

EGS4を用いたコンパニオンアニマルの核医学診療に関わる

人間の被曝線量評価

小松原直美¹⁾、伊藤伸彦¹⁾、花輪明日美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⁾

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 5 0 番 1 号

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

⁴⁾ 岩手医大サイクロトロンセンター
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. はじめに

獣医療において、欧米では既に核医学が広く行われている。生体への侵襲が低く、腫瘍の早期確認や臓器の機能情報が形態情報と同時に得られる核医学検査が日本でも望まれている。そして現在日本の獣医療において放射性同位元素を、安全利用するための法的整備が検討されている。核医学診療におけるガイドライン作成のために、RI を投与された動物から受ける獣医師や飼育者、一般公衆等の人間の外部被曝線量などのデータが必要になる。本研究ではコンパニオンアニマルの核医学診療に限定し、実験動物の数を減らすことも念頭に置き、コンピューターシミュレーションによる線量評価を試みた。

以前からコンパニオンアニマルの核医学診療に関わる人間の外部被曝線量の計算を行ってきており、第 9 回、第 10 回 MNCC 共同利用研究成果発表会では結果を発表した。これまでの方法で計算した外部被曝線量は、勧告値は超えなかったもののかなり過大評価であった。よってより正確に評価をする必要があるので、シミュレーションを行なうためにモンテカルロ法を用いて計算を試みた。モンテカルロ法のなかでも汎用の電子・光子モンテカルロコードの中で最も広く使用されている EGS4 を使用した。

2. 材料

2.1 放射性薬剤

本研究に使用した放射性核種は、 ^{99m}Tc (半減期 6.01 時間、 γ 線エネルギー 141keV) と ^{18}F (半減期 109.8 分、 γ 線エネルギー 511keV) の 2 種である。 ^{99m}Tc は医学・獣医学の領域を問わず核医学検査の中で最もよく使用されている核種であること、また ^{18}F は Positron Emission Tomography (PET) 検査で使用され獣医療でも有望視されている核種であることから、この 2 つを選択した。

^{99m}Tc はウルトラテクネカウ (放射性医薬品基準過テクネチウム酸ナトリウム注射液ジェネレータ、第一ラジオアイソトープ研究所、東京) より過テクネチウム酸ナトリウム溶液を抽出して使用した。 ^{18}F は (社) 日本アイソトープ協会、仁科記念サイクロトロンセンターで合成された ^{18}F -FDG (Fluorine-18 Fluorodeoxyglucose) 溶液を使用した。

2.2 ファントム

セラムチューブ (PE 製, 1ml)、ビニール製ボール (ϕ 7cm)、ポリタンク (PE 製, ϕ 29×30cm) をファントムの材料として使用した。

2.3 蛍光ガラス線量計 (Radiophotoluminescent Dosimeter ; RPLD)

本研究で使用した RI の放出する放射線種、および検出されると推測した線量範囲から、旭テクノグラス社製の RPLD 素子エネルギー補償フィルタ Sn 付 GD-351 を使用した。この RPLD の測定対応線種は γ 線および X 線 (15keV-20MeV) で、線量測定範囲は $10\ \mu\text{Gy}$ -500Gy である。素子の読み取りは旭テクノグラス株式会社の線量計リーダ FGD-1000 を用いた。実験に使用した GD-351 のエネルギー特性 Fig. 1 に横軸を光子の実効エネルギー、縦軸を相対レスポンスとして示す。RPLD は線源とスタンド間に針金 (鉄製, ϕ 0.28mm) をかけ、ファントム表面から一定の位置に設置した。

