

放射線防護

1. DSA 装置と放射線防護

久留米大学 放射線科
安陪等思

はじめに

Interventional radiologyと切っても切り離せない血管造影装置の基本的事項と放射線防護について概説する。血管造影装置はIVRに欠かせない装置であり、放射線の発生、検出、基本性能について述べる。放射線防護については押さえておきたい基礎的な事項についての再確認に役立てていただけると幸いである。

血管造影装置

エックス線の発生

陰極側のフィラメントを流れる電流で発生した電子は電氣的に陰性なので、電圧が与えられた陽極に引き寄せられる。真空管であるエックス線管球にかかる電圧が高いほど高速で電子が陽極に衝突することになる。陽極の電子を当てる部分をターゲットと呼び、原子番号が高くエックス線発生効率が良く、融点が高く、熱伝導が良く冷却効率が良いタングステンが用いられる。高速でタングステンの原子核(大質量、陽電荷)に近づいた電子(小質量、陰電荷)は原子核に引き寄せられて、進行方向を曲げて、減速される。その様子は地球に吸い寄せられる隕石の様である。減速もしくは停止することで電子は運動エネルギーを失いエックス線を発生させる。原子核と電子の距離によってはすべての運動エネルギーを失って停止するものから、軽度に変化を遂げつつ減速したことにより運動エネルギーを失うものがあり、その程度により発生するエックス線のエネルギー (KeV) が異なるので連続スペクトルを呈することとなる。このようなエックス線は連続エックス線、あるいは阻止線と呼ばれ、診断に用いられるものはこの型のエックス線である(図1)。

このことよりフィラメントを流れる電流が発生する電子の量を決め、エックス線管の電圧が電子の速度を決めることが分かり、ひいてはエックス線の線量と線質を規定する事が理解できる。

電子が衝突するターゲットは小さい方が鮮明なエックス線像を得ることができるが、その際に発生する大量の熱(電子の運動エネルギーのうちの99%は熱に変換される)により損傷を受けやすい。そのため陽極には角度を付け、回転陽極として長時間の使用に耐える事ができるようにしてある。また、回転陽極の回転時

に発生する熱を含めたエックス線管の冷却に様々な工夫が凝らしてある。

電圧をかけた状態でエックス線管球に電流を流せばエックス線が発生する。電流を連続的に流せば、エックス線は連続して発生する。これをcontinues modeと言う。一方、電流を流したり、止めたりを繰り返すことでパルス状にエックス線を発生させることができ、pulse modeと言う。パルス状に発生したエックス線の総量は連続状のものよりも減少することとなり、被曝の低減に繋がる。ヒトの目にとってテレビでの動きは滑らかなものに見えるが、そのフレームレートはおよそ毎秒30フレームである。ただし、高速に移動するもの(例えばボール)の視認性を高めるにはより高いフレームレートが求められる。同じエックス線のパルスであれば透視におけるパルスレートを半分に下げれば、単純に被曝線量は半分になる。動きが高速でない部位に比較的大きなものを対象とするのであれば毎秒7.5パルスで十分な情報を得ることができる。必要に応じてパルスレートの増減を行うことで無駄な被曝を効率的に下げることができる。

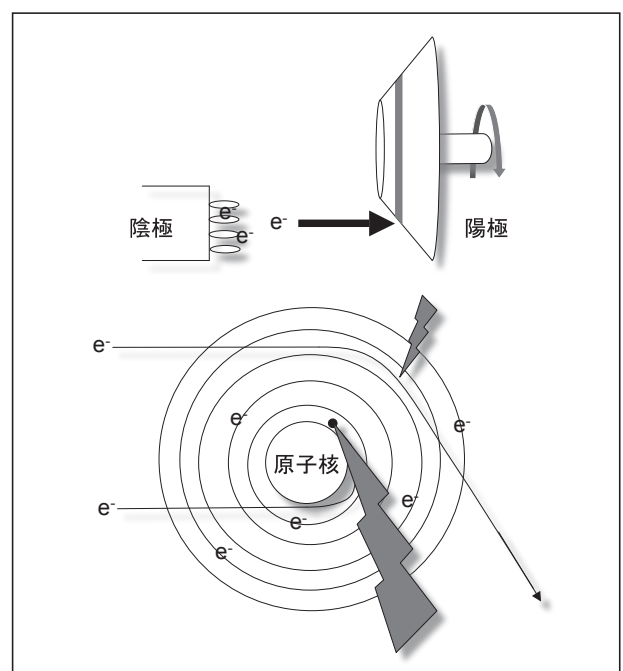


図1

エックス線の検出

従来用いられてきた蛍光増倍管 (image intensifier : I.I.) を用いた digital subtraction angiography (DSA) 装置ではエックス線を一度光に変換した後にテレビで撮影, そのアナログデータをデジタルに変換していた。この過程でデータの劣化が発生していた。また, 真空管である I.I. は使用頻度と経年変化に伴いエックス線を光に変換する能力が低下することがわかっており, およそ5年で1/2に低下すると考えるべきである。一方, 平面検出器 (flat panel detector : FPD) では I.I. 方式に比べると薄型化が実現でき, 大画面で高分解能のエックス線画像を得ることができる。また, 経年変化による劣化が少ないと言われている。

FPD ではエックス線検出原理の違いによって「間接変換方式」と「直接変換方式」に大別できる。間接変換方式ではエックス線情報を蛍光体によって光にした後にフォトダイオードを用いて電気信号に変換する。直接変換方式ではエックス線を電気信号に変換するエックス線変換膜を用いて電気信号としている。両者に長短はあるものの現時点における優劣は決定づけられてはいない。

現代の DSA 装置に求められる基本性能

最も重視すべき基本性能は画質である。I.I. system の DSA に比して FPD system の DSA においてダイナミックレンジと濃度分解能が向上し, 見えやすさが改善されている。Detective quantum efficiency (DQE), 散乱線除去, 周波数フィルター, エックス線パルスの最適化, エックス線の線量や線質と画質のバランスなどが重視されるべき項目である。残念ながら, これらについては各社の性能表を見るだけでは測定法の違いなどで比較しがたい面が多い。使用する医師と診療放射線技師によるコンセンサスの形成が必要である。

