

《原 著》

核医学検査における患者からの検者の被ばく線量

柏倉 健一* 金谷 信一* 柏倉 明美* 小林 秀樹*
牧 正子* 日下部きよ子*

要旨 放射性医薬品を投与された患者から核医学検査中に検者がどの程度被ばくするかを評価するため、5種類の代表的な検査における平均被ばく線量を高感度半導体ポケット線量計を用いて測定した。また、放射性医薬品投与5分後と検査直前における空間線量率(患者体表から5, 50, 100 cm)を電離箱サーベイメータを用いて測定した。さらに、患者周囲における空間線量率分布の測定を行った。この結果、検査中に患者から受ける被ばく線量は1検査あたり0.3~1.6 μSv と比較的小さく問題は少ないと考えられた。ただし、不必要な被ばくは避けるべきであり、この意味で空間線量率と空間線量率分布は検者の被ばく低減のための基礎資料として有用と考える。また、半導体ポケット線量計を個人モニタリングに使用することで被ばく線量を大きく低減できる可能性が示唆された。

(核医学 33: 477-483, 1996)

I. はじめに

核医学における放射線源は、放射性医薬品の患者投与を境に2つに分けられる。すなわち投与前は、ラジオアイソトープ(RI)が放射線源であり、投与後は患者が放射線源¹⁾となる。ところが、核医学検査時に患者から受ける検者の被ばく線量に関して検討した文献は少ない^{2~4)}。そこで本論では、放射性医薬品の投与を受けた患者から核医学検査中に検者がどの程度被ばくするかを測定評価することを目的とした。

II. 使用機器, 方法

(1) 検査別の被ばく線量測定

検者の検査別の平均被ばく線量を測定する目的

で高感度シリコン半導体ポケット線量計(Aloka: PDM-101)を診療放射線技師2名(男性23歳, 女性27歳)の白衣ポケット(それぞれ胸部, 腹部)に装着し測定を行った。ポケット線量計の測定範囲は1 cm線量等量値で0.01~99.99 μSv (誤差10%以内), エネルギーレスポンスは70 KeV~3 MeVの範囲で30%以内, また, 直線性は10 mSv/hr以下で10%以内である。

核医学において検査件数が多くルーチンとして行われている代表的な5種類の検査(骨スキャン [$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -hydroxymethylene diphosphonate ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HMDP), $n=25$], 肺血流スキャン [$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -macroaggregated albumin ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MAA), $n=8$], 脳血流 SPECT [$^{99\text{m}}\text{Tc}$ -hexamethylpropylene amine oxime ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -HMPAO), $n=17$], 心筋血流 SPECT [Thallium-201 chloride (^{201}Tl), $n=52$], ただし, 負荷, 再分布スキャンを別々に数えた], 腫瘍スキャン [Gallium-67 citrate (^{67}Ga), $n=17$])を選び, 被ばく線量を各検査, 検者ごとに記録集計し, 平均値を求めた。所要検査時間も同時に記録し, 平均時間を求めた。

また, バックグラウンド測定のためシリコン半

* 東京女子医科大学放射線科

受付: 7年6月6日

最終稿受付: 8年2月6日

別刷請求先: 秋田市千秋久保町6-10 (☎010)

秋田県立脳血管研究センター内

新技術事業団共同研究室

柏 倉 健 一

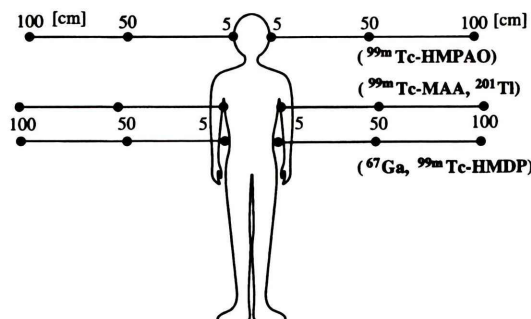


Fig. 1 Schematic representation of the measurement points of the spatial dose rates. In the 5 procedures, spatial dose rates from skin surface of the patients at 5 cm, 50 cm, and 100 cm were obtained, both after 5 min of the injection and right before the study. Each measurement point was along a coronal line, at right angles to the longitudinal axis, which passed through the center of the clinical organ. The measurements were performed on both sides of the body, and the mean spatial dose rates were obtained by averaging the data on both sides and among patients.

