

伴侶動物の核医学診療に関わる人間の外部被曝線量評価

藤井雅範¹⁾、山田直明¹⁾、小松原直美¹⁾、夏堀雅宏¹⁾、佐野忠士¹⁾

石川達也²⁾、畠山 智³⁾、二ツ川章二³⁾、寺崎一典⁴⁾、平山英夫⁵⁾、伊藤伸彦¹⁾

¹⁾ 北里大学獣医畜産学部
034-8628 青森県十和田市東 23 番地 35-1

²⁾ 旭テクノグラス(株)
273-0044 千葉県船橋市行田一丁目 50 番 1 号

³⁾ 日本アイソトープ協会仁科記念サイクロترونセンター
020-0173 岩手郡滝沢村字留が森 348-58

⁴⁾ 岩手医大サイクロترونセンター
020-0173 岩手郡滝沢村字留が森 348-58

⁵⁾ 高エネルギー加速器機構放射線科学センター
305-0801 つくば市大穂 1-1

1 緒言

欧米では既にイヌ、ネコやウマを対象とした獣医核医学が広く行われている。獣医核医学は、生体への侵襲が低く、臓器の形態情報や、他の方法では得る事が難しい臓器機能を反映する情報を得る事が出来るため、病態評価に多用されている。アメリカのいくつかの大学では腫瘍の早期診断のために PET が行われるようになり¹⁾、獣医核医学の利用は今後さらに多くなると考えられる。一方、日本では未だ *in vivo* の獣医核医学はその実施のための法的整備がされていないため行われていない。しかし、日本の獣医臨床においても、高度医療の要請が増加してきており、獣医核医学の実施を望む声が高まっている²⁾。

獣医核医学を実現するためには、それを安全に行うためのガイドラインを作成し、法的に整備する必要がある。獣医核医学を行う際に問題となるのは、動物自身の内部被曝よりも、従事者、飼育者、一般公衆などの動物周囲の人間に対する外部被曝である。しかし、獣医療の分野ではこれらの人間に対する外部被曝線量を評価した研究は十分行われておらず、ガイドラインを作成するための指標となるデータが不足しているのが現状である。しかし、日本では PET 核種以外の RI を実験動物に投与した場合、その動物を放射線管理区域から生きている状態で持ち出すことはできない²⁾。一方、実際に RI を動物に投与した後、動物周囲の人間の外部被曝線量を様々な条件で評価するためには、多くの動物が必要となり、また、線量測定を統一するのは現実的に困難である。このため本研究では、動物実験の数を減らすことも考慮して、コンピューターシミュレーションプログラム (Electron Gamma Shower: EGS4) を用いた。

本研究の目的は、従事者、飼育者、一般公衆の外部被曝線量をシミュレーション計算し、獣医核医学診断に関わる人間に対する安全性の評価を行うことである。

2 準備

2.1 数学ファントムの作成

高エネルギー加速器研究機構(KEK)で公開されている CGview というソフトを用いて、コンピュータ上でイヌの胴体部分の数学ファントムを作成した(Fig.1)。体内の RI 存在量が同一である時、動物の体格の違いにより線量分布が変化するため、体格の異なる 2 つの数学ファントムを作成し評価を行った。大きい体格より小さい体格であるほど、動物体内の線源から体表面までの平均距離が短くなり、体表面での線量が多くなる。実際に核医学検査を施すと想定した場合に考えられる小型犬の体重として、小型犬に分類されるチワワ(1~3kg)やミニチュアダックスフンド(4~5kg)などの平均体重より軽い約 1kg (以後、小型犬ファントム)、大型犬の体重として、バーニーズマウンテンドッグ(40~44kg)やグレートピレニーズ(41~57kg)などの平均体重より軽い約 30kg (以後、大型犬ファントム) のファントムを作成した。各臓器の元素組成および密度は人間で報告されているものを使用した³⁾。

