

基礎から始めるIMRT ー臨床応用編ー

一般財団法人 脳神経疾患研究所附属 南東北がん陽子線治療センター 加藤 貴弘 (Kato Takahiro)

【座長集約】

強度変調放射線治療(Intensity-modulated radiation therapy; IMRT)は、光子線で行う可能な最も高精度な治療技術として近年、国内においても普及が進んできています。2000年代初頭に国内で導入が始まった当初は、ソフト、ハード面ともに洗練されているとはいえない状況であったことから、その導入にはかなり高いハードルが課せられていました。あれから約14年の歳月が経過し、現在ではリニアック、治療計画装置のみならず、QA機器等の周辺機器も大変充実するとともに先達の努力により、多くのノウハウが蓄積されてきた結果、特殊な治療から日常的に実施し得る治療へと昇華されてきた感があります。

しかし、それにも関わらず未だIMRTは限られた施設の限られた患者さまにしか実施されていないというのが現実ではないでしょうか?日常臨床においてIMRTのニーズは高く、良質な治療を安全に、そして出来るだけ多くの患者さまに提供することはわれわれ放射線治療に携わる技術者の責務であると考えられます。一方、現実には施設毎にその行く手を阻む“さまざまな課題”が山積しており、それら解決困難な課題を前に“前向きな人間であるほど日々苦悩している”というのが実態のようにも感じられます。

このような背景の中、今回あらためて『基礎から始めるIMRT ー臨床応用編ー』と題した内容を企画しました。IMRTの普及に伴い、全国各地でQAやコミッションング

に関する内容を取り上げた研究会、講演会が盛んに開催されていますが、各施設が抱える課題は技術論だけに集約されるわけではありません。今回のテクニカルミーティングには技術的な話題もさることながら、上述した“さまざまな課題”にもスポットを当てながら、明日につながる、建設的な意見交換をする場としたい、そんな思いが込められています。演者には次代を担うであろう福島県を代表する若手ホープのお二方(竹田総合病院 勝田義之さん、南東北がん陽子線治療センター 遠藤浩光さん)にお願いしました。勝田さんには医学物理士の立場から前立腺癌に対するVMATについて、遠藤さんには放射線治療専門放射線技師の立場から頭頸部癌に対するIMRTについて一連の流れや施設での取り組みについてわかりやすく解説していただきました。フロアからも積極的な質疑があり、短い時間ながらも有意義な会であったのではないかと感じているところです。

以下に各演者の方々に内容を簡潔にまとめていただきました。IMRTに限らず、放射線治療の現場では日々さまざまな課題、難題が生じるものですが、臨床現場は常に“待たなし”であり、瞬間的に適切な判断、決断が求められます。今回の内容が日常生じる課題、難題を解決していく際の一助となれば幸いです。

前立腺IMRTの実際

一般財団法人 竹田総合病院 放射線科 勝田 義之 (Katsuta Yoshiyuki)

【はじめに】

竹田総合病院総合医療センター(福島県会津若松市)は2012年10月にオープンし、これと同時にシナジー(ELEKTA)が稼働開始した。IMRTを自施設で一から行うというのは放射線技師や医学物理士である私を含めてスタッフ全員が初めてであり、開始した当初は固定具の取り扱いや患者QAに試行錯誤を要する事が多々あった。しかし、現在に至っては大きな問題が発生することなく、計画CT撮影から照射開始まで1週間を要することなくスムーズに行うことができています。この恩恵として、マンパワー的・時間的制約にとらわれることなく、必要とする全ての患

者さんに前立腺IMRTを提供することができています。

IMRTの普及に伴い、品質管理やコミッションングなど技術的な内容をテーマとした研究会・講習会がさかんに実施されている。しかし、前立腺IMRTを既に行っている、またはこれから行う予定の各施設が抱える課題は技術論のみによって解決できるものばかりではない。本報告がそのような課題の解決に向けて少しでも参考となれば幸いです。