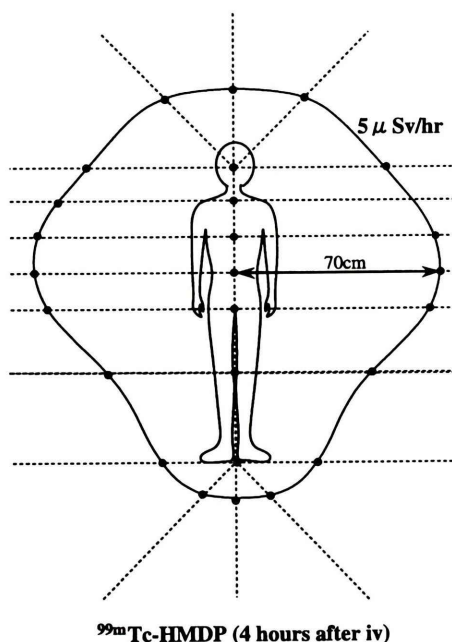


Fig. 2 An example ($5 \mu\text{Sv/hr}$, $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$, 4 hours after iv) of the measurement points of the spatial dose rate distributions. The measurement points were at 10 points on each side (total 20 points) of the body for a given spatial dose rate. Measurements were started clockwise from the head, along the midcoronal plain. Assuming midcoronal lines, the distances between skin surface and the points, which showed the same spatial dose rate on each line, were selected. These distances were then averaged among the patients, and average distances were plotted on the schematic figures. Circumferential curves were finally obtained by interpolating these points.

導体ポケット線量計を合計 100 時間検査室中央に設置し、その平均値を求めた。

(2) 空間線量率測定

上と同じ 5 種類の検査において、放射性医薬品の投与 5 分後と検査直前時（ただし、肺、脳血流スキャンに関しては投与 5 分後の 1 回のみ）に電離箱サーベイメータ（Aloka: ICS-311）を用い、患者体表からの特定距離（5 cm, 50 cm, 100 cm）における空間線量率の測定を行った。電離箱サーベイメータの測定範囲は 1 cm 線量当量値で $1 \mu\text{Sv} \sim 10 \text{ mSv/hr}$ 、もしくは $0.3 \mu\text{Sv} \sim 10 \mu\text{Sv}$ （ともに誤差 10% 以内）、エネルギーレスポンスは 30 KeV \sim 2 MeV の X, γ 線において 10% 以内である。

測定は成人患者（骨、腫瘍スキャン（ $n=21$ ）、肺、心筋血流スキャン（ $n=13$ ）、脳血流スキャン（ $n=10$ ）を対象とし、実際の検査と同様ベッドに仰臥した状態で行った。各測定点は検査対象臓器（すなわち脳血流スキャンに関しては頭部、肺血流に関しては肺野部、心筋血流に関しては心臓部、骨、腫瘍検査に関しては体幹部）の中心を通るコロナル面上に設定した。測定は体の両側で行

い平均をとった（Fig. 1）。なお、最小測定距離を 5 cm とした理由は、電離箱サーベイメータの入射窓とディテクター中心までの距離が 5 cm であるため、実際の測定では電離箱サーベイメータを患者体表に密着させている。

(3) 空間線量率分布測定

比較的時間に余裕があり、空間線量率分布を求めることが可能であった 4 種類の検査（脳血流、骨スキャン（ $n=3$ ）、腎スキャン [$^{99\text{m}}\text{Tc-diethyltri-amine pentaacetic acid}$ ($^{99\text{m}}\text{Tc-DTPA}$), $n=3$], 心プールスキャン [$^{99\text{m}}\text{Tc-human serum albumin}$ ($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -

