

最新放射線治療機器の適応

がん患者の増加、患者の高齢化、放射線治療の適応となるがんの増加、がん対策基本法の施行、それらに伴う国民の意識の高まりなどにより、放射線治療が漸く日の目を浴びつつあると思います。思えば随分我慢してきた気がします。院内の理解を得られず、異端治療的扱いで、必要な装置を揃えることもままならない状況を経験された方も少なくないと思います。

しかし、状況は好転しています。放射線治療患者数の増加に伴い、行政からの補助金や院内の予算が配分されるようになり、今まで難しかった装置の増設や最新装置導入の検討を比較的身近に行えるようになったと思います。IMRTの健康保険適応も、高精度化の流れを加速させているでしょう。光子線治療に限っても、IMRT、IGRT対応装置、IMRT専用機など、さまざまな機器が導入されてきています。

それでは実際、各装置の得意なところは何でしょうか。各施設によって得意な疾患や病態、扱う患者に特徴があると思いますが、自分の施設の患者に有用な装置や治療技術はどれでしょうか。新規導入に際して必要な、準備時間、スタッフ、トレーニング、日々の治療時間や維持コストは如何でしょうか。また、最新放射線治療機器を有する施設に患者を紹介する場合、どのような基準で紹介すれば良いのでしょうか。

今回の特集では、CyberKnife、TomoTherapy、Elekta SynergyによるVMAT、MHI-TM2000の各装置と治療技術を使いこなしておられる先生方に、それぞれの装置の特徴をご執筆いただき、最新放射線治療機器の適応について考えてみました。

順天堂大学 唐澤久美子

サイバーナイフII

大阪大学放射線治療学 塩見浩也，井上武宏

高精度放射線治療はその照射方法において、定位放射線治療に代表される集中性を重視したものと、IMRTのように線量分布の形状、均一性を重視したものに分類される。サイバーナイフは、この両方を高いレベルで達成できる装置である。開発者のAdler博士が脳外科医であることもあり、開発当初は定位放射線治療の要素が強く、また、治療可能範囲も脳、頭頸部に限られていたが、現在では体幹部にも対応できるものとなっている。

サイバーナイフの適応を正しく理解するためには、装置や治療計画ソフトウェアの特性を理解する必要がある。サイバーナイフはMLCを持たず、直径5～60mmの12種類の円形コリメータを使用する。治療計画時には、使用するコリメータは手動で設定する必要があるが、高度に自動化された治療計画装置のインバースプランニングにより、照射方向、使用するビーム数、各ビームのウエイトが自動的に設定される。ビームの本数、方向が自動的に設定されるのが、通常の放射線治療と大きく異なる点である。パラメータの設定により、線量分布をさまざまに変化させることができる。一般に、homoge-

neityとconformityは相反するものであり、治療計画者の考え次第で作成される線量分布は大きく異なる。細かいビームを数多く使用することで、きめ細かい線量分布を作成することが可能であるが、ビームを多数使用した場合、治療時間は長くなる。このため、複数のコリメータを組み合わせで治療計画を作成することもある。大阪大学では、患者の状態、治療時間を考慮して、40～200本程度のビームで治療することが多い。サイバーナイフでは1回線量を低く設定しても、超多門照射を行うため、治療時間はそれほど短くはならず、最短でも約20分程度は必要である。このため、1回線量が2-3Gyの通常分割照射には向かず(不可能ではない)、1回大線量での治療に用いられることが多い。

ハードウェアとしては、TLS(target locating system)を有するのが特徴的である。これは、頭蓋骨から患者位置を正確に認識する装置で、ロボットと組み合わせることにより、治療間、治療中の自動患者位置補正が可能である。このため、分割照射を行っても理論上は精度の低下がなく、また、治療中の緩やかな動きであれば、非常に高い精度で補正



