

《ノート》

全身スキャナーとデータ処理装置を用いた 内部被曝線量算出法

A Calculation Method of Internal Absorbed Dose Using Whole Body Scanner and Data Processor

秋山 芳久* 小塙 正木** 木下富士美** 油井 信春**

Yoshihisa AKIYAMA*, Masaki KOAKUTSU**, Fujimi KINOSHITA**
and Nobuharu YUI**

**Physics Division, Chiba Cancer Center Hospital*

****Division of Nuclear Medicine, Chiba Cancer Center Hospital**

I. 緒 言

近年、核医学における *in vivo* 検査においては ^{99m}Tc 標識化合物が多く使用されており、数年前と比較すると内部被曝線量もだいぶ低減されるようになってきている。が、反面、核医学の普及に伴い検査の機会は増加の傾向にあり、この意味から被曝線量の正確な推定、及び把握は重要な事の一つと考える。

今回、著者らは当院にある全身スキャナーと核医学専用のミニコン、それに中型の範用コンピューターを使用することにより、簡単に各臓器の被曝線量を算出する方法を考案したのでこの方法を述べ、併せて今回測定した ^{99m}Tc -phytate, ^{99m}Tc -macroaggregated albumin (以下、 ^{99m}Tc -MAA と略記), ^{99m}Tc -dimercaptosuccinic acid (以下、 ^{99m}Tc -DMSA と略記), ^{99m}Tc -ethylenehydroxy-diphosphonate (以下、 ^{99m}Tc -EHDP と略記) の 4 種の ^{99m}Tc 標識化合物の計算結果を従来の検査との比

* 千葉県がんセンター物理室

** 千葉県がんセンター核医学診療科

受付：54年5月28日

最終稿受付：54年10

別刷請求先：千葉市仁戸名町

千葉県がんセンター放射線治療部

秋山 菲 律 放射線治療部物理士

秋山万次

較を加えて報告する。

II. 計算方法

内部被曝線量の計算法は核医学では MIRD 法^{1,2,3)}がもっとも一般的に用いられており、臓器 S 内の放射能による臓器 T への平均吸収線量 $\bar{D}(T)$ [rad] は

$$\bar{D}(T) \doteq \tilde{A}_S \sum_i \vartheta_i \Phi_i(T \leftarrow S) \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ただし、

As: 線源臓器 S 内の累積放射能量 [$\mu\text{Ci}\cdot\text{hr}$]

A_i : i 種放射線の平衡吸収線量定数 [g-rad/ μ Ci-hr]

$\Phi_i(T \leftarrow S) = \phi_i(T \leftarrow S)/mt$: *i* 種放射線の臓器 S から臓器 T への比吸収率 [g^{-1}]

で計算でき、平衡吸収線量定数 A_1 と、比吸収率 $\Phi_1(T \leftarrow S)$ を求めるために必要な臓器の重さ $Mt[g]$ 、吸収率 $\phi_1(T \leftarrow S)$ はパンフレットに載っている。しかし、 A_1 は核種によって決まる値であり問題ないが、 Mt と $\phi_1(T \leftarrow S)$ の値は体重 70kg の MIRD 標準人についてのデータであり、MIRD 標準人については正確な値であるが、一般的にはこの標準人よりも体格の小さい日本人に対し、MIRD のデータをそのまま適用するにはいくぶ

Key words: MIRD, absorbed dose, whole body scanner, data processor, ^{99m}Tc labeled compound

ん問題がある。そこで山口らの考案した計算法^{4,5)}を用いた。計算式は、

$$\bar{D}'(T) = \tilde{A}_S \sum_i D_i \Phi_i'(T \leftarrow S) \dots \dots \dots \quad (2)$$

で表わされ (1) 式と比較すると $\Phi_i(T \leftarrow S)$ が $\Phi'_i(T \leftarrow S)$ に変わっている。ここで、比吸収率 $\Phi'_i(T \leftarrow S)$ の求め方は非透過性放射線と透過性放射線に分けて考え、

非透過性放射線 (α -, β - 粒子, 内部転換電子, Auger 電子, エネルギーが 0.01 MeV 以下の光子) については,

$$\Phi_i'(T \leftarrow S) = \begin{cases} 1/Mt' & \text{for } T = S \\ 0 & \text{for } T \neq S \end{cases} \dots \dots \dots (3)$$

