

MR 画像誘導即時適応放射線治療への期待と課題： MR リニアックの臨床導入と普及に向けて

画像誘導放射線治療技術の進歩とともに、MR リニアックが国内にも導入され始めました。MR リニアックの登場は、コントラスト分解能に優れたMR 画像を直接治療寝台上でリプランに使用する即時適応放射線治療 (on-line adaptive radiation therapy: on-line ART) を患者に提供し、リアルタイムシネMR 画像による照射中の体内監視 (beam-on モニタ) を可能としました。「放射線治療中の体内が見える化された」画期的な IGRT 技術であり、がん放射線治療は新たな次元に到達しつつあります。2021 年に JASTRO を中心に5つの学会が共同で「MR 画像誘導即時適応放射線治療ガイドライン」が作成 (委員長: 国立がん研究センター中央病院 井垣 浩 部長) され、本治療法を安全に臨床導入するための機器的要件、人的・施設要件その他が提示されています。2022年6月には、第1回日本MR 画像誘導適応放射線治療研究会が開催され、初期臨床経験、装置の更なる普及、臨床研究の推進や今後の課題などが議論されました。

病院あるいは放射線治療部門責任者にとっては、臨床の現場に登場して間もない高額な新しい装置を導入することは、水面下の苦労やコストベネフィットなどリスクを伴う案件であり、様々な困難とそれを乗り越える工夫が必要であったと推察されます。本特集では、MR リニアックを導入しMR 画像誘導適応放射線治療を開始している施設の先生方から、導入の際の工夫・苦労や、実際の使い勝手、これまでの経験や治療への意気込みなどについてご寄稿いただきました。

千葉大学医学部附属病院 放射線科 宇野 隆

「MR リニアック普及元年」までの5年間

●国立がん研究センター中央病院 放射線治療科 井垣 浩

2021年後半から2022年前半にかけて、立て続けに4施設でMR リニアックの稼働が開始されました (コバルト線源から換装した当院を含む)。その他にも複数の施設で、MR リニアックの導入が予定されていると聞きます。MR 画像誘導即時適応放射線治療ガイドラインの公開、MR 画像誘導適応放射線治療研究



図1 国立がん研究センター中央病院に設置されたMRIdian® Linac

会の発足といったイベントもあり、まさに我が国での「MR リニアック普及元年」と言える密度の高い1年でありました。

国立がん研究センター中央病院は今から5年前の2017年に、国内では最初となるMRIdian® Cobaltを導入しました。当院がMRIdian導入を決定した当時、MRI装置へのリニアック搭載が技術的に確立できておらず、MR リニアックの薬事承認の目途が立っていませんでしたので、コバルト線源装置を用いたMR 画像誘導放射線治療 (MRgRT) を始めることになりました。当院でもやっと今年、MRIdianの線源をリニアックに換装して稼働再開しています (図1)。本稿では、国内第1号機としてMRgRT装置を導入した施設として、これまでの苦労と困難を交えてこの5年間の経験をまとめました。

1. MRIdianの導入

病院内への当初の装置設置そのものは、放射性同

位元素等規制法（RI法）に則って粛々と進めることができ、大きな問題は起きませんでした。磁場シールドやヘリウムダクトといったMRI装置のための設備設置という、放射線治療部門としては見慣れないものをたくさん見ることになりました。

その一方で、当院で当初導入した線源はリニアックではなくコバルトであったため、それに伴う問題点がいくつかありました。まず、コバルトの外照射を算定する診療報酬項目がないことが当院でのMRI導入時点の最大の誤算でした。その後、コバルトの外照射に対してIMRTを準用することは認められましたが、コバルトでの体幹部定位照射の算定は最後まで認められなかったために、保険点数についてはIMRTしか算定できず、導入時の投資分が回収できなくて大変困りました。また、MRIでは3つのコバルト線源が120度間隔で設置されており、3方向から同時照射ができるのですが、線源の格納システムやMLCが故障することが時にあり、2線源での治療を余儀なくされることもありました。ただでさえ時間を要する治療が、さらに時間がかかるようになるため、外来患者さんの治療時間変更もしばしば必要となりました。

MRIのリニアック換装にこぎつけるのにも苦労がありました。上述の通り導入当初の借金が残った状態で、リニアック換装のための追加投資を病院長・理事長に納得してもらう必要がありましたので、このステップで多大な時間と労力を要しました。最終的にリニアック換装が決定したのは2021年頭、更にはコロナ禍で約4か月間工事が全面停止したこともあり、再稼働したのは今年2022年7月末でした。MRI Linacの2018年薬事承認から4年以上、当院にMRI Cobaltが導入されて5年以上経過してやっと、我々も本物の「MRリニアック」のスタート地点に立てることになりました。

