

医療分野での放射線利用、これにともなう被ばくと放射線防護について

(はじめに)

近年、診断、治療等、医療分野での放射線利用は目覚ましい。放射線を用いた診断や治療の最も大きな利点は、人のカラダにメスを入れることなく診断、治療が可能であるため、患者への負担が小さいということである。また、このため、疾患の早期発見等にも大いに役立っている。一方、わが国は放射線を利用した検査装置の数、受診回数ともに高く、放射線発生装置の線量低減のための努力が進められているものの、一人当たりの医療被ばくは世界平均に比べて約4倍高い。このため、これまでも医療被ばくによって受けた線量の健康影響については議論的となってきた。そこで、最近の医療分野での放射線利用、医療被ばくの現状及びその防護の考え方についてとりまとめる。

(診断・手法)

放射線による診断は、一般的な健康診断でも数多く利用されている。最近では、胸部単純X線撮影装置による検査だけでなく、臓器の3次元画像化が可能なCT(コンピュータ断層撮影)検査、乳房のがんの診断にはマンモグラフィCT検査が行われている。最大320列の検出器を兼ね備えたマルチスライスCT(MDCT)も登場しており、人体の幅160mmの範囲を1回転0.35秒という短時間で撮影するため、心臓等、動きを止めることのできない臓器を撮影することができるようになった。被ばく線量は、検査によって異なるものの、この320列MDCTによる冠動脈造影にかかるスキャン時間は現在の一般的な64列MDCTの3分の1となり、患者の被ばく線量は3割低減されたといわれている¹⁾。そして、PET(ポジトロン断層撮影)、SPECT(単一光子放射断層撮影)といった核医学検査も盛んになってきた。

(診断・件数/頻度)

原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)2008年レポート²⁾では、1997年から2007年の10年間においては、医療に関する技術レベル(ヘルスケアレベル)が最も高いレベルIの国々(わが国も含まれる)では、通常の医療診断での放射線利用は、年間1000人当たり1332件、歯科利用が275件と報告されている。一方、レベルIIの国々では、通常の診断利用が332件、歯科利用が16件、レベルIII及びIVの国々ではそれぞれ20件と3件となっている。世界平均としては、通常の診断利用が1000人当たり488件、歯科利用が74件となっている。国の社会経済、医療の普及レベル等の違いにより、放射線を利用した診断件数は大きく異なる。世界的に、放射線を利用した診断件数は、ヘルスケアレベルの向上により近年増加しており、これまで診断件数の少なかった地域において、件数が増加すると、今後も世界的に診断による医療被ばく線量が高まる可能性がある。わが国の放射線を利用した診断については、マルチスライスCTの台数が5960台、他のCTが6040台、マンモグラフィが3792台、PET、PET/CT、SPECTがそれぞれ199、267、1337台(平成20年)となっている。UNSCEARによると、日本

の人口あたりの CT 保有台数は、調査の中で最も保有台数が少なかったメキシコと比較して約 60 倍、2 番目に CT を多く所有しているオーストラリアと比較しても約 2 倍、アメリカの約 3 倍となっており、医療先進国の中でも格段に一人当たりの CT 保有台数が多い。

(診断・線量)

個人が診断によって受ける線量(治療を除く)の世界の平均的な値は現在年あたり 0.6mSv である²⁾。これは、一般公衆が 1 年間に自然放射線源から受ける線量(2.4mSv)について、大きな値である。さらに、ヘルスケアレベル I のいくつかの国では、1997 年から 2007 年の間に、歴史上はじめて、診断による集積線量が自然放射線源から受ける被ばく線量を上回る結果となった。ヘルスケアレベル別に一人当たりの線量を示すと、レベル I の国々の医療診断による実効線量は 1.91mSv、歯科診断では 0.0064mSv、レベル II の国々の医療診断では 0.32mSv、歯科診断では 0.0004mSv、レベル III 及び IV の国々では、医療診断が 0.03mSv、歯科診断が 5.1×10^{-5} mSv となっている。わが国の CT の年間診断件数と集団線量から、国民一人当たりの年間被ばく線量を算出すると、1989 年には 0.8mSv であったが、2000 年には、CT の保有台数が約 2 倍となったこととともない診断件数も約 3 倍に増加、この結果、線量も約 3 倍に増加して 2.3mSv となっている²⁾。

