合センターで同僚としてご一緒させていただいておりました。ご活躍の様を拝見できて、誠に祝着に存じます。

本稿を執筆するにあたって、想田光ら「山形大学医学部東日本重粒子センターの建設」, 加速器, **17** (3), 144-150, (2020), また重粒子線治療施設の Web ページを参照させていただいた。

(東京大学総合研究博物館)