2. 即時適応放射線治療の開始

MRI導入当時、わが国ではまだ即時適応放射線治療が行われていませんでしたので、治療計画QA方法や手順確立にも入念な準備が必要でした。2017年5月にMRIの稼働を開始し、普通の治療計画や監視、治療装置の操作にある程度慣れてきた2017年9月、医学物理士の岡本裕之先生と一緒に2人でアメリカのWashington大学を訪問し、彼らの施設で既に開始している即時適応放射線治療を見学して来ました。医療スタッフ配置数や診療報酬制度が我が国とは異なっているアメリカのやり方をそのまま日本に持ち込むことは難しいため、Washington大学の実施体制を参考に、記録の残し方および、プラン検証の方法や基準などは事前に十分に検討して決定しました。そのうえで、国立がん研究センター中央病院での即時適応放射線治療手順を決めてプロセスマップを医学物理士と一緒に作成し、当院でのMRI

稼働から9か月後の2018年2月に即時適応放射線治療を開始しました。開始当初は、治療室専有時間が予測不能であったことや、想定外の事態が生じるリスクも考慮して、十分な時間枠を確保して治療を行いました。

国内で現在MRリニアックが稼働している施設はいずれもいわゆるハイボリュームセンターであり、即時適応放射線治療の実施に際しては、特に医師と医学物理士のマンパワーの確保が非常に大きな問題となります。当院でも実際、当日のMR画像上でのコンソールリングのための医師呼び出しにかかる時間が、治療の律速段階の大きな要因のひとつになっています。日々の即時適応放射線治療をより効率よく短時間で行うためにも、治療計画を含めて治療開始前の準備をより入念に行う必要がありますし、施設の状況に応じて、医学物理士や診療放射線技師にタスクシフトすることも検討しなければなりません。さらに言えば、即時適応放射線治療という新しい日常業務が入ってくる訳ですから、他の業務との時間調整や、今話題の「働き方改革」も含めて本来は、仕事全体の進め方も考え直す必要があるのかもしれませんが。今では通常業務の一つとして日常的に即時適応放射線治療ができる体制が整ってきましたが、時間的・人力的負担が大きいことには変わりなく、今後もより良い治療を進めてゆくためにまだまだ業務改善の余地があると感じています。

3. MRgRT 適応疾患の選択

MRリニアックの出現により、腫瘍の直接監視によるIGRTと即時適応放射線治療が可能となりました。その結果、従来よりも正確な放射線治療が実現しましたが、一回あたりの放射線治療の所要時間も従来装置よりも長くなりました。このため、MRリニアックで毎日治療できる患者数は限られてしまいます。また、即時適応放射線治療を行うと、医療スタッフの業務負荷も格段に大きくなります。このため、大半の患者さんにとって理論的には従来よりも優れた治療が可能となる装置ですが、MRgRTの利点がより大きい治療対象を選定する必要があります。当院には他に、汎用リニアック4台とCyberKnifeがありますので、これらの装置ではできない（難しい）治療を優先してMRIで治療することにしています。

この点についても、上述のWashington大学見学时MRIでの治療対象とされていた疾患群を参考にしながら、日本国内での放射線治療対象患者分布や診療報酬制度を勘案しながら治療対象を検討しました。しかし、実際に使ってみると、即時適応放射線治療の負担が予想以上に大きかったり、MRgRTの有益性が事前の想定とは異なることに気づいたりするといった経験を経て、装置の稼働開始前に想定していたものとは対象疾患も少しずつ変わって行きました。

当院でも多彩な疾患を対象にMRリニアックでの治療を行ってきましたが、現在は①PTVが日々形状の変化するリスク臓器に隣接する場合の定位照射(膵癌、前立腺)、②マーカーレス定位照射(肝臓)、③ターゲットの位置や形状が日々顕著に異なるIMRT(子宮頸癌根治照射、胃MALT)などを主な対象疾患としてMRリニアックでの治療を行っています。

4. MRリニアックを用いた臨床試験

本稿を執筆している2022年9月時点で、国内で稼働しているMRリニアックはわずか5台しかありません。MRIIdian®、Unity®を販売している伊藤忠商事、エレクタ株式会社の担当者にお聞きすると、多くの施設の先生方から声がかかり関心は高いようですが、装置が高額であることと、MRgRTが従来よりも多くのマンパワーを必要とするにも拘わらず診療報酬上の利点がないこともあり、なかなか販売には結びつかないようです。国立がん研究センターでは2017年の導入時と2021年のリニアック換装時の2回にわたって多大な投資を必要としたことから、病院上層部からは研究業績および診療報酬の両面での成果を早速求められています。他のMRリニアック導入施設でも同様の

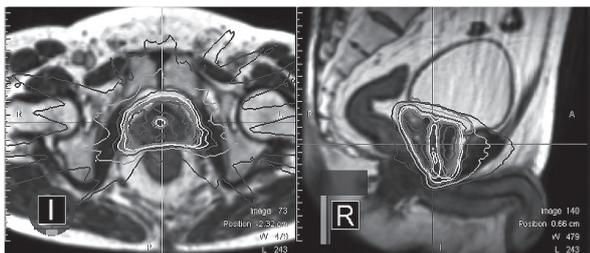


図2 MRリニアックによる前立腺癌定位照射の治療計画例

プレッシャーが病院内にある様です。

MRリニアックを普及させて高位の診療報酬を獲得するには、MRリニアックの利点を示す臨床的エビデンスが必要となります。このため、リニアック換装を機に、コバルト時代の経験を参考にしつつ、単施設・多施設のものを含めて数件の臨床試験の準備を進めています。ただし、MRリニアックが有効であるというエビデンスを実際に創出できる疾患・病態は、実はかなり限られていると言わざるを得ません。このため、まずは前立腺癌を対象にして、超寡分割体幹部定位放射線治療に関するMRリニアック施設All Japanでのエビデンス創出を目指して多施設共同臨床試験を行うことを計画しています(図2)。AMEDからの支援もいただき、今秋には臨床試験を開始する予定です。