し、照射することが可能である。脳、頭頸部の定位放射線治療(SRT)には最適と考えられる。

国内での体幹部治療の承認が得られたことで、他の部位への対応も進んできている。体幹部治療では、高精度の治療を行う場合、人体の変形が大きな問題になる場合がある。われわれの経験でも、固定具を使用しても、比較的動きの少ない椎体ですら、位置関係が変わっていることがある。サイバーナイフの最新のバージョンでは、Xsight Spineと呼ばれる新しい位置認識システムも導入されている。このシステムでは椎体の変形を自動認識して照射を行うため、椎体周囲の腫瘍に対して定位照射と同程度の精度での治療が可能となる。脊椎や傍脊髄腫瘍などの治療に威力を発揮するものと思われる。海外では、椎体への再照射や転移性骨腫瘍に対する、1 回大線量照射での治療が報告されている。

体幹部治療可能なサイバーナイフは、装置としては、金属マーカを追跡することも可能であるため、金属マーカを刺入できる部位であれば、照射可能である。海外では、肺、前立腺、肝、脾などの治療が報告されている。日本国内では、一般には体幹部定位放射線治療の対象とはならない前立腺、脾も、海外では 4~5 分割での少分割治療が報告されている。これらは良好な初期治療成績が報告されているが、長期成績は不明であり、一般的な治療とは言え

ないため、慎重な対応が求められる。また、現在のところ保険で認められた金属マーカはなく、これらの治療を保険診療として行うことは不可能である点に注意が必要である。

さらに、進化した照射方法として、Synchronyという動体追尾照射が可能なシステムも使用可能である。これは、腫瘍内あるいは近傍の金属マーカと体表面に貼り付けた赤外線マーカの両者の位置データからリアルタイムで腫瘍位置を計測して、ロボットにより追跡照射を行うものである。呼吸性移動の大きいターゲットに対して有効で、ITV(internal target volume)を大幅に縮小できる可能性がある。動体追尾照射では迎撃照射(待ち伏せ照射)と異なり、ビームのオン・オフを繰り返す必要がないため、治療時間の延長がない。ただし、この照射方法も、金属マーカを使用する必要があるため、現在のところ、日本国内では保険適応とはならない。米国では金属マーカを使用せずに動体追尾照射を行うソフトウェアも開発されているが、こちらは日本国内ではまだ導入されていない。

このように、現在のサイバーナイフ治療は、海外での新しい治療、臨床上の適応、薬事法上の適応、保険上の適応がそれぞれ異なるという複雑な事態となっている。サイバーナイフ治療においては、これらを熟知したうえで治療に当たる必要がある。

トモセラピー

愛知がんセンター中央病院 放射線治療部 古平 毅

はじめに

今回、茂松直之先生のご厚意により、「最新放射線治療機器の適応」というテーマで本機の紹介の機会を頂いた。導入後 2 年半程度になるが、われわれもこの装置の操縦に馴染んできたし、周囲も珍しい装置にありがちな過剰な治療効果を期待するようなムードから比較的冷静になり、強度変調放射線治療の専用機という実状としての認識が進んできた感がある。限られた誌面の中ではあるが、装置の特徴、適応疾患、限界、他機種との棲み分けを含めた将来への展望について概説したいと思う。

トモセラピーの特徴

トモセラピー (TomoTherapy社製TomoTherapy Hi-Art System)はWisconsin大学のMackie教授により、1990年にprojectが創案され、2009年 1 月現在、全世界で200台以上、本邦では設置計画を含めて14台設置または設置計画されている。

トモセラピーでは走査リング上に診断用CT同様に検出器が設置され、治療開始前にmegavoltage

CT(MVCT)を撮影し、3 次元的な画像データを収集する。MVCTは治療登録時の位置照合に加え、治療経過変化の画像記録、線量分布計算、治療再計画などの多用途の目的で使用され、image-guided radiotherapy(IGRT)とIMRTが渾然一体となった治療装置であるといえる。

IMRTは複雑なビームデータを管理し、高精度なセットアップなどの品質管理が重要になるため、これらの手技の時間的、技術的な負担が大きいと考えられている。本装置は、実用上の問題となる治療プランのビームデータ検証が系統的に行うことができ、装置に一体化したシステムで行えることから、検証の手順、時間を大幅に短縮できる長所がある。

