ノ ー ト

核医学における患者の内部被曝線量計算コードの作成

赤羽恵一*1, 甲斐倫明*2, 小西恵美子*3, 草間朋子*2, 青木芳朗*2

(1993年3月15日受理)

(1993年7月12日再受理)

The PC Code for Calculating Internal Exposure on the Nuclear Medicine

Keiichi AKAHANE,*1 Michiaki KAI,*2 Emiko KONISHI,*3
Tomoko KUSAMA*2 and Yoshiro AOKI*2

KEY WORDS: calculating code, internal exposure, compartment model

1. はじめに

人工放射性核種の利用が増大するに従い, それによる被曝の機会も増加傾向にある。放射線防護の観点から内部被曝線量評価が必要とされ, 現在までに MIRD 法等の被曝線量計算法が出されてきた¹⁻³⁾。また, それらに基づく計算コードもいくつか発表されている^{4,5)}。核医学の分野では, ICRP が Publ. 53 に内部被曝線量計算法を勧告している⁶⁾。しかし核医学用の計算コードはほとんど利用されていないのが現状である。そこで今回核医学に用いる放射性医薬品を対象として, 汎用パーソナルコンピュータ上で作動する簡便な計算コード (PIER: the Program of Internal Exposure by Radiopharmaceuticals) を試作し, 実測値との比較から, 現在の線量

計算モデルの妥当性を検討した。

2. 計算コードの作成

2.1 計算コードの概要

本計算コードは, ICRP Publ. 53 を基本にしている。Publ. 53 には, MIRD 法を基本とするコンパートメントモデルによる基本的な特定臓器毎の計算法その他, 核種と放射性医薬品の化学形に応じ, 医薬品の体内動態 (移行係数, 半減期等), 線源臓器及びその積分放射能, 標的臓器とその吸収線量, 実効線量当量 ($t=\infty$) が示されている。本計算コードは, 最初に計算対象とする放射性医薬品を選択し, 医薬品の体内動態モデルから線源臓器の積分放射能を計算させた後, 標的臓器の吸収線量を出力する。また積分値だけではなく, 尿中放射能の時間変化などの情報も出力するようになっている。対象とする放射性医薬品は, 比較的使用が多い^{99m}Tc を中心としていくつかの種類に限定した。使用言語は MS-FORTRAN, コンピュータは PC-98 シリーズである。

2.2 計算モデル

計算モデルは Publ. 53 のコンパートメントモデルを採用している。これは線型一次連立微分方程式で表現されるので, 解析解を求めることができる。従って, 時刻 ∞ だけでなく, 任意の時刻 t における解 (放射能, 吸収線量) も計算可能で, 実際解析的に式を算出した。これにより, 医薬品の体内動態及び吸収線量の時間変化が得られる。一例として, 以下に腎臓および尿中の放射能

*1 国立公衆衛生院放射線衛生学部医療放射線室; 東京都港区白金台 4-6-1 (〒108)
Section of Medical Radiation, Department of Radiological Health, The Institute of Public Health; 4-6-1, Shirokanedai, Minato-ku, Tokyo 108, Japan.

*2 東京大学医学部放射線健康管理学教室; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)
Department of Radiological Health, Faculty of Medicine, The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

*3 東京大学医学部附属病院; 東京都文京区本郷 7-3-1 (〒113)
University Hospital, Faculty of Medicine, The University of Tokyo; 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.

の式を示す。

腎臓：

$$t \leq T_k \quad A(t) = a_i \{e^{-\lambda_p t} - e^{-(\lambda_i + \lambda_p)t}\}$$

$$t > T_k \quad A(t) = a_i e^{-(\lambda_i + \lambda_p)t} (e^{\lambda_i T_k} - 1)$$

膀胱中の尿：

$$nt < t_v < (n+1)t$$

$$A(t) = a_i e^{-(\lambda_i + \lambda_p)nt} \{e^{-\lambda_p t} - e^{-(\lambda_i + \lambda_p)t}\}$$

a_i ：生物学的半減期 T_i で排出される割合

$$\lambda_i : 1/T_i$$

$$\lambda_p : 1/T_p$$

Fig. 1 Activity in bladder contents.