Table 1 Radiation exposure from patients in 5 common procedures

Procedure	Agent	Administration dose (MBq)	Average study time (min)	Average exposure (μ Sv)
Bone scan (n=25)	^{99m}Tc -HMDP	836 \pm 88	40	0.5
Lung scan (n=8)	^{99m}Tc -MAA	172 \pm 13	20	0.5
Brain SPECT (n=17)	^{99m}Tc -HMPAO	1054 \pm 48	30	1.6
Myocardial SPECT (n=52)	^{201}Tl	143 \pm 11	25	0.3
Tumor (n=17)	^{67}Ga	113 \pm 7	60	0.7

Values are mean \pm S.D.**Table 2** Spatial dose rates from patients for a given distance

Agent	Measurement time	Spatial dose rate (μ Sv/hr)		
		Distance from skin surface (cm)		
		5	50	100
^{99m}Tc -HMDP (n=21)	5 min after iv.	155.4 \pm 50.0	22.1 \pm 4.8	9.3 \pm 1.7
	4 hr after iv.	36.2 \pm 9.3	7.8 \pm 2.2	3.2 \pm 1.0
^{99m}Tc -MAA (n=13)	5 min after iv.	54.0 \pm 20.0	4.5 \pm 1.7	1.1 \pm 0.5
^{99m}Tc -HMPAO (n=10)	5 min after iv.	159.6 \pm 44.2	24.5 \pm 10.0	7.2 \pm 3.1
	5 min after iv.	31.9 \pm 10.4	4.9 \pm 1.7	2.1 \pm 1.1
^{201}Tl (n=21)	4 hr after iv.	26.2 \pm 9.7	3.9 \pm 1.2	1.6 \pm 0.6
	5 min after iv.	94.2 \pm 31.3	6.8 \pm 1.0	2.7 \pm 0.5
^{67}Ga (n=21)	3 days after iv.	38.3 \pm 13.0	2.9 \pm 0.6	1.1 \pm 0.3

Values are mean \pm S.D.

HSA), n=2))において、電離箱サーベイメータを用い、患者周囲における空間線量率分布を測定した。この理由は実際の検査の状況と考えた場合、患者からの被ばく線量を減少させるには検査対象臓器を通る1本の коронаル線上での空間線量率の測定のみでは十分ではなく、したがって空間線量率分布を把握する必要があると考えたためである。 ^{99m}Tc -HMPAOを投与された患者に対する測定は脳血流SPECT終了後、すなわち静注30分後より始めた。 ^{99m}Tc -HMDPを投与された患者に対する測定は骨スキャン終了後に行った。 ^{99m}Tc -DTPAを投与された患者に対する測定は腎スキャン中(静注5分後より開始)に行った。また、 ^{99m}Tc -HSAに関しては、ファーストパス終了後(静注5分後)に測定を開始し、測定終了後心電図同期心プル検査を施行した。測定は片半身10か所ずつ計20か所、頭部より始め時計回りに行った。体軸と直角(頭、足部に関しては平行)の

コロナル線上で同一線量率を示す点から体表までの距離を求め、これを患者間で平均し、滑らかな曲線で結び図を作成した(Fig. 2)。測定にはほぼ20分程度の時間を要した。

(4) 連続7週間の被ばく線量測定

検者の日、週ごとの被ばく線量を測定する目的で(1)と同じシリコン半導体ポケット線量計を女性診療放射線技師の腹部ポケットに装着し、通常の検査を行いながら連続7週間の測定を行った。1日の検査終了時に当日の総被ばく線量を記録し、週平均の被ばく線量を求めた。なお、この測定は実際には検査別の被ばく線量測定の約2か月前に行っている。

