

がん治療の最先端 粒子線治療

三菱電機株式会社 磁気応用医療システム部
 加速器設計課 副課長 井上 博光
 兵庫県立粒子線医療センター
 院長 沖本 智昭

聞き手：吉川 正 (トヨタテクニカルディベロップメント)
 佐藤 喜久男 (トヨタ自動車東日本)
 川村 光洋 (トヨタ車体)

先進医療として、がんの治療効果が高い粒子線治療が近年クローズアップされています。その装置開発現場について三菱電機の井上博光氏に、実際の治療現場について兵庫県立粒子線医療センターの沖本智昭氏に伺い、粒子線治療の今をお伝えします。

研究装置から医療装置へ

聞き手 まず、粒子線治療装置の開発を始めるきっかけを教えてください。

井上 当初は、KEK (高エネルギー加速器研究機構) や理化学研究所、SPring-8 (大型放射光施設) などの研究機関向けに加速器用の電磁石や電源のビジネスをしていました。その後、放射線医学総合研究所のHIMAC (重粒子加速器) にて粒子線治療装置の分野に参入した後、兵庫県立粒子線医療センター向けで初めて当社単独での粒子線治療装置を2002年に完成させました。

現在は国内8施設への導入が完了し、更に3施設を計画しており、国内シェアは6割を超えました。

聞き手 装置の特徴と優位性をお聞かせください。

井上 従来の放射線治療装置とは異なり、放射線(光)でなく、粒子線を使用します。

放射線はからだの表面での線量が多く、がん到達するまでに線量が少なくなってしまいます(図1)。つまり正常な細胞、臓器に不要な放射線を多く当ててしま

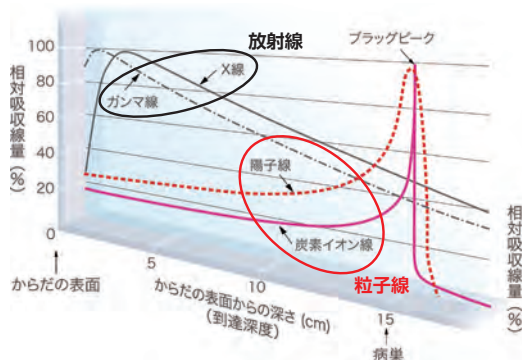


図1 放射線と粒子線の線量の違い



井上 博光氏



沖本 智昭氏

い、副作用を起こしてしまいます。照射経路に重要な臓器、例えば心臓や脊椎があると治療が困難になります。

それに対し、粒子線は体内に吸収される線量の分布特性(ブラグピーク)を用い、患部に集中的に照射ができる特長を生かし、がんを直接攻撃ができます(図2)。

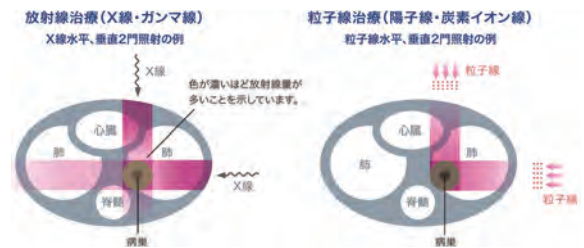


図2 患部への照射の様子

聞き手 画期的な方法だと思えます。装置構成はどのようなになっているのでしょうか。

井上 粒子線を患部に照射するまでには、多くの工程と大型の装置が必要です(図3)。

初めに、粒子である陽子や炭素をイオン化します。

次に加速器を使って1秒間に地球を5周する速さ(光速の約70%)まで加速させます。

粒子線は移動させると拡散するので、絞り込むための電磁石が必要です。また、加速させるのに必要な距離を稼ぐために直径数十メートルを超えるシンクロトロン(粒子線の軌道安定と加速制御)(写真1)や、患部に照射するための角度を制御するガントリー(大型の回転装置)が必要となります(写真2)。

最後に、加速した粒子線のがん病巣に合わせて照射システムで精度よく整形し、1mmの精度で照射します。



図3 装置概念図



写真1 シンクロトロンの一部(青色部は粒子線を曲げるための電磁石)



写真2 ガントリー(内部に患者が入る)

