患者にやさしい治療を実現する粒子線治療

秋山 浩 Akiyama Hiroshi
望月 健太 Mochizuki Kenta
梅澤 真澄 Umezawa Masumi

日立は，大型加速器プロジェクトへの参画で培ったビーム制御技術を基に粒子線治療システム市場に参入し，5施設を治療運転中，5施設を試運転・建設中である。現在，MDアンダーソンがんセンターで開発したスポットスキャニングを中核としたシステムを提案している。また，プロジェクトごとに顧客と協創し，スポットスキャニング，動体追跡，CBCTなどの最新技術を開発して提供してきた。今後も新しい技術にチャレンジし，タイムリーに市場に提案していくとともに，総合的なソリューションとしての粒子線治療システムを提案できるよう技術開発を進めていく。

1. はじめに

近年，がん治療における放射線治療の需要が増えている。放射線治療の中でも陽子線，炭素線などを用いた粒子線治療は，患部に放射線を集中させ，正常組織へのダメージを極力少なくする方法として注目されている。

日立は，物理実験用の大型加速器の国家プロジェクトに参画し，加速器などのビーム関連技術を培ってきた。その技術を基に粒子線治療システムの開発を進め，筑波大学附属病院陽子線医学利用研究センター(以下,「筑波大」と記す。)に陽子線治療システムを納入することで粒子線治療システム市場に参入した。このシステムは2001年9月より治療を開始し，これまでに約3,300人以上を治療している。

本稿では，これまでの日立の粒子線治療システム市場への展開，製品ラインアップ，顧客協創による先進技術の開発について述べる。

2. 粒子線治療システム市場への展開と製品の特長

2.1 粒子線治療システム市場への展開

日立は日本国内だけでなく，海外市場にも積極的に展開している。

2002年12月に米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンター(以下,「MDA」と記す。)の陽子線治療システムを受注し，日本のメーカーとしては初めて※1)米国の粒子線治療システム市場に参入した。また，粒子線治療システム販売会社として，世界で初めて※1)スポットスキャニング照射システムを完成させた。スポットスキャニング照射は，患部へ線量を集中し，正常組織への不要な線量付与を抑制する最新の照射法である。MDAでは2015年8月までに約6,200人以上を治療しており，うち約1,400人以上をスポットスキャニングで治療した。

名古屋市（愛知県）の名古屋陽子線治療センターの陽子線治療システムでは，2013年2月より治療を開始している。このシステムでもスポットスキャニング照射が導入され，アジアで初めて※1)陽子線のスキャニング治療が開始された。名古屋市のシステムでは，治療開始から2年5か月で約900人，特に2014年度の1年間で約500人を治療した。筑波大，MDA，名古屋市の3つのシステムで，すでにトータル約1万人を超える人数を治療したことになる。

北海道大学病院陽子線治療センター(以下,「北大」と記す。)に，動体追跡システムやロボット型治療台，CBCT［コーンビームCT（Computed Tomography)］などの最新技術を取り入れた分子追跡陽子線治療装置を納入し，2014年3月より治療が開始された。

2011年5月には，米国のメイヨー・クリニックからミネソタ州ロチェスターとアリゾナ州フェニックスの2か所の陽子線治療システムを受注した。ロチェスターでは2015年6月から治療を開始した。

2012年2月に同じく米国のセント・ジュード小児研究

※1) 日立製作所調べ。

病院から陽子線治療システムを受注し，現在試運転中である。

2014年には，日立としては初の重粒子線治療システムとなる大阪重粒子線がん治療施設（仮称）向けの重粒子線治療システムのプロジェクトが開始された。また，2015年6月に米国ジョンズ・ホプキンス・メディスン傘下のシブリー・メモリアル病院から陽子線治療システムを，さらに2015年7月には，京都府立医科大学附属病院に設置される永守記念最先端がん治療研究センター向けの陽子線治療システムを受注した。

2.2　日立の粒子線治療システムの特長

日立はスキャニング照射を中核としたシステムを提案している。スキャニングは従来のブロードビーム法と比べ，患部への線量の集中が可能であり，二次粒子の発生も少ない。また，飛程補償体（ボーラス）などの患者用具が不要なため，治療時間を短縮でき，ランニングコストも低減できる。