【当院における前立腺IMRT新規患者の状況】

当院では前立腺IMRTの他に術後IMRT、ブーラストIMRTを行っている。術後IMRTは主に開腹手術・内視鏡

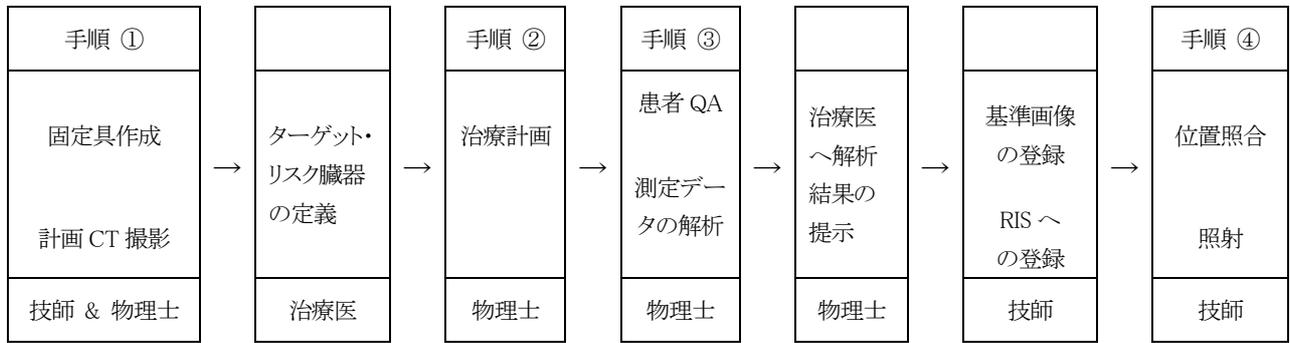


Fig.1 当院における前立腺IMRTの流れ

手術やロボット手術後のPSA再発患者を対象としている。ブーストIMRTは治療医のオーダーに応じて行う事が多い。前立腺IMRT新規患者の推移であるが、シナジー稼働開始から2014年10月までの総数は128名で平均5人/月（多い月では9人/月、少ない月では1人/月）である。通院の都合を考慮し、冬期の新規患者は少ないのが現状である。

【使用装置・機器】

シナジーの使用可能であるエネルギーは4・6・10 MVであり、1 cm幅のリーフが40対備わっている。寝台は平行移動に加えてRoll・Yaw・Pitch方向の移動が可能である6軸カウチが装備されている。IMRTはSMLC / DMLC / VMATの3方式が使用可能であるが、当院は稼働開始からVMATのみで照射を行っている。治療計画装置はMonaco (v 5.00) であり、モンテカルロベースによる線量計算を行うことができる。絶対線量評価はファーマ形線量計 (PTW 30013) と検証用ファントム (IBA I^m RT) にて、相対線量評価は2次元半導体検出器 (Sun Nuclear MapCHECK) と専用の水等価ファントム (Sun Nuclear MapPHAN) の組み合わせで行っている。固定具は吸引式固定具 (エンジニアリングシステム エスフォーム) とヒールサポート、CT装置はOptima 580W (GEHC) 16列スライスCT撮像装置である。

【前立腺IMRTの流れ】

放射線治療室には治療医 (1名) ・放射線技師 (5名、う

ち専門技師1名) の他に医学物理士 (1名) が所属しているため、医学物理士が不在、あるいは非常勤の施設とは異なるので紹介する。①固定具作成から計画CT撮影は技師と物理士が協力して行う。治療医によるターゲット・リスク臓器の定義が行われると、医学物理士が②治療計画、③患者QA・測定データの解析を行い、最後に治療医へ解析結果の提示を行う。位置合わせに必要な基準画像やRISの登録及び毎回の位置合わせと照射は2名の技師がペアとなり行っている (Fig.1)。

【手順 ①：固定具の作成ー計画CT撮影】

前処置として、まず始めに排尿・排便を行っていただく。その後、水300mlを服用した後、待機してもらい、スタッフはその間に固定具の準備を行う。当院では固定精度の他に、毎回の照射において、固定具上での患者位置の再現性が得られやすい形状となるように留意している。そのために(1)作成時のセットアップでは予め収縮させた固定具を使用し、(2)ヒールサポートを用いることを行っている。作成した固定具をFig.2に示す。計画CT画像の撮像条件は120 kV、200 mA、FOV=500 mmである。便・ガスの有無、膀胱容量、小腸・S状結腸を確認した後、問題がなければ治療計画装置へ画像の転送を行う。判断が困難である場合は治療医へ画像の確認を依頼する。