III. 結 果

(1) 検査別の平均被ばく線量

ポケット線量計を用いて測定した検査別の平均被ばく線量をTable 1に示す。この中では ^{99m}Tc -

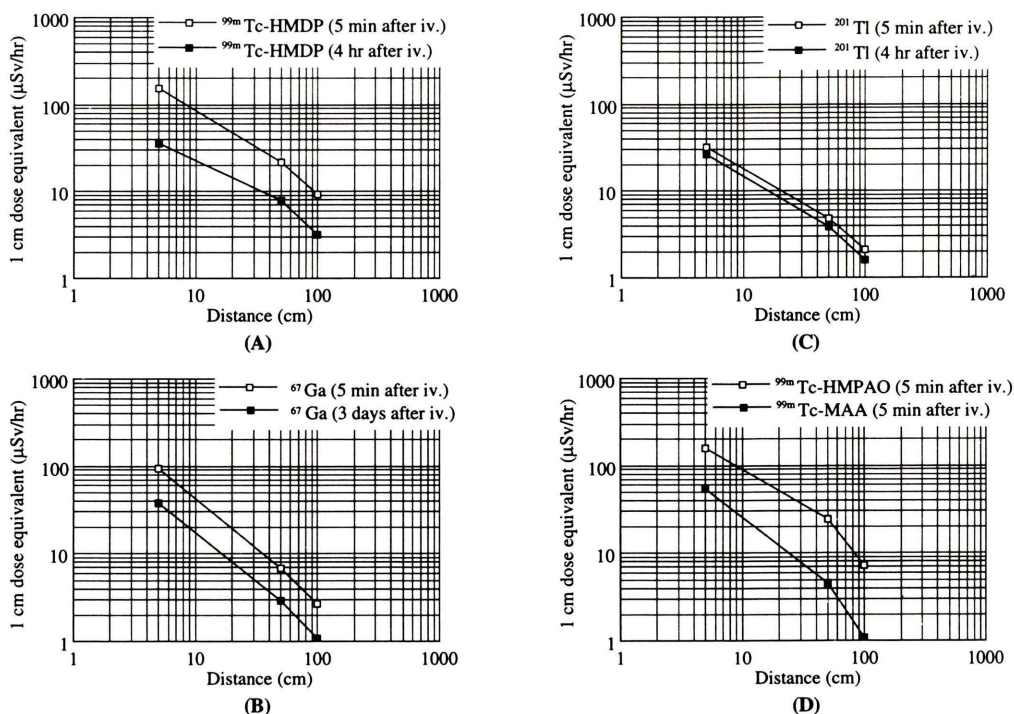


Fig. 3 Correlations between distances from skin surface of the patients and spatial dose rates ($\mu\text{Sv/hr}$) measured with an ionization chamber. These graphs were plotted on both log scales. Comparing the graphs of $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$ and ^{201}Tl , the ratio of decreasing the spatial dose rates was bigger in the $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$ than in the ^{201}Tl . In the graph of $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$, the slope of 5 min after injection was steeper than that of 4 hr after injection. In the ^{67}Ga tumor scan, the spatial dose rates reduced into approximately 1/2.5 after 3 days. The slope of the $^{99\text{m}}\text{Tc-MAA}$ was steeper compared with that of $^{99\text{m}}\text{Tc-HMPAO}$.

HMPAO を用いた脳血流 SPECT 検査時の被ばくがとりわけ大きいことがわかる。なお、バックグラウンド測定の結果、その平均値は $0.08 \mu\text{Sv/hr}$ であったためこの値を各検査の平均被ばく線量から減じてある。

(2) 平均空間線量率

電離箱サーベイメータを用いて測定した各測定点における平均空間線量率を Table 2 に示す。5 cm の場合と比較し、50 cm の距離で空間線量率はほぼ 1/5～1/10、また 100 cm で 1/20～1/40 となった。投与 5 分後と検査直前の空間線量率を比較した場合、特に $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$ でその減少が顕著であった。

(3) 距離と空間線量率との関係

上の結果を両対数表示したグラフを示す (Fig. 3)。この理由は、もし線源が理想的なポイントソースであり、また検出器が理想的な特性を持つと仮定した場合、放射線の減弱は距離の逆自乗の法則に従い、両対数グラフにおいて距離と線量率との関係は直線となるためである。実際には放射性医薬品は患者体内に分布しているので直線にはならないが、得られた各グラフの形を比較することにより放射性医薬品の特性の違い (すなわち体内分布の違い、実効半減期の違い) を推測することが可能となる。

Fig. 3 で $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$ と ^{201}Tl とを比較した場合、 $^{99\text{m}}\text{Tc-HMDP}$ では ^{201}Tl に比べ線量率の減少の