陽子線治療システムの加速器には，北大向けに開発した小型シンクロトロンを採用した。重粒子線治療システムの加速器についても小型化をめざした加速器を開発中である。回転ガントリーについては，顧客ニーズに合わせ，標準型360度，小型360度，190度回転型と3種類の中から提案する。位置決め用イメージングシステムについては，標準の2軸のX線撮像装置のほかに，CBCT，同室CTなどを選択可能である。イメージレジストレーションには，2軸X線撮像に対応した2D（Two-dimensional）/2Dモードのほか，治療計画のCT画像から多数のCT再構成シミュレーション画像（DRR：Digitally Reconstructed Radiography）を生成し，位置決め時のX線画像と比較して自動的に位置ずれ量を算出する3D（Three-dimensional）/2Dモード，CBCTや同室CTに対応した3D/3Dモードを提供可能である。

また，日立は粒子線治療計画装置を自社開発している。陽子線版は現在国内3施設で稼働している。重粒子線版も現在開発中である。粒子線治療の新たな治療技術を開発しても治療計画装置がその技術をサポートできなければ，新技術を市場に投入できない。粒子線治療計画装置の自社開発により，新技術をタイムリーに市場投入することが可能となる。

2.3　使いやすく人や環境に配慮したシステム

以前の加速器システムではシステムの安定化を図るため，常時運転をしていた。日立は2001年に治療を開始した筑波大向けのシステムから，ビームを供給するときのみ加速器を運転する省エネルギー運転を実現している。また，2006年に治療を開始したMDA向けのシステムでは，加速器，照射系のすべてのパラメータを自動的に設定するオペレータレス運転を実現した。位置決め後，治療技師がビームを要求するとビーム機器の設定をシステムが自動的に実施する効率的なシステムとなっている。

治療室内のデザインについては，日立のデザイン部門により，柔らかくリラックスできる治療空間を実現する（**図1**参照）。

図1｜治療室のデザインの例
北海道大学病院陽子線治療センターの治療室を示す。

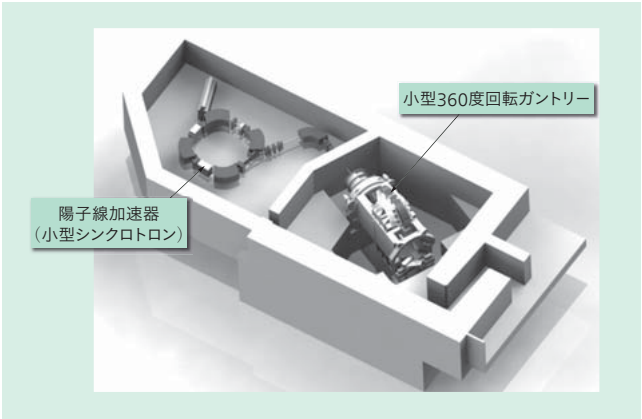


図2｜陽子線治療1室システムの鳥瞰（かん）図
陽子線加速器と回転ガントリー照射室1室を組み合わせ，敷地面積を低減したシステムである。

2.4　小型システムの提供

今後，陽子線治療システムは大病院だけでなく，中小の病院や都市部の土地の狭い場所での需要が高まると考えている。そのために，北大システムで開発した小型加速器と小型ガントリーの組み合わせにより，ガントリー1室で設置面積を極力少なくしたシステムを開発している（**図2**参照）。

3.　顧客協創による新技術の開発

日立はこれまで，世界最先端の粒子線治療技術を顧客と共に開発し，実現してきた。MDAとのスキャニング照射

技術の開発とその実現[1]や，北大との共同国家プロジェクトである最先端研究開発支援プログラム「持続的発展を見据えた『分子追跡放射線治療装置』の開発」を通じた動体追跡技術とスキャニング照射技術の融合[2]などを進めてきた。ここではその代表例をいくつか紹介するとともに，今後の展開について述べる。

3.1　照射精度の向上

照射の高精度化については，放射線治療全体としてIGRT（Image Guided Radio Therapy：画像誘導放射線治療）を高度化する技術開発が進んでおり，北大との共同開発においては，陽子線治療用の照射装置における動体追跡技術，およびCBCT撮像技術を開発し実現している。