【手順 ②：治療計画】

当院での前立腺IMRTとブーストIMRTのターゲット及びリスク臓器の線量制約をTable 1に示す。線量制約は、計



Fig.2 作成した固定具

Table 1 線量制約

輪郭	線量制約	
	指標	目標
IMRT	V74 Gy	> 90 %
	V64 Gy	> 90 %
PTV	IMRT	D95 % > 95 %
	&	D0.5 % (hot) < 110 %
	術後IMRT	D1.0 % (cold) < 90 %
Rectum wall		
	Dmax	< 78 Gy
	V70 Gy	< 15 %
	V40 Gy	< 50 %
Bladder wall		
	Dmax	< 78 Gy
	V70	< 15 %
	V40	< 50 %

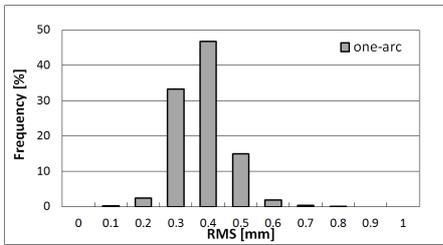


Fig.3 MLC の誤差分布

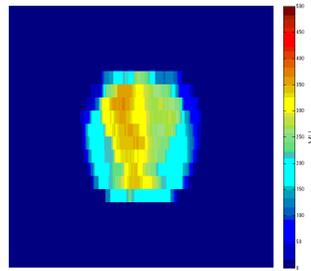


Fig.4 フルエンスマップの一例

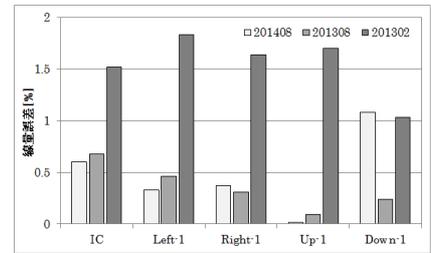


Fig.5 絶対線量誤差のレトロスペクティブ解析

画装置の特性や計算グリッドサイズ、文献による報告などを考慮し、治療医と物理士が協議の末に順次更新している。このため、あくまでも現段階での線量制約となっている。また、DVHは各臓器の線量と体積の関係を表す指標であるため、線量制約の他に目視にて線量分布を確認する必要がある。特にHot spotの場所は放射線障害の一因となる可能性があるためとりわけ留意している。ビームアレンジではTongue & Groove効果など計画装置の種類によっては十分な考慮がなされていない種類もあるため、計算誤差が発生しにくい治療計画の立案を心がけている。

【手順 ③：患者QA・測定データの解析】

患者QAは(1)絶対線量評価、(2)相対線量評価、(3)MLC・Gantry動的精度評価の3項目を行い、それぞれの結果が許容値以下であることを確認している。

(1) 絶対線量評価

ターゲット線量はアイソセンターの他、左・右・上方向へ各1cmを測定点とした評価を行っている。リスク臓器（直腸）の測定点は物理士が治療計画ごとに決定している。

(2) 相対線量評価

MapCHECK2をMapPHANに挿入して測定を行っている。測定面はCoronal・Axialの2面であり、判定基準は3mm/3%におけるガンマパス率95%以上としている。

稼働開始時はフィルムによる測定を行っていたが簡便化のため、測定機器・解析ソフトウェアのコミッションを行った後、2次元半導体検出器へ移行した。

(3) MLC・Gantry動的精度評価

過去の報告においてJ Pengらはログデータから照射中の動的精度を評価した¹⁾。これと同様に当院でもIn-houseソフトウェアを作成し、VMAT照射中におけるMLC及びGantryの動的精度を確認している。判定基準を設定するために前立腺VMAT70名のログデータの解析²⁾を行った (Fig.3)。この結果より当院ではMLC及びGantry動的精度の判定基準をRMS値でそれぞれ0.5 mm以下、0.9 degree以下としている。また、フルエンスマップの再構成³⁾を行い (Fig.4)、誤差の分布が過去のプランから逸脱していないことも同時に確認している。