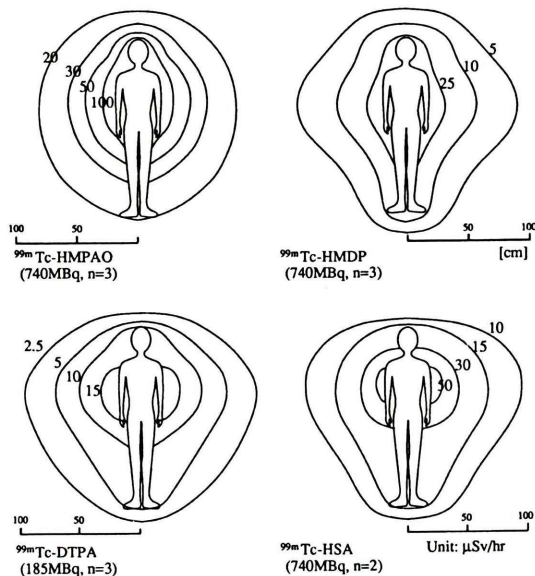


Fig. 4 Schematic representation of the spatial dose rate distributions among subjects with 4 types of radiopharmaceuticals. High spatial dose rates were mainly observed near the chest and abdomen in the ^{99m}Tc -HSA studies, and were especially observed around kidney and bladder in the ^{99m}Tc -DTPA studies. In the ^{99m}Tc -HMDP studies, spatial dose rates showed more uniform distributions corresponding to the concentration to the bone. However, in the ^{99m}Tc -HMPAO studies, high spatial dose rates were detected not only around the brain as a clinical organ but also around the other organs in the body.

割合が大きいことがわかる。また、 ^{99m}Tc -HMDPでは静注5分後と約4時間後のグラフの傾きに差がみられた。 ^{67}Ga において、3日後の検査時に線量率は約2.5分の1となった。さらに、 ^{99m}Tc -HMPAOと ^{99m}Tc -MAAでは、 ^{99m}Tc -MAAの方がグラフの傾きが大きいことがわかる。

(4) 平均空間線量率分布

患者周囲の平均空間線量率分布を Fig. 4 に示す。 ^{99m}Tc -HSAでは体幹部付近に高空間線量率域がみられ、 ^{99m}Tc -DTPAではとりわけ腎臓付近にみられた。また、 ^{99m}Tc -HMDPはより均等な分布を示した。 ^{99m}Tc -HMPAOでは頭部のみならず、胸、腹部にも強い線量率分布域が観察された。

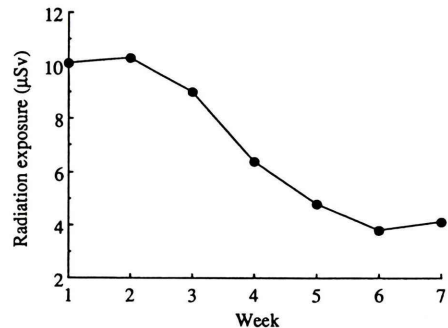


Fig. 5 The changes of the average radiation exposure (μSv) of a technologist in 7 consecutive weeks. Because of the total number of the studies was almost equal in each week, radiation exposure could be compared on the weekly base. It was understood that the average exposure was largely reduced as increasing the weeks.

(5) 平均被ばく線量の推移

ポケット線量計を用いて測定した連続7週間における検者の被ばく線量を、週ごとにまとめたものを、Fig. 5 に示す。週単位での検査の種類、件数の合計はほぼ一定なので、週ごとの平均被ばく線量については得られた線量を直接比較することが可能となる。測定を続けるに従い、週平均の被ばく線量が大きく減少していることが理解される。

IV. 考 察

各検査から受ける被ばく線量については、脳血流スキャン ($1.6 \mu\text{Sv}$) を除きその平均被ばく線量は $0.3 \sim 0.7 \mu\text{Sv}$ 間に分布しており、通常の検査を行っている限りその年間被ばく線量は職業被ばくの実効線量当量限度 (医療法施行規則第30条の27, 50 mSv/年) をはるかに下回ると考えられる。したがって、この程度の被ばくでは問題ないとも言える。ただし、診療放射線技師の場合これ以外にも被ばくをする可能性があり (特にQC時の被ばくが大きいという報告^{2,5)}もある)、また、ICRPの1990年勧告では引き続きがん、遺伝的影響をしきい線量のない確率的影響とみなしている⁶⁾。したがって不必要な被ばくはできるだけ避けるべ

