

## 獣医核医学における放射線防護に関する研究 その2

### ～ 獣医師、飼育者、一般公衆の外部被曝線量評価～

鈴木花杏 <sup>\*1</sup> 鍋島紀子 <sup>\*1</sup> 伊藤伸彦 <sup>\*1</sup> 夏堀雅宏 <sup>\*1</sup>

石川達也 <sup>\*2</sup> 畠山智 <sup>\*3</sup> ニツ川章二 <sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> 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

<sup>\*2</sup> 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

<sup>\*3</sup> 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

#### 1. はじめに

近年、日本を含めた先進諸国では動物の福祉が見直されてきたと共に、動物に対する高度医療の要請が増加している。この重要な背景として、家庭で飼育される動物や社会に貢献する動物に対しての認識の変化がある。加えてこれらコンパニオンアニマルの飼養環境の向上やワクチン接種率の増加など獣医予防医学の浸透によって、動物の長寿化・高齢化が進み、犬・猫いずれも10歳以上の割合は増加しつづけている<sup>1)</sup>。それに伴い、これら動物の疾病の種類は大きく変化し、感染症から加齢性の代謝性疾患や新生物（腫瘍）等へと移行しつつある<sup>2)</sup>。このことも動物のQOL (quality of life)向上への要求に伴う高度獣医療の需要増の一因となっている<sup>3,4)</sup>。このため少なくとも先進諸国ではヒト医療で行われている高度医療技術は殆ど獣医療に適用されており、核医学も例外ではない。しかし、我が国では獣医核医学は実現されておらず、実現するためには、その有用性の検討や安全性の評価を行い、安全なRI利用のための基準を設ける必要がある。核医学検査を行う際、問題となるのは獣医師等従事者、飼育者、一般公衆の外部被曝である。そのため、本研究では動物実験の数を減らすことも念頭に置き、コンピュータシミュレーションによりヒトの年間被曝線量評価を行った。

#### 2. 方法

本研究では、まず、表計算ソフト Microsoft Excel 2000 の VBA マクロを用いてファントムからの空間線量を計算する空間線量計算プログラムを作成した。このプログラムはファントムを 1mm 間隔に並んだ点の集合体とみなし、動物の体内と想定する部分に吸収とビルドアップを考慮して計算を行った。動物を単純な円柱状とし、その中に RI が均一に分布すると想定した単純円柱状ファントムと、体内に臓器があると想定し、その臓器を球状と仮定した混合ファントムを作成し、ファントム内に Tc-99m や F-18 を注入して、空間線量を

蛍光ガラス線量計（RPLD：GD-301、旭テクノグラス）で実測した。そこで、空間線量計算プログラムにより計算した値と実測値を空気カーマ率にて比較し、システムの正確性を評価した。

さらに、本システムを用いて獣医師等従事者、飼育者、一般公衆の年間被曝線量を求めた。その際、核医学検査時におけるヒトの作業条件を考慮して、条件を設定した（表3）。RIの量は臨床的に使用する最大量を想定し、2種類（Tc-99m, F-18）の核種と4種類（0.5, 5, 15, 50 kg）の動物の体格条件で計算を行った。また、今回は物理的半減期のみを考慮し、生物学的半減期つまり、代謝や排泄等の体内動態によるRIの減衰を考慮しなかった。

## 2.1 空間線量計算プログラムによる線量計算方法

空間線量計算プログラムは、ファントムを X, Y, Z軸いずれの方向にも 1mm 間隔に区切った任意の場所に点線源 P があり、ファントム表面より d (cm) 離れた位置にある測定点 Q があるものとした。P 点の放射能は全体の放射能を等分割したもので、球状ファントムでは点線源 1 つ 1 つについて PQ 間のうちファントム内に自己吸収とビルドアップを考慮した。また混合ファントムでは、P 点の範囲をボール（球）内に限定して、球内の P 点と測定点 Q を結ぶ直線 PQ と球との交点を M 点、円柱体との交点を L 点とし、今回の実験では球内にある部分 PM も、遮蔽体となっている部分 ML も同じ水で満たしたため、PQ 間のうち PL の部分に自己吸収とビルドアップを考慮した。また、球ファントムと同様に、P 点の放射能はボール内の放射能を等分割したもので、点線源 1 つ 1 つについて Q 点における合計線量を計算した。