で与えられる。なお、臓器の重さ Mt' は

$$\mathbf{M}\mathbf{t}' = \mathbf{M}\mathbf{t} \times \boldsymbol{\varepsilon}^3 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

ここで、

：体格の違いを評価する係数

：個人の重腕を含む眼の幅(cm)/40 cm

：個人の眼の厚さ (cm)/20 cm

：個人の眼の長さ (cm)/70 cm

で評価している

透過性放射線(エネルギーが 0.01 MeV 以上の光子)については $T = S$ と $T \neq S$ の 2 つに場合分けされ、

$T = S$ の時は、

$$\Phi'(T \rightarrow S) = \varepsilon^{3(q-1)} \times \Phi(T \leftarrow S) \dots \dots \dots (6)$$

たたか

9: 光子エネルギーに依存する定数

で見え

$T \neq S$ の時は MIRD Pamphlet No. 2 Table 6⁶⁾を用いて。

「(i) 光子エネルギー E_i の MIRD 値 $\Phi_i(T \leftarrow S)$ に対して、同じエネルギーの $\Phi_{ph}(X)$ のグラフ上から $\Phi_{ph}(Xg) = \Phi_i(T \leftarrow S)$ を満たす Xg を求める。」

(ii) 次に $Xg' = \varepsilon \cdot Xg$ の時の $\Phi_{ph}(Xg')$ の値を同じグラフ上から得れば、それが考える個人の

比吸収率 $\Phi'(T \leftarrow S)$ の推定値となる。 $\Phi'(T \leftarrow S) = \Phi_{ph}(\epsilon \cdot Xg)$ である。」

で与えている。なお、以上的方法は一般の臓器について成り立つが、 $T=S$ の場合の肺と骨、 $T \neq S$ の場合の全身と全骨は成り立たず、これらの変換法もあるが最終的な方法とみなすにはまだ検討の余地があると報告されているので、これらについては吸収率 $\phi(T \leftarrow S)$ に MIRD 値そのままを用い、

$$\Phi_1'(T \leftarrow S) = \phi(T \leftarrow S)/Mt' \dots \dots \dots (7)$$

で計算した。

III. 累積線量

現在, MIRD 委員会では pamphlet を発行しており, これらは主に基礎的な計算式や, 計算に必要な table 等を記載しているが, これと並行して, テクネシウム, ガリウム等の放射性医薬品を単位放射能投与した時, 各臓器で平均どの程度の内部被曝線量になるかを示した MIRD dose estimate report⁷⁻¹⁴⁾ がある. ここでは各臓器の累積線量を whole body counter¹⁵⁾ や外科手術をした際に摘出した標本, あるいは投与後死亡した患者を解剖した時の臓器の切片等から求めている. しかし, これは大変な労力を必要とするし, 又, いくつかの施設の協力が必要であると共に得られたデータを線量計算に使えるようにするまとめの作業を経なければならない. そこで我々は一つの試みとして Fig. 1 にあるように当院にある日立社製の whole body scanner (RSW IIA 520 型) の上下の検出器

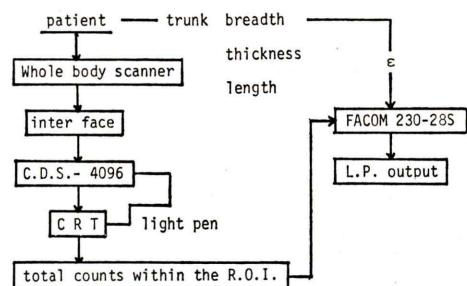


Fig. 1 Block flow chart for calculation of absorbed dose.

