

世界最大の陽子線治療センターの稼動

The World Largest Proton Therapy Center Started Patient Treatment

西村 直哉 Naoya Nishimura

平本 和夫 Kazuo Hiramoto

佐々木 淑江 Toshie Sasaki

森山 國夫 Kunio Moriyama



図1 米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターの陽子線治療施設
患者治療が開始されたMDアンダーソンがんセンターの外観 a と、陽子線治療室での治療準備の様子(b)を示す。

1.はじめに

米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターは、世界トップクラスのがん専門病院として知られており、放射線治療・外科治療・抗がん剤治療などの治療方法を組み合わせ、それぞれの患者に最適な治療が施されている。

また近年、陽子線治療は臨床例が蓄積されてきており、がん治療への導入の気運が高まってきている。

これらを背景として、MDアンダーソンがんセンターでは、よりよい治療の提供を目的として陽子線による治療施設の導入を2002年に決定した。

日立グループは、日本国内における加速器技術、陽子線施設の技術が評価され、米国内で3番目となる陽子線治療施設の設計・調達・製造・据付け・試運転の包括的な契約を締結することができた。日立グループにとって海外の陽子線治療施設の建設は初めてであったが、米国特有のニーズに応えるため、各種の新設計や新機能の開発も行い、現地工事掘削開始から3年という、この種の設備としては最短の工程で最初の患者治療を実現することができた。この施設は、全方向からの治療が可能なガントリー治療室を3室、照射方向が固定された大小二つの治療設備を持った固定治療室を

日立グループが建設した米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターの陽子線治療施設が稼動し、患者治療も開始された。

陽子線治療はがん周辺の健全な組織に対する影響を抑えつつ、がん組織を集中的に治療できる放射線治療として注目を浴びており、今後広く活用されることが期待されている。

日立グループは、国内で培ったシンクロトロン加速器による陽子線加速技術と、それぞれのがん形状に合わせて陽子線を加工する技術をベースに、精度の高い陽子線照射技術、患者位置決め技術、信頼性の高い制御・安全技術を開発した。

1室、さらに実験室を別に持つ、世界最大規模の陽子線治療施設である(図1参照)。

ここでは、陽子線治療と米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターの陽子線治療施設、および日立グループの陽子線治療設備の特徴について述べる。

2. 陽子線治療のニーズ

現在、がん治療には外科治療・抗がん剤治療・放射線治療などが単独あるいは組み合わせられて活用されている。これまでの放射線治療には主にX線(光子:フォトン)が利用されていた。

X線は人間の体内に入ったときに体表面の人体組織に対して最大の線量(エネルギー)を与え、その後体内を進むにつれて線量は次第に減少し、標的とするがん組織を過ぎても線量は連続的に減少するという特徴がある(図2参照)。このため、がん組織のみならず周囲の健全な組織にも影響を与えるため、照射方向を変えて健全な組織への影響を少なくしつつ、

がん組織に必要な線量を与えるIMRT(Intensity Modulated Radiation Therapy:強度変調放射線治療)なども用いられている。

陽子線は体内に入った段階では低い線量のままで、陽子の持つエネルギーの強さに応じた深さで最大の線量を放出(ブラッグピーク)し、その後は急激に減少するという特徴を持つ。

このため、治療計画でがん組織の形状に合わせて陽子線のエネルギーを調整し、計画どおりに正確に陽子線を照射することによって、がん組織を集中的に治療できるという長所がある。

このように陽子線が、がん治療に対して理想的な効果を持つことは従来から知られていたが、実際のがん治療に使用されるようになったのはCT(Computed Tomography:コンピュータ断層撮影装置)やMR(Magnetic Resonance Imaging:磁気共鳴画像撮影)などの画像診断技術が広く活用できるようになってきた1990年代からである。近年では、臨床データも数多く蓄積され、有効な治療法としての期待がますます高まっている。

3. 日立陽子線治療設備の特徴

3.1 がん形状に合わせた陽子線の整形

加速器で所定のエネルギー(速度)に加速された陽子線は、電磁石で制御された真空中を通過してノズルに運ばれる。

ノズルには、物質中を陽子線が通過する際の散乱効果を活用するパッシブノズルと、電磁石によって陽子線を走査し、がんの形状に沿って一筆書きのように塗りつぶしていくスキャニングノズルがある。MDアンダーソンがんセンター陽子線治療施設には5台のパッシブノズル(そのうち1台は目の治療専用)と、1台のスキャニングノズルがある。

パッシブノズルでは、散乱効果を持ったRMW(Range Modulation Wheel)によって深さ方向に陽子線を拡幅する。RMWは厚みを変えた円盤を回転させ、この中に陽子線を通すことにより、体内到達深度を変更する機能を持つ。次に、第二散乱体で三次元的な広がりを持つ陽子線の束を作り出