FPD の大きさは各社で様々であり, それを搭載するアームの形態によっても利点と欠点が修飾されるわけである。どの領域の検査が主体となる装置であるのか, 主体とならない領域で求められる性能はどのようなものであるかを見極める必要がある。その中で脳血管内治療においては2方向からの同時透視が任意の方向から得られることが重要である。そのためのアームの動きと FPD の干渉について十分に検討する必要がある。患者頭側からのアプローチは麻酔のみならず緊急時の対応にも必要であり, また, 頭部と同時に胸腹部を観察できる性能も必要な場合があり得る。多軸の回転機能を駆使してロボットのように自在に動かすことができるアームが開発され, 今まで寝台を動かすことが求められた水平面での移動を行うことなく, アームの動きによって観察できるようになっているものもある。

基本性能の一つであるが, 良好なロードマップを得ることができることは直接的に手技に関するもので重要である。ロードマップ用に撮影が必要なものと直前に撮影した DSA を活用できるものがある。また, ロード

マップを透視画像にスーパーインポーズする際の濃度調整が容易なものがよい。最近の装置では術者が様々な操作を内部で行うことができるようになっているが, 操作法について習熟する必要もあり, 実際の治療においては診療放射線技師との連携が良好であることが重要であり, チームとしての技術向上を図るべきである。

放射線防護

放射線防護に関連する線量

放射線被曝や防護の話になるとまず線量というものが出てくる。その単位は普段は使い慣れないもので, 第一のハードルとなる。ここでは我々に関連する外部被曝についての線量について述べる。線量には計測できる物理量と放射線の生物学的影響を考慮した防護量がある¹⁾。

物理量としてなじみがある線量は吸収線量 (absorbed dose) である。吸収線量は単位質量あたりの吸収エネルギーであるので単位は J/kg であるが, これを Gy (グレイ) としている。防護線量として等価線量 (equivalent dose) と実効線量 (effective dose) とがある。これらは物理量 (Gy) に係数が乗じてあり, 単位は Sv (シーベルト) となる。等価線量は放射線の種類と影響の違いを考えたものである。目の水晶体や皮膚などの線量限度などに用いられる。放射線の種類による係数を乗じたものであり, 単位は Sv である。ちなみにエックス線の係数は1である。実効線量は複数の臓器が同時に被曝した場合の被曝の影響や一部の被曝が全身に及ぼす影響の程度を示しうるものである。被曝の影響の大きさを比較するのに適している。これらは原爆の被曝者から得られたデータをもとに決められた臓器毎の係数を乗じたものであり単位は同じく Sv である。ちなみに臓器毎の係数は合計すると1となるように設定されている。

等価線量と実効線量を実際に計測するのは困難であるので, 実用量という測定可能なものが定義されている。実用量としてなじみが深いのは個人モニタリング (個人線量計, ガラスバッジなど) である。直径 30 cm, 密度 1g/cm³ の球を人体に見立てて中心に向かって照射された場合の線量を, 表面からの深さ 1cm でのものを実効線量, 3mm のものを水晶体の等価線量, 0.07 mm のものを皮膚の等価線量に対応させている。単位は Sv となる。ガラスバッジで計測しているものは 1cm と 0.07 mm の深さに相当するものを計測し, 実用量としている。水晶体についてはプロテクター外においたガラスバッジでの 0.07 mm での計測値を採用することとなっている。ほとんどの状況ではその値が 150 mSv を超えないようにすることで 3mm での線量 (水晶体の線量) の線量限度は担保されるからである。

職業被曝における線量限度

実効線量の限度は①平成 13 年 4 月 1 日およびその5年ごとの 4 月 1 日を始期とする 5 年間に付き 100 mSv,

表1 線量限度

実効線量限度	
① 100 mSv/5年	
② 50 mSv/年	
③ 女子 5 mSv/3月	
④ 妊娠中である女子	
本人の申し出等により使用者が妊娠の事実を知ったときから出産までの間につき、内部被曝について1 mSv	
等価線量限度	
① 水晶体	150 mSv/年
② 皮膚	500 mSv/年
③ 妊娠中である女子の腹部表面	2 mSv

②①に規定するほか、4月1日を始期とする1年間につき50mSvとなっている。また、等価線量の限度は③眼の水晶体については4月1日を始期とする1年間につき150mSv、④皮膚については4月1日を始期とする1年間につき500mSvとされている。これらの法令、制度は職業被曝による放射線障害を防ぐ目的で活用されるものであるため、我々としては正確な個人線量計測についての努力を怠ってはならない(表1)。

正当化、最適化、線量限度

放射線利用にあたっての必要にして不可欠な条件は正当化、最適化、線量限度である。放射線を用いることによって得られる利益が、それによる損失を上回っているのを確かめること(医療行為の正当化: justification)は患者にとっては「はっきりとした利益があるはずだ」ということになる。また、合理的に達成可能な最大限の努力が払われた上での被曝でなければならないこと(放射線防護の最適化: optimization)は患者にとっては「医師は放射線防護の・管理について十分な知識を持っているはずだ」、そして「医師は被曝線量を少なくする努力を絶えず行っているはずだ」ということになる。この「合理的に達成できる限り低く保つ」ことを英語ではas low as reasonable achievableといい、その頭文字を取ってALARAの原則と言う。最適化で決まった被曝線量がICRP(国際放射線防護委員会)の勧告している許容線量を下回ることを検討すること(個人の線量限度: dose limit)は医療被曝(患者の被曝)には適応されないが医療従事者には適応される(表2)。そのため被曝の可能性がある場合には個人線量計の装着が義務づけられているわけであり、それを装着せずに管理区域に入ってはならない。

時間、距離、遮蔽

放射線被曝防護の3原則は時間、距離、遮蔽の3つである。この中で最も効果が高いものは時間であり、無駄な照射を極力さけることが求められる。技量の向上による手術時間の短縮も重要な事項の一つである。次にエックス線は距離の二乗に反比例して減衰するので線源からの距離をとることが重要である。エックス

表2 放射線利用にあたっての必要にして不可欠な条件

放射線を用いることによって得られる利益が、それによる損失を上回っている事を確かめる(医療行為の正当化): ○

- ・患者にははっきりとした利益があるはずだ!

合理的に達成可能な最大限の努力が払われた上での被曝でなければならない(放射線防護の最適化): ○

- ・医師は放射線防護の・管理について十分な知識を持っているはずだ!
- ・医師は被曝線量を少なくする努力を絶えず行っているはずだ!