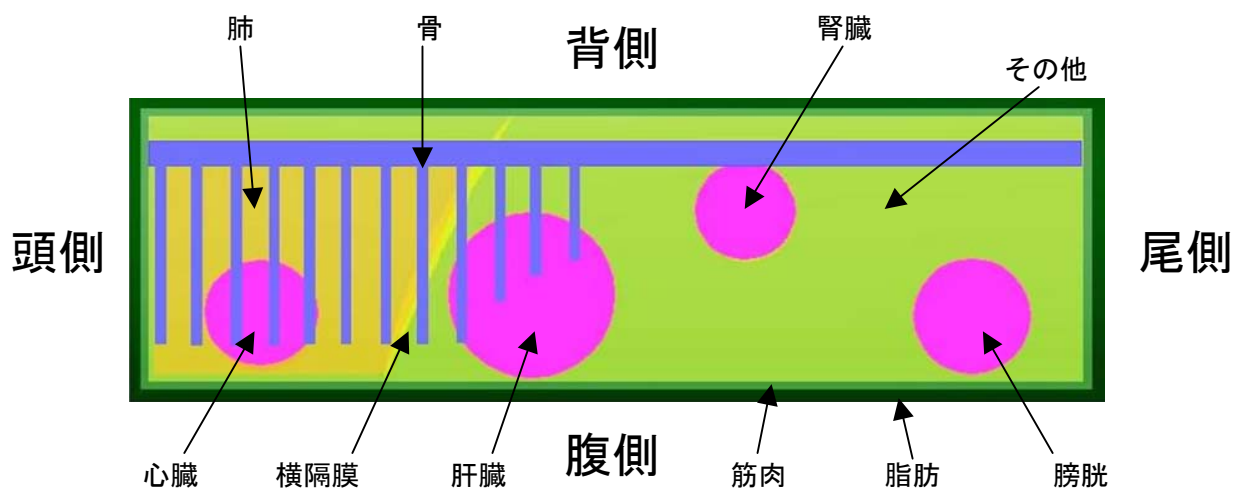


Fig. 1 犬の胴体部分の数学ファントム

2.2 計算条件の設定

計算に使用する核種は核医学診療での利用が多くなることが予想される ^{99m}Tc および ^{18}F とした。投与した RI が主要臓器(心臓、肝臓、腎臓、および膀胱)に、臓器重量に比例した量が集積すると設定した。RI の減衰は、生物学的半減期は考慮せず、物理学的半減期のみを考慮した。

検出器領域は空気とした。検出領域のエネルギー毎の光子フルエンスをシミュレーションで求め、換算係数を用いて AP(前後)照射の実効線量を計算した^{4,5)}。

3 方法

3.1 動物周囲の線量分布の評価

動物に RI を投与した時の、動物周囲における線量分布を調べるために、Fig.2 に示すように、心臓の中心を通る横断面、肝臓の中心を通る横断面、腎臓の中心を通る横断面、および膀胱の中心を通る横断面の、それぞれ背・腹・右・左側の体表面から 0cm の位置を検出領域と設定した。体格や投与する RI の種類による線量分布の相違を検討するため、RI の投与量を 100MBq に統一して計算を行った。

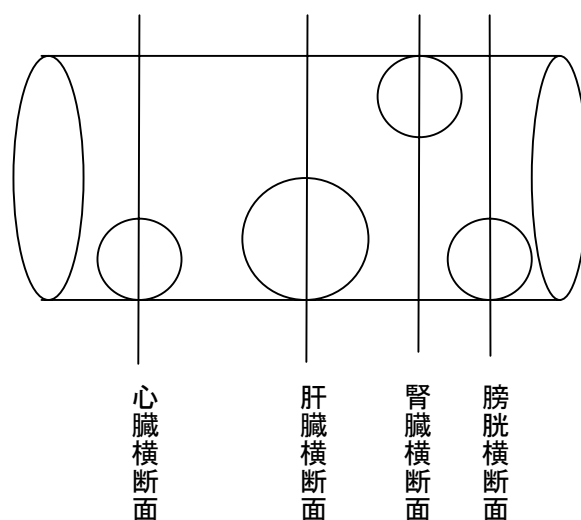


Fig. 2 各臓器の中心を通る横断面

3.2 獣医核医学診療に関わる人間の外部被曝線量評価

方法 3.1 の結果、肝臓中心を通る横断面の腹側で実効線量が最大となった。そのため、より安全側に評価するために、肝臓中心横断面の腹側を検出領域とし、検出器を体表面から 0、10、100cm の位置に設置した。

^{99m}Tc および ^{18}F を小型犬ファントムにそれぞれ 185、37MBq、大型犬ファントムにそれぞれ 740、185MBq 投与すると設定した。これらの投与量は、米国の大学で一般的に用いられている各核種の最小量と最大量を用いた⁶⁾。

獣医師の外部被曝線量は、RI 投与後 0～10 分を動物に対しての処置時間とみなし動物体表から 10cm、10～50 分を撮影時間として 100cm、50～60 分を撮影後の処置時間として 10cm の位置で作業すると仮定し評価した。飼主の外部被曝線量は、動物をずっと無限時間まで抱き続けるものと仮定して 0cm の位置で、RI 投与 1～24 時間後から無限時間までの被曝線量を評価した。一般公衆の外部被曝線量は、RI 投与 1～24 時間後から無限時間まで 100cm の位置にとどまると仮定して評価した。

獣医師の線量限度は法律や ICRP90 年勧告に従い、5 年間で 100mSv を 1 年あたりに換算し 20mSv/y とした。飼主の線量拘束値は、飼主には便益があるとし、IAEA の基準を参考として 1 件当たりの線量拘束値を 5mSv とした⁷⁾。一般公衆は ICRP 勧告に基づき、年線量限度を 1mSv とし⁸⁾、その線量限度の 1/100 はほとんどリスクに影響がないとされているので⁹⁾、線量基準を $10\mu\text{Sv}$ とした。

3.3 鉛エプロンによる放射線の遮蔽効果の検討

鉛エプロンの着用により獣医師の外部被曝線量をどのくらい低減できるかシミュレーション計算を行った。肝臓中心横断面腹側の体表面から約 10cm の位置に $60\times 60\text{cm}$ の鉛板を置いて実験 3.2 と同様の計算を行った。鉛板の厚さは、市販の鉛エプロンの厚さを考慮して 0.25mm または 0.50mm とした。