動体追跡用の制御画面を**図3**に示す。同図に示すとおり，マーカの現在位置が透視画像上に表示されるとともに数値としても表示され，計画された位置からの差分がしきい値内に入ったときのみ照射可と判定し，陽子線を照射する。この動体追跡と陽子線スキャニングを組み合わせたシステムについては薬事法に基づく製造販売承認を2014年8月に取得し，同年12月より治療に適用している。

日々の患者の腫瘍の状態を把握し，より高精度な位置決めを実現する手段としては，回転ガントリーに搭載したX線撮像システムを利用してCT撮像する技術を開発した。この技術は，従来の位置決め，あるいは前述の動体追跡用に撮像する撮像装置を用い，ガントリーを回転させることでCT画像を得るものである。このCT画像を用いた位置決め，治療への適用を計画中である。

3.2　使い勝手の向上

粒子線治療システムの普及においては，技術的な性能向上と合わせて顧客視点に立った使い勝手の向上も必須となる。日立は顧客との議論を通じ，制御装置，特にユーザーの手に触れる機器についてそのデザインを改善している。特にメイヨー・クリニックとの受注後の議論においては，実際に装置を使う放射線技師を日立の製造現場に招き，設計者と直接対話してそのデザインを行った。その結果となるペンダントと言われる機械制御用装置と，照射をつかさどるオペレーションパネルのデザインを**図4**に示す。メイヨー・クリニック以降の顧客に提案し，シンプルで使いやすいとして導入されている。

3.3　今後の開発の展望

今後の粒子線治療システム市場の動向として，前述の小型1室システムのようなより広い顧客層を対象としたシステムが求められる。したがって，今後も顧客との協創を通じた最先端の技術開発を進めるとともに，その先進技術を

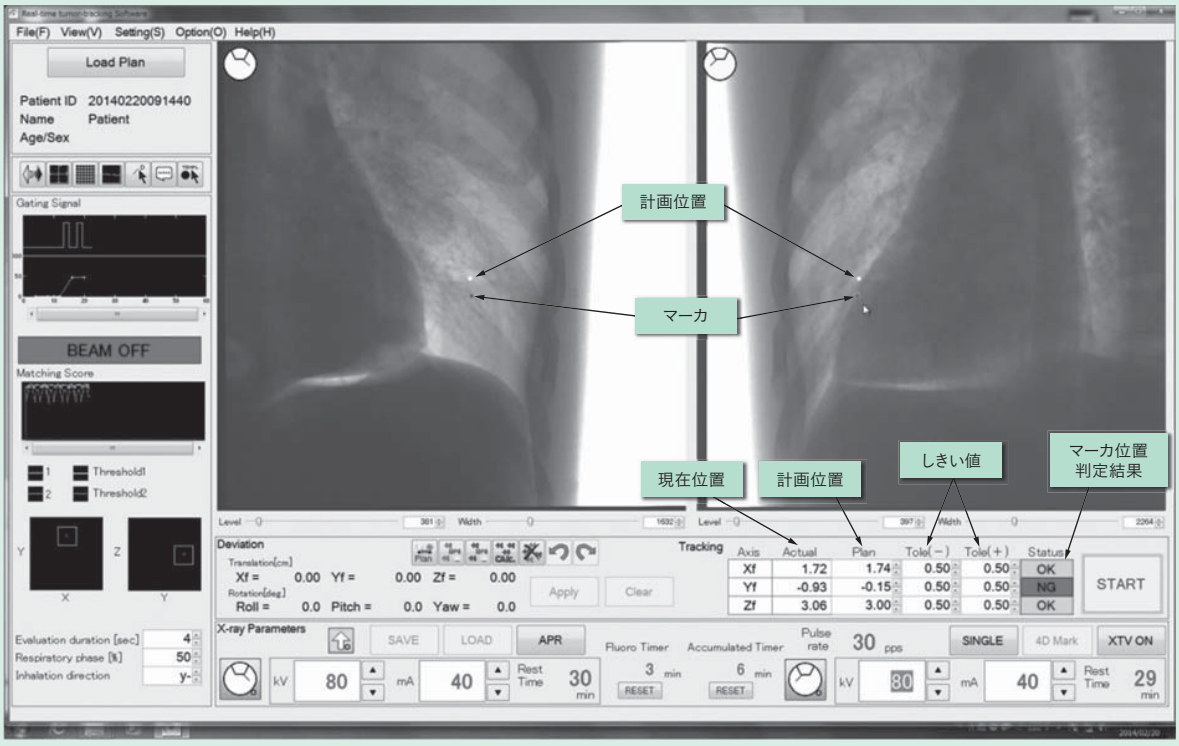
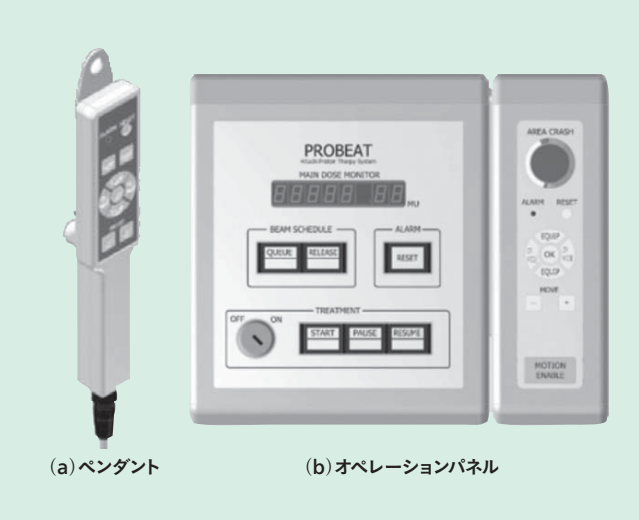