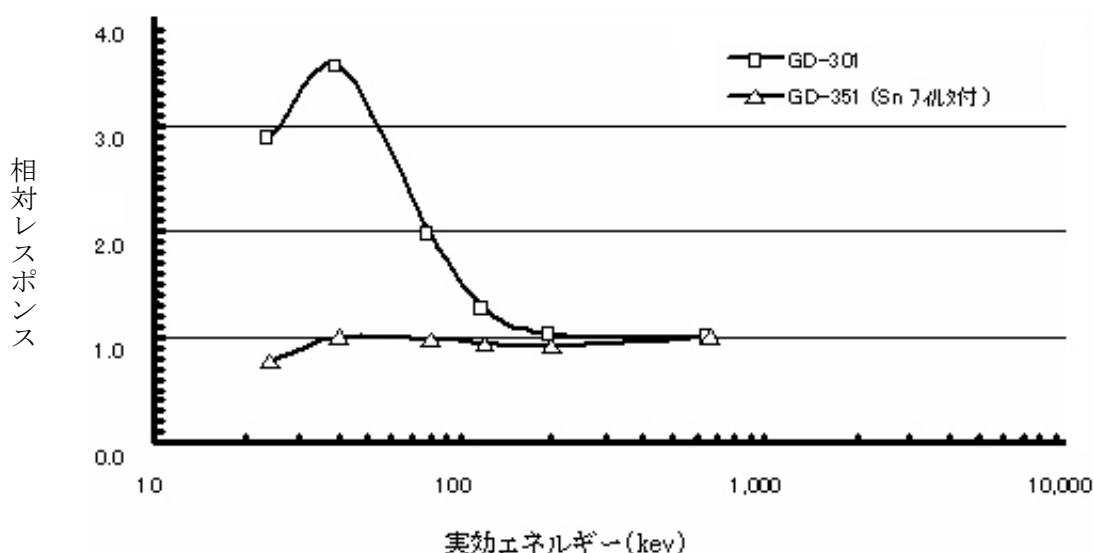


Fig. 1 空気吸収線量に対するエネルギー特性

2.4 キュリーメータ

^{99m}Tc 溶液および ^{18}F -FDG 溶液は、キュリーメータ (IGC - 7B、アロカ社、東京) により正確に放射エネルギーを測定し、ファントムに注入した。測定した放射エネルギーは抽出時間を基準として測定までの経過時間を補正し、計算に用いられた。

3. 実験方法

3.1 ファントムを用いた空間線量の実測方法

計算プログラムの性質を確認するために、様々な形状のファントムを用いて実験を行い、実測値と計算値の結果を比較した。また、床や壁などによる散乱線の影響を極力避けるためファントムを中空発泡スチロール製の一辺 30cm の立方体の箱上に設置し、壁から 3m 以上離して実験を行った。

3.1.1 単純な形状のファントム実験

1 ml に満たない、RI をセラムチューブに入れて空中に設置した。RPLD は線源とスタンド間に針金 (鉄製 $\phi 0.28\text{mm}$) をかけ、ファントム表面から一定の位置に設置し、線量測定後に計算結果と比較した。

3.1.2 球状線源が円柱状ファントム内の中心に設置されている実験

直径 30 cm 高さ 30 cm の円柱状のポリタンクに水を満たし、直径 7 cm のビニール製ボールをポリタンクの中心に位置するように沈めた。RPLD はポリタンクの表面とスタンド間に針金をかけ、ファントム表面から一定の位置に設置し、線量測定後に計算結果と比較した。

3.1.3 球状線源が円柱状ファントム内に偏心して設置されている実験

直径 30 cm 高さ 30 cm の円柱状のポリタンクに水を満たし、直径 7 cm のビニール製ボールをポリタンクの偏心した場所に位置するように沈めた (Fig.2)。透過する水の距離が長い方向を 180° 方向とし、透過する水の距離が短い方向を 0° 方向として示した。RPLD はポリタンクの表面とスタンド間に針金をかけ、ファントム表面から一定の位置に設置し、線量測定後に計算結果と比較した。