また、検出領域に到達する光子のエネルギー分布が鉛板でどのように変化するかを調べるため、小型犬のファントムを用いて、そのスペクトルを得た。

4 結果

4.1 動物周囲の線量分布の評価

各臓器の周囲で最も実効線量が高かったのは、 ^{99m}Tc においては、小型犬ファントムに 100MBq 投与した条件で、心臓腹側で $539.8 \mu\text{Sv}$ 、肝臓腹側で $1076.4 \mu\text{Sv}$ 、腎臓左側で $470.9 \mu\text{Sv}$ 、膀胱腹側で $515.2 \mu\text{Sv}$ 、大型犬ファントムに 100MBq 投与した条件で、心臓腹側で $53.3 \mu\text{Sv}$ 、肝臓腹側で $113.8 \mu\text{Sv}$ 、腎臓左側で $31.8 \mu\text{Sv}$ 、膀胱腹側で $53.2 \mu\text{Sv}$ であった。 ^{18}F においては、小型犬ファントムに 100MBq 投与した条件で、心臓腹側で $3439.0 \mu\text{Sv}$ 、肝臓腹側で $6767.7 \mu\text{Sv}$ 、腎臓左側で $3141.8 \mu\text{Sv}$ 、膀胱腹側で $3348.2 \mu\text{Sv}$ 、大型犬ファントムに 100MBq 投与した条件で、心臓腹側で $368.3 \mu\text{Sv}$ 、肝臓腹側で $769.9 \mu\text{Sv}$ 、腎臓左側で $269.9 \mu\text{Sv}$ 、膀胱腹側で $367.8 \mu\text{Sv}$ であった。全ての条件で、肝臓腹側で最も高い値を示した。同一の核種、同一の投与量の場合、いずれも小型犬ファントムの方が高い値を示した。同一の投与量、同一のファントムの場合、いずれも ^{18}F の方が高い値を示した。

4.2 獣医核医学診療に関わる人間の外部被曝線量評価

1 検査当たりの獣医師に対する外部被曝線量は、 ^{99m}Tc においては、小型犬ファントムに 185MBq 投与した条件で $56.5 \mu\text{Sv}$ 、大型犬ファントムに 740MBq 投与した条件で $65.5 \mu\text{Sv}$ であった。 ^{18}F 使用時の外部被曝線量は小型犬ファントムに 37MBq 投与した条件で $70.8 \mu\text{Sv}$ 、大型犬ファントムに 185MBq 投与した条件で $123.9 \mu\text{Sv}$ であった (Fig. 3)。 ^{99m}Tc 、 ^{18}F どちらにおいても大型犬ファントムの条件の方が小型犬ファントムの条件より被曝線量が多くなった。 ^{99m}Tc では、小型犬ファントムで年線量限度の 1/350 程度、大型犬ファントムで 1/310 程度となった。一方 ^{18}F では、小型犬ファントムで年線量限度の 1/280 程度、大型犬ファントムで 1/160 程度となった。

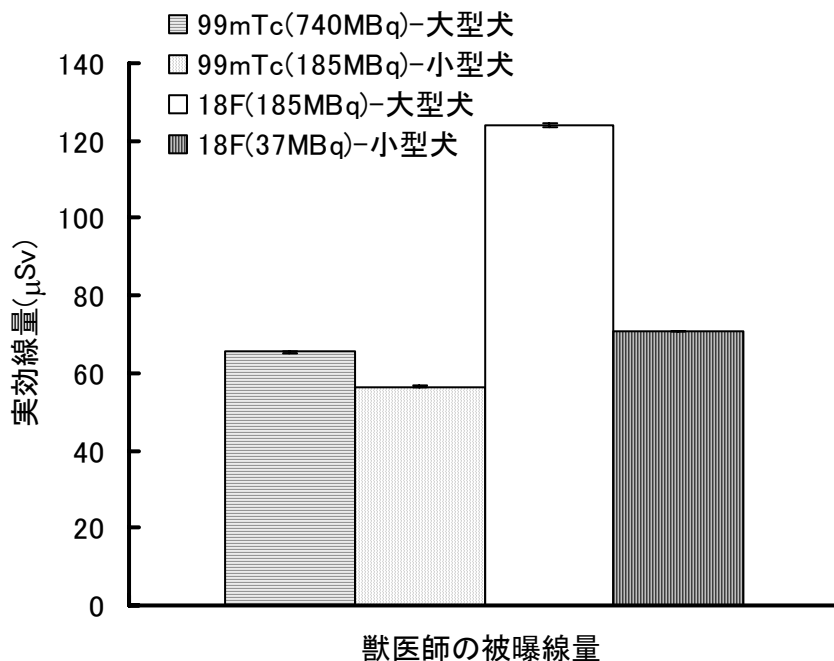


Fig.3 1 検査当たりの獣医師の被曝線量

一般公衆に対する外部被曝線量は Fig.4 のようになった。 ^{99m}Tc においては、最大で投与 19 時間後の退出で線量基準を下回った。 ^{18}F においては、最大で投与 5 時間後の退出で線量基準を下回った。