個々の診断に対する線量は、国際放射線防護委員会(ICRP)が 2007 年に発刊した Publication 102 によると、シングルスライス CT またはマルチスライス CT による 1 回あたりの撮影は実効線量で 2 から 20mSv となる³⁾。特に、骨盤を含む腹部の場合、照射部位も広く最も線量が高くなる。1997 年から 2007 年のヘルスケアレベル I の国々における 1 検査当たりの胸部 X 線撮影、腹部 C 線撮影、マンモグラフィ、CT 検査、血管造影の平均実効線量は、0.07、0.82、0.26、7.4 及び 9.3mSv となり、血管造影による線量が最も高く、次いで CT 検査となっている。2006 年の米国の年平均実効線量は、自然放射線 3.1mSv に対し、CT 検査が 1.5mSv、核医学利用が 0.8mSv、心臓診断が 0.3mSv と報告されている²⁾。診断とは異なるが、CT 画像等による誘導のもと、体内にカテーテルを挿入して治療を行うインターベンショナル・ラジオロジー(IVR)は 0.4mSv と報告されている。これは、一般的な胸部 CT 撮影より撮像時間が長いいため、被ばく線量が高くなるためである。

(治療・手法)

放射線利用した治療としては、Co-60 γ 線を利用した遠隔治療や脳腫瘍や脳血管の奇形などの治療に用いられ、病変の部分に集中的に放射線を照射するガンマナイフ、直線加速器を利用して病巣に電子線や中性子線を照射する方法、また、前立腺がんなどに用いられる I-125 や Ir-129 の小密封線源を体内に挿入する治療等がある。また、照射した放射線の線量が体内深部で高くなり、手術が難しい場所や深部にある腫瘍を集中的に攻撃できる陽子線治療や重粒子線治療法等が最近、注目されている。さらに、ホウ素中性子補足療法(BNCT)は、腫瘍細胞内にホウ素を取り込ませ、体外から熱中性子または熱外中性子を照射することにより、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 核反応により α 線と Li 反跳核を発生させ、腫瘍細胞を破壊する⁴⁾。この治療法は、発生する荷電粒子は飛程が細胞径を超えないため、正常細胞をほとんど傷つけることなく、腫瘍細胞のみにダメージを与えることができる。中性子源として、原子炉を利用するが、加速器を用いる方法も開発されている。

(治療・線量)

放射線治療の目的は腫瘍等の標的組織を根絶する、または患者の症状を緩和することである。このため、治療で受ける放射線量は診断に比べ、非常に高くなる。病巣周辺の局所的な被ばくとなるが、1回に照射する線量は数十 Gy^{注)}となる⁵⁾。例えば、小児の脳腫瘍のうち、もっとも発生頻度が高い髄芽腫の場合、全脳脊髄に30-35Gy、後頭蓋窩に20Gy程度照射する。舌がんの場合、前立腺がん治療と同様に、小線源を組織内に挿入して照射するが、この線量は65-70Gyである⁵⁾。このため、病巣周辺の正常組織にやけどに相当するような確定的影響が発生する。したがって、放射線治療においては腫瘍に線量を与えることだけでなく、腫瘍周囲の正常組織の防護の計画も最適化に含まれる。