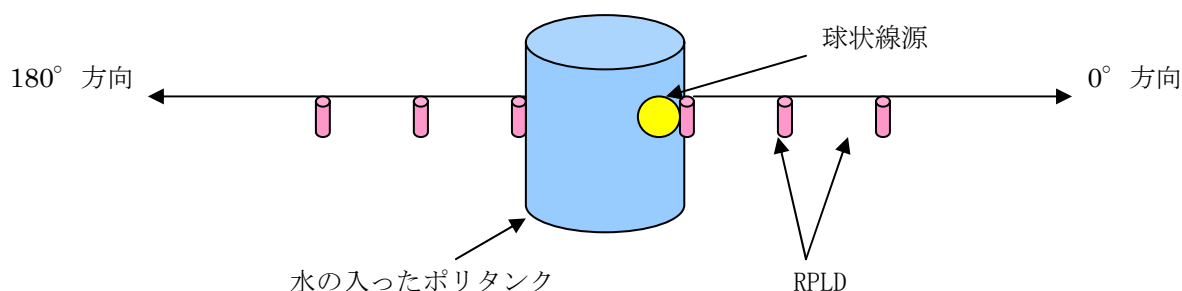


Fig.2 ファントムの構造 (1 例) と線量計の設置位置

3.2 RPLD の読み取り値の換算

実験に使用した RPLD の線量は、旭テクノグラス株式会社静岡工場にて専用の線量計リーダ (FGD-1000、旭テクノグラス株式会社、千葉) で読み取った。実験に用いた RPLD の読み取り値から一緒に保管された RPLD の値をバックグラウンド値として差し引き、その値 D (空気カーマ) を次の式(1)により測定開始時における空気カーマ率 D_R ($\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$) に換算して実測値として示した。散乱線のエネルギー分布は不明なので、線量計のエネルギーの補正は、 ^{99m}Tc と ^{18}F の γ 線エネルギーの値で行った。

$$D_R = D \times \frac{\lambda}{e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2}} \quad (\mu \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}) \quad (1)$$

3.3 空間線量計算

3.3.1 EGS(Electron gamma shower)法

本研究では、EGS4 コードシステムを用いて計算を行なった。EGS4 コードシステムは融通性のあるユーザーインターフェイスを持ったパッケージで、任意の元素、化合物あるいは混合物中の電子、陽電子あるいは光子の輸送を扱う。EGS4 で使用する各物質の諸データは、元素の断面積データを用いて PEGS4(A Preprocessor for EGS4)プログラムにより計算される。

EGS4 の計算に使用した OS は WindowsXP である。

EGS4 で得られた計算値を測定開始時の吸収線量率に換算した結果を EGS 法として示した。

3.3.2 理論値

光子を放出する点状線源についての空気衝突カーマ率定数 ($\mu \text{ Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) がアイソトープ手帳に掲載されている。単純な形状のファントム実験ではセラムチューブに入れた線源を点線源とみなして、空気衝突カーマ率定数を基に線源と距離を補正したものを理論値として示した。

3.3.3 従来法

従来法として示した結果は(財)原子力安全技術センターが出版した放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル⁵⁾の γ 線のしゃへい計算方法を用いて得たものである。

質量減弱係数とビルドアップ係数を考慮し、フルエンス率とカーマ率から吸収線量を求め、測定開始時の吸収線量率に換算した。⁶⁾

4. 結果と考察

4.1 単純な形状のファントム実験

いままで使用してきた計算方法では評価対象は γ 線のみで、計算に考慮した物質は水のみであったが、EGS4 コードシステムでは様々な物質中での数 keV から数 GeV のエネルギー範囲の電子、陽電子、光子の物理反応が扱われている。またプログラムで扱うことの出来る形状は、円柱と球だけだったが、EGS4 では円柱や球、円錐などの単純な形状を組み合わせて、様々な形状を表現することが出来る。ユーザーコードなどの記述のみで計算が出来るなどの特徴がある。

最初に、EGS4 でのユーザーコードが正しく記述され、入力されているかどうかを単純な形状のファントム実験で確かめた。1 ml に満たない、RI をセラムチューブに入れて線量測定を行った。実験条件での EGS 計算結果と比較した。また線源の体積が小さいので、線源を点線源とみなして、アイソトープ手帳⁷⁾に載せられている空気衝突カーマ率を基に計算をした理論値と比較した。

RI が ¹⁸F 場合の結果を Fig. 3 に、^{99m}Tc の場合の結果を Fig. 4 を示した。結果を比較しやすいように 100MBq 当たりに換算し示した。いずれも横軸は球線源の中心から測定点までの距離、縦軸は空気の吸収線量率で、両対数グラフに示した。

計算値と実測値はいずれも負の傾きを示す直線になった。これは距離の逆自乗則に基づき減衰することを示している。まず理論値と実測値がよく一致したことから、この実験条件において RPLD での線量測定が正確に行なわれたと考えた。またこの実験では、単純な系であり、実測値と EGS 法と理論値の値は良く一致したため、ユーザーコードは正しく記述されたと考えられた。