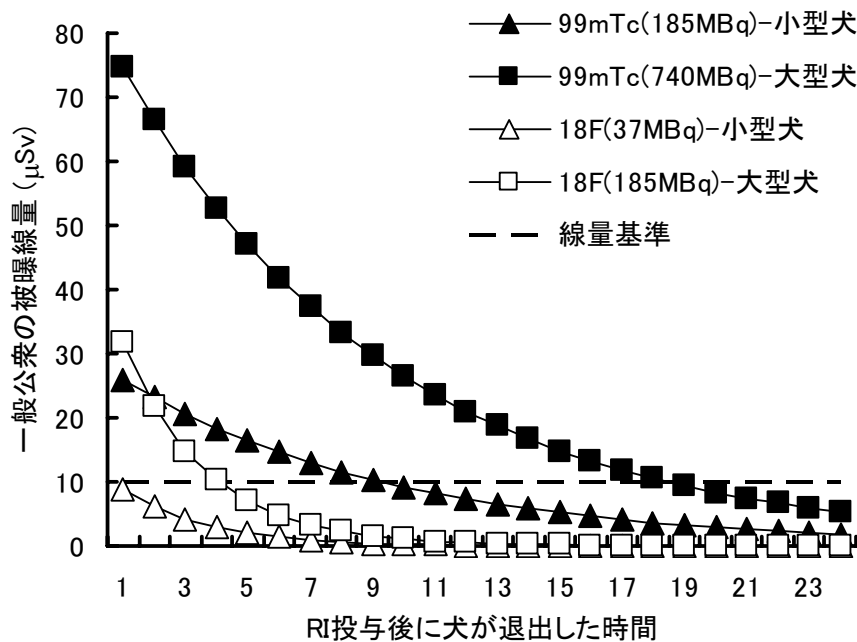


Fig.4 一般公衆の被曝線量の経時的変化

飼主に対する外部被曝線量は Fig.5 のようになった。一般公衆の結果と照らし合わせると、 ^{99m}Tc 投与 19 時間後の退出では最大で 2.1mSv、 ^{18}F 投与 5 時間後の退出では最大で 1.2mSv と、何れも線量拘束値を十分に下回る結果となった。