注) 治療のために照射する線量は、病巣周辺の局所の線量を吸収線量で表すことが多く、その場合の単位は Gy(グレイ)を用いる。治療の被ばくにより起こる二次がんなどに対する放射線防護のための線量としては、実効線量(Sv)が用いられるが、その場合は病巣部周辺で照射野に入ってしまった部分や病巣部での散乱などによって受ける全身の正常組織での線量を評価することになり、それらは、ほとんどの場合照射する線量と比べて、非常に低いと考えられる。

(治療・事故)

放射線治療での事故的な被ばくについては、ICRP Publ. 86、87、112 等に、過去の経験とその予防としてまとめている⁶⁻⁹⁾。各国において Co-60 照射装置の更新に伴う減衰補正ミスや前立腺がん治療時の線源確認ミス等による過剰被ばくによる組織の炎症等の早期障害、組織の壊死等の晩発性障害、死亡事故が起こっている。このような医療事故の教訓として、誤操作を防ぐための安全装置等の取り付け等、これまでに技術面ではさまざまな改善がなされている。

わが国では、最近、腎臓の機能をみるための腎動態シンチグラフィや腎臓の位置や大きさをみるための腎静態シンチグラフィの検査に使用する放射性医薬品(Tc-99)の過剰投与が報告された¹⁰⁾。通常の小児に対する投与量の5倍以上、最も投与量の多かった患者で通常の40倍であった。このような過剰投与が起きた原因は、検査時間が長く、患者が小児の場合、撮影時に動いてしまい画像が不鮮明になることから短時間で撮影するためであった。また、医師は投与量を確認していなかったといった問題もあった。幸い、現時点では、過剰投与と推測される患者に急性障害や発がん等の影響は出ていない。関連学会は、これまでも核医学検査の安全確保の観点から「核医学事故防止指針」や「放射性医薬品取り扱いガイドライン」等を作成、広く開示していたが、今後、医療における放射線利用の適性利用にむけて一層努力するとの声明を出している¹¹⁾。このほか、医療放射線利用における従事者の被ばく事故としては、血管造影作業時の医療従事者の過剰被ばくや放射線発生装置据え付け調整時に天井裏にいる別の作業員に気付かず、装置据え付け者がX線を発生させたために天井裏の作業員が被ばくする等が報告されている¹²⁾。

(医療被ばくの正当化・最適化)

診断・治療による被ばく(医療被ばく)の特徴は、意図的に実施するものであり、患者にとっては直接的な便益となることである。また、医療被ばくが職業被ばくや公衆被ばくと異なる点は、線量限度が設けられていないことである。患者への線量を制限することは、診断のための画像に影響を与える可能性が

ある、十分な治療効果が得られないといったような、患者にとって損害よりも多くの利益を得ることができないといったことになってしまうかもしれない。しかし、いくら良い画像が撮影できたとしても、より低い線量で同等の効果が得られるなら、不必要な被ばくは避けるべきである。

ICRP が掲げる防護の目的は、第一に人の健康を防護することである¹³⁾。そのためには、確定的(やけどのような組織反応)を防止し、がん、遺伝的影響といった確率的影響を合理的に達成できる程度に低減する必要がある。この目的を達成するための方針としての放射線防護の3つの基本原則としては、「正当化」、「防護の最適化」及び「線量限度の適用」を挙げている。「正当化」と「最適化」については、医療被ばくを含むすべての被ばく状況に適用されるが、線量限度の適用に関しては、医療被ばくは除かれる。また、「正当化」や「防護の最適化」についてもその適用については医療被ばくと、職業被ばく、公衆被ばくでは考え方が異なる。このため、ICRP は、医療被ばくへの基本勧告の適用には別のガイダンスが必要であるとして、放射線防護と医学の放射線利用の安全については Publication 73 に示した¹⁴⁾。この考え方は、最新の ICRP 基本勧告にも引き継がれている。

(正当化の意味)