おわりに

MRgRTの最大の利点は、「見ながら照射できることの絶対的信頼感」とそれによって可能になる「腫瘍への線量増加」です。一度良い治療ができることを知ってしまうと、それ無しには安心して放射線治療をすることはできなくなってしまいます。MRリニアックはこれから徐々に普及してゆくでしょうが、十分に普及するまでにはまだかなりの時間を要するの間違いありません。その点では、MRリニアックにとっての今後も、まだまだ苦難の道が続いているかもしれません。しかし、これまでは「先が見通せない苦勞」をしていたのに対して、今では少し先が見通せるようになり、MRリニアックの仲間が増えたという点では頑張り甲斐が出てきたように感じています。これからも、MRリニアックの普及に向けた努力を続けてゆきたいと思います。

MRリニアック導入のハードルと、もたらされる新たな放射線治療の世界

●国立がん研究センター中央病院 放射線品質管理室 千葉 貴仁

当院では、2017年5月に本邦で初めてのMR画像誘導放射線治療装置として、コバルト線源を用いたViewray社のMRIIdianシステムを臨床導入した。2022年7月には、直線加速器を用いた同社のMRIIdian-linacシステムに換装し、コバルト装置時代から培った経験を活かした臨床稼働を行なっている。本報告では、その導入・換装と臨床経験について報告する。

MR画像誘導放射線治療装置導入のハードル

本邦初の導入ということで、得られる情報も不足しており、手探りでのコミッション・装置品質管

理・臨床運用を経験した。コミッション・装置品質管理では、国外でもMR対応の品質管理機器が普及しておらず、当院で開発したものも多い。特にMR画像誘導放射線治療装置の売りとも言える即時適応放射線治療(On-line ART: On-line Adaptive Radiation Therapy)のEnd to End試験を可能にしたファントムは開発に苦慮した。現在でも同様の機能を持つ市販品はなく、新規導入施設が汎用リニアックと同様の品質管理が可能な環境が整っているとは言い難い。

臨床運用に関しては、On-line ARTという未経験で通常の放射線治療と大きく異なるプロセスに対

し、安全かつ適切に遂行するために、発生し得るエラー事象 (FM : Failure Mode) を事前に予想し、そのリスク解析 (FMEA : Failure Mode and Effect Analysis) を行うことで運用開始前から潜在的リスクを意識したワークフローを構築した。それでも臨床運用中には、全く想定していなかったニアミス・インシデントが発生し、都度運用にフィードバックを行っている。On-line ART開始約2年後に、FMEAを再度行ったところ、前回の約4倍数のFMが挙げられ、臨床経験が潜在的リスク把握の向上に繋がっていることを実感した。この経験がリニアック換装後もそのまま活かされ、潜在的リスクを把握し、スタッフ間で共有していることが現在の安全運用を支持している。

当院での導入経験から、MRリニアックという新しい治療技術の導入に際し、実臨床経験を基にした情報共有の場が安全な普及に繋がると考える。その点で、2021年には本学会から「MR画像誘導即時適応放射線治療ガイドライン」が刊行され、2022年5月には第1回日本MR画像誘導適応放射線治療研究会が開催されるなど、MRリニアックの普及に向けた環境整備、臨床運用の情報共有の場が整いつつあり、その導入ハードルは下がってきていると言える。

MRコバルト線源装置からMRリニアックへ

リニアックに換装後のコミッションングは、汎用リニアック装置より短めの約1ヶ月をかけて、MRIシステム、放射線治療システム及び治療計画システム (TPS : Treatment Planning System) の検証作業を実施した。

頭を悩ませたのは出力を管理するための電離箱線量計の選定と各種補正係数の決定である。磁場とFlattening filter free (FFF) ビームを有する装置特性により、線量計の体積効果の補正係数、磁場下での線量計の応答を補正する磁場補正係数、コバルト線源時には不要であった線質変換係数の検討が必要となる。これらの係数には、本邦での基準となっている標準測定法12では算出ができない係数があり、IAEA TRS-398、TRS-483、AAPM TG-51、など国外の各ガイドラインや報告を参考にユーザー責任で値を算出・決定する必要がある。

また、常に磁場による線量プロファイルの傾き(歪み)が生じる点が汎用リニアックと大きく異なり、TPS計算値と実測値でプロファイルが一致しない際に、TPSの磁場考慮に起因するものか、リニアックの設置・出力に起因するものか、測定機器に起因するものか特定するのに苦慮した。