よって、 ^{99m}Tc では投与 19 時間後、 ^{18}F では投与 5 時間後の退出で、一般公衆と飼主の線量基準および線量拘束値を下回ることになる。

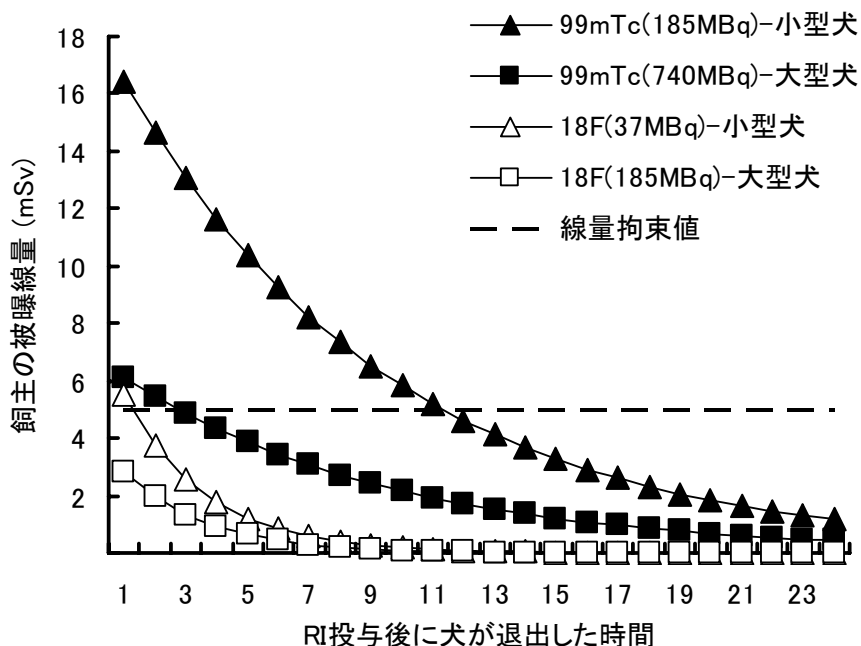


Fig.5 飼主の被曝線量の経時的変化

4.3 鉛エプロンによる放射線の遮蔽効果の検討

鉛遮蔽の効果は ^{99m}Tc で顕著に現れ、 ^{18}F ではほとんど変化しなかった (Fig.6)。

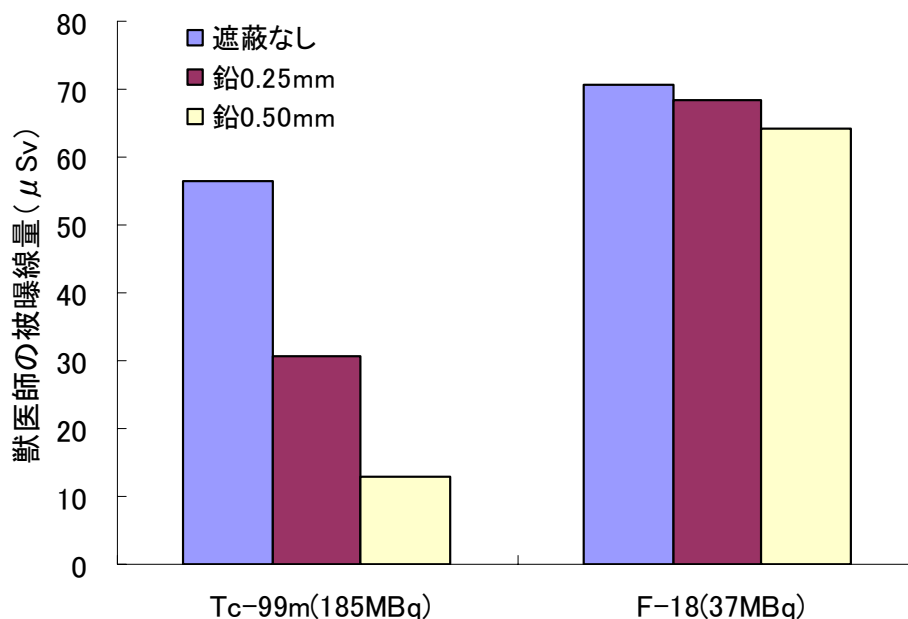


Fig.6 鉛遮蔽による獣医師の被曝線量の変化

^{99m}Tc では、遮蔽なしと比較して、0.25mmの鉛板を使用した場合は小型犬ファントムで元の54% ($30.6\mu\text{Sv}$)、大型犬ファントムで元の45% ($29.3\mu\text{Sv}$)、0.50mmの鉛板を使用した場合は小型犬ファントムで元の23% ($12.9\mu\text{Sv}$)、大型犬ファントムで元の19% ($12.7\mu\text{Sv}$)まで被曝線量が減少した。また、0.25mmの鉛板を使用した場合、小型犬ファントムでは年線量限度の1/650程度、大型犬ファントムでは1/680程度となった。0.50mmの鉛板を使用した場合、小型犬ファントムで年線量限度の1/1550程度、大型犬ファントムで1/1580程度となった。

^{18}F では、遮蔽なしと比較して、0.25mmの鉛板を使用した場合は小型犬ファントムで元の96% ($68.3\mu\text{Sv}$)、大型犬ファントムで元の91% ($113.1\mu\text{Sv}$)、0.50mmの鉛板を使用した場合は小型犬ファントムで元の90% ($64.1\mu\text{Sv}$)、大型犬ファントムで元の86% ($106.0\mu\text{Sv}$)までしか被曝線量が減少しなかった。また、0.25mmの鉛板を使用した場合、小型犬ファントムでは年線量限度の1/290程度、大型犬ファントムでは1/180程度、0.50mmの鉛板を使用した場合、小型犬ファントムで年線量限度の1/310程度、大型犬ファントムで1/190程度で、鉛板の厚さによる影響は小さかった。

到達する光子フルエンスの変化は ^{99m}Tc で大きく変化した (Fig.7)。放出エネルギー付近の 140~144keV のエネルギーの光子も良く遮蔽された。また、それよりエネルギーが低い領域の光子も良く遮蔽された。

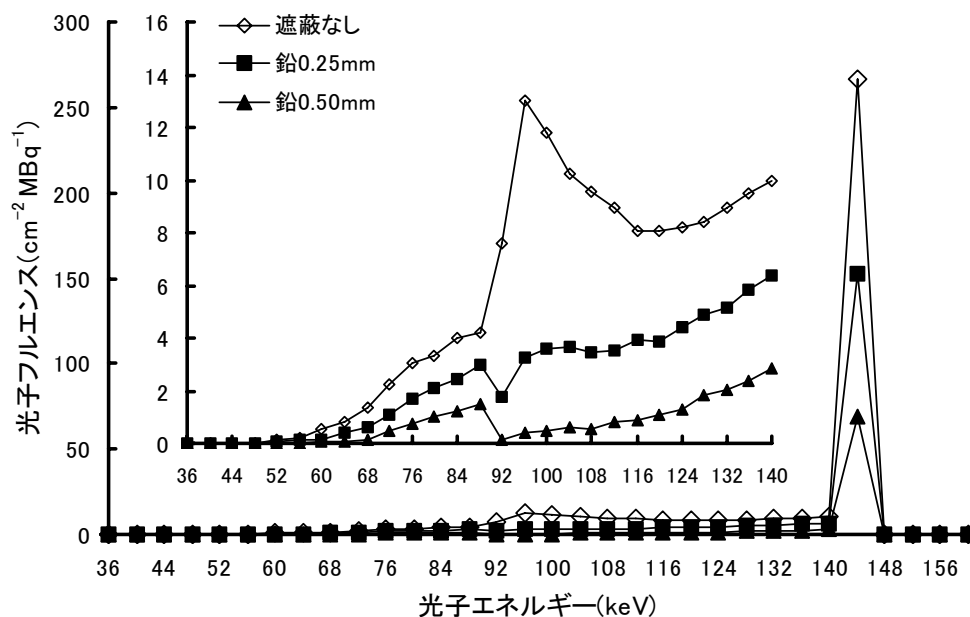


Fig.7 鉛遮蔽による光子フルエンスの変化(Tc-99m)

^{18}F では、低エネルギー領域で若干遮蔽の効果が観察されたが、エネルギーが高くなるにつれて遮蔽の効果は見られなかった。放出エネルギー付近の 504~515keV に対する遮蔽効果は、ほとんど認められなかった (Fig.8)。