聞き手 粒子線として陽子や炭素イオンが出てきましたが、違いは何ですか。

井上 粒子線治療は、主に陽子や炭素イオンを利用しています(図4)。

陽子は、もっとも軽く小さい水素原子核のことです。炭素イオンは、陽子より質量が重く大きいので、同じ線量なら、がんへの攻撃能力が増すというメリットがある一方、エネルギーが大きい分、短距離でビームを曲げることができません。そのためより大型なシンクロトロンの設備が必要で、ガントリーも活用しにくくなり、患部への照射角度も限定されてしまいます。

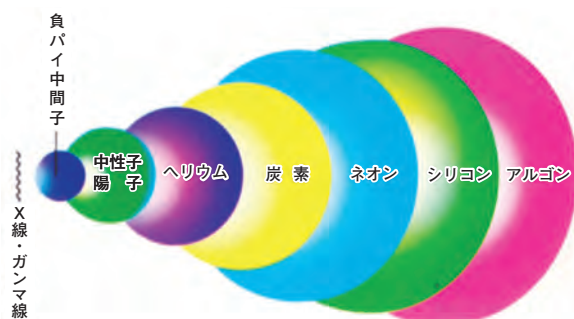


図4 粒子の大きさ、種類

ものづくりの総合力から生まれた

聞き手 それぞれ一長一短があるわけですね。では、このような設備を開発するための技術を教えてください。

井上 粒子線のビーム設計は物理技術者、電磁石や回転ガントリーは機械技術者、電源は電気技術者、装置の制御は制御技術者が担当します。また放射線の知識や生理学の知見、建築技師、治療ルームのデザイナーなど幅広い分野の技術力を結集して粒子線治療装置を作っています。

まさに大学で学んだ電気磁気学、電気回路学、機械工学、制御工学などの基礎理論を元に応用、実践されています。

聞き手 設備の安全性、信頼性はどのように確保されていますか。

井上 もともと超大型の発電機と、シーケンサと呼ばれる産業用の制御装置や、モータコントローラを自社で開発、販売しているので、その強みを十二分に発揮しています。特に粒子線治療装置のキーコンポーネントである電磁石の開発・製造技術は長年の経験を生かしており、珪素鋼板を利用しコイルの巻き方を含め、高い精度と信頼性を確保しています。

設備全体も設置精度 $\pm 0.1\text{mm}$ に規定し、空調、水温の管理を $\pm 1^\circ\text{C}$ で厳格に管理しています。

もちろん日常においても、始業点検で設備の暖機運転後、作動状態を必ず確認しています。

また、電磁石の電流値や、各種電流センサをモニタリングし、それらを一部二重化することで照射する粒子線の確実な制御を実施しています。

粒子ビームは非常に短いパルスで間欠照射しているので、発熱の影響もほとんどありません。

粒子線治療装置の特徴として、電源を遮断すれば放射線は一切出なくなる安全性のメリットがあり、かつ設備内の放射線は国の定めた基準以下で制御されています。更に年1回の大規模な点検を行っており、装置の維持管理につとめています。

点検で装置を止めてしまうと治療が止まってしまうため、最近は分割点検を実施し稼働率を上げています。

国内治療実績は延べ12,000人を超えましたが、安定して稼働しています。

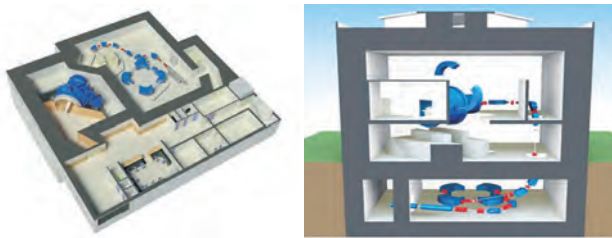
次の一手を目指して

聞き手 多くの技術と安全管理のもと装置が生まれ、運用されていることが分かりました。

今後の展望についてお聞かせください。

井上 設備環境を含め粒子線治療装置は大型であり、導入には非常に多くのスペースが必要です。

この課題に対し、近年小型化の取組を行い、1室の平面タイプや2階建てタイプの装置を開発しました(図5)。



1室 平面タイプ 1室 2階建てタイプ

図5 装置小型化の取組

これは都市型病院での導入を想定しています。

最終的には100万人に1か所、少なくとも各都道府県に1つは普及することを目指しています。

しかし、既存の病院に設置するためには、例えば放射線治療装置の代わりに導入を考えると、更に装置を小さくすることが必要です。今の装置の延長線上では非常に難しく、技術のイノベーションが求められます。例えば、常電導から超電導磁石タイプを活用し、シンクロトロンやガントリーの超小型化、他の粒子イオンの選定や新しい制御方法が考えられます。当社では研究用として超電導加速器の納入実績もあります(写真3)。