今後、本邦でもMRリニアックにおける標準計測方法やコミッションングを補助するガイドラインが策定されることに期待したい。

MRリニアックで変わる放射線治療の世界

MRリニアックは「視覚化」「再現対象の変化」という2つの観点で、新しい放射線治療の世界を提供していると感じる。

「視覚化」は、被曝なく軟部組織コントラストが優れたMR照合画像やシネ画像の取得、照射中の臓器変動観測と照射制御を可能とする。特に、照射中の腸管位置変動など、X線ベースのシネ画像では取得できなかった情報が視えることで安心して精度の高い治療を遂行可能である。同時に、一度視えることを経験してしまうと、今まで行ってきた治療の精度や視えないことに不安を感じることも少なくない。

「再現対象の変化」は、MR画像にOn-line ART技術を組み合わせることで、照射における治療の精度を高めている。汎用リニアックでは、腫瘍形状変化や体型変化など患者位置再現性が悪化し、再Set Upや再治療計画を行うか判断に悩む状況が日常的に発生する。MRリニアックは、On-line ARTという新たなアプローチでこのような状況にためらいなく計画修正する判断材料と技術を提供する。このアプローチにより患者位置再現性が求められる放射線治療から、患者位置(状態)に合わせて計画を再現する放射線治療に変化していると言える。

MRリニアックの今後の課題と展望

前述した通り、MRリニアックは放射線治療の世界観を変える可能性を秘めているが、装置技術面と診療プロセス面で課題もある。

装置技術面の課題は、長い治療時間である。ひと患者の入室から退室までOn-line ART利用時には約1時間を要し、そのうち輪郭描出に約20分、照射自体に約15分程度と長時間を要する。これは治療室のスループット、患者負担の問題のみならず、治療の質にも影響し得る。

輪郭描出及び照射自体に時間を要すると、その間の臓器変動により、取得画像上の線量分布と実照射による線量分布が乖離する可能性がある。直前のシネMRや迎撃照射を用いて、画像取得後からの臓器変動や照射中の臓器変動を評価可能ではあるが、計画の修正が必要な変動が生じた場合には再度輪郭描出して…というループになってしまう。将来的にAIを用いた自動輪郭抽出や、線量率の増加、VMATの実現、追尾照射の実現などの技術進化により、治療時間の大幅な短縮に期待したい。

診療プロセス面の課題は、人員リソースの確保と求められる能力に対する教育環境不足である。On-line ARTを積極的に行うと、医師や医学物理士が輪郭描出や治療計画変更、線量評価のために治療装置コンソール前に留まる時間が増えてくる。安全なOn-line ART実施には、他の臨床業務に逼迫されずに集中して作業できるよう人員確保が必要不可欠である。医師のリソース確保に関しては、輪郭描出や線量評

価の一部を診療放射線技師や医学物理士にタスクシフトすることである程度緩和されるが、そのコメディカルには、正確な輪郭描出、線量分布の臨床的影響判断、意図する計画の立案などを短時間で行う能力が求められる。経験により培われる部分が多いこれらの能力に対して、実践的に学べる教育の場がないのが現状であり、MR リニアックの安全な普及のためには教育の充実も求められる。

MR リニアックの導入は、人員リソース確保や教育・経験の受けられる環境整備、品質管理の標準化・機器の不足など、未だハードルは高いと言えるが、MR リニアックは放射線治療の世界観を変える可能性を秘め、今後も発展の余地がある。今後、本邦においてもMR リニアックが普及し、放射線治療の新たなベースとなることに期待したい。

東北大学病院における Elekta Unity の稼働までの道のりとこれから

●東北大学大学院医学系研究科放射線腫瘍学分野 神宮 啓一・高橋 紀善

東北大学病院では2012年よりMR画像誘導放射線治療の導入に向けて様々な準備を行ってきた。2012年に私が教授へ就任した直後に先進医療棟新築の話が持ち上がり、放射線治療装置4台の刷新を考えることとなった。汎用性のリニアックの他、当院の今後の高精度放射線治療を担う基軸となる装置を入れたいと考えるようになった。多くの企業のプレゼンを聞く中で、MR リニアックには大きな魅力と将来性を感じ、導入することを決めた。建屋の完成には業事承認が間に合わないことも想定し、承認が下りるまでは汎用性リニアック3台で年間1000人以上の患者さんをこなしていくこととした。当時の病院長交代のために一度導入にストップがかかるなど、無事に承認が下りた後も公的病院特有の様々な障害が持ち上がり、最後にはCOVID-19の流行による外国人技術者が日本に来れないという事態まで起き、2021年11月2日時点でやっと設置が完了となった(写真1)。搬入の様子はYouTubeに掲載しているのでご覧になってほしい(<https://youtu.be/z01mt2yj2TQ>)。想定よりもかなり遅れることとなったが2022年2月28日よりMRリ