リニアックによるIMRTに比較し、最大の特徴はFOV 40cm、頭尾方向1.6mという、非常に広い照射可能域を有している点で、この自由度の高い治療プラン作成能を生かして、全脳全脊髄照射、全身の骨髄を標的体積とした全身照射の治療報告や、脳転移の定位放射線治療体幹部の定位放射線治療の報告も見られる。

適 応

原発性の頭頸部癌、前立腺癌、脳腫瘍に対してのIMRTは保険適応であり、臨床的有用性についてはコンセンサスを得られている。

一般に、前立腺癌に対するIMRTの適応はT1-T3N0の限局癌と考えられる。とくにintermediate riskの症例は74Gy以上の線量増加が必要と考えられており、IMRTの適応が推奨される。前立腺の位置および周囲臓器の状態は不規則な変化を日々生じるため、治療開始時にMVCTを用いた照合を行うことで、セットアップ誤差を最小化した精度の高い位置照合が達成できる。

頭頸部癌はIMRTのよい適応疾患と考えられている(Kodaira, 2009 #76)。当院では、脳神経、脳幹部、脊髄などの線量制限、唾液腺機能温存や下顎骨の線量低減などの利点が多い疾患を考慮し、上咽頭、中咽頭、鼻腔・副鼻腔原発の悪性腫瘍(リンパ腫を含む)を主たる対象としている。

また、頭頸部癌の治療経過中には腫瘍の縮小や体輪郭の変化により、線量分布の変化が生じるのはよく知られており、MVCTを用いたIGRTの手法は治療中のコントロール変化の検出だけでなく、線量分布の変化の検証、再計画などの、いわゆるadaptive radiation therapy(ART)に、その威力を最大限に発揮すると思われる。

原発性脳腫瘍に対してのsimultaneous integrated boost法を用いたIMRT-SRTの有用性も報告されている。

体幹部定位放射線治療は、欧米では比較的まとまった臨床例が報告されている。肺の小病変で、呼吸性移動が少ない条件を十分満たせば、ファントム実験のデータからも、体内の移動下での線量分布への影響は許容範囲であるという実験データも報告されており、自施設でも同様の検証により確認している。一般臨床への普及以前に適格条件に十分な配慮を行った臨床試験という形で、臨床的效果や安全性を十分に検討することが推奨される。

現在の保健適応外の疾患としては婦人科癌や肛門癌などの骨盤部腫瘍、乳癌、III期肺癌に対しての強度変調放射線治療の有用性が報告されている。今後、これらの疾患に対しても、適応の拡大が検討される必要がある。

他の高精度治療装置との対比

通常のライナックによるIMRTと比較し、トモセラピーの臨床的な治療効果、安全性は、ほとんど差がないと思われるが、従来の装置に比し、治療計画、データ測定、品質管理において、スタッフへの負担が少ない点ではトモセラピーが優る。しかしながら、近年装置の進歩もめざましく、IGRT装備は装置に標準化された感があり、IMRTの手法もintensity modulated arc therapy(IMAT)対応の治療装置が出現してきた(中川先生の論文を参照くださ

い)。IMRTのperformanceにおいても、トモセラピーに肉薄していると思われる。

一方、当装置の限界としては、サイバーナイフやTM-2000のようにnon-coplanar beam arrangementができないため、定位照射としてのperformanceには限界があること、ヘリカル照射であり、呼吸移動に対しての照射には技術的な弱点があることが指摘されている。従って、比較的大きな腫瘍への定位照射や胸腹部病変への治療には不利である。

本装置の他機種との比較でもっとも特筆すべき特徴は、MVCTを用いたIGRTをhigh performanceで用いることができる点である。頭頸部のIMRTのように比較的大きなtarget volumeを対象とする治療では、fiducially markerによる限られたpointの照合では不十分で、関心領域の総合的なセットアップ精度が要求される。頸椎のような可動域の多い部分は再現性の高いセットアップは困難であり、MVCTに利点が多い。また、頭頸部癌では経過中の体重減少や腫瘍縮小により、分布の経時的変化が生じることも固定精度の問題となる。サイバーナイフやX線透視による照合を基準とした装置に比較して利点が多い。また、同種のIGRTであるcone beam CTに比べ、artifactの影響が少ないこと、線量分布計算に用いることができ、実際の線量分布に対応した治療計画が可能となる点で有利である。