最適化で決まった被曝線量がICRPが勧告している許容線量を下回ることを検討する(個人の線量限度): ×: 医療被曝には適応されない

線管球からの距離はもちろんのこと、エックス線の照射によって散乱線が発生する部位からの距離をとるように心がけたい。遮蔽については各施設において工夫がなされているが、基本は防護エプロンの装着である。重さを減らし腰にかかる負担を小さくしたものもあるので各自に適したものを選んでいただきたい。

エックス線管球と蛍光増倍管の配置

患者の治療において必要な透視時間や撮影回数は同じでも被曝線量に違いが起これるので、出来る限りそれを少なくする方法について概説する。エックス線は距離の二乗に反比例して減衰するので、管球とI.I.の距離が短い方がよい。人体を透過した後の減衰を避けるためにI.I.はなるべく患者に近づけた方がよい。管球が患者に近いと減衰のない放射線の被曝となる。管球とI.I.の距離が不変の場合には患者をなるべくI.I.に近づけた方がよいということになる。また、I.I.の大きさを小さくして拡大画像を得ようとするときI.I.に入射する照射面積が減り、光子が低下するのでフィードバックにより照射線量が増加する。I.I.のサイズを2倍にすると約4倍の照射線量増加になる。被曝線量の増加はいずれもモニター上で画像拡大が行われている場合に相当するので、術者は安易に拡大画像を用いないように心がけることが被曝線量の低減に役立つといえることが出来る(図2)。最新の装置はFPDを装着しているが、I.I.よりは被曝の低減が期待されるが、類似の傾向はあるので、今まで同様の努力を惜しんではならないと考えられる。

ICRPの勧告

ICRPは助言的役割を果たし、放射線防護の原則についての勧告を発表する機関であり、我が国においてもその助言をもとに法改正が行われる。法改正までには時間がかかることが多いのでICRPによる勧告については各施設で取り組んで早期に導入することが望ましい。Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures (Pub. 85)はIVRにおける患者皮膚被曝についての勧告である。日本語訳は「IVRにおける放射線傷害の回避」日本アイソトープ協会(丸

善)より発行されている²⁾。その要点は次の三つに分けることができる。

①インフォームド・コンセント

IVRにおけるインフォームド・コンセントを得る際、放射線障害のリスクを説明しなくてはならない。障害は遅れて出現すること、短期間に繰り返し行われることにより重症化することを含めて述べねばならない。

②プロトコール

IVRの手技ごとにプロトコールを作成し、標準的な撮影部位と回数、透視時間などを記載する。同時にその場合の患者の皮膚線量が分かるようにしておく。これにより実際の患者の推定皮膚線量が得られる。

③3Gy追跡調査

1回のIVRでの患者の推定皮膚線量が3Gy(繰り返される手技では1Gy)を超えた場合、皮膚の照射部位と線量を診療録に記載する。3Gy以上の場合、患者および主治医に皮膚障害の可能性を説明し10～14日後に追跡調査を行わなくてはならない。

言いかえると1Gyが患者の皮膚に照射されたことが分かるようにする必要があり、何らかの線量計を用いて計測すればいいのであるが、それができない場合には、どのような手技をどのくらいの時間行えば1Gyに達するのかを把握して、診療録に記録するということになる。脳血管内治療において最も高頻度に問題となるのは患者頭部の皮膚被曝に伴う一時的脱毛である。そのしきい値は3Gyとされている。代表的なしきい値を呈示する(表3)。

最近ではDSA装置に自動的に線量を計測、記録する線量計が付属している。エックス線管球から出てくるエックス線の線量の指標に面積線量積(dose area product : DAP)であるが、入射皮膚線量などの実際に皮膚に吸収される線量や臓器が吸収した線量とは異

なっている。しかし、症例毎に自動的に線量が記録され便利である。また、同じタイプの装置であれば同程度の被曝であろうと想像されるが、施設の設定によっては3倍近い照射線量の違いがあることも分かってきており、施設毎の線量把握は必須である。標準的な計測法を用いて他施設または他装置との比較、および患者の皮膚被曝線量の計測が求められることとなる¹⁵⁾。我々は頭部専用のファントムと計測法を確立し、ホームページ(<http://www4.plala.or.jp/radiox/>)を用いた貸し出しを行っているので活用されたい。

IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドライン

ICRPの勧告をうけて我が国でも「IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドライン」が出されており、具体的な方策について述べてある³⁾。その中からの抜粋を示す。

インフォームド・コンセント：皮膚線量がしきい値を越えた場合には皮膚障害が発生する可能性が高くなることを説明する。治療の必要性、方法および合併症

表3 放射線による皮膚障害

皮膚障害	しきい線量(Gy)	出現時間
初期一時的紅斑	2	数時間
一時的脱毛	3	3週
主紅斑	6	10日
永久脱毛	7	3週
皮膚萎縮	11	14週以降
毛細血管拡張	12	52週以降
晩発性紅斑	15	6～10週
皮膚壊死	18	10週以降
2次性潰瘍	20	6週以降