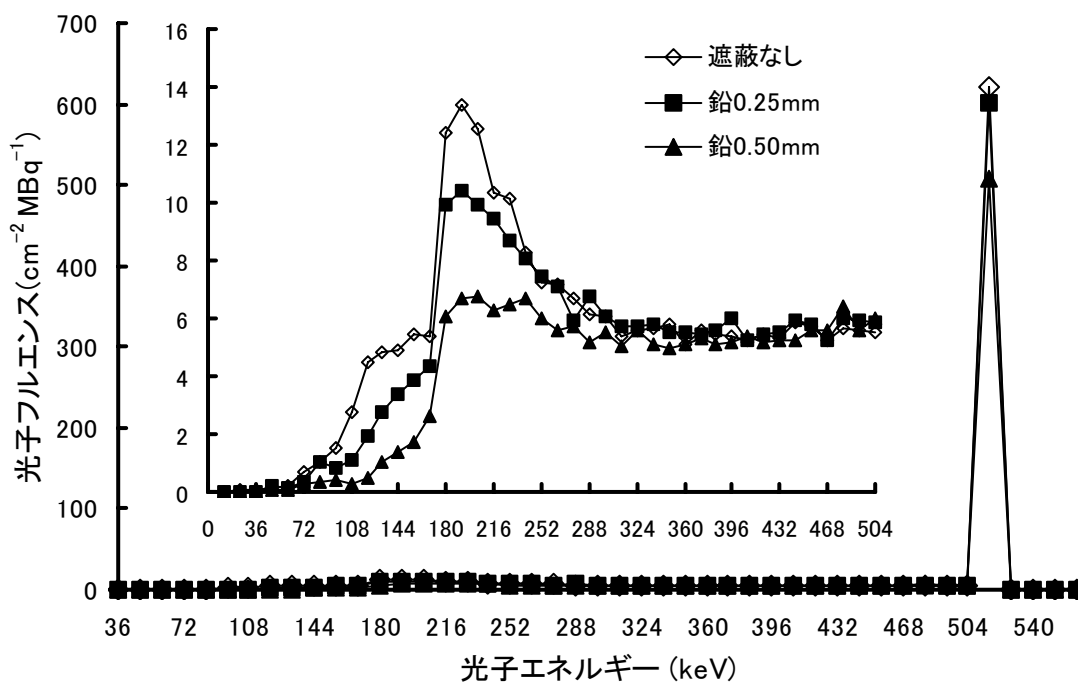


Fig.8 鉛遮蔽による光子フルエンスの変化(F-18)

4 考察

4.1 計算結果の妥当性の評価

今回の計算結果は安全側に評価するため、多くの過大評価の要素を持っている。数学ファントムは小型犬として 1kg、大型犬として 30kg と実際よりも少ない体重で設定した。体内の RI 存在量が同一である時、小さい体格であるほど動物体内の線源からの平均距離が短くなり体表面の線量率は高くなる。このため、平均体重よりも少ない体重・体格に設定する事で安全側に評価することが出来る。RI の減衰は、物理学的半減期のみで被曝線量計算を行った。生物学的半減期は個体の状態によって大きく異なると予想され、結果実効半減期は大きく異なる。しかしながら、物理学的半減期は考えうる最大の半減期のため生物学的半減期を無視する事で、同一条件で安全側に評価することが出来る。RI の投与量は一般的にはガンマカメラの性能や動物の体格により決められる。しかし今回の研究では、米国の大学で一般的に用いられている適切かつ最大と考えられる投与量を設定し、安全側に評価した。獣医師が撮影に関わる時間については 60 分間と設定した。飼育者に関しては、退出後ずっと抱き続けると仮定し、0cm の位置に無限時間までいると設定した。一般公衆に関しては、退出後 100cm の位置に無限時間までいると設定した。これらの時間は実際の撮影、状況よりも長時間に設定してあり、安全側の評価となる。測定した場所はプレ計算で最大線量を示した肝臓横断面腹側とする事で、安全側に評価した。以上の設定により、今回の計算結果は十分に安全側で評価できたと考えられる。

4.2 獣医核医学診療に関わる人間の外部被曝線量評価

獣医師の被曝は、Fig.3 に示すように、 ^{99m}Tc の場合、185MBq (5mCi) を投与量として設定した小型犬ファントムよりも 740MBq (20mCi) を投与量として設定した大型犬ファントムの方が被曝線量が多くなった。また ^{18}F 使用の場合、37MBq (1mCi) を投与量として設定した小型犬ファントムよりも 185MBq (5mCi) を投与量として設定した大型犬ファントムの方が約 2 倍も被曝線量が多くなった。体重が約 30kg の場合、約 1kg の場合に比べて体格が大きいため体内に存在する RI と動物体表面との平均距離が離れ放射線の体内吸収も大きくなるが、 ^{99m}Tc の場合は約 1kg の小型犬に投与する時よりも約 30kg の大型犬へ投与する場合の方が、投与量は 4 倍多いため相対的に大型犬ファントムの方が、被曝線量が多くなったと考えられる。一方 ^{18}F の場合、エネルギーが高いため γ 線の体内吸収の割合が少なく、被曝線量は RI 投与量の影響を受けやすい。その結果、投与量が約 1kg の小型犬ファントムより 5 倍多い大型犬ファントムからの被曝線量は小型犬ファントムからの被曝に比べ約 2 倍大きくなったと考えられる。人間の核医学検査においては、 ^{99m}Tc を用いる通常の核医学検査よりも ^{18}F -FDG を用いる PET 検査の方が被曝線量が高くなる傾向があるといわれている¹⁰⁾。今回の評価では体重が約 1kg の場合および約 30kg の場合のいずれにおいても ^{99m}Tc より ^{18}F の方が高い被曝線量を示し、人間の核医学検査と同様の傾向が認められた。エネルギーの高い放射性核種を用いる場合はその取り扱いや被曝に関してより一層の注意が必要であることが示された。