Fig. 2 The flowchart of the calculation.

T_k ：腎臓に放射性医薬品が留まる（通過する）時間

t_v ：膀胱が満たされる（排尿の）時間間隔

このモデルによる尿中放射能の時間変化を示す（Fig. 1）。

2.3 計算コードの構成

計算コードの構成を図に示す（Fig. 2）。

計算の入力パラメータは、医薬品の種類、投与放射能、経過時間である。任意の時刻における線源臓器の積分放射能、標的臓器の吸収線量を出力する。計算に必要な体内動態の半減期の値はデータファイルとして組み込まれているため、患者（被験者）毎に数値の設定が可能にしてある。計算に必要な吸収割合は、Publ. 53 にな

Table 1 Calculated absorbed dose (^{99m}Tc -labeled phosphates and phosphonates).

Organ	Absorbed dose (mGy/MBq)	
	Calculated	ICRP
Adrenals	2.0E-03	1.9E-03
Brain	1.5E-03	
Breasts	5.9E-04	8.8E-04
Gall BL wall	1.3E-03	
GI-tract		
LLI wall	3.7E-03	3.8E-03
SI wall	2.1E-03	2.3E-03
Stomach wall	1.1E-03	1.2E-03
ULI wall	1.8E-03	2.0E-03
Heart wall	1.1E-03	
Kidneys	3.2E-03	7.3E-03
Liver	1.1E-03	1.3E-03
Lungs	1.1E-03	1.3E-03
Muscle	1.7E-03	
Ovaries	3.5E-03	3.5E-03
Pancreas	1.5E-03	1.6E-03
Skeleton		
Active marrow	2.9E-03	9.6E-03
Bone surface	5.5E 03	6.3E-02
Skin	8.9E-04	
Spleen	1.3E-03	1.4E-03
Testes	2.3E-03	2.4E-03
Thymus	9.2E-04	
Thyroid	1.2E-03	1.0E-03
Urinary BL wall	2.2E-02	5.0E-02
Uterus	6.1E-03	6.1E-03
Whole body	2.0E-03	

いため、ORNL のデータを用いた⁷⁾。エネルギーおよび放出割合は文献⁸⁾を参照した。

3. 計算コードの検証

3.1 ICRP の計算結果との比較

本コードの計算結果の妥当性を確認するため、ICRP Publ. 53 に掲載されている計算結果と比較を行った。

一例として、^{99m}Tc MDP の計算結果を示す (Table 1)。積分放射能は、MDP の線源臓器では求める計算式が Publ. 53 に掲載されているため、計算結果は完全に一致した。任意の時刻における放射能の値は、Publ. 53 にないため実測値と比較した。標的臓器の吸収線量は、線源臓器として、全身⁹⁾、骨、腎臓そして尿を使用した。計算に用いた吸収割合のデータが Publ. 53 と異なるため、線源臓器の数と種類は Publ. 53 と一致していない。臓器吸収線量は、全体的に Publ. 53 よりも小さな値になった。この例では乳房、腎臓、骨髓、骨表面、膀胱壁が Publ. 53 よりもかなりずれた値 (約 30~100%) となっている。その他の臓器については、計算値は ICRP のほぼ 0~20% の範囲に入る。計算に用いている吸収割合 (S 値) は、ORNL や MIRD の間で数値に差があり、特に前述の臓器は特に異なっている (Table 2)。従って、この差は吸収割合として、どの値を用いたかに起因するものと考ええる。

3.2 実測値との比較

計算結果を実際に核医学診療の患者から得られた尿中のデータと比較した¹⁰⁾。計算結果と実測結果を以下に示す。

採取時刻も一定でなく、患者自体の状態にも差があるので、実測値はある範囲内ではばらつきを示した。計算結果と比較した場合、^{99m}Tc-Phosphates (Fig. 3) では計算結果がその範囲内に収まったが、²⁰¹Tl, ⁶⁷Ga は実測値より低い値を示した (Fig. 4, 5)。実測値と計算値の差の原因には、Publ. 53 を基本とした算出法自体の問題がある。すなわち実際の人体を模擬するには、モデルが簡略化されていて、使用データが個体差に合わないことも考えられる。

4. まとめ及び今後の課題

核医学に用いる放射性医薬品による被曝線量の評価のため、ICRP Publ. 53 に基づき簡便な計算コードを作成した。吸収割合として ORNL のデータを用いたことか

Fig. 3 Cumulative urinary excretion of ^{99m}Tc-MDP (decay corrected).