ニアック (Elekta Unity) が国内としては2号機として稼働するに至った(写真2)。

本装置は高磁場のMRI装置とX線発生装置である直線加速器が一体となった画期的ながん治療装置になると期待された。まだ開発段階ではあったが実用化に向けて着実に進んでおり、以前から機能画像を放射線治療に応用する研究をしていた私としてはこの装置を導入したいと強く思うようになった。放射線治療において最も重要なことの一つとして再現性というものがあり、狙った位置から腫瘍の位置がずれているようなことがあつてはせっかく治るものも治らないことが起こりえる。このElekta Unityでは1.5TのMRIにより治療直前、治療中のリアルタイムの明瞭な画像が描出でき、またこれに合わせた毎回の放射線治療計画を実施するため(オンライン即時適応放射線治療)、位置のずれを見込む必要がほとんどなくなり、本当に腫瘍に集中した放射線を設定することが可能となった。これにより腫瘍の周囲の正常組織の被曝を極限まで低くできることから、より高線量の放射線治療を行うことができるようになった。

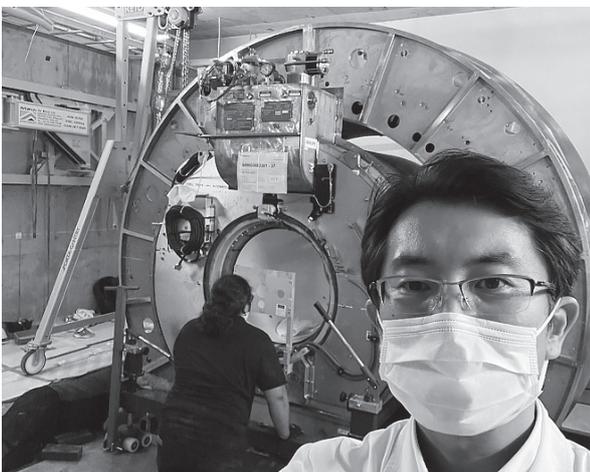


写真1：搬入直後に自撮り



写真2：東北大学病院に導入したMRライナック(Elekta Unity)

MRIと放射線治療が一体化することで、①軟部組織の抽出能力し、正確な位置合わせができ、その場でその日の状態に合わせた治療計画を設計することが可能、②放射線照射中にリアルタイムのMRI画像で体内を描出できるなど、多くのメリットがある。IMRT専用機でもあり、より正確に高線量を照射することが可能となり、治療期間の短縮や治療効果の向上が期待される。

現在のところはこの装置による治療を目的に多くの患者さんが紹介されており、稼働も順調である。しかし、それも時限的と思われ、報酬加算の獲得や適応の拡大に向けてMRリニアックを導入した全国の施設と連携していくことが重要と思われる。2023年夏には第2回日本MR画像誘導適応放射線治療研究会を当番世話人として企画している。会員の皆様にはぜひご参加いただきたい。

本装置は様々ながん種に適応はあるが、東北大学病院では前立腺癌や腎臓がん、すい臓がんなどを対象に診療を開始した。これまでに70症例を超える症例で完遂している。治療手順が大変煩雑であるため1回の治療時間は40-50分程度かかる。そのため1日の照射患者さんが限られることから基本的には定位

放射線治療専用装置となり、前立腺癌についてこれを機に40回程度の通常分割から5回程度の定位放射線治療に方針を変え、治療期間が大幅に短縮した治療を実施しており、患者さんには好評である。

本装置は現在のところ固定多門とstep and shoot方式による強度変調放射線治療装置となっている。強い磁場にX線は影響を直接は受けないが、二次電子などが磁場の影響を受け、線量分布図が無磁場と異なるが、それを加味した治療計画となる。さらに照射中もシネ画像を用いてtargetや周囲正常臓器の動きをほぼリアルタイムに描出できることから照射範囲を極力抑えることが可能となっている。前立腺癌を中心にオリゴ転移などにも治療を実施しており、これまでのところ特に困るような重篤な副作用はでていない。今後のバージョンアップにて呼吸性移動に対するトラッキング機能がつくそうであり、さらに安全な治療が期待される。当施設でもMRI画像誘導の特性を更に活かして、更に治療後のQOL向上に向けた治療や、機能画像を活かしたfocal dose escalationによる治療成績の向上に向けた治療を提供していきたい。MRリニアック見学など随時受け入れているので、お気軽にご相談いただければ幸いです。

大阪公立大学におけるMRリニアックの導入から稼働まで

●大阪公立大学大学院医学研究科 放射線腫瘍学 澁谷 景子

大阪公立大学医学部附属病院では、2020年10月にMRリニアック：Unity（エレクトラ社製）の導入が決定し、多くの方々のご協力を頂きながら本年5月より無事、稼働を開始いたしました。当初より、費用や設置場所、人員の問題など様々なことが困難に感じられましたが、なんとかここまで来ることができました。この度、このような機会を頂きましたので、当院での導入の経緯や現状につき、ご紹介させていただきます。

導入の経緯

大阪公立大学（旧、大阪市立大学）では2018年に放射線腫瘍学を専門とする教室が放射線診断学・IVR学教室より独立し、新たなスタートをきりました。当初はリニアックを初めとする多くの機器、システムが更新の時期を迎えておりました。当院では年に一度、医療機器整備に関するヒアリングがありますが、予算の限られる中、ある程度の優先順位を決めてその必要性を戦略的に示す必要があります。一方、大阪府には5つの大学があり、さらに、がん拠点病院も国指定のもので18施設、大阪府指定の地域がん診療連携病院が45施設あり、その大部分が放射線治療の