写真3 超電導磁石を利用した研究施設(理化学研究所)

責任・情熱・積み重ね

聞き手 若手技術者に向け、開発プロジェクトで成功させるための秘訣を教えてください。

井上 粒子線医療装置も分解すると、ボルト1本からの小さな所の改善の積み重ねでできています。最先端であろうが根っこの部分は皆同じです。スケジュール管理から、調達、構造、スペースの取り合い、システム制御など様々な課題があり多少(かなり)苦労しましたが、人の命にかかわり、そして救える装置を開発しているのだと思うと、そうした苦労は消し飛びました。人の役に立っている仕事であることを念頭において、あきらめずにやりきるのだという情熱を持ち続けることが重要です。

今後も、その考え方をもとにより装置を作り、医療の発展に貢献していきたいと思います。

治療現場の今

聞き手 実際の治療現場である兵庫県立粒子線医療センターを訪問しました。施設の特徴を教えてください。

沖本 2001年に自治体としては全国初となる、粒子線治療に特化したセンターとしてスタートしました。

また、陽子線治療と炭素イオン線治療の両方の粒子線治療を先進医療として行っている日本唯一の施設です(写真4)。粒子線治療専門スタッフ(約60人)のみで構成され、高い治療技術と治療実績(約7,000人)があります。



写真4 兵庫県立粒子線医療センター全景

施設内部には、陽子線治療用の回転ガントリー照射室2室(写真5)、炭素イオン線治療用の水平垂直照射室1室、45°照射室1室、座位照射室1室、開発照射室1室、合計6室7門の治療室があります。

エネルギーとして、陽子線は70~230MeV/u^{*1}(体内飛程30cm)、炭素イオン線は70~375MeV/u(体内飛程21cm)を出力できます(*1 eV...1Vの電場で加速された電子のエネルギー、u...統一原子質量単位、M...10⁶)。共用のシンクロトロンが一基あり、それぞれの照射室に振り分けることができます(図6)。



写真5 回転ガントリー照射室



図6 施設構成

聞き手 最先端の設備、人材が集結されていますね。陽子線治療と炭素イオン線治療の両方が使えると、どのようなメリットがありますか。

沖本 治療を行う場合の選択の幅が大きく広がります。陽子線治療は様々な角度から照射しやすく、炭素イオン線治療は集中照射が可能かつ生物学的効果が陽子線治療の約3倍あるといわれています。

それぞれの長所を生かし、陽子線治療プラン、炭素イオン線治療プランを立てることができます。

そして実際に患者を診断して、どちらの方がより効果があるか副作用を含め選択し、治療していきます。

聞き手 治療される側から見ても安心できます。粒子線治療では、実際どこまでの効果が期待できますか。

沖本 外科的な手術をせずのがんを死滅できる多くの効果、実績があります(図7)。

粒子線治療が向いているのは、頭頸部(鼻腔や副鼻腔など)、肺、肝臓、前立腺、骨などにできたがんですが、それに加え直腸がんの術後再発や、転移性のがん(肝転移、肺転移)などにも効果があります。しかしながら、すべてのがんが粒子線で治療できるわけではありません。これまでの経験から、がんができた臓器によっては粒子線での治療が不向きな場合もあります。まずは万能ではないことを承知してください。胃や大腸などの消化器系のがんは放射線により粘膜が潰瘍になりやすく、一般に粒子線治療の対象になりません。

リンパ節への転移が広がっている場合も、十分な効果を期待できません。実際、治療が可能かどうかといった治療適応は、がんの大きさや進行度、がんの場所、全身の状態などを診察して決まります。