ICRP は医療被ばくの正当化については、3つのレベルが適用されるとしている^{13,14)}。レベル1は「患者に被ばくによる害よりも便益を多く与える場合に受け入れられること」、レベル2は「特定の目的を持つ特定の手法が明確にされ、これが正当化されること」である。レベル3は、「患者ひとりひとりに異なる放射線の利用方法が適用されるが、この適用が正当化されること」。それゆえ、「すべての個人の医療被ばくは、個人の特徴や被ばくの目的を考慮して、あらかじめ正当化されるべきである。」としている。

(最適化と診断参考レベル)

ICRP は最適化の観点から診断とIVRによる被ばくについては、診断参考レベルを用いることを勧告している¹³⁻¹⁵⁾。国際原子力機関(IAEA)では、1992年に発行した国際基本安全基準(BSS)において診断やIVRに対する具体的なガイダンスレベルを提示した^{16, 17)}。このガイダンスレベルは、例えば、頭部単純X線撮影(正面)で5mGy、胸椎(側面)20mGy、腰椎(側面)30mGy、骨盤(正面)で10mGy等となっている。2011年にBSSの改定版を発行したが、その中で、ガイダンスレベルの具体的な値を示さず、診断参考レベルは、国や地域での現状に適切な値を設定することとして、国や地域で線量の分布を調査して設定することとしている。わが国では、2006年に日本放射線技師会が医療被ばくガイドラインを提示しており、単純X線撮影に加え、注腸検査、血管造影等についても値が記載されており、IAEAのガイダンスレベルよりも低い目標値が与えられている¹⁸⁾。

(医療放射線による被ばくと発がん)

X線診断による発がんの可能性に関しては、2004年にLANCET誌にGonzalezらが、15カ国において調査した結果を発表した¹⁹⁾。この論文では、わが国のX線診断の頻度は最も高く、X線診断時の線量から、しきい値なし直線モデルにより発がん率を算定した場合、がん患者全体の3.2%(年間7587例の発がんに相当)に相当すると報告され、当時、全国紙でも取り上げられて話題となった。また、最近、週刊誌等にも、「医療の常識を疑え」として、上記英国の研究成果を取り上げ、「CT検査でがんになる。『発がん性の有無を(担当医に)尋ねて、「CT一回では発がん性は心配ない」という答えも論外で、やはり帰宅

すべき』といった記事が掲載された²⁰⁾。UNSCEAR2008 年レポートにも記載されているとおり、事実、わが国の国民あたりの医療被ばく線量は、諸外国に比べて高い。しかし、診断によるわが国の医療被ばくは年間で平均 2.3mSv であり、線量としては非常に低く、100mSv を下回るような低線量・低線量率での被ばくに対して健康影響が現われるかどうかについては慎重に取り扱う必要がある。ICRP は、放射線防護の観点から、100mSv を下回る放射線量について、がんのような確率的影響のリスクを管理するためには、しきい値なし直線(LNT)モデルが、最も良い実用的アプローチであり、「予防原則」にふさわしいとしている。一方、低線量においては不確実性が大きく、このモデルの根拠となっている仮説を明確に実証する生物学的・疫学的知見はすぐに得られそうにないともいっている。わが国の人口の約 30%ががんで死亡していることを考えると、がん患者のうちの 3.2%が医療被ばくに起因するとしても、個人の習慣の違い等によって不確かさは大きく、放射線による被ばくで高められたものがどうかを明確に区別することはできないだろう。注意すべきは、LNT モデルは、放射線防護のために便宜的に使用するものであり、X 線診断のような低線量の被ばくに対しての発がん率増加の議論に使用することができないということである。また、わが国において、一般的な X 線診断や CT 検査、核医学検査により、がんや遺伝的影響が現われたといった報告はなされていない¹⁰⁾。

(妊娠と放射線)