核医学検査に伴う被曝評価では ICRP などの国際的勧告を基準とすることが一般的である^{11~14)}。しかし、イヌやネコ等の伴侶動物を対象とした核医学検査に関与する人間の被曝については報告が少ない。そのため、獣医核医学に関わる人間の被曝線量を推定し、人間における国際的勧告値を超えないことを確認した。獣医師等の獣医療従事者は、1990 年の ICRP 勧告を受け改正された「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律」に示されている通り実効線量限度 5 年間で 100mSv、1 年あたり 20mSv を超えないように管理されることが望ましい。今回計算を行なった各種条件下での評価中最も高い値を示した 1 検査あたりの被曝線量は 0.124mSv であり、上記の計算に従えば、年に 160 回の検査を行っても獣医師の被曝線量は線量限度を超えないことが明らかとなった。しかしながら、検査を行う際には検査回数を管理するばかりでなく、検査ごとの被曝が少なくなるように考慮すべきである。獣医師等の従事者は、個人線量計によるモニターが義務付けられ被曝を管理されているので、結果に応じた作業内容の見直しや作業時間の短縮などにより、更に被曝を抑えることが可能である。

一般公衆および飼主においては RI を投与された動物が管理区域を退出（退院）した後の被曝が問題となる。よって核医学検査を行った後の、退院の時期を RI 投与 1~24 時間後とし、それ以降放射能が減衰し消失するまで被曝し続けるとして、一般公衆や飼主が受ける被曝線量が設定した線量基準および線量拘束値を超えることがあるかどうかを検討した。

飼主の線量拘束値としては ICRP Publication 73 と IAEA の基準値を参考とした^{7,15)}。ICRP では「患者の介護と慰撫を助ける友人や親族」の被曝を医療被曝と定義し、患者の訪問者と核医学患者が退院したときの自宅における家族との両方に対する防護の方針を決める際に用いるために線量拘束値を設定すべきであるとしているが、ICRP 委員会では具体的な数値を明確にせず「1 件につき数 mSv 程度の値が合理的と思われる」、としている。この勧告をふまえ、国際原子力機関 IAEA の「診断又は治療を受けている患者の介護、介助及び慰安を自発的に助けるあいだに承知の上で被曝する個人に対する線量」を参考として、動物の飼主または介護者に関する線量拘束値は、1 行為あたり 5 mSv 以下にすべきであると考へた。被曝管理されない公衆に対する線量限度としては、ICRP 勧告（1990 年）で 1 年間につき 1mSv を勧告している。しかし、一般公衆は獣医療における核医学実施による便益を受けないため、これに伴う被曝は十分に低い値に保たなければならない。さらに、1 年で 0.01mSv 未満の被曝は None Level であるという報告を参考にして⁹⁾、一般公衆に関する線量基準は 1 行為あたり 0.01mSv 以下にすべきであると考へた。

飼主の被曝線量は、^{99m}Tc は 12 時間後、¹⁸F は 2 時間後の退出で線量拘束値を超えなかった。今回の評価において飼育者では平均距離を 0cm と仮定しているため、被曝線量に影響を与える大きな要因は RI の集積する臓器からの距離となり、投与量が少ないにもかかわらず臓器との距離が近くなる小型犬ファントムで高い被曝線量を示した。今回飼育者の評価については、人間のいる位置が計算上最大値を示す肝臓の中心を通る面の腹側であり、退院直後から RI が減衰し消滅するまで飼主が動物を抱き続けるという厳しい条件で計算を行ったため、^{99m}Tc を小型犬ファントムに用いた条件では 11 時間後まで線量拘束値を超えてしまった。しかし人間の核医学検査に関する研究では、RI を投与された子供を親が運んだり食事をあげるなどしても 1mSv を超えないことがわかっている¹²⁾。このことから実際の運用では、飼育者に対し、獣医師等が退院後の動物の扱いについて指導を行うことで、飼育者の被曝は計算結果よりも大幅に低減させることが可能であると考へられる。また、IAEA の基準値で、病人を訪問する子供に対しては 1mSv を線量拘束値としているため、動物の飼育環境に合わせて線量拘束値を設定することが好ましいと考へられる。

一般公衆の被曝線量は ^{99m}Tc については 19 時間後の退院で、¹⁸F については 5 時間後の退院で、線量拘束値の 10 μ Sv 以下となった。一般公衆については平均距離を 100cm と仮定しているため、RI の集積する臓器との距離よりも投与量が大きく影響し、投与量の多い大型犬ファントムにおいて高い被曝線量を示したが、大型犬ファントム、小型犬ファントムいずれも線量限度の 1mSv と比較して十分に低い値であった。10 μ Sv/年の被曝線量はラドンを除いた自然放射線量の 100 分の 1 の量であり微少レベルもしくは None level の被曝であるとされている^{9,16)}。この被曝による一年あたりの致死リスクは 10^{-6} であり、問題にはならないと考へられる。しかし低レベルの放射線被曝の影響は解明されていないことが多く、また一般公衆は獣医学検査によって便益を受けないため、被曝線量を出来る限り低減することが必要である。飼主に対して、帰宅の方法や帰宅後の動物の扱いについての指導を行えば、さらに一般公衆の被曝線量は低減できると考へられる。

4.3 鉛エプロンによる放射線の遮蔽効果の検討

次に、被曝防護の三原則(遮蔽・距離・時間)のうち、「遮蔽」の効果を検討するために、診療用放射線防護に用いられる鉛エプロンによって獣医師の外部被曝線量をどの程度低減することが可能か検討を行った。鉛の厚さは実際に市販されている防護エプロンの厚さにしたがって 0.25mm および 0.50mm と設定した。今回は体重換算で投与量が少ないが体表面の被曝線量は多くなる 1kg の数学ファントムで評価を行った。Fig.6 に示すように放出 γ 線のエネルギーの低い ^{99m}Tc では薄い鉛板でも被曝線量を低減させることが可能で、0.25mm の鉛板でも年線量限度の 1/650 以下に、0.50mm では 1/1550 以下に被曝線量を低減できることが示された。人間の ^{99m}Tc を用いた核医学検査に関する研究で、従事者の外部被曝線量は 1 日 60 μ Sv を超えないと