設備を有しています。近年では、高精度放射線治療の可能な病院も急増し、2018年には近隣の施設で重粒子線治療も始まりました。このような地理的背景もあり、当院での放射線治療の患者数は過去5年間、右肩上がりとはいかない状況でした。IMRTの割合を増やすことで、なんとか収益は維持していたものの当時は線量計算に膨大な時間を要する旧バージョンの治療計画システムしかなく、教室員には相当の負担であったと思います。リニアックの更新に関する交渉はこのような状況をすべてデータ化し明らかにすることから始めました。折しも、2018年に就任された平田一人前病院長より示された方針『特色あるがん診療の推進』のもと、附属病院にがんセンター構想が立ち上がりましたことから、少子高齢化が加速する中での今後のがん診療の在り方、当院における放射線治療部門の現状と将来予測、がんセンターとしてMRリニアックを導入することの意義について、市田隆雄技師長とともに各種会議（いくつかの会議を経たか思い出せないくらいですが）にて説明を行いました。MRリニアックの導入が病院のプロジェクトとして決定されたことで、高精

度放射線治療センターの設立と医学物理士の配置(センターと申しましてはまだ構成員は私と医学物理士1名のみですが)、手狭であった診察室や待合室、治療計画室の整備等が叶いましたことも大きな変化のひとつであったと思います。

導入決定から臨床稼働まで

当院は商業施設の密集する市街地の中にあり、MRリニアック用の建屋を別途建設できる土地のスペースがないことから、地上18階建ての病院の地下1階、既存のリニアック室への搬入しか選択肢はありませんでした。設置に必要な高さ約1メートルの床下スペースがなんとか確保できましたことは幸いでしたが、工事から搬入までの作業は我々の理解できる範囲においても相当の難関であり、当院で設置できたということは大抵のご施設でクリア可能なのではないかと思います。一方、作業工程には海外からの技術者に入って頂かなければならないポイントがいくつかあり、コロナ禍の影響で予想を超える遅延にも見舞われました。しかしながら、我々、放射線治療に携わるスタッフの数は決して十分でなく、MRIについての経験も豊富とは言えない状況でありましたので、医師、診療放射線技師、医学物理士、看護師ら多職種での「MRリニアック立ち上げチーム」を結成し、勉強会や課題解決のための会議を重ねるなど、準備時間を十分にとることができたのは却って良かったのかもしれません。また、この間、先に稼働を開始しておられました千葉大学に技術者数名で見学に行かせて頂き、運用のノウハウを教えてくださいましたことは、我々にとって非常に大きな助けとなりました。

尚、我々の準備状況を患者さんにも知って頂くために、病院ホームページにMRリニアックのサイトを開設していただき、「MRリニアック トピックス」として月1回、計15回のレポートを掲載しました。今後も定期的に情報を発信できればと考えております。

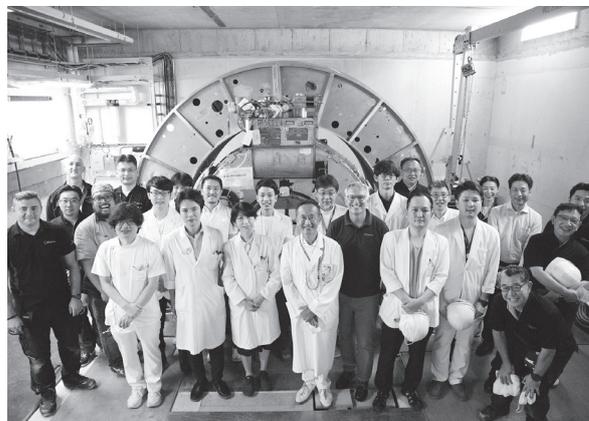
臨床稼働と今後の展望について

本年5月末の臨床稼働より、前立腺癌、肝臓腫瘍(肝癌や管内胆管癌など)、膵臓癌、子宮頸癌(局

所再発、オリゴ転移・再発)などの治療を行ってまいりました。特に前立腺癌は「MRリニアック希望」として紹介いただくことが多く、現時点で半年近く先まで予約が入っております。

MRリニアックは、X線を用いたこれまでの画像誘導放射線治療と比較して、軟部組織の描出能に優れていること、患者さんの被ばくがないこと、照射中にも腫瘍と周囲の正常組織を直接監視できること、などのメリットを有しておりますが、MRI固有の画像情報を利用した新たな個別化治療の開発が今後進んでいくことも期待されます。また、これまで放射線治療があまり貢献できなかった腹部難治がん(膵癌、肝癌、胆道系腫瘍など)にも挑戦していきたいと思っております。尚、パンデミック下での放射線治療として、世界中が照射回数を減らす方向へと向かいましたが、MRリニアックを用いて高齢者にも就労中の世代にも負担が軽く、かつ安全性の高い寡分割照射を今後も提供していくことができると考えております。

当院への見学をご希望の際には、いつでもご連絡ください(med-ocuro-request@ml.omu.ac.jp)。MRリニアックの導入を検討しておられるご施設、あるいは準備に入られたご施設に少しでもお役に立つことができましたら幸いです。