これらの結果のうち、許容値を逸脱する項目があった場合は再計画及び再測定を行う。現段階では数値のみで判定を行うことが多いが、評価の結果を項目ごとにレトロスペクティブな解析を行い、トレンドを時系列で把握するようにしている (Fig.5)。解析結果は品質管理へ反映し、QA項目の見直しや追加を行っている。

【手順 ④：位置照合】

位置照合における前処置は計画CT撮影と同様である。

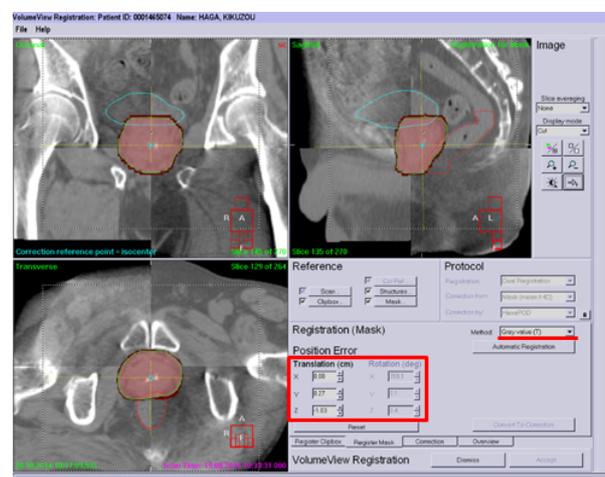
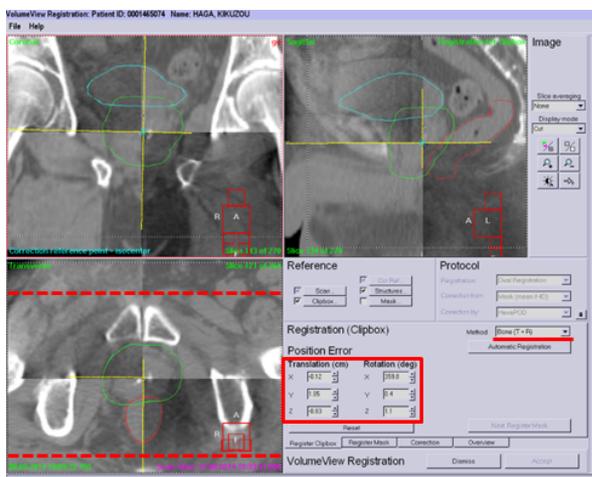


Fig.6 画像照合ソフトウェアのスクリーンショット (左:骨組織照合、右:軟部組織照合)

位置照合の手順は(1)骨組織照合、(2)軟部組織照合、(3)目視による照合である。

(1) 骨組織照合

骨盤全体を画像照合の演算領域に含めており、平行・回転方向の移動量として算出している。

(2) 軟部組織照合

基準画像から画像照合に用いる輪郭を選択してCBCT画像上から検索を行うもので、平行方向の移動量として算出している (Fig.6)。

(3) 目視での照合

(1)と(2)で画像照合がほぼ完了してしまうため、目視にて確認のみとなることが多く、必要に応じて照合を行う。

また、腸管ガスや便が溜まっている場合は排便を行っていただく。2度繰り返しても良好な結果が得られない場合は浣腸と下剤の処方が行われる。排便や蓄尿のコントロールが困難であると判断した場合、固定多門照射へ切り替えることもある。

【まとめ】

今日のIMRTは治療装置や計画装置、測定デバイス等

の発展に伴って多くの施設で行われている。当院もその恩恵を受けている施設の一つである。私はまず、これらの発展は先達たちの努力の賜物であると感謝したい。そして、マンパワー的・時間的制約にとらわれることなく、必要とするすべての患者さんに前立腺IMRTを提供するのは勿論の事であるが、より安全かつ、より効果の高い形で患者さんに提供していきたいと考えている。