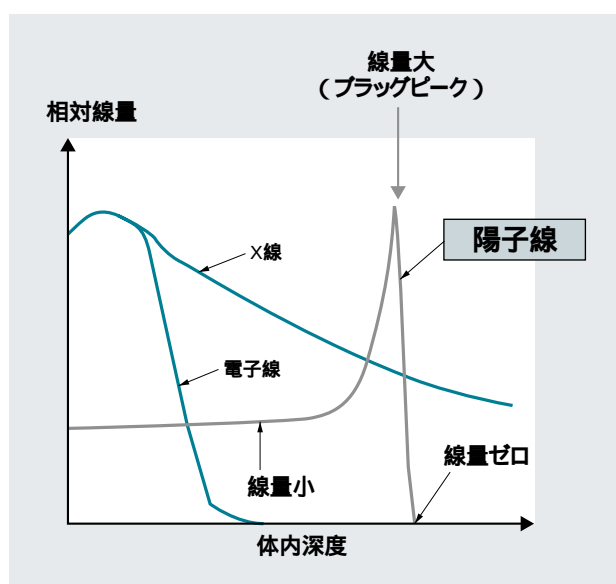
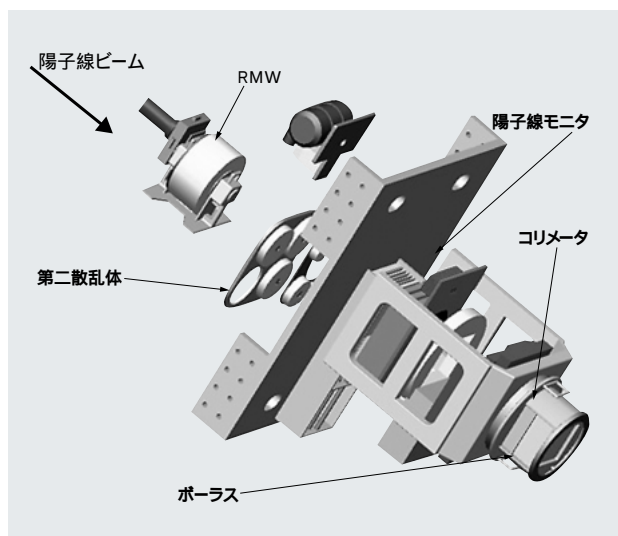


図2 陽子線とX線・電子線の体内での線量分布比較

X線・電子線は体表面に最大のエネルギー(線量)があり、体内を進むにつれて徐々に減衰している。これに対して陽子線はある一定の深さで最大のエネルギーを与えている。この深さを調整することによって、がんの病巣に直接エネルギーを与えて治療することができる。



注:略語説明 RMW(Range Modulation Wheel)

図3 パッシブノズルの構造

陽子線はノズルに入ってから、RMW・第二散乱体・コリメータ・ボラスでがん形状に合わせて整形され患者に照射される。ノズル内には各種陽子線モニターが設置されており、常に監視している。



図4 シンクロトロン加速器の外観

最大250 MeVの出力を達成するシンクロトロン加速器の外観を示す。

し、その後、コリメータとボラスでそれぞれのがん形状に合わせて整形し照射する(図3参照)。

スキャンングノズルでは、細い陽子線ビームのままで直交する電磁石によって平面的に走査しつつ、深さ方向には加速器出口のエネルギーを調整することで、がん形状に合わせて陽子線を細いビームのままで照射する。

必要な陽子線は、水素元素を直線加速器(LINAC)で7 MeVまで加速した後に、シンクロトロン加速器で光速の約70%まで加速することによって最大250 MeVの出力を達成する(図4参照)。こうして加速された陽子線は、日立の特許である高周波駆動ビーム取り出し技術により、加速器から取り出され、真空のチューブの中を電磁石で制御されながら、それぞれの治療用ノズルまで輸送される(図5参照)。

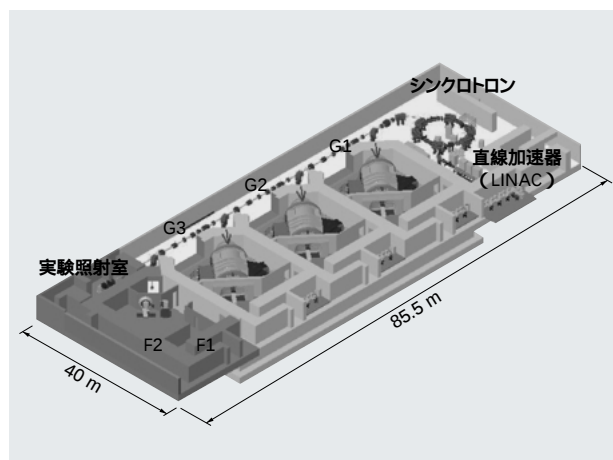


図5 加速器ならびに陽子線輸送系の概要

右上の円形をしたシンクロトロン加速器で加速された陽子線はビーム輸送系を経由して各治療室に輸送される。

三つのガントリー治療室があり、右上二つのガントリー治療室(G1, G2)はパッシブノズル、3番目(G3)はスキャンングノズルを有する。

左下は固定照射室で、目の治療専用の小照射野(F1)と通常照射野(F2)の二つのパッシブノズルを有する。

左上は実験照射室で患者治療以外の実験に使用される。

3.2 高精度での患者位置決め

陽子線治療では、放射線感受性の高い健全な臓器を避けて、陽子線をがん組織に当てることが重要である。このため、この治療装置では任意の方向から陽子線を照射可能で、かつ高い精度でがん組織を照射位置に合わせる位置決め機構を導入した。