ま と め

トモセラピーは急速に普及している装置の1つである。多くの施設では専ら前立腺癌の治療が行われているが、今後高齢化社会で臨床的ニーズの拡大が予想されるため、本装置の導入は実臨床でIMRTの普及に大きく貢献することが期待される。トモセラピーは簡便で、汎用性の高いIMRTが行える点で優れた治療装置であるが、一方、新規の治療装置であるが故に、ビームデータ、位置確認、テーブル移動などのQA/QCに関し、リニアックIMRTのような確立された手法がまだないのも事実である。限られたマンパワーのなかで本装置の至適な運用を行うためには、治療方法の標準化や適応症例の選定について早急な対応が必要と思われる。



強度変調回転放射線治療(VMAT)

東京大学医学部附属病院放射線科 中川恵一, 芳賀昭弘

VMATの特徴

1960年代に高橋¹⁾によって提案された原体照射・打ち抜き原体照射に代表されるように、連続回転型放射線治療は日本で発達した。原体照射の発展型として、1995年Yu^{2), 3)}により、逆計算による強度変調を取り入れた回転放射線治療(Intensity Modulated Arc Therapy: IMAT)が提案され、2008年にはガントリ回転速度や線量率、マルチリーフコリメータ(Multi-Leaf Collimator: MLC)位置などを変調のパラメータとした回転照射(Volumetric Modulated Arc Therapy: VMAT)を実現するシステムがElekta社とVarian社により提供された⁴⁾⁻⁶⁾。これまで通常使われてきたライナックを用いる強度変調連続回転型照射技法は、ファンビームを用いたヘリカル型のTomoTherapy(Hi-Art System社)とも一線を画す最新の技術であり、VMATは今や世界中の多くの医療施設で導入され始めている。日本では東京大学医学部附属病院がいち早く治療装置Synergy及び治療計画機ERGO++v1.71(ともにElekta社)を用いたVMAT治療を導入し、前立腺がん・頭頸部がんの治療や骨転移の疼痛緩和に適用を開始した。ERGO++ではアークを分割し、その照射野をビームから見た関心領域(Region Of Interest: ROI)の形状から決める(図1)。分割された角度ごとのMU値が最適化され、それらが滑らかにつながれることによって回転照射となる。照射の際には計画のリーフ・ジョー位置やMU値などの線形補完を用いて、より細かなガントリ間隔でのフィードバック制御がなされる。

VMATの特徴の1つは、照射するMU値が明白に減少する点である。その例を図2に示す。ここではStep and Shootとの比較がなされているが、両

者が同程度の線量分布を与えるにもかかわらず、特に頭頸部ではMU値が1,100から323まで減少する。MU値の減少は治療時間の短縮(及び線量率効果の違いによる影響が出ることも予想されている)に直接寄与するため、患者の負担軽減や治療中の動きの制御、さらには治療のスループットを高めるなど、そのメリットは極めて大きいと考えられる。

もう1つの特徴として、線量分布の誤差が大きくなる点が挙げられる。VMATの検証では、ガントリ位置、線量率、ガントリ回転速度、リーフ位置、コリメータ角度といったVMATに特有なダイナミカルなパラメータの線量分布に対するそれらの精度の検討を行う必要がある。東大病院で検証を行ったVMAT 20例のアイソセンター線量計測を例にとると、その計算値との平均誤差は $-0.44 \pm 0.86\%$ である。Axial, Coronal, Sagittal各面に対する最大線量の50%以上の照射領域に対するガンマ値(但し、ともに中心線量で規格化した相対値による比較)の平均はそれぞれ98.4, 95.6, 96.0%である。アイソセンター線量で2%以上の誤差を生じること、ガンマ値で95%を下回るようなことはほとんどない。ダイナミカルパラメータの誤差は必ず生じるが、回転照射の有利な面は、MLCの追従やMU値の制御がガントリ回転に対して多少遅れた(早すぎた)としても、その補償をほとんど同じ角度で行うことができることである。こうして、トータルの線量分布を見る限り、ダイナミカルなパラメータのエラーの影響が表面に現れて来ないのである。