ガントリーとマグネットの搬入・設置は夜を徹した作業となりました

Elekta Unity の導入と使用経験

●千葉大学大学院医学研究院 MR 画像誘導即時適応放射線治療学寄附講座 阿部 幸太

Elekta Unity について

Elekta Unity は、1.5TMRI 装置と 7MV フラットニングフィルターフリー (FFF) リニアックシステムを一体化した放射線治療システムである。世界で 47 台、日本では当院を含めて 3 台稼働している (2022 年 5 月

現在)。以下に Elekta Unity の特徴的な装置仕様を挙げる。

- エネルギー：7MV-FFF
- 線量率：425MU/min
- 最大照射野：22(頭尾方向)×57.4(左右方向)cm

- SAD : 143.5cm
- ボア径 : 70cm
- 磁場 : 1.5T (尾側方向)

コリメータ角度は固定されており、MLCは頭尾方向に駆動する設計となっている。これはMLC trackingによる治療を想定しての仕様となっている。

Elekta UnityはMRI画像を使用して、Online-adaptive radiotherapy (OnlineART) を実施できる。従来の放射線治療ワークフローと同様に、事前に撮像した治療計画画像で計画を作成しておき、これをリファレンスプランとして治療当日のARTを行う。その際、Elekta Unityでは、当日の症例によってAdapt to shape (ATS)、Adapt to position (ATP) の2種類のART方法が選択できる。図1に両者の概要図を示す。ATSとは、当日のMRI上に臓器輪郭を描出し、その輪郭を基に治療計画を作成して治療を実施する方法である。この時の臓器輪郭はイチから描出するのではなく、事前に作成したりファレンスプランの輪郭を当日のMRIにDeformable image registration (DIR) を用いて転送し、その転送輪郭が正しくなければ修正を加える。治療計画作成はリファレンスプランのIMRTパラメータを使用して最適化を行う。それに対してATPとは、患者の体内臓器や体輪郭の変形がない場合に使用される、照射位置のみ修正して治療を行う方法である。ATPではリファレンスプランと治療直前のMRI画像をrigid registrationし、当日のシフト量を適用し治療を行う。この時リファレンスプラン作成時に使用した画像と輪郭を使用して最適化と線量計算を行うため輪郭再描出の工程を省略できる。

Elekta Unity コミッショニング時の苦労・工夫

当院の当初のElekta Unity導入計画では、2021年春にコミッショニングを開始して7月末に患者への治療が開始される予定だった。しかしながら、コロナウイルス感染症の蔓延によって海外技術者の入国が困難となる状況が続き、コミッショニング開始が2021年の10月となってしまった。そこからは2021年内の臨床稼働を目指しコミッショニングに取り組み、2021年12月14日に1例目の治療を行うことができた。図2にトレーニングを開始した時期からの治療開始までの

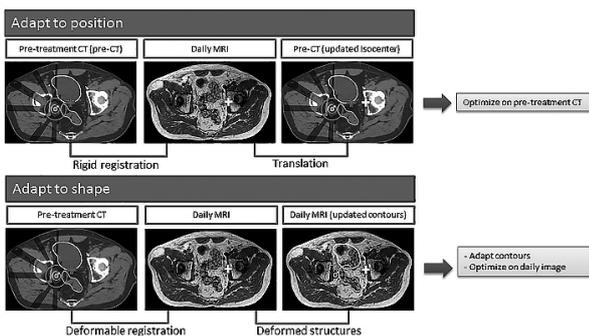


図1. ATP,ATSワークフローの概要図¹⁾

スケジュールを示す。

装置設置後のコミッショニング期間の作業内容を簡単に説明する。2021年の9月下旬にはMRI撮像に関するトレーニングを行った。Elekta UnityのMRI装置はPhilips社製のMRI装置であるため、その期間はPhilipsのアプリケーション担当者が1週間立ち合いながら、MRIコンソールの操作法や品質管理方法の確認、シーケンスの検討まで行った。2021年10月初旬からは海外施設でのUnity導入経験があるElektaの医学物理士が立ち合い、PDD、OCR、OPFなど基本的なビームデータを取得する“Beam Data collection”を行った。ここでは、海外施設の測定結果との比較も行いながら測定を進められたため我々も安心であった。その後は、合計3週間の“Application training”や“Physics training”にてUnityの操作法、治療を行うまでの一連の作業、そしてEnd to End試験を含めたUnityの品質管理項目測定法を講義形式・実習形式で学んだ。10月までのトレーニング期間だけでも基本的な品質管理項目が検証でき、治療までの流れは確認できた。しかし、当院では11月はトレーニング時に検証せず自分たちで必要と感じた検証項目の確認と多職種でのワークフロー確認の期間として設定した。千葉大では追加検証として「オフセンター位置におけるMVアイソセンターサイズの検証」を実施した。Elekta Unityは患者の腫瘍位置をアイソセンターに移動して照射するわけではないため、オフセンタービームを使用した治療ビームが多くなるのが想定される。そこで、当院ではオフセンタービームの照射精度がどの程度のものなのかを検証しておく必要があると判断し、本検証を実施した。MRI対応のオフセンターMVアイソセンターの検証ツールは市販されていないため、この検証では3次元水ファントムであるBeamSCAN MR (PTW) の位置合わせ用のボールベアリングを使用し、そのボールベアリングを頭尾方向、左右方向、腹背方向のオフセンター位置に移動してWinston-Lutsテストを行った。当院での検証結果はオフセンター位置においてもアイソセンターの大きさは最大でも1mm以内であった。