●しきい値の定義
しきい線量を浴びた人の1～5%に障害が発生する線量

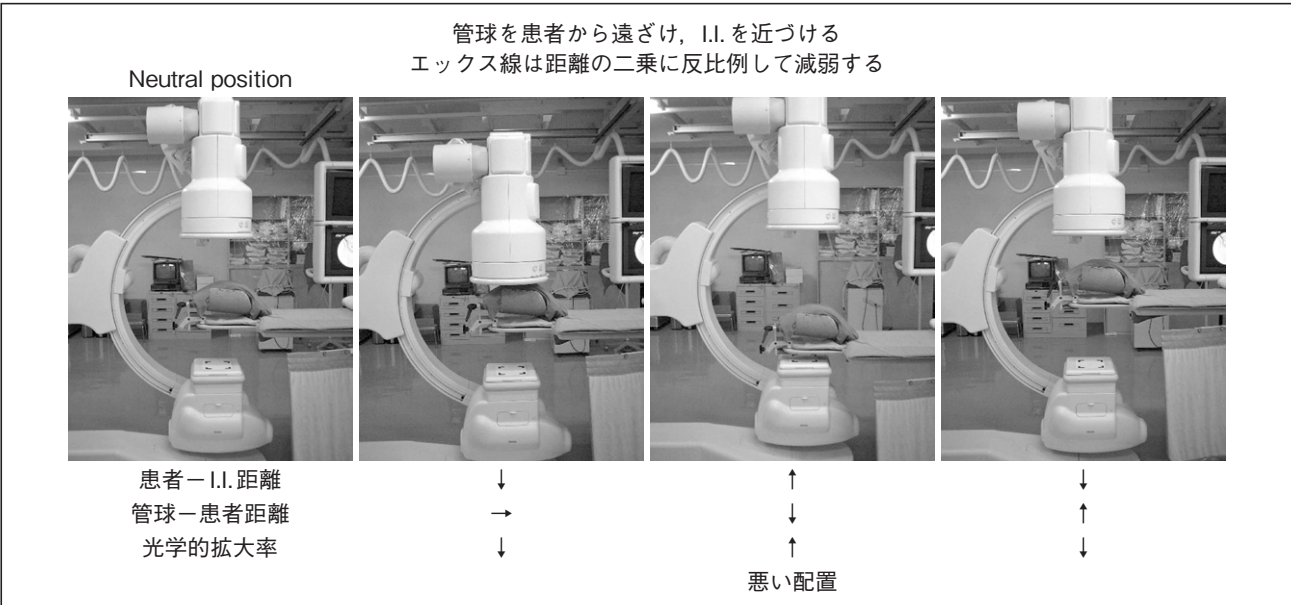


図2

に関する説明のほかに、放射線被曝によって生じる皮膚障害等の確定的影響とその防止策、皮膚障害が発生したときの治療方法についても説明をする。

IVR手技における皮膚線量の管理目標値の決定：IVRの施行に際し、あらかじめ管理目標としての皮膚線量値の上限を定めておく。管理目標値を超えて治療の継続が必要であるか否かの判断を誰が行うのかの手続きを定めておく。これは事前に定められた線量に達した場合に更に同様の治療を続けるのか、何らかの変更(例えば術者や器材を変える)をして継続するか、中止するかを判断する人を定めておくと言うものである。

IVRに使用する装置の線量率の把握：使用装置における皮膚線量の把握は不可欠であり、安全性を担保するために測定マニュアルを用いて線量率を実測しておく必要がある。もしくは症例毎の被曝線量の計測を行うことが必要である。医療法実施規則では空気カーマ率が50mGy毎分以下になるようにすることとされている。

皮膚障害の影響線量を超えたと考えられる患者への対応：初回治療では3Gyを超えた場合や頻回に治療を受けている場合は、1Gyを超えた場合に皮膚障害が発生する可能性があるため、(1)治療が必要不可欠であったことの説明、(2)照射部位と線量の記録および情報の伝達(他の医療機関など)、(3)照射部位の観察(1から2週間、家族の協力も)、(4)皮膚の安静：擦ったり、掻いたりしない。入浴剤や石鹸を用いない。絆創膏や湿布を使用しない、(5)医師の診察、(6)皮膚科医の診察(情報の伝達が必要)が必要となる。この中で特に注意を要するのは情報の伝達である。特に患者が異なった医療施設で治療を受ける場合には(2)が重要であるし、障害の発生のための皮膚科での診察に際して放射線照射の既往を伝達することで診断と治療に遅れがでないようにすることができる。患者に対しての教育も必要と考えられる。

治療における留意点

さて、我々が実際にIVRを行う場合の注意点としてはどのようなものがあるかを考えてみる。装置の品質管理や性能維持管理は診療放射線技師にゆだねられることが多いが我々もそれに留意していることを知らせることは必要だと考えられる。装置に付属する防護器具の活用は習慣づけることが必要である(図3)。我々にとっての最も重要なゴールデン・ルールはエックス線照射時間を必要最小限にせよということである。透視についてはモニター画面を見ないときに透視を出さない(ガイドワイヤーをカテーテルに入れている時に透視を出さない。ガイドワイヤーやコイルが画面に現れる大まかな長さを知り不必要な透視を出さないなど)ことである。そのためには上手になること、便利なものを使うことなどが必要である。また、光学的拡大や電氣的拡大ともに被曝線量の増加に繋がるので拡大透視は必要最低限にすることを心がける様にしてもらいたい。

術者被曝の低減
プロテクターを着用
(古いものは穴があいていることがある！)
個人モニターの装着
(法で定められている！)
水晶体防護には天井走行の防護板と眼鏡型プロテクターが有効。
モニターに術者や看護師の手が映ることがないようにする。
装置に付属の遮蔽装置を活用し、散乱線による被曝を減少させる。



図3

術者の被曝は主として放射線が患者を通過した際に生じる散乱線から引き起こされる。画像が拡大されたときにはエックス線量の増加が起こることは述べたが、患者を通過する線束が小さくなっているため散乱線が体外に出る程度が低下する。つまり、術者の被曝は減少するという利点があることも知っておきたい。

エックス線管球側の方が散乱線の発生が多いので、側面管球を用いる場合には管球は術者の反対側にあることが望ましく、最近開発された脳神経用の装置では従来とは逆の配置となっている。また、同様の理由からポータブル装置を用いる場合には管球をベッドの下に入れること(アンダーチューブ)が望ましい。逆にオーバーチューブでは患者の眼球および術者の上半身(特に甲状腺と眼球)に被曝線量が増加することを知り、頸部プロテクターや眼鏡タイプのプロテクターの装着が必須となる。ICRPでは術者の水晶体について従来考えられていたよりも放射線感受性が高い可能性があるということで委員会が立ち上がっている。水晶体については厳密な防護は天井走行の防護板と眼鏡型プロテクターで可能とされており、常時使用が望まれる。

基本的には患者被曝低減は術者の被曝も減らすわけであるから、両者に利益があるので常々注意を払っていただきたい。不必要なエックス線照射をなくし、照射に伴う患者の皮膚障害と医療従事者の被曝を最小にしていきたい。

【参考文献】

- 1) 酒井一夫, 米原英典：医療被曝をめぐる動向と線量の単位. INNERVISION 25: 42-45, 2010.
- 2) ICRP Publication 85, IVRにおける放射線傷害の回避. 社団法人日本アイソトープ協会, 東京, 2003.
- 3) IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドライン-Q&Aと解説一. IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドライン-Q&Aと解説-ブックレット作成ワーキンググループ, 医療放射線防護連絡協議会, 東京, 2004.