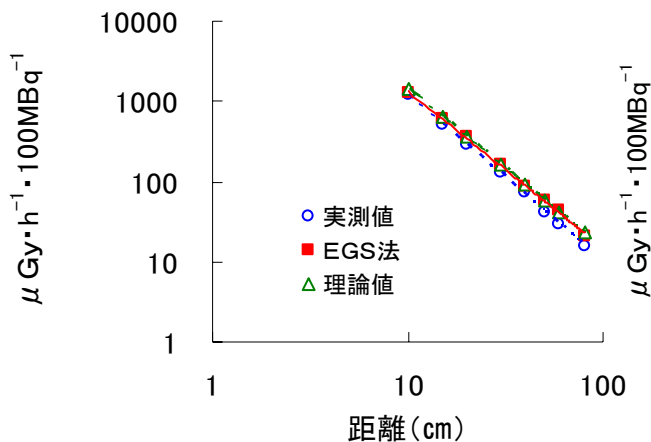


Fig. 3 ^{18}F の実測値と EGS 法と理論値の比較

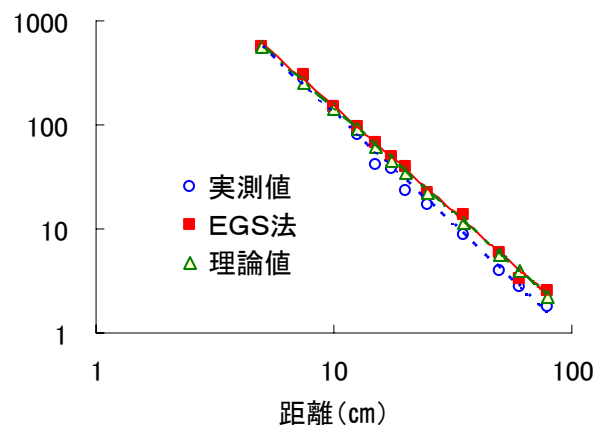


Fig. 4 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の実測値と EGS 法と理論値の比較

4.2 球状線源が円柱状ファントム内の中心に設置されている実験

次に体積のある線源での評価が正しく行われるかどうか検討した。

RI を含む約 200ml の球形の線源が、約 20l の円柱形のファントムの中心に設置した。RI が ^{18}F 場合の結果を Fig. 5 に、 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の場合の結果 Fig. 6 を示す。線源が ^{18}F の場合も $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の場合も従来法の値と比較して、EGS 法の値と実測値は良く一致した。

従来法の計算値は吸収、ビルドアップなどを安全側に過大評価するように考慮されている。さらに計算プログラムに用いたビルドアップ係数は、ファントム内に充満した水を遮蔽体と考えた時に、その遮蔽体が無限媒質であるとした時の点等方線源に対する値であるが、実際には遮蔽体は有限媒質であり、遮蔽体後方における線量評価においては、評価点の周囲は空気である。従って実際の有限媒質中における実測値に比べて、計算値は、ファントムの外側にも存在すると仮定されている遮蔽物質による散乱成分がある分だけ大きくなる。従来法ではこれらの要因によって、かなり過大評価していたと考えられる。

一方 EGS の値と実測値は良く一致した。EGS で得られる計算結果は、 ^{18}F よりも $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の特に線源から離れた位置における統計精度が悪くなった。その理由として次の事が考えられる。まず実効エネルギーが 511keV の ^{18}F の場合は EGS 法の計算において設定位置でのヒット数が多いため、統計精度の比較的高い結果が得られたと考えられる。一方実効エネルギーが 141keV の $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の場合は EGS 法の計算において設定位置でのヒット数が少ないために、統計精度が低くなったと考えられる。EGS において統計精度の改良はシミュレーションの方法を工夫しユーザーコードの変更を行えば可能であるので、今後は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の統計精度を高める方法を検討する予定である。

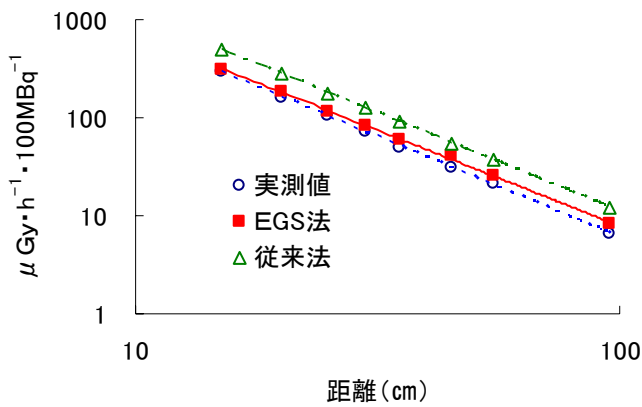


Fig. 5 球線源が円柱状のファントムの中心にある場合 (^{18}F 使用)