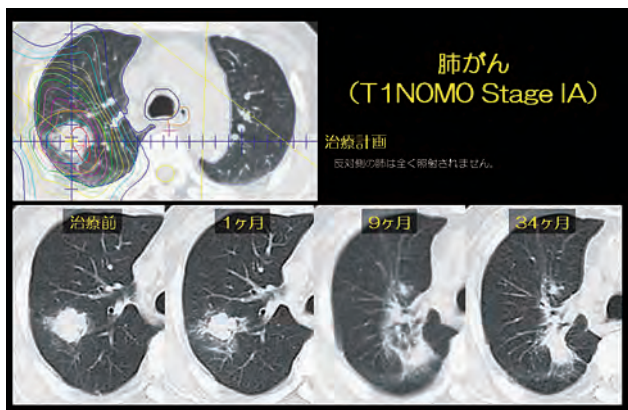


図7 粒子線治療計画と治療結果(肺がん)

聞き手 2人に1人ががんになる時代になり、他人事とは思えません。実際の費用や治療の流れを教えてください。

沖本 がんになられた患者さんの主治医さんが、粒子線治療が効果を発揮できることを判断した場合に、粒子

線医療センターに申し込みをさせていただいております。その後、診断書を確認、諸検査を実施後、治療方針、治療計画を決定します。患者さんおよびご家族に説明し合意をいただいた後、治療が開始されます。

先進医療にかかる料金は、288万3千円(保険適用外)となり全額自己負担となります。

1回の治療は約30分で、照射中、痛みも熱さも感じることはありませんし、患者さんが常に意識を保った状態で治療を行います。照射回数は数回~数十回、治療期間は数週間から数か月になります。治療終了後、速やかに社会復帰できることを目指しています。

ひとりひとりに向き合う

聞き手 治療する際に特に気を付けていることは何でしょうか。

沖本 粒子線治療において、がんへの正確な照射と、がん以外への照射を極力少なくする(副作用を抑える)ことが非常に重要で、治療計画により綿密に決定されます。CTやMR撮影により得られた情報から、がんの大きさや進展範囲を判断し、適切な粒子線の照射範囲や方向、線量の処方を行います。そして粒子線を照射する方向やエネルギー、深さを決定します。この時にコンピューター上で調整を繰り返し、もっとも副作用を少なくすることのできる効果的な治療法を選びます。

作成された治療計画は、カンファレンス(医師、診療放射線技師、医学物理士、看護師が参加)で検討し納得するまで議論を重ね承認します。

聞き手 患者の症例をしっかりと確認してこそその装置活用ですね。ビームはどのようにして正確に患部に当てることができるのでしょうか。

沖本 患者さんごとに専用の「固定具」「コリメータ」「ボラス」(写真6)を作成します。



写真6 固定具(左)、コリメータ(中)、ボラス(右)

「固定具」はビーム照射中から体が動かないようにする治具です。「コリメータ」は、照射方向から見たがんの輪郭を、「ボラス」は奥行方向の距離の調整ができます。「コリメータ」や「ボラス」は、患者さんのがんの3Dモデルから作成します。これを粒子線治療装置の照射システム(図8)でがんの形状に合わせてビームを整形することで、正確に当てることができます。

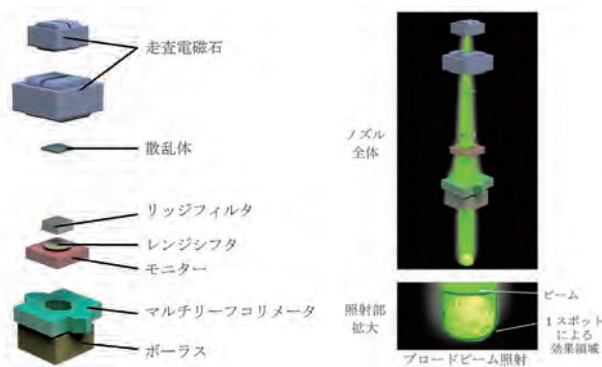


図8 照射システム 構成 (左)、照射イメージ (右)