自己吸収にはファントムを満たしている溶液を水として、各核種から放出されるγ線エネルギーにおける線減衰係数<sup>5)</sup>を用いた。

ビルドアップはファントムを満たしている溶液を水として、播磨により提案された式<sup>6)</sup>を用い、線量ビルドアップ係数を算出して用いた。ここで、x は平均自由行程で表したファントムからの距離、b, k は定数である<sup>6)</sup>。

$$B = 1 + \frac{(b-1)(k^x - 1)}{k-1} \quad (k \neq 1) \quad \dots \text{式}$$

$$B = 1 + (b-1)^x \quad (k = 1) \quad \dots \text{式}$$

それぞれの係数は使用した核種のエネルギーに対する値が与えられていないため、次のラグランジェの補間公式<sup>6)</sup>を用いて係数を求めた（式<sup>6)</sup>）

$$f(x) = \sum_{k=1}^n g(x_k) \frac{(x-x_1)(x-x_2)\Lambda(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\Lambda(x-x_n)}{(x_k-x_1)(x_k-x_2)\Lambda(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\Lambda(x_k-x_n)} \quad \dots \text{式}$$

点線源の空気カーマ D は空気カーマ率定数  $\Gamma$  ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ )<sup>7)</sup>を用い、式<sup>6)</sup>より算出した。

$$D = \frac{\Gamma \cdot A \cdot (e^{-I \cdot t_1} - e^{-I \cdot t_2})}{I \cdot d^2} \times 10^4 (\mu\text{Gy}) \quad \dots \text{式}$$

ここで A は RI を抽出または合成したときの初期放射能 (MBq)、I は壊変定数、t<sub>1</sub> は RI を抽出または合成してから曝露開始までの時間 (hr)、t<sub>2</sub> は RI を抽出または合成してから曝露終了までの時間 (hr)、d はファントムから測定点までの距離 (cm) である。

また、計算値と実測値を、曝露開始時間における空気カーマ率 D<sub>R</sub> ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{hr}^{-1}$ )で比較するため、式<sup>6)</sup>を用いて換算した。

$$D_R = D \times \frac{I}{(e^{-I \cdot t_1} - e^{-I \cdot t_2})} (\mu\text{Gy} \cdot \text{hr}^{-1}) \quad \dots \text{式}$$

## 2.2 ファントムによる実際の測定

混合ファントムとは、水とRIで満たされたボールを水で充満させたポリタンク内に木綿製たこ糸で吊り下げ、任意の位置に固定したものである。また、体積の異なる2種類のファントム(2, 20L)を用いた。混合1型とは球状ファントムがポリタンク内の中央に位置するもの、混合2型とは球状ファントムがポリタンク内のほぼ底部に位置するものを示す。また、床や壁などによる散乱線の影響を極力避けるために中空の発泡スチロール製の箱上に設置した。

RPLDはファントムとスタンド間に木綿製たこ糸をかけ、ファントム表面から10, 20, 50, 80, 100 cmの点の糸上に設置した。

表1. 実験に使用したファントムの条件

核種	ファントム形状	大きさ	測定開始時の放射能(MBq)
Tc-99m	20L 混合1型	円柱： 30×33.3cm	177.6
		球： 6.4cm	
	20L 混合2型	円柱： 30×33.3cm	173.9
		球： 6.6cm	
2L 混合1型	円柱： 12×20cm	128.4	
	球： 6.2cm		
2L 混合2型	円柱： 12×20cm	110.6	
	球： 6.2cm		
F-18	20L 混合1型	円柱： 30×32.5cm	92.1
		球： 6.4cm	
	20L 混合2型	円柱： 30×32.5cm	87.7
		球： 6.3cm	
	2L 混合	円柱： 12×18cm	70.7
		球： 6.6cm	