妊娠した女性に対する放射線被ばくをとまなう診断・治療は、母体の健康状態と胎児への影響を勘案して注意して行う必要がある²¹⁾。胎児が 500 から 1000mGy 被ばくした場合、着床前期ならば流産、器官形成期(4 週から 4 か月)ならば奇形、胎児成長期(5 か月から出産)ならば成長障害、精神遅滞(精神遅滞は 25 週まで)といった確定的影響が発生する。また、全期間において、胎児の被ばくは、がん、遺伝的影響といった確率的影響の発生を増加させる。しかしながら、胎児が受ける被ばく線量が 100mGy 以下の場合、奇形の自然発生確率を上昇させることなく、発がん率も低い。また、自然に起こる流産や奇形が発生するレベルに比べても十分に低い。胎児への被ばく線量が高くなると考えられる骨盤 CT 撮影でも 1 回数十 mGy、一般的な X 線診断で受ける被ばく線量は 1mGy 以下である。したがって、診断により受けた線量レベルでは、放射線による胎児の放射線影響を区別することは難しいだろう。しかし、妊娠している女性の医療被ばくは可能な限り避けるべきである。母体を優先して治療や IVR 等で、1 回の被ばく線量が 100mGy を超える場合には、胎児を照射野から避け、可能な限り胎児の被ばく線量を低くする等、十分な配慮が必要である。さらに、内部被ばくを伴う核医学検査や放射線治療の場合には、胎児への影響に加え、乳児への授乳も控える必要がある。

(介助者、介護者、医学研究志願者の被ばく)

ICRP は 2007 年勧告にも明記している通り、診断、IVR 及び放射線治療により患者が受ける被ばくを医療被ばくに区分するとともに、これらの患者を支援・介護する家族、生物医学的研究への志願者が受ける被ばく等についても、医療被ばくに区分している¹³⁾。このため、このような人々には職業被ばくや公衆被ばくのような線量限度は適用されない。しかし、これらの人々が過剰な被ばくを受けることのないよう、その予測線量の上限の値として、線量拘束値を用いることが有効であるとしている。例えば、生物医学研究志願者のような社会への利益が少ない場合には 0.1mSv 以下、それほど大きくない場合は 1-10 mSv、大きい場合は 10mSv 以上、介護や付き添いに対しては、1 事象につき 5mSv とするよう勧告して

いる。

(まとめと結論)

医療分野における放射線利用は、診断、治療において重要な役割を果たしてきた。放射線を利用する以外にも MRI(核磁気共鳴画像)装置や超音波診断装置等があるが、撮影時間や撮影部位等にそれぞれの方法に得意・不得意分野があることから、今後も放射線は医療分野において、痛みや手術を伴わない診断・治療の有用な手段として利用され続けるであろう。

患者等の医療被ばくに対する放射線防護の観点からは、医療被ばくについても、職業人や公衆の被ばくと同様に、放射線被ばくの状況を変化させるいかなる決定も害より便益を大きくすべきであるといった正当化、また、個人の線量を合理的に達可能な限り低減すべきであるといった最適化の原則が適用されることは紛れもない事実である。医療被ばくの最適化に関しては参考レベルの使用が有効であり、ICRP は患者の線量を医療目的とバランスがとれるように管理するための手段であるとしている。国際的、国内的にも、個々の診断に対して診断参考レベルやガイダンスレベル等が設定されており、わが国においては国際的に設定された基準よりも低いレベルで運用するなど医療被ばく低減の意識は高い。

今後、診断・治療件数や診断撮影枚数の増加、撮影範囲の拡大等により、線量の増加が懸念されるが、これまでの放射線を利用した診断、治療技術の進展を考えると、放射線発生源や照射野を決定するコリメータの改良、放射線検出部の高精度化に加え、画像解析技術や再構築技術の開発等により、線量低減の余地があるだろう。また、診断・治療の手技によっても線量が異なり、線量低減の観点からの術者の指導・育成によっても患者の被ばく線量の低減が期待できる。