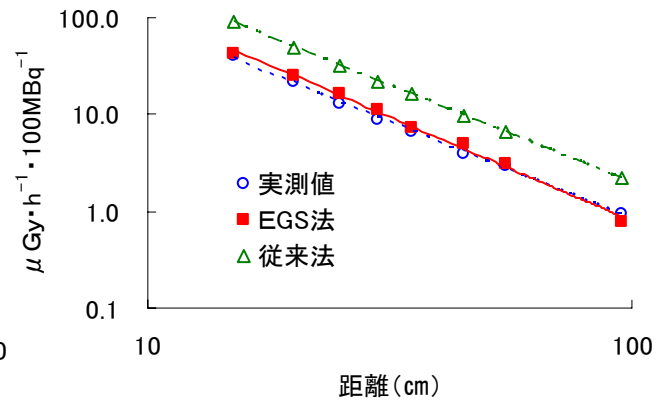


Fig. 6 球線源が円柱状のファントムの中心にある場合 ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ 使用)

4.3 球状線源が円柱状ファントム内に偏心して設置されている実験

またプログラムの性質を検討するために、RI を含む球形の線源を、円柱形のファントム内に偏心して設置し実験を行った。まず RI を ^{18}F にして実験を行った。透過する水の距離が長い 180° 方向の結果を Fig. 7 に、透過する水の距離が短い 0° 方向の結果を Fig. 8 に示した。RI が ^{18}F であったために比較的統計精度の高い結果が得られ、また従来法の値と比較して、EGS 法の値と実測値は良く一致した。実効エネルギーが 511keV の ^{18}F の場合は EGS4 の計算で正確な線量評価が得られていると考えられる。

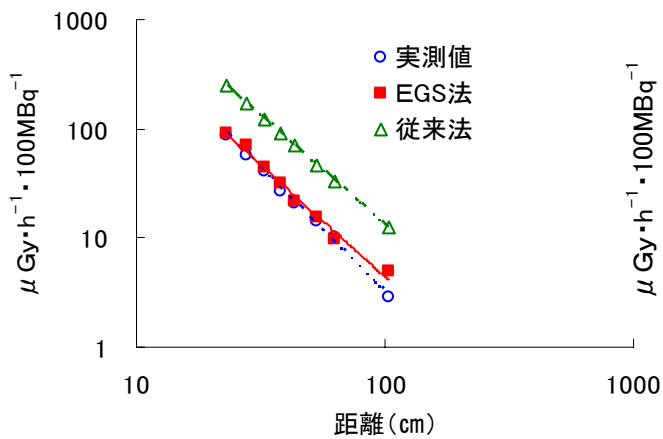


Fig. 7 180° 方向の結果 (^{18}F 使用)

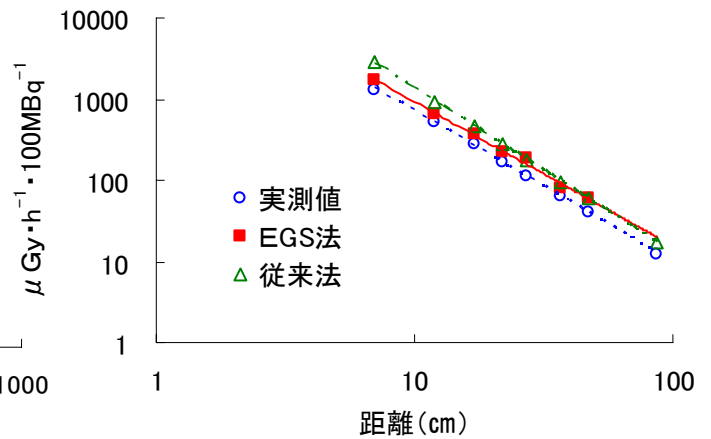


Fig. 8 0° 方向の結果 (^{18}F 使用)

次にRIを ^{99m}Tc にして実験を行った。180°方向の結果をFig.9に、0°方向の結果をFig.10に示した。RIが ^{99m}Tc であったため統計精度は低かったが、0°方向では従来法の値と比較して、EGS法の値と実測値は良く一致した。しかし、180°方向では実測値よりもEGS法の値が小さくなった。