実験に使用したRPLDは、線量計リーダ(FGD-1000、旭テクノグラス)で線量(Gy)を読み取った。その読み取り値からバックグラウンドを引き、さらにエネルギー特性の補正値を曝露開始時の線量率( $\mu\text{Gy} \cdot \text{hr}^{-1}$ )に換算して使用した。

## 2.3 作業条件を考慮したヒトの外部被曝線量評価

空間線量計算プログラムから得られた結果に様々な作業条件を考慮して、ヒトの外部被曝線量の評価を行った。ヒトにおいて一般的な投与量は $^{99\text{m}}\text{Tc}$ で370~740 MBq(10~20 mCi)、 $^{18}\text{F}$ で111~296 MBq(3~8 mCi)なので、より安全側で評価するため、臨床的に使用する最大量である $^{99\text{m}}\text{Tc}$ は740 MBq(20 mCi)、 $^{18}\text{F}$ は370 MBq(10 mCi)とした。プログラムの条件を設定するにあたり、動物の体型は円柱状、体内の臓器を球状とし、投与されたRIはある臓器に分布するものとした。動物の大きさは、評価例1は新生児(体重約0.5 kg)、評価例2は猫や小型犬(体重約5 kg)、評価例3は中型犬(体重約15 kg)、評価例4は大型犬(体重約50 kg)を想定し、評価した(表2)。またすべての評価例で、獣医師等の従事者・飼育者・一般公衆を被曝の対象として、それぞれの患者との平均距離、曝露時間、年間検査回数を下記(表3)のように設定し、これらの条件における線量を空間線量計算プログラムで算出し、その結果を障害防止法で定められている線量限度と比較した。

表 2. 被曝線量計算プログラムによる評価例の設定条件

	評価例 (0.5kg)	評価例 (5kg)	評価例 (15kg)	評価例 (50kg)	
ファントム形状	円柱体 球	7×13cm 4cm	15×30cm 5cm	20×50cm 6.6cm	30×75cm 10cm
投与量	Tc-99m F-18	740MBq (20mCi) 370MBq (10mCi)			

表 3. 被曝対象の設定条件

被曝対象	平均距離	曝露時間	回数
獣医師	50cm	投与後 1 時間まで	50/yr
飼育者	0cm	投与後 48 時間以降	1/yr
一般公衆	100cm	投与後 48 時間以降	1/yr

外部被曝線量を評価するときは、ICRP 1990 年勧告では 1cm 線量当量で評価しているのので、空気カーマ率定数 $\Gamma$ ではなく 1cm 線量当量率定数 $\Gamma_{1cm}$ ( $\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{hr}^{-1}$ )<sup>6)</sup>を用いて 1 cm 線量当量  $H_{1cm}$ を算出した。(式 )

$$H_{1cm} = \frac{\Gamma_{1cm} \cdot A \cdot (e^{-\lambda_1 t_1} - e^{-\lambda_1 t_2})}{I \cdot d^2} \times 10^4 (\mu\text{Sv}) \quad \dots \text{式}$$

### 3. 結果

#### 3.1 ファントムによる実際の測定

図 1 は Tc-99m の 20L 混合ファントムの実験結果である。混合 1 型の結果は若干実測値が計算値を超えており、その比は平均  $0.90 \pm 0.07$  だった。また混合 2 型の結果の比は平均  $1.16 \pm 0.39$  だった。2L 混合ファントムの実験結果図 2 に示したが、混合 1 型、混合 2 型ともに計算値と実測値は近似しており、その比は前者が  $1.04 \pm 0.13$ 、後者が  $1.12 \pm 0.12$  だった。

また図 3, 4 は F-18 を用いた同様の実験結果を示す。20L 混合ファントムを用いた実験では計算値が実測値より大幅に大きな値となった。その比は混合 1 型、混合 2 型で平均  $2.18 \pm 1.13$ 、 $2.41 \pm 1.04$  だった。また 2L 混合ファントムの結果も計算値は過大評価しており、その比は平均  $1.53 \pm 0.21$  となった。