東大病院では2008年8月28日から、VMATによる高精度放射線治療が開始され、2009年3月20日現在、22例の治療がすでに行われたか進行中である。

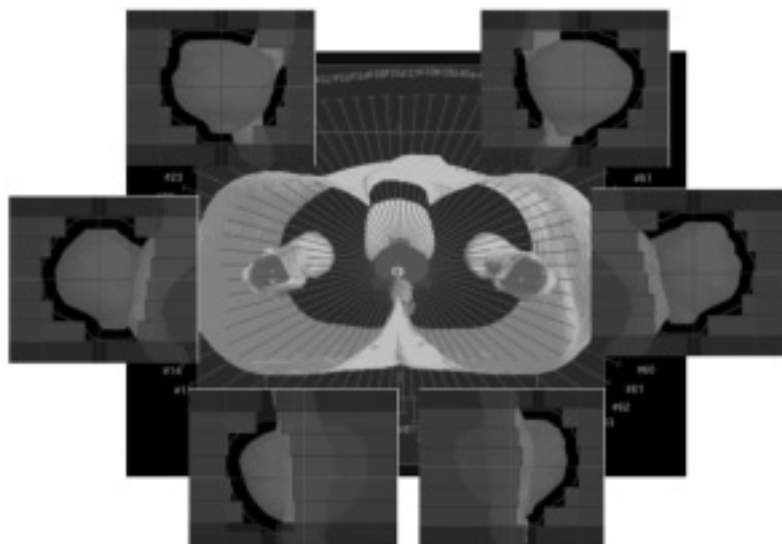


図1 ERGO++による治療計画
ERGO++ではアークを離散化し、各点の照射野をbeam's eye viewによるROIの形状から決め、離散化した点のMU値をDVHにより最適化する。