きであり、この点において本論は意味を持つと考える。

また、この測定によって得られた被ばく線量が他の報告に比べて低くなっている第一の理由は、諸研究^{3,4)}では電離箱その他の放射線測定機器を用いて患者からの特定距離における空間線量率を測定し、これにもとづき計算によって被ばく線量を推定しているためと考えられる。しかし、この方法は実際的ではなく多分に誤差を含んでいると思われる。第二の理由は、検査室(東京女子医大病院)にはベッドとコンソール間に鉛の防護ついたて(鉛厚3mm)があり、検者はスキャン中特に必要のない限りこのついたての後ろにおり、これが被ばくを減少させたと考えられる。すなわちいわゆる放射線防護の3原則のうち、本測定では放射線の減弱に関し距離と遮蔽の2要素が関係している。したがって距離のみを減弱要因としている他の報告と比べ、得られた値は小さくなるが、逆に検査の現状を反映し、また、防護ついたての有用性を示していると考ええる。

また、脳血流スキャンにおいて被ばく線量が多くなっている理由は、^{99m}Tc-HMPAOの投与量が大きいこと、生物学的半減期が比較的長いことに加え、患者の身体的状態に左右された可能性も考えられる。検者が患者を抱きかかえざるを得ない場合、被ばくは急激に増大する⁷⁾という報告もある。

特定距離における空間線量率の測定結果は、5 cmの場合と比較し、50 cmではほぼ1/5~1/10、また100 cmで1/20~1/40となった。Fig. 1で^{99m}Tc-HMDPと²⁰¹Tlとを比較した場合、両グラフとも同一時間帯(静注5分後と約4時間後)に測定を行っているにもかかわらず、^{99m}Tc-HMDPでは²⁰¹Tlと比較し線量率の減少の割合が大きい。この理由は物理的半減期と生物学的半減期の双方の違いによるものと考えられる。すなわち^{99m}Tc-HMDPでは静注後4時間以内にはほぼ40%のRIが尿中に排泄⁷⁾され、また、物理的半減期も²⁰¹Tlと比較し短い。したがってこれらの要因が空間線量率の違いを大きくしていると推察される。^{99m}Tc-

HMDPでは静注5分後と4時間後のグラフの傾きに微妙な差があるが、この差は、この間にRIの体内分布に変化があったことを意味する。また、実効半減期の長い⁶⁷Gaにおいて、検査は放射性医薬品投与5日後にもかかわらず線量率は約2.5分の1に減少したにすぎない。さらに、^{99m}Tc-HMPAOと^{99m}Tc-MAAを比較した場合、^{99m}Tc-MAAの方がよりグラフの傾きが急峻である。この理由も両放射性医薬品の体内分布の違いに起因すると考えられ、^{99m}Tc-MAAの方が検査対象臓器により高い集積を示しているためと考えられる。逆に、^{99m}Tc-HMPAOは頭部のみならずその他の臓器にも分布していることが示唆される。

空間線量率分布の違いは、放射性医薬品の体内分布の違いに起因すると考えられる。すなわち、^{99m}Tc-HSAでは体幹部を中心に高空間線量率域が観察され、^{99m}Tc-DTPAではとりわけ腎臓付近にみられた。また、^{99m}Tc-HMDPでは骨に対する集積を反映し、より均等な分布を示している。核医学検査で用いられる放射性医薬品には高い臓器親和性が要求されることを考えてもこれは予期された結果である。ただし、^{99m}Tc-HMPAOでは検査対象臓器である頭部のみならず、胸、腹部においても高空間線量率域がみられ、この部位の臓器へのRIの高い集積⁸⁾が示された。したがって、核医学検査中に患者から受ける被ばくを減少させるためには、検査対象臓器以外の臓器への放射性医薬品の分布にも注意を払う必要があると考える。