図3｜動体追跡システム制御画面

1秒間に30回撮影した透視画像を基に，マーカの現在位置を求め，設定位置からの差分が所望のしきい値内になったときに照射可と判定し，陽子線を照射する。本図に示す透視画像は，人体を模擬したファントムにマーカを疑似的に設置した試験時のものである。



(a) ペンダント　　(b) オペレーションパネル

図4｜新規デザインした制御装置

(a) 治療室にあるガントリー，治療台，レーザマーカなどを操作する装置であるペンダントの外観を示す。(b) ビームのオン／オフなどを操作する装置であるオペレーションパネルの外観を示す。

より容易に，かつ簡便に適用できるシステムの開発が必要となる。その実現に向けて，単なる治療システムの開発に限定せず，治療前後のプロセスや患者・スタッフの動線も考慮した全体システムの開発を社内外の協力を得て推進する。

4. おわりに

国内外の著名病院との協創によって開発された最先端の技術を基に，日立は粒子線治療事業のグローバル展開を進めている。現在，粒子線治療装置のシェア・売上高ともに世界トップ3の位置にいるが※2)，重粒子線治療装置の拡販，中堅民間病院などへも導入可能な小型1室システムのパッケージ提案などにより，シェア・売上高ともに世界第1位をめざしていく。さらに，粒子線治療装置の顧客である米国著名病院との共同研究などを通じ，IT (Information Technology) プラットフォームを活用した治療計画の高度化・治療時間短縮化などの技術を確立させ，ヘルスケア分野におけるITサービス事業の実現をめざす。

今後も日立はヘルスケアイノベーションを実現するリーディングカンパニーとして，医療の質の向上と効率化を追求し，世界の医療へ貢献していく所存である。

※2) 2015年8月現在，日立製作所調べ。

参考文献

1) 松田，外：世界初の商用スポットスキャニング照射装置―M.D.アンダーソンがんセンター納め陽子線治療システムの完成―，日立評論，91，3，314～319 (2009.3)
2) 梅澤，外：移動性臓器対応小型陽子線治療システムの開発，日立評論，97，6-7，388～393 (2015.7)

執筆者紹介

秋山 浩
日立製作所 ヘルスケア社 粒子線治療事業部 所属
現在，粒子線治療システムの技術マネジメントに従事
理学博士
日本医学物理学会会員，日本原子力学会会員

望月 健太
日立製作所 ヘルスケア社 粒子線治療事業部
粒子線治療ソリューション部 所属
現在，粒子線治療事業の拡販業務に従事

梅澤 真澄
日立製作所 ヘルスケア社 粒子線治療事業部 兼 研究開発グループ
エネルギーイノベーションセンタ 応用エネルギーシステム研究部 所属
現在，粒子線治療システムの技術マネジメントに従事
日本医学物理学会会員