内径約5 m、総重量200トン弱のシリンダ型回転ガントリーは、ノズルや陽子線を輸送する電磁石を搭載しており、患者を中心に360度回転して任意方向から照射することができる。患者を載せる治療ベッドは3軸3回転の6自由度を有しており、ガントリーと合わせて、要求される位置に対し、直径1 mm球の中に入る高い位置決め精度を実現している。

患者のがん組織を位置決めするために、治療室に設置したX線撮像装置で得た直交3方向の画像情報と、治療計画時に作成した参照用画像とを位置決め支援ソフトウェアを用いて比較することにより、治療ベッドの6自由度の移動量を計算することができる。

これらの機構を使用して、患者のがん組織をアイノセンターと呼ばれる陽子線照射中心位置に合わせることができる(図6参照)。

3.3 使いやすい制御系・信頼性の高い安全系

制御は上位制御系である全系制御とローカル制御系との組み合わせで構成している。全系制御は統括監視および全体治療シーケンス制御を受け持ち、ローカル制御では各ローカル機器固有の制御を受け持っている。

治療時の制御については、治療計画時に作成した処方箋(せん)データに基づき全系制御からのガイダンスにより、簡単



図6 ガントリー治療室

患者治療ベッドと45度回転したバッシュノズル、および天井から保持されたアームの先に操作用ペンダントがある。ガントリーの奥にX線管とX線受像器の搭載場所が四角く示されている。

な操作で各治療室に付属している治療制御室から治療にかかわるセラピストだけで治療が可能となっている。

治療室での患者の位置決めなどの作業は治療室のペンダントから実施できるようになっており、ガントリーの回転、治療ベッドの移動、ノズルの伸長など患者の治療準備作業が1台のペンダントですべて操作できる。準備作業終了後、セラピストが治療制御室に移動して実際の陽子線照射を実施する。

患者・セラピストなどの医療関係者・作業員などの安全を確保するため、安全系のシステムは、制御系とは独立して構築している。安全系はソフトウェアを使用せず、ハードウェアで構成しており、事象の重要度に応じて二重系あるいは三重系の多重・冗長システムで安全インターロックロジックを構築している。

MDアンダーソンがんセンター陽子線治療施設では、市販の治療計画システムや治療管理システムを導入しており、制御系および位置決め支援ソフトウェアは、これらの市販ソフトウェアと医療画像の国際標準規格DICOM RT-1onに準拠したインタフェースによって通信可能である。

4. おわりに

ここでは、陽子線治療と日立グループの陽子線治療設備の特徴について、米国テキサス州立大学MDアンダーソンがんセンターの陽子線治療施設を例に述べた。

MDアンダーソンがんセンター陽子線治療設備の患者治療開始は、陽子線治療が今後広く普及していくエポックとしてと

らえられており、欧米の有力病院がその計画を発表している。また、国内においてもすでに複数の陽子線治療施設が運用されており、今後、患者に配慮した低侵襲医療として期待されている。

日立グループは、今回培った技術を基に、今後とも顧客ニーズに合った陽子線治療施設を提供していく予定である。

MDアンダーソンがんセンター陽子線治療施設の建設にあたっては、日米の医療に求める条件・言語の違いなどさまざまな障害や、新設計・短納期などの厳しい条件もあったが、放射線治療部門長のコックス博士、ならびに主として設計仕様を調整いただいたスミス博士、そしてプロジェクトを推進されたプロトンセラピーセンター・ヒューストンの方々との協力関係を構築できたことがこのプロジェクト成功の鍵であったと考える。これらの関係各位に深く感謝の意を表する次第である。

なお、MDアンダーソンがんセンターでの治療開始に先立ち、日立の陽子線治療システムPROBEAT™は米国FDA(Food and Drug Administration: 米国食品医薬品局)から医療機器として販売する許可を取得している。

執筆者紹介



西村 直哉
1979年日立製作所入社、電力グループ 放射線治療推進本部 PBT部 所属
現在、陽子線治療設備営業技術に従事
日本機械学会会員



平本 和夫
1978年日立製作所入社、電力グループ 電力・電機開発研究所 所属
現在、陽子線治療システムの研究・開発に従事
工学博士
日本原子力学会会員



佐々木 淑江
1983年日立製作所入社、電力グループ 日立事業所 放射線治療システム設計部 所属
現在、陽子線治療システムの設計に従事



森山 國夫
1979年日立製作所入社、情報・通信グループ 情報制御システム事業部 原子力制御システム設計部 所属
現在、陽子線治療装置の制御システム設計に従事
計測自動制御学会会員、システム制御情報学会会員