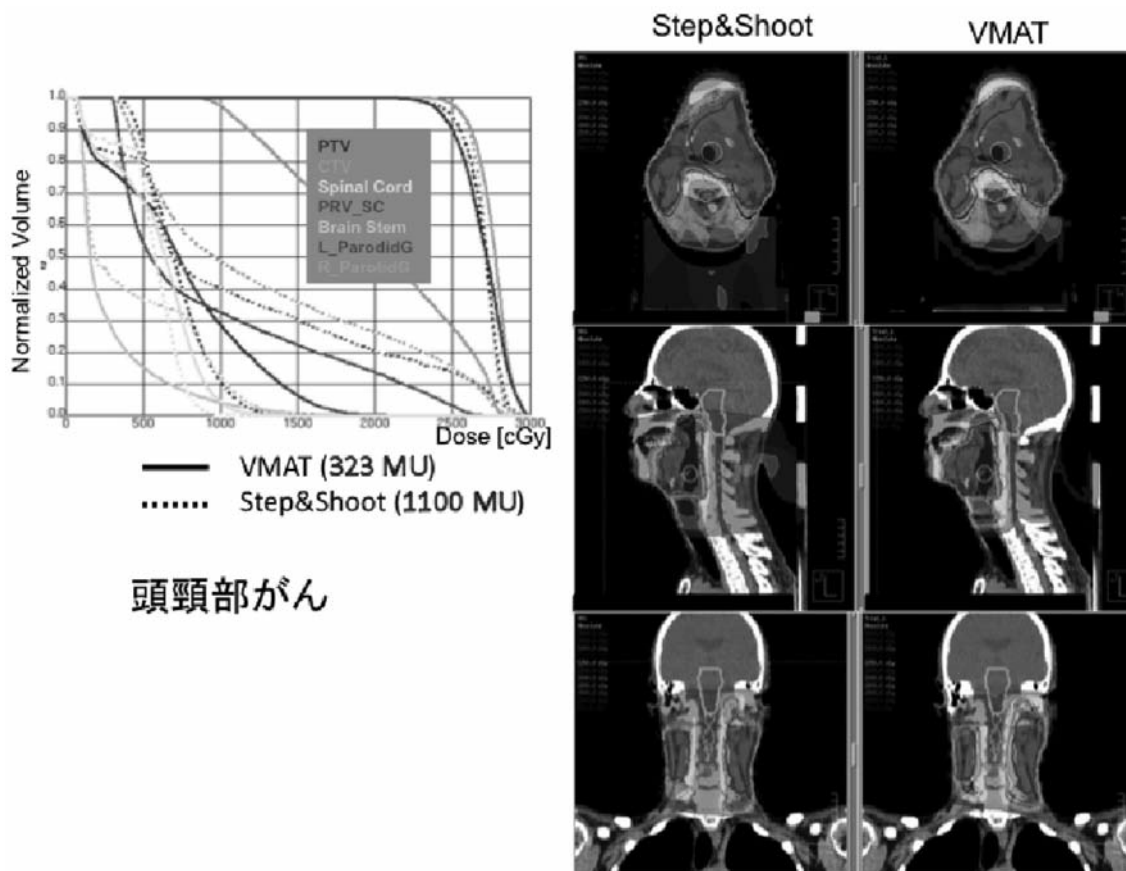


図 2 VMATとStep and Shootによる頭頸部がん治療計画のDVH及びアイソセンターを含む 3 面での比較
危険臓器に対する線量は同程度、PTVに対する均一性は同程度かStep and Shootの方がわずかによい
が、MU値はVMATがStep and Shootに対し大幅に減少する。

その内訳は、前立腺がん19例、頭頸部がん 2 例、骨転移 1 例である。さまざまな部位に対するVMATの計画・検証試験や出力調整等に時間を要するため、VMAT治療を行う新規患者はスタート時から週 1 人に制限してきた。しかしながら、前立腺がんのVMAT治療計画やその検証方法に対するプロトコルが確立されつつあること、また計画・検証に費やす時間と労力も、これまでのIMRTに比べ少なく済んでいることなど、特に前立腺がんに限っては今後その数を増やしていく土台はできている。他方、先進医療として、京都大学から新規申請されていた強度変調放射線治療の承認を受け、前立腺がん、頭頸部がん以外、例えば、これまで東大病院ではIMRTの適用がなされてこなかった肺がん、乳腺などの部位へのVMATの応用が、東大病院でも期待されるようになっている。こうした新しい部位への適用試験もまた、今後すぐに取り組まなければならない重要な課題である。

参考文献

- 1) Takahashi S: Conformation radiotherapy: Rotation techniques as applied to radiography and radio-therapy of cancer. Acta Radiol Di-

agn Suppl. 242, 1-142, 1965.

- 2) Yu CX: Intensity-modulated arc therapy with dynamic multileaf collimation: an alternative to tomotherapy. Phys Med Biol 40: 1435-1449, 1995.
- 3) Yu CX, Li XA, Ma I, et al: Clinical implementation of intensity modulated arc therapy. Int J Radiat Oncol Biol Phys 53: 453-456, 2002.
- 4) Otto K: Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc. Med Phys 35: 310-317, 2008.
- 5) Bedford JL, Nordmark HV, MacNair HA, Aitken AH, Brock JE, et al: Treatment of lung cancer using volumetric modulated arc therapy and image guidance: A case study. Acta Oncol 2008, DOI: 10.1080/02841860802282778, available on-line.
- 6) Ling CC, et al: Commissioning and quality assurance of RapidArc radiotherapy delivery system. Int J Radiat Oncol Biol Phys 53: 575-582, 2008.

三菱重工業社製新型放射線治療装置MHI-TM2000の紹介

先端医療センター放射線治療科 小久保雅樹
三菱重工業名古屋航空宇宙システム製作所 神納祐一郎

はじめに

三菱重工業、京都大学、先端医療センターは、IMRT、IGRT及び動体追尾照射治療の3つを高度に統合化した放射線治療装置を共同で開発し、先端医療センターにおいて臨床使用を開始した。本稿ではその特徴を中心に述べる。