放射線防護

2. 血管系IVRの被ばくの実態と対策

さいたま赤十字病院 放射線科
鈴木 滋

Interventional radiology (IVR) は、患者への負担が比較的小さく侵襲の少ない治療法であるが、従来の放射線診療よりも利用する放射線の量が多いため、患者および術者に放射線被ばくによる障害を生じうる。従ってIVR術者は適切な放射線防護を行わなければならない。放射線防護においては、まず、線量を把握すべきである。

患者の被ばく防護

1) 皮膚線量

放射線皮膚障害においては、急性照射における閾値は、一過性紅斑で2Gy、一過性脱毛で3Gy、永久脱毛で7Gy、遅発性皮膚壊死で12Gyである。これらの障害の発生を防止するためには、最大皮膚線量が閾値を超えないようにする必要がある。

標準的なIVR手技が行われた際の患者最大皮膚線量は手技の種類により異なっており、さらに手技が行われる施設によっても、異なっている(表1)^{1~3)}。

また、同一施設で行われた特定の手技においても、患者最大皮膚線量は、術者の違い、血管造影装置及びその設定の違い、患者の体格の違い、透視時間などに大きく影響される(図1)。

IVR施行後の患者における放射線障害(特に皮膚障害)に関して、国際放射線防護委員会(International Commission on Radiological Protection: ICRP)は推定される皮膚の最大蓄積線量が3Gy以上の場合(繰り返し

される可能性のある手技では1Gy以上の場合)、被ばくを受けた皮膚の部位・範囲及びその線量の記録を保管すべきであるとし、さらに、推定皮膚線量が3Gy

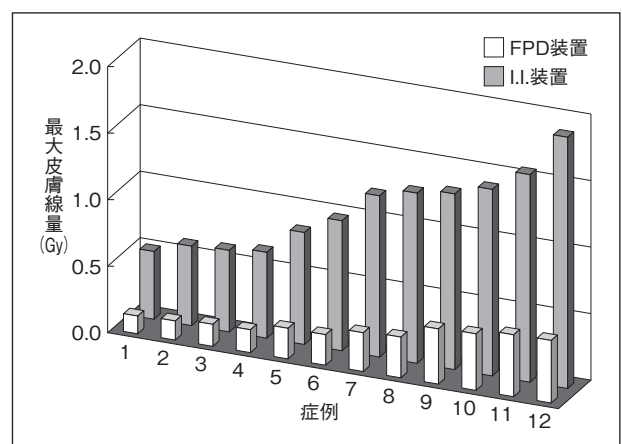


図1 HCCに対するTACEにおける患者最大皮膚線量²⁾
同一施設において異なる24症例に対し従来型血管造影装置(I.I.装置)(n=12)またはフラットパネル検出器搭載装置(FPD装置)(n=12)を用いて、HCCに対するTACEを施行した。FPD装置を用いた手技と比較して、I.I.装置を用いた手技の線量は4倍程度高かった。また、同一装置においても、最大皮膚線量には症例間で4倍程度の開きが認められたが、これには、術者の違い、患者の体格、透視時間などが影響しているものと思われる。

表1 各種IVRにおける患者皮膚線量

手技	X線入射面における皮膚線量；平均値(範囲)	著者 / 年
脳神経領域の血管塞栓術	AVM：3.74 Gy (0.043～12.68)	Miller / 2003
	脳動脈瘤：3.78 Gy (1.28～9.81)	
	腫瘍：3.77 Gy (0.60～10.91)	
HCCに対するTACE	I.I.装置：1.07 Gy (0.51～1.88) FPD装置：0.28 Gy (0.13～0.47)	Suzuki / 2005
TIPS	病院 A：1.7 Gy (0.9～2.6) 病院 B：0.4 Gy (0.1～1.9)	Zweers / 1998
IVCフィルター留置術	0.22 Gy (0.02～0.68)	Miller / 2003
腎動脈形成術(ステント)	2.02 Gy (0.79～4.24)	Miller / 2003
腸骨動脈形成術(ステント)	1.40 Gy (0.46～3.62)	Miller / 2003
消化管出血に対するIVR	2.77 Gy (0.52～7.09)	Miller / 2003
子宮動脈塞栓術	2.75 Gy (1.22～5.45)	Miller / 2003
胆道ドレナージ	1.16 Gy (0.04～4.83)	Miller / 2003
椎体形成術	1.28 Gy (0.15～3.99)	Miller / 2003

表2 IVRにおける放射線皮膚障害の防止対策^{4,6)}

1. 各施設で標準的な手技を決定する。
2. 各施設で標準的な手技での線量を把握する。
3. 放射線被ばくの影響に関するインフォームドコンセントを得る。
4. 手技中の線量を概算する。
5. 被ばく低減のための手技時の工夫を行う(X線管角度の変更など)。
6. 実際の皮膚線量とその分布を把握し、必要に応じて記録する。
7. 必要に応じて放射線の皮膚への影響を確認するための診察を行う。

以上の場合、皮膚への影響を確認するための再診察を10～14日後に準備すべきであるとしている。なお、高線量被ばくの可能性のあるIVR手技では、予め放射線皮膚障害についてもインフォームド・コンセントを得るべきであるとしている⁴⁾。

従って、術者は患者皮膚線量を概ね把握する必要がある。しかし、患者皮膚線量の評価法は必ずしも確立されてはいない。患者皮膚線量の把握方法としては、患者皮膚表面に線量計を設置して直接測定する方法、面積線量から算出する方法、およびNDD法や患者照射線量管理ネットワークの様に照射条件や装置の規格から線量を推定する方法に大別される⁵⁾。それぞれの評価法の長所短所を把握した上で、適切な評価を行う必要がある。

線量計を用いる場合には、予め線量率・線量レンジを把握した上で、状況にあわせて適切な線量計を選択する必要がある。また、多くの場合、線量計のセンサーには角度依存性やエネルギー依存性があるため、得られた計測値の補正が必要となる。最近では、面積線量およびIVR基準点(アイソセンターからX線管側に15cmの距離)での空気カーマが表示される装置が増えている。この場合、X線管の角度が途中で変更されないのであれば、空気カーマに組織線量変換係数および後方散乱係数を乗じる(通常は空気カーマを1.3～1.4倍する)ことでIVR基準点に皮膚面がある場合の入射皮膚線量を概算することができる。なお、手技中にX線管の角度を変更した場合、この方法では被ばくを受けた皮膚の部位や範囲を推定することは困難であり、最大皮膚線量は過大評価されることとなる。