照射時には人の呼吸との同期や、体の動きを骨基準で常時補正するなど、多くの細かい調整を行いながら、がんに対し1mm以内の最終精度を確保しています。

最後に人がモニタを監視しながらビームの照射タイミングの決定をし、照射続行の判断を常にしています。

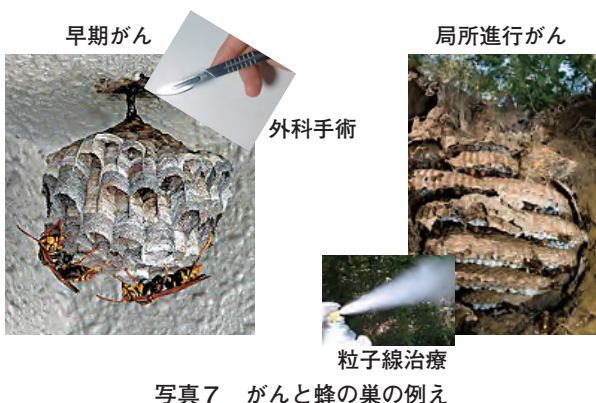
聞き手 きめ細かいシステムと作業に支えられていることが分かりました。やはりこれからは、粒子線治療が進んでいくのでしょうか。

沖本 外科手術との比較は、がんの状態によりけりです。よく蜂の巣 (写真7) を題材に出しますが、転移がなく、茎を切れれば切除できるタイプのがんなら外科手術の方が有効です。粒子線治療は、殺虫スプレーで駆除することに例えられます。がん幹細胞が残ってしまうと、女王蜂が生き残っているような状態で再度増殖します。

では、外科手術の方がいいのだろうと思われるかもしれませんが、例えば土の中にいる多くの蜂を想定すると駆除はやっかいで、外科手術では除去することが非常に困難になるため、使い分けが必要です。

粒子線治療をした場合の4cm以下の肝細胞がんの局所制御率 (放射線を照射した部位からがんが再発しない割合) は95%を超え、非常に優秀です。

逆に4cmを超えると、がん幹細胞が生き残る確率が増えていきます。



聞き手 今後の取組についてお聞かせください。

沖本 他の臓器から転移したがんの治療効果を上げる

ことや、胃や大腸などの消化器系の近くのがんの治療を可能にすることなどに取り組んでいく必要があります。

治療可能な範囲を広げ、多くの患者さんが元気に退院して通常の生活ができるよう、スタッフ一同、日々全力で治療してまいります。

先進医療の更なる発展を目指して

聞き手 では最後に、装置開発側と装置を利用して治療する側合同で意見交換をしていただきます。

井上 臨床結果は、装置を開発する側としてよく分かっていないのが現状です。今後に生かすため教えていただくことができますか。

沖本 治療の観点と、装置の観点は少し違うかもしれませんが、例えば陽子線と炭素イオン線治療での実績の差異等、役立つ部分はお見せしていきたいと思います。

また、治療していただいた患者さんから感謝のお手紙を多く頂戴しており、それを直接見るようにしていきたいです。ボラス製作のスケジュールを短くすることがいかに喜んでいただいているかなど、生の声を聞いて感じていただきたいと思います。

井上 ありがとうございます。また陽子線と炭素イオン線治療の差異は結果として表れているのでしょうか。

沖本 大きな数値としては表れていませんが、生物学的効果がよい炭素イオン粒子線装置をどんどんよくしていただき、治療の幅を広げていきたいと思っています。

要望としては、照射の自由度の向上や、保守期間の短縮などがあります。また、開発照射室が1つ設けてあり、様々な実験を行う環境がありますので、新技術をそこで一緒に生み出せていけたらと思います。

井上 今後、使う側や患者さんの気持ちを肌を感じながら装置開発と保守を実施していきたいと思っています。

開発照射室の件、お話をいただきありがとうございます。具体的なテーマをもとに検討させていただきます。

聞き手 井上さん、沖本さん、単独インタビューと合同インタビューともども、本日は長時間、貴重なお話ありがとうございました。

「インタビュー」2015年6月15日 (月)

三菱電機株式会社 神戸製作所にて

兵庫県立粒子線医療センターにて

記事中の図、写真提供

三菱電機株式会社 図1、2、3、5、6、8 写真6(中)

兵庫県立粒子線医療センター 図4、7 写真4、7

国立研究開発法人 理化学研究所 写真3