ICRP は放射線防護の観点から線量と影響の関係を LNT モデルを用いて推定することを推奨している。一方、最も良い実用的アプローチ、「予防原則」といったことを強調しており、低線量においては生物学的・疫学的な知見から人の健康影響に関しては明確になっていない。このため、特に LNT モデルを低線量の被ばくの健康影響の推定に使用する場合には、結果の解釈を慎重に行う必要があるだろう。

また、このような事実をインフォームドコンセントの立場から医療関係者が患者に説明する場合、放射線の影響について正確かつわかりやすく説明する必要がある。正当化及び最適化を円滑に進めるためにも、また、医療における放射線関連事故の発生防止の観点からも、防護の専門家、医療関係者及び患者間のさらなるコミュニケーションも重要な課題の一つとなるであろう。

参考文献

- 1) 日経メディカルオンライン、<http://medical.nikkeibp.co.jp/leaf/all/gakkai/jcs2009/200903/509936.html>, 平成 23 年 2 月 17 日閲覧
- 2) UNSCEAR, UNSCEAR 2008, Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B., Volume I, 2010.
- 3) ICRP, ICRP Publication 102, Managing Patient Dose in Multi-Detector Computed Tomography (MDCT), Ann. ICRP 37 (1), 2007.
- 4) 熊取町, ホウ素中性子補足療法 (BNCT) PR パンフレット, <http://www.town.kumatori.lg.jp/ikkwebBrowse/material/files/group/48/bnctpamphlet.pdf>, 平成 25 年 5 月 28 日閲覧.
- 5) 渡部陽一他, 放射線治療科学概論, 医療科学社, 2008.
- 6) ICRP, ICRP Publication 86, Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy, Ann. ICRP 30 (3), 2000.
- 7) ICRP, ICRP Publication 87, Prevention of Accidents to Patients Undergoing Radiation Therapy, Ann. ICRP 30 (3), 2000.
- 8) ICRP, ICRP Publication 105, Radiological Protection in Medicine, Ann. ICRP 37 (6), 2007.
- 9) ICRP, ICRP Publication 112, Preventing Accidental Exposures from New External Beam Radiation

- Therapy Technologies, Ann. 39 (4), 2009.
- 10) 甲府市立甲府病院, RI 検査についてのお詫び, http://www.city-kofu-hp.jp/oshirase/files/ri_h230903.pdf, 平成 23 年 10 月 23 日閲覧.
 - 11) 日本核医学会, 放射性医薬品の過剰投与について, [http://www.jsnm.org/japanese/11-09-01- 0](http://www.jsnm.org/japanese/11-09-01-0), 平成 23 年 10 月 23 日閲覧.
 - 12) 文部科学省, <http://www.mext.go.jp>, 平成 22 年 12 月 2 日閲覧.
 - 13) ICRP, ICRP Publication 103, 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Ann. ICRP 37 (2-4), 2007.
 - 14) ICRP, ICRP Publication 73, Radiological Protection and Safety in Medicine Ann. ICRP 26 (2), 1996.
 - 15) ICRP, ICRP Supporting Guidance 2, Radiation and your patient – A Guide for Medical Practitioners Ann. ICRP 31 (4), 2001.
 - 16) IAEA, Safety Series No.115, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for Safety of Radiation Sources, 1996.
 - 17) IAEA, Safety Reports Series No.59 Establishing Guidance Levels in X Ray Guided Medical Interventional Procedures: A Pilot Study, 2009.
 - 18) 日本放射線技術学会, 医療被ばくガイドライン 2006, <http://www.jart.jp/guideline/index.html>, 平成 22 年 12 月 2 日閲覧.
 - 19) A. Berrington de Gonzalez, S Darby, Risk of cancer from diagnostic X-rays estimates for the UK and 14 other countries, 363, LANCET, 2004.
 - 20) 近藤誠, 衝撃レポート CT 検査でがんになる, 文芸春秋, 2010.
 - 21) ICRP, ICRP Publication 84, Pregnancy and Medical Radiation, Ann. ICRP 30 (1), 2000.