この面積線量・空気カーマを用いた線量概算法により手技中の患者最大皮膚線量も把握することが可能である。手技中の線量が放射線皮膚障害の閾値に近づいている場合には、X線管の角度を変えることで同一皮膚面への照射が避けられる。なお、面積線量値が利用できない場合には、総透視時間もある程度は患者最大皮膚線量の目安になる。

IVR術者は個々の患者最大皮膚線量だけではなく、自らが行う標準的なIVR手技の際の患者最大皮膚線量も把握しておく必要がある。その線量が他の施設の線量に比べて高い場合や、放射線皮膚障害の閾値に比べて低いといえない場合には、より線量率の低い設定の選択やimage intensifierや血管造影装置の更新も含めて、被ばく低減のための努力を積極的に行うべきであ

表3 回転撮影による3次元画像収集時の患者実効線量および面積線量－実効線量変換係数⁹⁾

	Allura Xper FD20/10	INNOVA 4100	AXIOM Artis dTA
実効線量 [*] (mSv)	1.9	2.2	2.1
変換係数 (mSv Gy ⁻¹ cm ⁻²)	0.4	0.3	0.15

^{*}標準的な体型のファントムに対して被ばくが最も少ないモードを使用した場合の値

ろう。表2にIVRにおける放射線皮膚障害の防止対策をまとめた^{4,6)}。

2) 実効線量

IVRによる患者実効線量は診断X線による実効線量と比べて決して少ないとはいえない。従って、上述した皮膚障害のほかに、確率的影響についても考慮する必要がある。全身での確率的影響を考慮する際に用いられるのが実効線量であり、各臓器の放射線感受性を考慮して、各臓器の等価線量を重みづけ平均して算出される。

100mSv以下の被ばくにより、発癌のリスクが高まるかどうかは現時点では不明であるが、ICRPの放射線防護体系は、「確率的影響には閾値が存在せず、線量と反応は正比例する」という説(閾値なしの直線化説)に基づいている。この仮説に基づき、ICRPの防護体系では、過剰生涯がん死亡確率は、子供を含む全集団に対して $5.5 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ 、成人のみの集団に対して $4.1 \times 10^{-2}/\text{Sv}$ と見積もられている⁷⁾。

血管造影検査における実効線量は面積線量値に換算係数(撮影部位、管電圧、総ろ過、X線管の角度、照射野の大きさにより異なる)をかけることで概算することができる。回転撮影による3次元画像収集の際にも同様に、面積線量値に換算係数をかけることで、実効線量を算出することが可能である(表3)⁸⁾。

術者の被ばく防護

1) 線量評価法と線量限度

術者の被ばく防護において重要なことは、まず、個人線量計を適切に装着し、自らの被ばく量をきちんと把握することである。

医療法施行規則により放射線診療従事者には外部被ばく測定のための個人被ばく線量計の装着が義務づけられている。IVRのような体幹部の不均等被ばくの場合、体幹部の基本部位(男性は胸部、女性は腹部)のプロテクターの内側および頭部または頸部において線量を測定する。

・実効線量は次式により算出する。

$$HE = 0.11 \times Ha + 0.89 \times Hb$$

HE：実効線量、Ha：頭頸部の線量計に基づく1cm線量等量、Hb：体幹部の基本部位の線量計に基づく1cm線量等量

眼の水晶体にかかわる等価線量は頭頸部に装着した

線量計の測定値に基づき算出し、皮膚の等価線量は各線量計の測定値の最大値に基づき算出する。

また、医療法施行規則における放射線診療従事者等の線量限度は以下になっている。

- ・実効線量限度は、5年間で100mSvかつ1年間につき50mSvである。妊娠可能な女子の場合は3月間に5mSvである。
- ・等価線量限度は、眼の水晶体について1年間につき150mSv、皮膚については1年間につき500mSvである。

2) IVR術者の被ばく低減策

術者の被ばく量には、先述した患者被ばくに影響を与える因子の他に、防護対策が大きな影響を及ぼす。防護対策の基本は外部被ばく防護の三原則（時間・距離・遮蔽）である。術者被ばくのほとんどは患者からの散乱線によるため、透視時間を最小限に抑えるなどの患者被ばく量の低減策は、多くの場合術者被ばくの低減にも有効である。散乱線の線量レベルは患者からの距離とともに減少するため、手技の妨げとならない範囲で、可能な限り照射野から離れた位置で手技を行うべきである。なお、直接線は散乱線と比較して桁違いに線量が多いため、照射野を絞ることや管球の角度を工夫することなどで、照射野に直接手指が入ることは避けるべきである。さらに、患者からの散乱線は前方（検出器側）より後方（X線管側）に多いことは留意すべきである。従って、強斜位や側方からの透視の場合には、検出器側に立ち手技を行う方が、被ばく量を軽減できる。

防護用具を適切に使用することも術者被ばくの防護対策として重要である。防護衣は体格に合わせて選択し、全重量が脊椎にかかることがないように着用すべきである。最近では、含鉛防護衣と同等の遮蔽効果のあるより軽量の素材を用いた防護衣も販売されている。なお、防護衣の品質はきちんと管理されるべきである。

「白内障（軽度の混濁）の閾値は急性被ばくで5Gy（2Gy）、慢性被ばくで8Gy（5Gy）であり、閾値以下の被ばくであれば白内障は生じない」と従来は考えられていたが、放射線による白内障の閾値がより低いことを示唆する論文が最近いくつか発表されている^{9,10)}。

従って、術者は水晶体をより積極的に防護するべきかもしれない。水晶体の被ばく防護には防護眼鏡・ゴーグルが有用である。0.07mm鉛当量程度の軽量のものでも70%程度の遮蔽効果がある。

血管造影装置に付加する防護用具（吊り下げ式含鉛透明衝立、寝台に取り付ける鉛カーテンなど）も術者被ばく防護には有用である。これらの補助的な防護用具を使用することで、術者が着用する防護用具の重量を増やすことなく防護効果を高めることが出来る。但し、このような装置に付加する防護用具は、手技の妨げとなる可能性があるため、遮蔽効果の高さよりむしろ使いやすさを考慮した上で設置すべきかと思われる。