されている¹²⁾。今回の計算では遮蔽なしの場合は同程度の被曝量と試算されたが、前述のような獣医師側の被曝低減の努力と鉛による遮蔽によって被曝線量を大幅に抑えることが可能であると考えられる。一方、エネルギーが高い¹⁸Fでは鉛エプロン程度の厚さの鉛板で被曝線量を低減させることはできなかった。^{99m}Tcからの被曝線量を10分の1に抑えるには鉛板厚さが1.06mm必要であり、一方¹⁸Fからの被曝線量を10分の1に抑えるには鉛板厚さは13.47mm必要であると示されている。以上のことから^{99m}Tcでは鉛エプロンによる遮蔽効果が期待できるが、¹⁸Fでは光子エネルギーの高さゆえ薄い鉛板では遮蔽効果が期待できない。よって¹⁸Fを使用する際には、時間と距離に特に注意して作業を行うことで被曝量を低減出来ると考えられる。

4.4 最後に

今回の計算結果は、実際の検査と比較して、どの程度過大評価しているかは不明であるが、多くの過大評価の要素を持っているため、実際の検査時の被曝線量は計算結果よりもかなり少ないと考えられる。また、前述のような被曝線量低減の努力、指導を行えば、さらに被曝線量は低減できると考えられる。獣医核医学を行う際には、獣医師や飼育者のモニター、空間線量率の測定などを行って、国際基準値を上限として、適切で現実的な拘束値、退出基準を随時見直していく必要があるであろう。また、人間の受ける外部被曝線量に関して詳細に調べるためには、今回検出領域とした場所に詳細な人体のファントムを置き、臓器ごとの被曝線量を評価し実効線量を求める事が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Berry C.R., DeGrado T.R., Nutter F., Garg P.K., Breitschwerdt E.B., Spaulding K., Concannon K.D., Zalutsky M.R. and Coleman R.E.; Imaging of pheochromocytoma in 2 dogs using p-[¹⁸F] fluorobenzylguanidine Vet Radiol Ultrasound., 43, 183-186 (2002).
- 2) 伊藤伸彦, 夏堀雅宏, 佐野忠士; 核医学によって変わる日本の獣医療, Isotope News. 604 (2004).
- 3) The International Commission on Radiological Protection ; “Basic Anatomical and Physiological Data for Use in Radiological Protection: Reference Values”, p.243-246 (2001), Pergamon Press, Oxford.
- 4) 平山英夫 ; 光子の線量概念と実効線量への換算係数との関係—ICRP90年勧告の実施にあたって—日本原子力学会雑誌, 43, 427-432 (2001).
- 5) 社団法人日本原子力学会; 放射線遮へい計算のための線量換算係数:2004, AESJ-SC-R002:2004, p26-27 (2004).
- 6) Berry, C.R. and Daniel, G.B. eds. “Handbook of veterinary Nuclear Medicine,” p.49-180
- 7) The International Atomic Energy Agency ; “Radiological Protection for Medical Exposure to Ionizing Radiation” p.9 (2002), The British Journal of Radiology, Stanford.
- 8) The International Commission on Radiological Protection ; “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”(1990), Pergamon Press, Oxford.
- 9) The International Commission on Radiological Protection ; The evolution of the system of radiological protection: the justification for new ICRP recommendations, J. Radiol. Prot., 23, 129-142 (2003).
- 10) Chiesa C., De Sanctis V., Crippa F., Schiavini M., Fraigola C.E., Bogno A., Pascali C., Decise D., Marchesini R. and Bombardieri E.; Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67, and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose Eur. J. Nucl. Med., 24, 1380-1389 (1997).
- 11) Harding L. K., Hesslewood S., Ghose S.K. and Thomson W.H. ; The value of syringe shields in a nuclear medicine department, Nucl Med Commun., 6, 191-194 (1985).
- 12) Mountford P.J., O'Doherty M.J., Harding L.K., Thomson W.H., Carter N.J., Bray D., Paul C. and Batchelor S. ; Radiation dose rates from paediatric patients undergoing ^{99m}Tc investigations, Nucl Med Commun., 12, 709-718 (1991).

- 13) Mountford P.J., O'Doherty M.J., Forge N.I., Jeffries A. and Coakley A.J. ; Radiation dose rates from adult patients undergoing nuclear medicine investigations, *Nucl Med Commun.*, 12, 767-777 (1991).
- 14) Wu T.H., Liu R.S., Chong N.S., Tsai C.S., and Lee J.S. ; Evaluation of equivalent dose to working staff with oxygen-15-water in positron emission tomographic studies, *Applied Radiation Isotopes*, 53, 463-468 (2000).
- 15) The International Commission on Radiological Protection ; "Radiological Protection and Safety in Medicine"(1997), Pergamon Press, Oxford.
- 16) Clarke R. ; Control of low-level radiation exposure: time for a change?, *J.Radiol.Prot.*, 19, 107-115 (1999).