【参考文献】

- 1) J Peng et al. “A study on investigating the delivery parameter error effect on the variation of patient quality assurance during RapidArc treatment,” Med. Phys. 40, 031703 (2013)
- 2) Y Katsuta et al. “Plan Quality Assurance of VMAT for Prostate Cancers in a Digitally Integrated and Controller Linear Accelerator Using Log Files,” Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 90, S737 (2014)
- 3) Y Katsuta et al. “Plan Quality Assurance of VMAT using Fluence Images Reconstituted From Log-Files,” Med. Phys. 41, 283-284 (2014)

頭頸部IMRTの実際

一般財団法人 脳神経疾患研究所附属 南東北がん陽子線治療センター 遠藤 浩光 (Endo Hiromitsu)

【はじめに】

当院は、平成22年8月よりIMRTを開始し、頭頸部領域においてはこれまでに100例以上の治療を実施してきた。同領域のプラン数は166件(平成26年9月現在)であり、症例の内訳は副鼻腔癌(22%)、舌癌(20%)、脳腫瘍(20%)、中咽頭癌(18%)、上咽頭癌(15%)、下咽頭癌(2%)、その他(3%)となっている。直近の3年間では、年間あたり50件程度のプラン数で推移しており、頭頸部IMRTにおいては今後も多くの臨床需要が想定される。我々、現場のスタッフが直面する日常での課題は多岐に亘るが、今回はそれらを解決するための試みについて、頭頸部IMRTに焦点を絞り報告する。

【当院における頭頸部IMRTの特徴】

当院における頭頸部IMRTは、従来のSIB(Simultaneous Integrated Boost)法やTwo-step法に加え、IMRTと陽子線治療(Proton Therapy;PT)を組み合わせるプロトコルがある。これにより、IMRT単独ではリスク臓器の線量制約をクリアできない症例に対しても、PTを用いたブーストプランでリスク臓器の線量を低減しつつ、ターゲットへの線量増加が可能となる。当院の舌癌症例は全例このプロトコルを採用している。また、進行頭頸部癌の標準治療は外科手

術であるが、動注化学療法と放射線治療の併用により機能・形態温存を図りつつ根治を目指す治療も選択肢のひとつとして提供している。なかでも浅側頭動脈から穿刺し、腫瘍の栄養血管へ高濃度の抗癌剤を注入する“超選択的”動注化学療法が積極的に施行されている。

【使用機器】

LINAC : Clinac iX (Varian)
CTシミュレータ : Light Speed RT16 (GE)
RTPS : Eclipse Ver.8.6 (Varian)、
固定具 : 全方位頭部用固定プレート(一体型)
ESF-15C+Index Bar (ES)
シエル : 頸部・肩用ESS-25 (ES)、
枕 : 発砲スチロール枕ESF-24 (ES)
or モールドケアRIⅡ・BR (アルケア)
マウスピース : 簡易型 (自作)

【シエルの開窓】

頭頸部IMRTにおける皮膚反応への寄与として、シエルのボーラス効果や多方向からのビームの接線入射による影響が報告されている¹⁾。この対策として、治療計画での最適化計算の際に皮膚面から3~5mmをPTVから除外し、

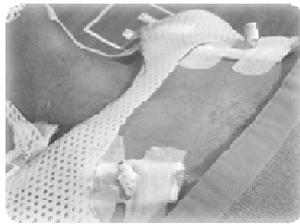


Fig.1 シェルの開窓



Fig.2 シリンジタイプ

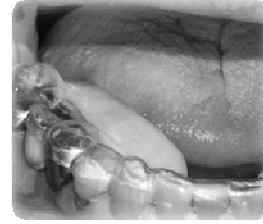


Fig.3 歯科用スぺーサ

さらにその領域をリスク臓器として線量制約を設けている。シェル自体にも、皮膚炎が生じやすい領域は予め開窓しておくが、加えて、前述した動注療法のためのポートやカテーテル用にも開窓が必要となる(Fig.1)。当然、切り抜く面積が増えればシェルの強度が低下し、セットアップにおける再現性の低下が懸念される。