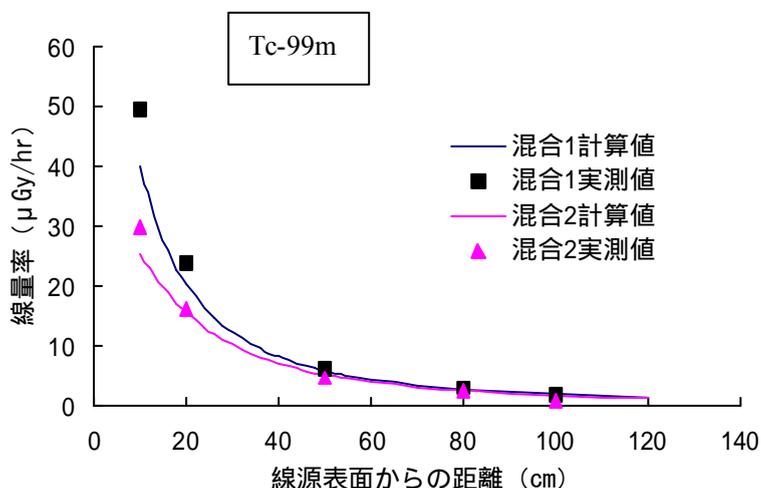


図 1 20L 混合ファントムの実測値と計算値の比較 ( Tc-99m,1 型 : 177.6MBq,2 型 : 173.9MBq )

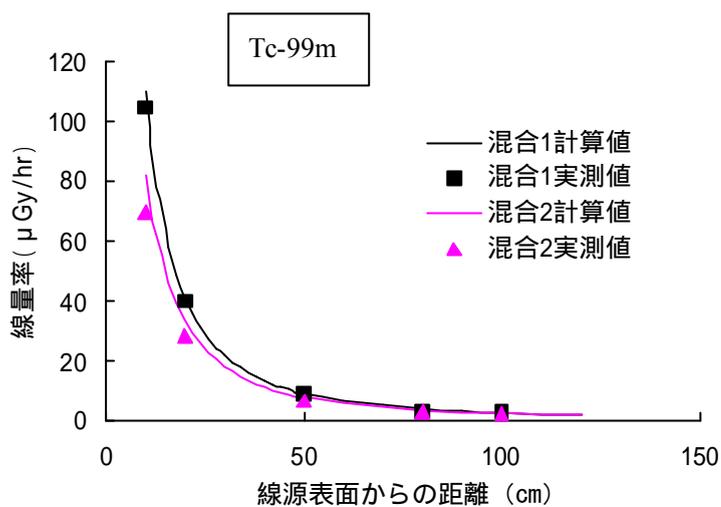


図 2 2L 混合ファントムの実測値と計算値の比較 ( Tc-99m,1 型 : 128.4MBq,2 型 : 110.6MBq )

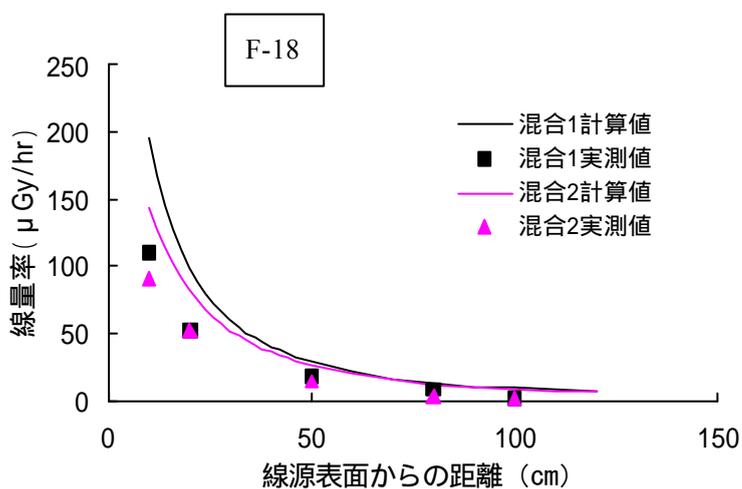


図 3 20L 混合ファントムの実測値と計算値の比較( F-18,1 型 : 92.1MBq, 2 型 : 87.7MBq )