システムの概要

本装置は基本的にアイソセントリックであるが、治療線を体動に追尾させて高速に移動するために「ジンバル支持X線ヘッド方式」を考案し、導入した。X線ヘッドは、その重心位置でpan軸及びtilt軸の2軸のジンバル上に支持されている。ジンバル軸からアイソセンターまでの距離は約100cmであり、 $\pm 2.5^\circ$ の小角のジンバル軸の回転により、アイソセンターを中心として1辺が80mmの正方形の範囲内の任意の位置に、高速に照準可能である。ジンバルは高剛性のO-ring構造で支持されている。O-ringは、アイソセンターを中心として360°回転して、照射門を設定する他、カウチと接触しない範囲でその鉛直軸の周囲でskew回転して、ノンコプラナー照射を可能とする。O-ring自体は極めて高い剛性を有しており、X線ヘッドの位置による機械的な撓みはごくわずかであるが、これを更にジンバル軸の回転で補正して、アイソセンターにおいて誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下の照準精度を実現している。

O-ring上には、2組のkV X線管球とアイソセンターを挟んで、これと対向するように置かれたflat panel detector (FPD) から構成されるイメージング・サブシステムが装備されている。また、X線ヘッドと対向する位置にはelectronic portal imaging deviceを備えて、治療線による照射画像のモニタを可能としている。患者の体形への対応や治療の自由度の点から、アイソセンターとX線ヘッド出口の距離は、一般の医療用電子リニアックと同じ50cmとし、また、既存の治療室の改造規模を最小限とするため、O-ringの最外径は約3.3mとした。

X線ヘッドには、アイソセンターにおいて5mmのリーフ幅の30リーフ対を持つMLCを装備して、IMRTを可能としている。

X線のエネルギーは、頭頸部、肺野等の治療に最適な6MVを選定したが、多門照射、IMRTを前提とすれば、前立腺等の深部の治療にも、臨床上問題なく適用できる。最大照射野は、前立腺等の体幹部治療も考慮して $15 \times 15\text{cm}$ とし、定位治療時等の1回大線量照射時の照射時間の短縮のため、線量率は 500cGy/min (ピーク深において)とした。

イメージング・サブシステムは、ステレオX線フルオログラフ機能により、腫瘍やマーカをリアルタイム追跡して動体追尾照射治療を可能とするとともに、治療計画時のX線CT画像から再構成したDDRとの画像自動照合を行って、骨構造基準のIGRTが実施できる。また、O-ring回転により取得したcone beam CT画像を治療計画時に取得したX線CT画像と自動照合を行うIGRTも可能である。

動体追尾照射治療に必要な機械的な追従性を確保するため、Cバンド(使用周波数=5712MHzで、従来のSバンドリニアックの倍の周波数)の超小型・軽量の加速管を開発して採用した。

システム性能の評価

スターショットで集光度を評価した結果、最大0.04mm、平均で0.018mmの、極めて良好な集光特性を得た。

MLC漏洩線量の評価では平均0.33%程度の、極めて良好な漏洩特性を得た。

前立腺ファントムを使用して、JASTROのガイドラインによるIMRT性能評価を実施し、コプラナーの7ビームのstep & shoot IMRTで、同推奨誤差の半分以下の誤差値であった。

動体追尾照射に必要なジンバル機械的追従性についても、呼吸動を模擬した0.75Hz、40mm全振幅の正弦波入力に対して誤差0.6mm以内、拍動を模擬した2.0Hz、8mm全振幅の正弦波入力に対して誤差0.4mm以内が達成できた。

臨床評価及び結論

本システムは、動体追尾照射機能を除いて、2007年8月29日付で米FDAの型式承認を取得し、2008年1月16日付で厚生労働省の薬事承認を取得して、2008年5月から先端医療センターにて、実際の患者に対して臨床施行を進めている。最初は転移症例から開始し、10月からは前立腺のIMRT症例を開始した。初期セットアップについては、現時点では、実績のあるDDRによる骨構造基準セットアップを基本としているが、CBCT機能の評価も併せて進めている。治療所要時間については、前立腺IMRT症例で、初期セットアップも含めて、患者の治療室滞在時間で15分を切る例が出始めており、高度なシステム統合による高精度放射線治療の効率化のメリットが見え始めている。動体追尾照射治療については、技術的にはほぼ完成しており、今後、薬事承認等の手続き及び臨床適用時の細部の検討を進め、慎重に臨床適用を進めていく予定である。