Table 2 S values (rad/ μ Ci-h).*

Source organs	Target organs	ORNL	MIRD No. 11
Kidneys	Kidneys	6.1E-05	1.9E-04
	Bladder wall	2.5E-07	2.8E-07
	Active marrow	2.3E-06	3.8E-06
	Whole body	1.6E-06	2.2E-06
Bladder contents	Kidneys	2.7E-07	2.6E-07
	Bladder wall	6.7E-05	1.6E-04
	Active marrow	1.1E-06	2.2E-06
	Whole body	1.5E-06	1.9E-06
Whole body	Kidneys	1.6E-06	2.2E-06
	Bladder wall	1.7E-06	2.3E-06
	Active marrow	1.4E-06	2.9E-06
	Whole body	1.4E-06	2.0E-06

* MIRD の S 値の単位、ORNL をこれに合わせて計算した。

Fig. 4 Cumulative urinary excretion of ^{201}Tl (decay corrected).

Fig. 5 Cumulative urinary excretion of ^{67}Ga (decay corrected).

ら, 計算結果が Publ. 53 と異なる部分もある。また, モデル自体も非常に簡略化されている。しかし, 実測データと比較した結果, $^{99\text{m}}\text{Tc}$ の尿中放射能は比較的近い値となった。

MIRD も最近はより実際の人体を考慮した新しい体内動態モデルを出してきている^{11,12)}。体内被曝評価におけるこれらのモデルの正当性の評価も, 今後必要になると思われる。今回は試作ではあるが, 実際の線量評価には合理的なモデルに対応した, 実用性と簡便性を持った計算コードの存在の重要性も益々大きくなっていくと思われる。

参考文献

- 1) Medical Internal Radiation Dose Committee; MIRD Dose Estimate Report No. 1-11.
- 2) Medical Internal Radiation Dose Committee; MIRD Pamphlet No. 1-13.
- 3) 作業による放射性核種の摂取の限度 Part 1, 2, 3, ICRP Publication No. 30.
- 4) A. BIRCHALL *et al.*; LUDEP: A lung dose evaluation program, *Radiation Protection Dosimetry*, **38** (1/3), 167-174 (1991).
- 5) 日本保健物理学会体内被曝線量評価コード専門研究会; 体内被ばく線量評価コードの開発の現状 (1992).
- 6) ICRP Publication 53, Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals, *Annals of the ICRP* **18** (1-4) (1987).
- 7) M. CRISTY and K.F. ECKERMAN; Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources VII. Adult Male, ORNL/TM-8381/V7 (1987).
- 8) ICRP Publication 38, Radionuclide transformations energy and intensity of emissions, *Annals of the ICRP* **11-13** (1983).
- 9) J.L. COFFEY, E.E. WATSON; Calculating dose from remaining body activity: A comparison of two methods, *Med. Phys.*, **6** (4), 307-308 (1979).
- 10) 小西恵美子, 阿部欣二, 草間朋子; 放射性医薬品投与後の患者介助時の被曝(医療被ばく)とその放射線防護上の取扱いについて, 日本保健物理学会第 27 回研究発表会要旨集, **80** (1992).
- 11) Medical Internal Radiation Dose Committee, MIRD Dose Estimate Report No. 15, *J. Nucl. Med.*, **33** (5) (1992).
- 12) Medical Internal Radiation Dose Committee, MIRD Pamphlet No. 14, *J. Nucl. Med.*, **33** (5) (1992).