^{99m}Tc を用いた実験において、 ^{99m}Tc の実効エネルギーが141keVであることから低エネルギー成分の散乱線の寄与が大きいことが予測される。一方RPLDはFig.1から実効エネルギーが40keV以下の場合のRPLDの相対レスポンスが1以下であり、また15keV以下では相対レスポンスの評価が行われていない。よって、RPLDは低エネルギー成分の感度が低いことが推測される。加えて ^{99m}Tc の場合は、低エネルギー成分の散乱線の影響が大きい事が予測されるので、実測値も検討し直す必要があると考えられる。実験の際に散乱線の寄与を減らすために床や壁を鉛で覆い、またどの方向からの散乱線の寄与が大きいか確認するために、線量計の取り付ける数を増やすなどして工夫をして行きたいと考えている。しかし、低エネルギー成分の問題に関してはさらに原因を追究する必要があると考えられる。

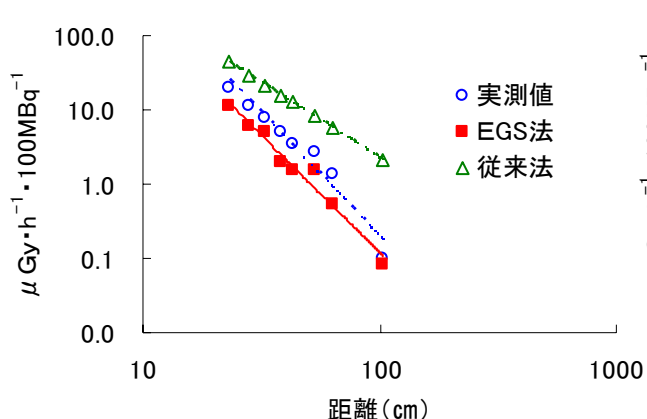


Fig. 9 180°方向の結果 (^{99m}Tc 使用)

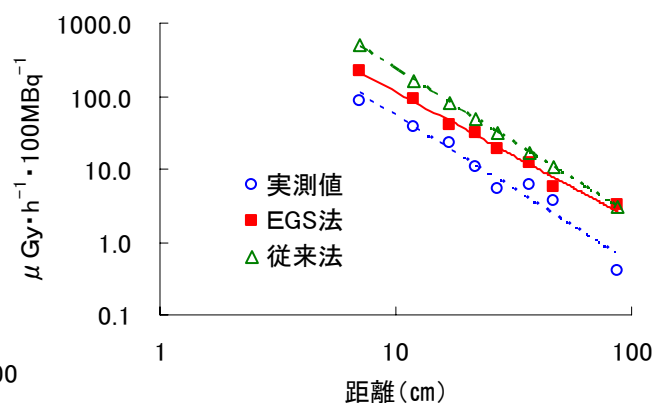


Fig. 10 0°方向の結果 (^{99m}Tc 使用)

5. 今後の課題

今後はEGS4の利点を生かし、動物の体内臓器の元素組成や密度情報などを考慮するとともに、より実際の動物の解剖学的情報に近いファントムを構築して精密なシミュレーション計算を行う計画である。また、本研究の発展形として、獣医核医学実施時の動物体内被曝の計算や放射線治療時の組織線量を求めることも可能である

文献

- 1) 荻野勇: イヌ・ネコのバックグラウンドデータの推移, PROVET, 128 (7), 17-28 (1998)
- 2) 熊井治孝: イヌとネコの年次別疾病の発生順位, PROVET, 128 (7), 27-41 (1998)
- 3) 伊藤伸彦: 獣医核医学の現状と将来 -わが国における獣医核医学の実現を目指して-, 獣医畜産新報. 53(11), 903-907, (2000)
- 4) 伊藤伸彦, 夏堀雅宏: RIの獣医療への応用を目指して -獣医核医学の現状と将来- 報告, Isotope News, 7, 30-31 (2000)
- 5) しゃへい計算マニュアル編集委員会 (委員長 濱田達二): しゃへい計算の基本的な方法, “放射線施設しゃへい計算実務マニュアル”, pp. 6-7, 財団法人原子力安全技術センター, 東京 (2000)

- 6) 伊藤信彦, 花輪明日美, 鈴木花杏, 鍋島紀子, 永井裕司, 夏堀雅宏, 石川達也, 畠山智, ニツ川章二, 寺崎一典, 坂本幸夫: 核医学診断を受けたコンパニオンアニマルに関わるヒトの外部被曝線量評価
RADIOISOTOPES, Vol. 53, No. 51, January 2004
- 7) アイソトープ手帳 10 版, pp21, 38, 社団法人日本アイソトープ協会