結 語

IVRの放射線防護において、術者は患者及び術者の線量を把握した上で必要な対策を行うべきである。

【参考文献】

- 1) Miller DL, Balter S, Cole PE, et al: Radiation doses in interventional radiology procedures: the RAD-IR study: part I: skin dose. J Vasc Interv Radiol 14: 977-990, 2003.
- 2) Suzuki S, Furui S, Kobayashi I, et al: Radiation dose of patients and radiologists during transcatheter arterial embolization for hepatocellular carcinoma: comparison of new unit with digital flat-panel-system and conventional unit. AJR Am J Roengenol 185: 855-859, 2005.
- 3) Zweers D, Geleijns J, Aarts NJ, et al: Patient and staff radiation dose in fluoroscopy-guided TIPS procedures and dose reduction, using dedicated fluoroscopy exposure settings. Br J Radiol 71: 672-676, 1998.
- 4) International commission on radiological protection. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures. ICRP Publication 85. Ann ICRP 2000.
- 5) 永井良三, 栗井一夫, 水谷 宏, 他: 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2004~2005年度合同研究班報告) 循環器診療における放射線被ばくに関するガイドライン. Circulation Journal 70 (Suppl IV): 1247-1299, 2006.
- 6) Food and Drug Administration. Recording information in the patient's medical record that identifies the potential for serious X-ray-induced skin injuries following Fluoroscopic guided procedures. Statement 15 Sept. 1995; Food and Drug Administration, Rockville, MD, USA.
- 7) International commission on radiological protection. The 2007 recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP 2007.
- 8) Suzuki S, Yamaguchi I, Kidouchi K, et al: Evaluation of effective dose during abdominal three-dimensional imaging for three flat-panel-detector angiography systems. Cardiovasc Intervent Radiol [Epub ahead of print].
- 9) Nakashima E, Neriishi K, Minamoto A: A reanalysis of atomic-bomb cataract data, 2000-2002: a threshold analysis. Health Phys 90: 154-160, 2006.
- 10) Worgul BV, Kundiye YI, Sergiyenko NM, et al: Cataracts among Chernobyl clean-up workers: implications regarding permissible eye exposures. Radiat Res 167: 233-243, 2007.

放射線防護

3. CTガイド下IVRの被曝防護

日立総合病院 放射線科
入江敏之，倉持正志

術者の被曝防護

古典的なCTガイド下IVRでは、針先位置の確認撮影の度に術者は室外に退避していたので術者の被曝は皆無であった。しかしCT透視の導入以来¹⁾、撮影時に術者は患者の傍に位置しており術者の被曝防護が関心事項となった。特に術者の手の被曝防護は重要であり、CT連続曝射中にガントリー内に手指を入れた場合、数回の手技でICRPの勧告上限値500mSv/年を越えてしまうことを認識しておく必要がある。盲目的穿刺を行い、CT撮影時に針から遠く手を離しておけば手の被曝はほぼ皆無となるが、小さな病変を標的とした精度の高いCT透視ガイド下IVRを行うためには針保持器具の併用は必須といえる。逆説的に考えれば、容易な症例では敢えて古典的な方法でCTガイド下IVRを行うことも術者の被曝防護には重要なかもしれない。このような判断を行うためにも自己の被曝線量を常に計測・把握し、勧告値以下に保つ必要がある。

術者の手の直接被曝を防ぐために、プラスチック製のペアンや専用の補助器具が針の保持目的に用いられている(図1)。この際に着目すべきことはCT断面と

指先との距離である。おそらくは線量率は距離の2乗に反比例するので距離は長い方が被曝低減に有利であるが、あまりに長いと操作性に難が生じる。妥協点として7～15cmぐらいの距離を保てる針保持器具が販売されている²⁾。

CT透視はシングルスライスCTをベースに開発されたが、現時点でCT透視を用いるとすれば多くの施設でマルチスライスCT透視を用いていると思われる。その他、マルチスライスCTをベースとして開発された穿刺支援CTシステムとしてCT透視機能を省いたGuideshotシステムがある³⁾。いずれのシステムも3断面同時撮影・表示により、シングルスライスCT透視の弱点であったCT断面からの針の逸脱をカバーできるもので、穿刺のためのCT曝射時間を大幅に削減できるようになった。結果として術者の手の被曝は大幅に減少した。また、以前は鉛板を利用して更に手の散乱線被曝を削減していたが(図2)²⁾、鉛板は付着した血液の洗浄等の手間もかかることもあり、現在は他のIVRによる被曝を加算しても十分に許容範囲内なので鉛板は用いていない。もちろん、CT透視下IVRの件数が多く、実際の被曝線量計測で手の被曝が多い術者

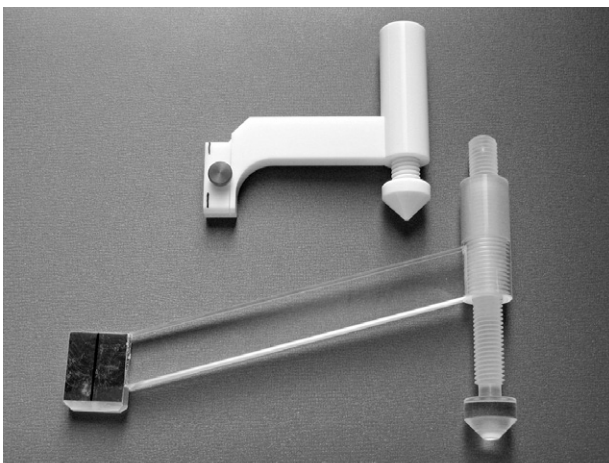


図1 市販及び特注のI-Iデバイス

市販のI-Iデバイスは断面とハンドルの距離は7cmであるが、工務店で特別に作成してもらったデバイス(非売品)では手の被曝線量を減らす目的で距離を15cmに設定した。距離を15cmに設定したI-Iデバイスも現在は市販され入手可能である。



図2 鉛板を用いた手の被曝防護

鉛板を保持器具の下に敷くことにより患者からの散乱線を防ぐことができる。実測上は1mm厚の鉛板で約75%の削減が可能である。

技術教育セミナー / 放射線防護

にとっては鉛板の使用は被曝防護に有効な方法である。

当施設で鉛板使用を中止したことでもわかるように、被曝防護で最も重要・基本的なことは常に被曝線



図3 計測リングの装着

リングの計測面を手掌側にして装着すると指の動き・感覚に支障をきたしにくい(矢印)。

量を計測・把握することといえる。しかしながら手の被曝線量を実際に計測している術者は意外に少ない。これは計測指輪を装着すると器具の操作に支障をきたすと考えている術者が多いためかもしれない。そのような場合、計測面を手掌側にとすると指の動きに支障をきたさないので一度試していただきたい(図3)。もちろん、指輪を装着するためには手を洗浄消毒することはできない。