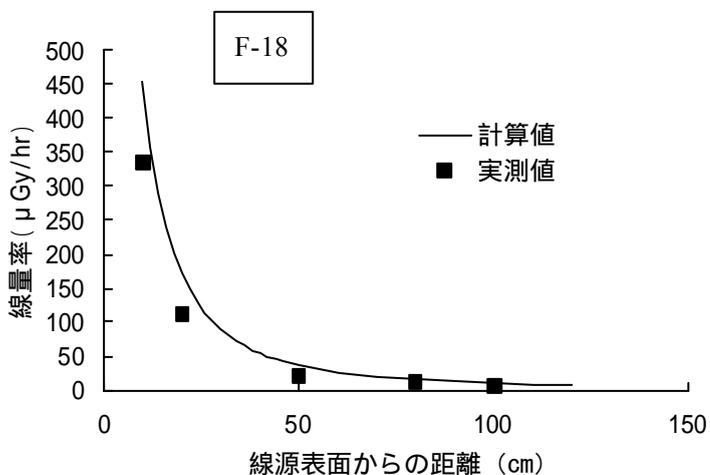


図 4 2L 混合ファントムの実測値と計算値の比較 ( F-18,70.7MBq )

### 3.2 作業条件を考慮した外部被曝線量評価

計算の結果は以下の表に示した。

被曝線量計算プログラムの結果

		評価例	評価例	評価例	評価例
獣医師 ( $\mu$ Sv)	Tc-99m	3970	3400	2800	1750
	F-18	10400	9120	8000	5800
飼育者 ( $\mu$ Sv)	Tc-99m	727	148	74.5	24.0
	F-18	0.0021	0.00044	0.00024	8.96E-05
一般公衆 ( $\mu$ Sv)	Tc-99m	0.77	0.70	0.61	0.40
	F-18	2.25E-06	2.11E-06	1.92E-06	1.5E-06

獣医師等の従事者、飼育者、一般公衆の年間最大線量はそれぞれ 10.4 mSv (評価例 1 の  $^{18}\text{F}$ )、0.7 mSv (評価例 1 の  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) および 0.77  $\mu$ Sv (評価例 1 の  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ) であった。どれも平成 13 年度より施行された改正法の線量限度 (職業被曝 5 年間で 100 mSv かつ任意の 1 年間で 50 mSv、公衆被曝 1 mSv) を下回った。

## 4. 考察

### 4.1 混合ファントムにおける計算値と実測値との比較

線源の体積が小さいほど表面の線量率が高くなることから<sup>8)</sup>、RI がある臓器に集中することを考慮に加えて、より現実の動物に近い条件で実験を行うために、混合ファントムを用いて実験を行った。

Tc-99m を用いた実験で計算値と実測値の比の平均は、20L 混合ファントムでは混合 1 型、混合 2 型それぞれ  $0.90 \pm 0.07$ 、 $1.16 \pm 0.39$ 、2L 混合ファントムでは混合 1 型、混合 2 型はそれぞれ  $1.04 \pm 0.13$ 、 $1.12 \pm 0.12$  となり計算値と良い一致を示した。20L 混合 1 型ファントムにおいて実測値が計算値を超えてしまった ( $0.90 \pm 0.07$ ) 原因のひとつに以下のことが挙げられる。水などの軽い物質では、多数回散乱線の寄与でファントム近くでは吸収による指数関数的な減衰以上にビルドアップ係数による寄与が大きくなり、計算値と実際の値との比が 1 より小さくなり過小評価となる現象が起こる。特に水やコンクリートの場合には 0.1MeV 近辺の線にこの現象が生じると言われている<sup>9)</sup>。今回の実験では、ファントム内は水で満たし、また Tc-99m の線エネルギーは 0.141MeV であるため、特に大型の混合ファントムに近い位置で上記のような現象の影響を受けたと考えられる。