連続した7週間の被ばく線量測定を行った結果、検者の平均被ばく線量は急激に減少した。週単位ではほぼ同一の検査量をこなしているため、減少の理由は検者の心理的な理由によるものと推察される。すなわち、この間当該検者は1日の総被ばく線量を記録するように言われており、また、自身の被ばく線量を随時チェックすることが可能であった。これが、被ばくに対する注意を無意識のうちに高めたのかもしれない。通常、病院では個人モニタとして広くフィルムバッジが利用されているが、フィルムバッジは低線量域での測定が難しく、また、本人が被ばく結果を知るの

1 か月近く後のことになる。したがって被ばくに対する注意を喚起するのは難しい。これに対し高感度直読式ポケット線量計はその場で線量の確認ができるため、被ばくを低減させる効果があったと考えられる。

文 献

- 1) Germain JS: The radioactive patient. *Semin Nucl Med* **16**: 179–183, 1986
- 2) Sloboda RS, Schmid MG, Willis CP: Technologist radiation exposures from nuclear medicine imaging procedures. *J Nucl Med Tech* **15**: 16–24, 1987
- 3) Velchik M: Radiation exposure associated with the performance of radiologic studies in radioactive patients. *J Nucl Med Tech* **18**: 211–213, 1990
- 4) Harding LK, Mostafa AB, Roden L, Williams N: Dose rates from patients having nuclear medicine investigations. *Nucl Med Commun* **6**: 191–194, 1985
- 5) La Fontaine R, Graham LS, Behrendt D, Greenwell K: Personnel exposure from flood phantoms and point sources during quality assurance procedures. *J Nucl Med* **24**: 629–632, 1983
- 6) 国際放射線防護委員会: 国際放射線防護委員会の1990年勧告, 日本アイソトープ協会, 東京, 1991, pp. 17–26
- 7) Littlefield JL, Rudd TG: Tc-99m hydroxymethylene diphosphonate and Tc-99m methylene diphosphonate: Biological and clinical comparison: Concise communication. *J Nucl Med* **24**: 463–466, 1983
- 8) Deckart H, Ertl S, Blottner A, Tautz M: Radiopharmacokinetics and radiation dose from ^{99m}Tc-HM-PAO (Preliminary report). *Eur J Nucl Med* **13**: 429–431, 1987

Summary

Exposure to the Technologists from Radioactive Patients during Nuclear Medicine Studies

Kenichi KASHIKURA, Shinichi KANAYA, Akemi KASHIKURA,
Hideki KOBAYASHI, Masako MAKI and Kiyoko KUSAKABE

Department of Radiology, Tokyo Women's Medical College

In order to evaluate the exposure to the nuclear medicine technologists from patients who had been administrated with radiopharmaceuticals, we measured the exposure in 5 common diagnostic procedures (bone, lung, tumor scan, and brain, myocardial SPECT, n=8 to 52) using a silicon semiconductor pocket dosimeter. We also measured the spatial dose rates at 5 cm, 50 cm, and 100 cm from skin surface of the patients (n=10 to 21) using an ionization chamber, both 5 min after injection and right before the studies with the same procedures above. We further measured the spatial dose rate distributions around the patients in the 4 procedures (bone, renal, blood pool scan, and brain SPECT, n=2 to 3). In results, the exposure to the technologists in each procedure was small (0.5, 0.5, 0.7, 1.6, and 0.3 μ Sv in each bone, lung, tumor scan, and brain, myocardial SPECT, re-

spectively), compared with the dose limits of the medical workers. However, the dose-response relationships in cancer and hereditary effects, referred to as the stochastic effects, have been assumed linear and no threshold models; therefore, the exposure should be minimized. For this purpose, the measurements of spatial dose rates and spatial dose rate distributions were thought to be useful. The differences of these results among procedures were caused by the differences of dose distributions and physical and biological half lives of the radiopharmaceuticals. The results of the measurements in 7 consecutive weeks suggested that the direct measurement of the exposure using a high sensitive digital pocket dosimeter might result a reduced exposure to the technologists.

Key words: Radiation exposure, Radioactive patient, Nuclear medicine study.