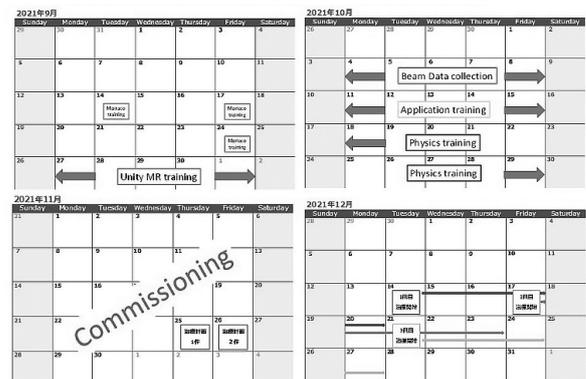


図2. 千葉大学におけるElekta Unity導入の際のコミッショニングスケジュール

このように、Elekta Unityの照射精度を担保するための検証を行う際、汎用機で使用している検証ツールがMRI対応ではない場合も多いため工夫が必要となることがあった。追加で検証を行った項目やその手法を含めた当院におけるElekta Unityのコミッション報告は当講座の恒田先生が結果をまとめており、Journal of Radiation Research誌へ掲載される予定である²。こちらが今後の導入施設の参考になれば幸いである。

Elekta Unityを実際に使用してみても

当院では、Elekta Unityを用いた治療を2022年9月までに50症例実施した。50症例の247フラクションのうち235フラクション(95%)がATSによる治療として行われた。治療部位は前立腺、肝臓、膵臓、リンパ節、腎臓、骨であった。ここでは、膵臓症例6例(3例:40Gy/8fr、3例:40Gy/5fr)における、ART時の作業ごとの平均所要時間を挙げる。入退室の時間は平均108.3 ± 22.4分であった。この中で、輪郭描出に37.8 ± 15.2分、プラン作成に10.9 ± 1.6分、プランチェックに5.2 ± 2.3分、照射時間に平均10.9 ± 1.6分要した。コントロール作成時間に入退室時間のうちの3割以上の時間が割かれている。膵臓症例では十二指腸、小腸、大腸、胃などの輪郭描出が必要となる点が多くなる点、腹部領域であることからDIRの精度も高くない点から医師による大幅な輪郭修正が必須となり、所要時間も長くなっているのが現状である。これらに対して人工知能(AI)ベースのオートコンツォリングの研究開発が必要であるとされており、最近ではARTに向けたAIコンツォリングの研究報告も数多くされている。さらに、ART時のAIオートコンツォリングに特化したAAPMのタスクグループ(TG-384)も作成されているところであり、ARTワークフローが改善されることを期待してこれまで以上にAIコンツォリングには関心が集まっている。

実際にMR-Linacを使用した個人的な感想としては、治療時にMRIシネ画像でPTV内に腫瘍が収まっているのかどうかをモニタリングしながら照射できる点はとても安心できると感じる。前立腺がん患者で直腸ガスの発生で前立腺が変位しPTVから外れてしまった患者も経験したため、より一層この利点は強く感じる。その一方で、膵臓症例の所要時間で感じられた方が多いかもしれないが、治療のスループットに関しては課題点が残っていると感じているのが現状である。

今後について

MR-Linacは世界的に見ても臨床使用開始されたばかりであり、ワークフロー改善に向けた研究開発に積極的に取り組まれている状況であるため、これからの発展性が高い治療装置である。今後、Elekta UnityはGating照射、VMAT照射^{3,4}、MLC tracking照

射⁴の実装が考えられている。これらの技術が実装されることでMR-Linacによる治療のスループットが向上し、多くの施設でMR-Linacの導入を検討できることとなることを期待している。

参考文献

1. Winkel D, Bol GH, Kroon PS, et al. Adaptive radiotherapy: The Elekta Unity MR-linac concept. Clin Transl Radiat Oncol. Sep 2019;18:54-59.
2. Masato Tsuneda, Kota Abe, Yukio Fujita, et al. Elekta Unity MR-Linac Commissioning Mechanical and Dosimetry Tests. JRR . in press
3. Kontaxis C, Woodhead PL, Bol GH, Lagendijk JJW, Raaymakers BW. Proof-of-concept delivery of intensity modulated arc therapy on the Elekta Unity 1.5 T MR-linac. Phys Med Biol. Feb 3 2021;66(4):04LT01.
4. Uijtewaal P, Borman PTS, Woodhead PL, et al. First experimental demonstration of VMAT combined with MLC tracking for single and multi fraction lung SBRT on an MR-linac. Radiother Oncol. Sep 2022;174:149-157.