患者の被曝防護

穿刺時のCT被曝の他、穿刺前後にも穿刺位置決定・合併症評価のためのCT撮影が行われ患者は被曝する。実際に患者の被曝線量を計測した経験はないが、スライス厚×スライス枚(回)数×1スライスのmAsを被曝の基準値として考えた場合、シングルスライスCT透視を用いたIVRでの患者被曝を左右するものは主にCT透視によるものであり、穿刺前後での撮影による被曝の約2倍以上であった。しかし当院でGuideshotシステムを導入して以来、穿刺前後での撮影による被

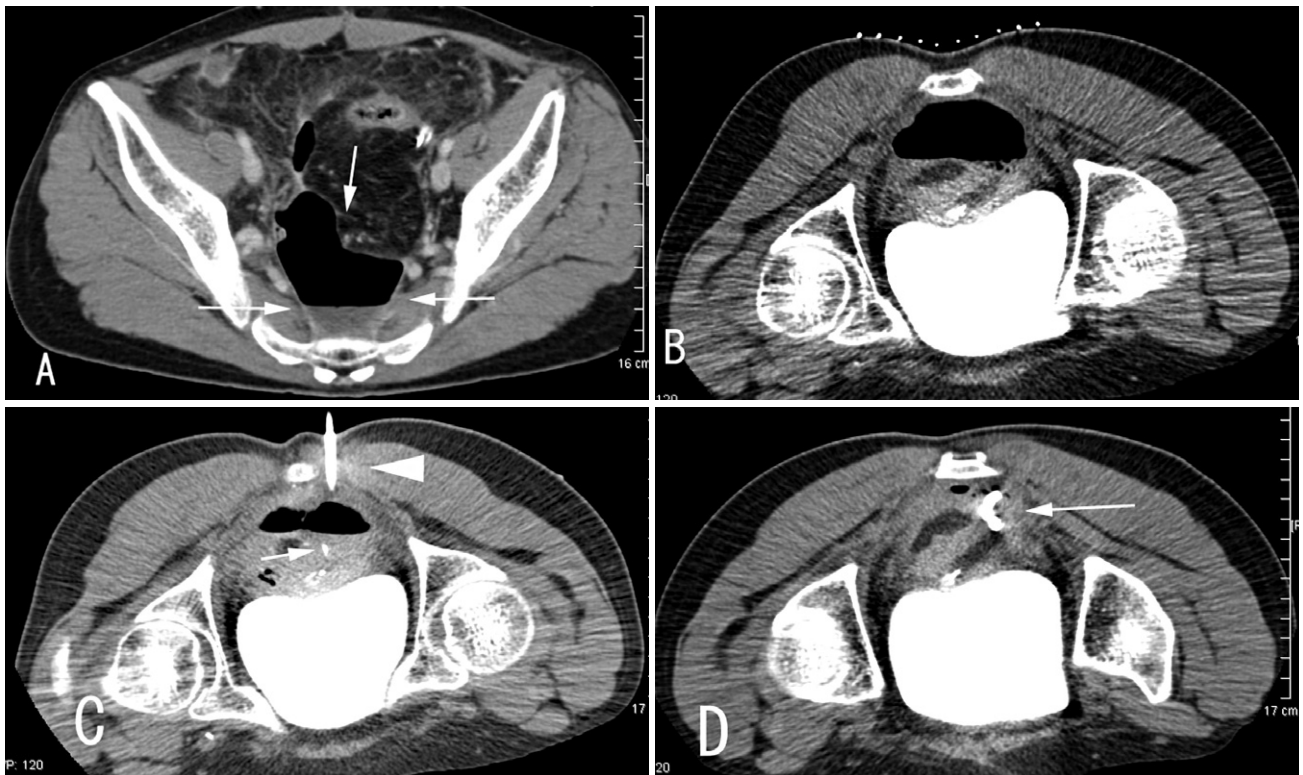


図4 Guideshotシステムを用いたドレーナージューブ留置

50歳代・男性、直腸癌術後に骨盤内膿瘍を生じた(矢印, A)。Guideshotシステムのみを用いて8.5Fチューブを膿瘍に留置した。膿瘍の診断目的造影CTは170mAs/回転で撮影された(A)。穿刺位置決定の撮影は30mAs/回転(B)で撮影され、同時に低い管球電流でも膿瘍及び近傍の解剖構造は把握できると判断した。穿刺・留置のための撮影は1cm厚・40mAs/回転で合計14回撮影された。3断面の中心のスライスでは膿瘍内のガイドワイヤー(矢印, C)及び穿刺途中のチューブが描出されている(矢頭, C)。穿刺・膿瘍吸引後の撮影は70mAs/回転(D)で撮影された。チューブの先端は内容物の完全吸引により表層にシフトした(矢印, D)。穿刺のための撮影による患者被曝は、穿刺前後の撮影による被曝の約40%と推定された。また、穿刺位置決定、穿刺・チューブ留置、及び留置後の撮影の合計の被曝は、骨盤内膿瘍診断のためのCT撮影による被曝の約50%であった。

曝の方が多く，Guideshotシステムによる穿刺のための被曝の約2倍であった³⁾。トータルでの患者被曝を減少するには穿刺前後での撮影条件により多くの注意を払う必要があるといえる。例えば我々は，穿刺前の位置決定のための撮影条件は管球電流を少なくするよう努めている(図4)。また，撮影範囲も最小限としている。このような小さな積み重ねが患者の被曝防護には非常に重要である。

CTガイド下IVRにおける術者・患者の被曝防護のための結論

- 1) 針保持器具を使用する。
- 2) マルチスライスCTを使用する。
- 3) 術者の被曝線量を常に計測・把握する。
- 4) 穿刺前後でのCT撮影条件にも留意する。

【参考文献】

- 1) Katada K, Kato R, Anno H, et al: Guidance with real time CT fluoroscopy: early clinical experience. Radiology 200; 851-856, 1996.
- 2) Irie T, Kajitani M, Itai Y: CT fluoroscopy-guided intervention: marked reduction of scattered radiation dose to the physician's hand by use of a lead plate and an improved I-I device. J Vasc Interv Radiol 12: 1417-1421, 2001.
- 3) Irie T, Kuramochi M: Newly developed application system for CT-guided puncture based on multidetector row CT without CT fluoroscopy. Radiat Med 25: 411-416, 2007.