F-18 について、20L 混合ファントムを用いた実験では実測値が計算値より大幅に小さな値となった。その比は混合 1 型、混合 2 型ファントムで平均  $2.18 \pm 1.13$ 、 $2.41 \pm 1.04$  だった。また 2L 混合ファントムの結果も計算値が過大評価となり、その比は平均  $1.53 \pm 0.21$  となった。計算値は 20、2L の両方のファントムで実測値よりも過大評価したが、特に 20L ファントムの方が実測値と計算値の偏差が大きい。全体的に F-18 実験結果の方が Tc-99m 実験結果より大幅に過大評価となっているのは、エネルギーの違いによるものと推察される。今回線量計算に使用した式・係数は一般的に使われているものだが、エネルギーが大きい場合には (F-18 の線エネルギー 0.511MeV)、吸収体による線の減衰率が実際より大きくなり、過大評価する傾向があるといわれていること<sup>9)</sup>が原因の一つとして考えられる。

### 4.2 ヒトの作業条件を考慮した条件での計算結果

被曝対象の条件を表 3 のように設定した。ヒトの核医学検査に従事する看護婦について、20 分の作業時間として評価を行った研究があるが<sup>10)</sup>、獣医師の場合には、看護婦や放射線技師などの役割も一人でこなすことになるので、今回は暫定的に作業時間を 1 時間と長めに設定した。

また小児の核医学検査に関する研究では、両親が検査後子供を抱くと仮定して評価している<sup>11)</sup>。そのため、飼育者の場合も患者である動物を退院後ずっと抱きつづけると仮定した。また今回は排泄等の問題に加えて、

患者と飼い主の負担を考慮し、48 時間後の退院が妥当と考えた。ヒトの Tc-99m を用いた核医学検査の研究で、RI 投与後 2~12 時間で 92% の RI が排出され、24 時間後に排出された尿からはごく少量の放射能しか検出されないことがわかっている<sup>12)</sup>。今回の実験では物理的半減期のみを考慮したため退院を 48 時間後と設定したが、生物学的半減期も考慮すれば、48 時間以前の退院が可能かもしれない。また、実際にはヒトと動物との平均距離はより長く、接近時間はより減少する可能性が考えられるので、海外などで行なわれている獣医核医学診療の現場を調査する必要がある。

被曝評価例の条件についてはさらに調査が必要だが将来獣医核医学における放射線防護のガイドラインの作成と密接な関連をもつことになると考えられる。

平成 13 年度より施行された改正法で、職業被曝の場合には 5 年間で 100 mSv( 1 年あたりの平均は 20 mSv ) かつ任意の 1 年では 50 mSv、公衆被曝の場合には 1 mSv という線量限度が定められている。改正法は International Commission on Radiological Protection (ICRP)1990 勧告を受け入れて改正されたものだが、核医学検査に伴う被曝評価の研究では ICRP 勧告を基準としていることが多い<sup>10, 11, 13)</sup>。今回の被曝評価例の結果はいずれもこの線量限度を超えなかったことから、獣医療で核医学を行う際、ヒトの被曝の安全性についての問題は生じないと推察される。さらに、獣医核医学においても、ヒトの核医学検査と同様に、防護エプロンの使用や手技の自動化、患者への接近時間や接近距離の減少などの防護対策を行うことにより、今回の被曝シミュレーションシステムによる計算値よりもさらに線量が小さくなると推察される。

また、F-18 の計算線量が過大評価されていることを割り引いても、被ばく線量が Tc-99m より高かったことについて、他の研究<sup>13)</sup>においても Tc-99m を使う普通の核医学検査よりも FDG を使う PET 検査の方が被曝線量は高くなる傾向があるとしている。それは、FDG の方が放出線のエネルギーが高いので、技師や看護婦の外部被曝線量が高くなるためである。