【マウスピースの役割】

舌癌症例については、全体の64%がマウスピース(Fig.2, 3)を着用している。この目的として、①舌の再現性、②口蓋との距離の確保、③歯冠からの散乱線の影響を低減することなどが挙げられる。副鼻腔癌においてもターゲットの位置によっては舌や下顎との距離を確保するために用いているが、頻度は全体の16%と少ない。マウスピースは、シリンジを用いた簡易型のを技師が作成している場合が大半であるが、Fig.3のように歯科技工用のスぺーサが必要となる場合は医師に依頼するため、事前に十分な協議をしておく必要がある。

【治療計画】

AAA(Ver.8.6.15)/Calculation grid size 0.25 cm/Dynamic MLC/線量制約はJCOG1015 Ver1.0に準ずる

PRVマージン:脳幹・視神経・視交叉…2mm、脊髄…5mm (OARは症例や治療方針により適宜設定する)

支援ソフト:ABAS(=Atlas-Based Auto Segmentation)、Velocity AI…Deformable Image Registration

【プラン検証】

当院で実施しているPatient Specific QAの概要をTable 1に示す。また、MLCの位置誤差については、MLC Dynalog File (Varian)を適宜参照している。

【患者セットアップ】

当院では、毎回の照射前にkV-Image(OBI)による2D/2D照合を実施している。照合の補助としてPTVやPRVマージン、舌の輪郭などをDRR上に表示し、オペレーターが視覚的かつ直感的に判断できるよう工夫している。また、週1回の頻度でCBCTを撮影し、腫瘍サイズやOARの位置ズレ、体輪郭の変化などを評価し、必要に応じて医師とReplanの必要性やタイミングについて協議している。

【残余誤差へのアプローチ】

頭頸部領域は可動性に富むことから、全体を精度良く一致させることは必ずしも容易でない。そのため、ある程度の残余誤差(Residual Setup Error)を許容した上での照射を余儀なくされており、これらの統計的な評価と、残余誤差を低減させるための工夫が必要とされる。以下にその一部を示す。

A)残余誤差の解析

当院で実施した過去326回の照合結果から、各々の解剖学的指標における残余誤差を算出した。各指標におけるTotal 3-D population displacement errorは2.3~3.2mmであったが、個々の症例でみると下顎などで5.0mm以上の誤差も存在していることが確認された。

B)モールドケアの導入

全患者に対してモールドケアを作成することで、既製品の発砲スチロール枕で発生してしまう患者と枕の隙間を無くすことを試みている。現在までに15例施行しており、頸椎アライメントの再現性が向上している印象を受けている。今後、定量的な解析を行なっていく予定である。

Table 1 Patient Specific Quality Assurance for IMRT

項目	絶対線量測定		相対線量分布測定	
	各門検証	全門検証	各門検証	全門検証
使用機器	RT-3000-NEW (頭頸部用) 0.125cc Semiflex Chamber		2D-Array seven 729 タフウォーターファントム	RT-2000-EC タフウォーターファントム
測定領域	1点(各門ごと)	2~4点(GTV,OAR等)	25×25cmの範囲内	20cmφ or 40×40cm
解析ツール	シューハート管理図		VeriSoft (PTW)	DD IMRT (R-tech)
評価方法	許容誤差 ±5%	許容誤差 ±3%	γ解析 1mm/1%/TH10%	γ解析 2mm/3%/TH30%

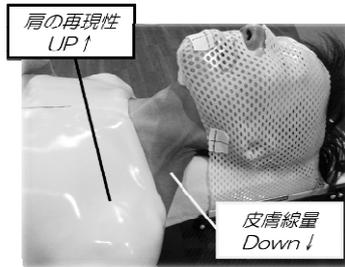


Fig.4 セパレートタイプ

C) シェルのセパレート化

従来の手法では、先に述べた理由によるシェルの強度低下について、セットアップ精度に及ぼす影響が懸念されていた。これを解決する試みとして、現在は頭部シェルと肩シェルをセパレートしたタイプを利用している(Fig.4)。この手法により、①肩シェルのみ、孔なしタイプに変更することでシェルの強度低下が低減できる、②首周りのシェルが無くなるため、皮膚線量を下げることが可能である(鎖骨上リンパ節領域は逆に増加する恐れがあるため、照射範囲に応じて適宜カットする必要がある)、③頭部を固定した状態で体幹部や肩の位置修正が容易に実施できる、などのメリットが得られる。その他として、マンパワーが不足している状況下においても1人での作成が可能という運用上のメリットもある。シェルの固定精度の改善については、試行錯誤しながらより良い手法を模索し続ける事が重要である。