#### 4.3 今後の課題

今回作成したシミュレーションシステムで、F-18 を用いた線量計算については、安全側に約 2 倍過大評価しているが、実測値との差が大きいので、そのエネルギーの特性などを考慮して今後さらに精密な計算方法を検討しなければならない。しかし Tc-99m についての線量計算では、体積の大きいファントムについても計算値と実測値が良く一致している。そのため、本システムは安全性評価に利用できると考えられた。

今回の被曝評価の例では考慮しなかったが、被曝線量に影響する他の因子として RI の体内動態や体外への排出などが挙げられる。また尿や糞などから放出される放射線による線量の評価・検討が必要である。

今回は投与した RI が全て一箇所に集積すると仮定した。実際の RI は特異的な臓器に集積するが、動態は時間的に変化し、その集積状況も変化していくため、さらに現実的な動物に近いファントムの検討が必要である。

また実際に線量が最大となるのは投与量や体重の大きさだけが問題ではない。RI の投与法、体内動態、退院時期、接近時間、接近距離などで線量は変化するため、さらに調査・研究が必要である。特に従事者の場合はその手技や、接近時間により被曝線量が大きく左右されるため、実際の動物を使った核医学検査を想定した実験による被曝線量の実測や、その作業状況について調査する必要がある。

今後これらを考慮することで、より詳細で現実的な被曝線量の評価を行い、動物の退出基準についても考察する必要がある。

#### 5. 文献

- 1) 荻野勇. 1998. イヌ・ネコのバックグラウンドデータの推移, Pro Vet. 128 (7): 17-28.
- 2) 熊井治孝. 1998. イヌとネコの年次別疾病の発生順位, Pro Vet. 128(7): 27-41.
- 3) 伊藤伸彦. 2000. 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 -, JVM. 53(11): 903-907.
- 4) 伊藤伸彦, 夏堀雅宏. 2000. 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.

- 5) 日本アイソトープ協会. 1996. アイソトープ手帳. 丸善.
- 6) 兵藤知典. 1979. 細いビームのガンマ線の物質による減衰. pp.38-52. 放射線遮蔽入門 第2版. 産業図書.
- 7) 兵藤知典. 1979. ガンマ線の物質による減衰. pp.69-96. 放射線遮蔽入門 第3版. 産業図書
- 8) 鍋島紀子、永井裕司、夏堀雅宏、伊藤伸彦、石川達也、池上徹、高橋秀幸、畠山智、二ツ川章二. 2000 NMCC 共同利用研究成果報文集 8 p227-234 獣医核医学における放射線防護に関する研究～獣医師、飼育者、一般公衆の外部被曝線量評価～
- 9) 播磨良子・田中俊一・坂本幸夫・平山秀夫. 1989 新しい線ビルドアップ係数データベースと遮蔽計算への応用 日本原子力学会誌 31(4)477-486
- 10) Harding, L.K., Hesslewood, S., Ghose, S.K., and Thomson W. H. 1985. The value of syringe shields in a nuclear medicine department. Nucl. Med. Commun. 6: 449-454.
- 11) Mountford, P.J., O'Doherty, M.J., Forge, N.I., Jeffries, A., Coakley, A.J.1991. Radiation dose rates from adult patients undergoing nuclear medicine investigations. Nucl. Med. Commun. Aug. 12(8):767-777
- 12) Katsumi Ishii, Akira Ishibashi, Kanji Torizuka,. 1993. Phase I Clinical Study of <sup>99m</sup>Tc-MAG-3. 核医学 30 巻2号
- 13) Chiesa, C., De Sanctis, V., Crippa, F., Schiavini, M., Fraigola, CE., Bogni, A., Pascali, C., Decise, D., Marchesini, R., and Bombardieri, E. 1997. Radiation dose to technicians per nuclear medicine produce: comparison between technetium-99m, gallium-67, and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. Eur. J.Nucl. Med. 24(11):1380-9