【照射時間の短縮に向けて】

頭頸部IMRTはCTVが広範囲におよぶ症例が多く、PTV coverageを優先した計画(固定多門、Split field等)を立てれば、照射時間が長くなることは避けられない。当院では外科的切除後や気管切開後、あるいは局所進行症例、再照射例などもIMRTの対象としており、痛みや呼吸苦(腫瘍による気道狭窄、痰による気道閉塞などが原因)により、固定具を装着した状態での長時間静止が困難なケースに遭遇することもある。このようなケースでは持続的酸素投与でSpO₂を監視したり、状況によっては照射を一度中断して痰の吸引処置を施すなど、1回の治療を完遂するために時間を要しているのが実情である。それを解決する手段のひとつとして現在、時間を要するSplit fieldを避け、Fixed jaw technique²⁾の採用を試みている。この手法はTarget dose及びOAR doseが同程度かつ、Split fieldと比較して総MUを少なくすることが可能であり、治療時間の短縮(最大で5分程度)が図れる。つまり、患者の身体的負担の軽減やintra-fractional errorの低減に直結するものであり、更にはスルーット向上にも寄与する。今後はVMATへの移行も視野に入れ、さらなる検討を図っていきたいと考えている。

【今後の展望】

1. Patient Specific QAの簡略化とDaily QAの強化

Patient Specific QAの簡略化が求められるが、その背景にあるMachine QAがしっかりと強化されていることが前提であることは言うまでもなく、統括的なQAの見直しを図る必要があると考えている。特に、日々の多忙な業務の中で後回しになりがちな項目に対して、まずは効率的な手法を確立することが目標である。加えて、新規QAツール(DAVID、ArcCHECK)の基礎的な性能評価を行なっていくことも検討している。

2. マシントラブルへの早急な対応

放射線治療装置は高度化、複雑化の一途を辿っているが、それに反してマシントラブルに対する対応は進歩が緩やかであるように感じる。ユーザーでの対応が困難なマシントラブルが発生した場合、担当営業所との物理的な距離(当院の場合は仙台一郡山間)により、最低でも復旧までに3時間以上のダウンタイム、さらには当日の治療を休止せざるを得ない状況が生じている。最悪なケースは後者であり、治療成績への影響だけでなく、ブースト陽子線のスケジュール変更や院内関係者、患者からのクレーム対応が生じるが、真に不利益を被っているのは患者自身に他ならない。メーカーの責任は極めて重大であり、早急に対応できる体制に強化することが社会的責務であると考えている。放射線治療の社会的ニーズは急速に増しており、企業側にもそれに応じた努力が求められているということを、我々現場のスタッフが患者の代弁者となって訴え続けることも重要だと考えている。

3. 全患者への均質な照射技術の提供

当院はマンパワー不足により頭頸部IMRTの需要に追いついていないのが現状である。そのため、医師がIMRTを実施する症例を“選別”しなければならず、将来、治療方法の妥当性の評価に支障を来す恐れもある。今、我々がすべきことは、マンパワーの充実(スタッフ育成も含む)や治療装置の増設であり、IMRTやVMATを均質に提供できる環境を築くことが、臨床の真のニーズに応えるための重要な一歩と考えている。

【参考文献】

- 1) Nancy Lee, M.D.; *et al.* Skin toxicity due to intensity modulated radiotherapy for head-and-neck carcinoma. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 53:630-37; 2002.
- 2) Shiv P. Srivastava, M.S.; *et al.* Dosimetric comparison of split field and fixed jaw techniques for large IMRT target volumes in the head and neck. *Med. Dosim.* 36:6-9; 2011.