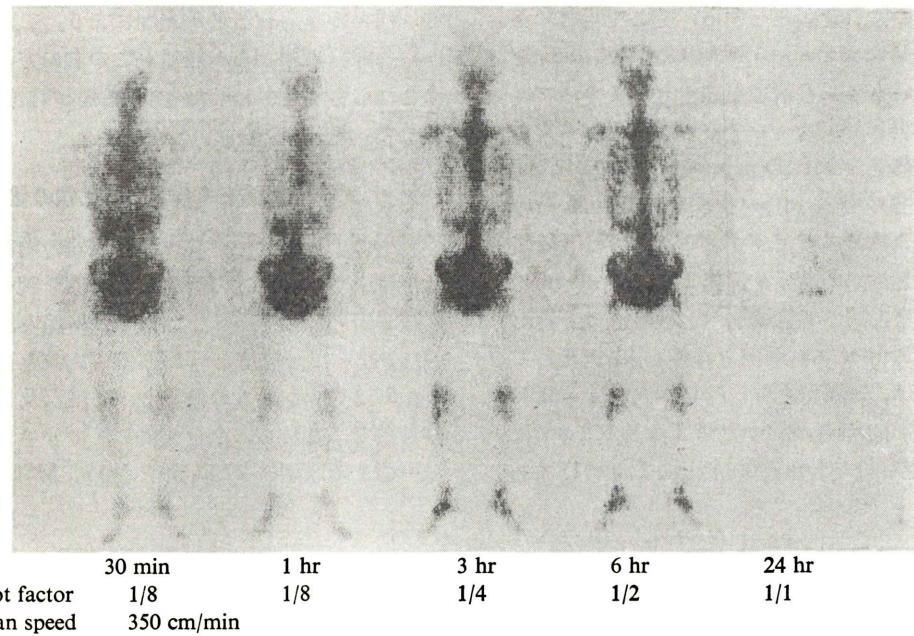


Fig. 2 Whole body scintigram taken after 30 min. to 24 hr. of intravenous administration of ^{99m}Tc -EHDP.

からのカウントを加え合わせインターフェイスを介して 64×64 のメモリーをもつサール社製のデータ処理装置 CDS-4096 に入力し、これに付属している CRT と light pen より各臓器のカウントを求め、これを投与後時間を追って何回か測定し、これら経時的なデータをもとに各臓器の累積線量を計算する方法を用いた。Fig. 2 に ^{99m}Tc -EHDP (静脈注射) の全身分布の経時的变化を示す。

今回は 4 種類の ^{99m}Tc 標識化合物でいずれも正常例 (各 ^{99m}Tc 標識化合物とも 1 名あるいは 2 名の volunteer) を測定したが、このうち ^{99m}Tc -phytate と ^{99m}Tc -MAA (静脈注射) については薬品の臓器沈着性が良く物理的減衰に比較して生物的な減衰が無視しえると思われたので物理的な減衰だけを考慮して求めた。又、 ^{99m}Tc -DMSA も Fig. 3 上 (物理的な減衰を補正してある) のように時間的な変化がほとんどないので前述の 2 つの薬品と同様に累積線量を求めた。又、 ^{99m}Tc -EHDP (Fig. 3 下) の場合は骨、全身、腎の経時的变化がひとつの指數関数 $a \cdot e^{-\lambda t}$ でかなり良く近似で

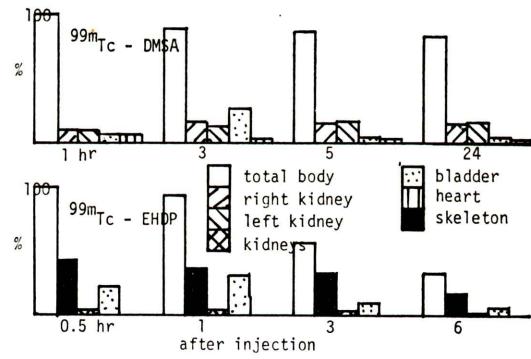


Fig. 3 % distribution of each organ.

きると思われたので a, λ を最小自乗法で導き出し、膀胱については各測定値の平均を求め、物理的減衰だけを考慮して累積線量を求めた。

IV. コンピュータープログラム

前述の方法で求めた累積線量を (2) 式の \tilde{A}_s に代入すれば各臓器の内部被曝線量を算出できるが、補正法を用いない (1) でも結果を得るには、計算を何回も行なわなければならず、手計算で行なう

にはかなりの労力を必要とする。そこで当院にある中型の範用コンピュータ-FACOM 230-28 S を使用しフォートラン言語で処理できるようにプログラムを作製した。フローチャートは Fig. 4 である。計算に必要な MIRD pamphlet No. 2 table 6 の値や、臓器の重さ M_t 、吸収率 $\phi (T \leftarrow S)$ の値はプログラムに組み込まれており、入力は各臓器の累積線量と体格の違いを評価する係数 ϵ である。これにより全身18の各臓器別内部被曝線量が算出され、Line Printer に打ち出されるが、1例として $^{99m}\text{Tc-}\text{DMSA}$ 、2 mCi を平均的日本人を $\epsilon = 0.93$ (体の各部が同じ割合で縮少ならば身長 158 cm に相当) と仮定し投与した時の結果が Table 1 にあ

る。18コの標的臓器名が左端にあり、これら臓器への各線源臓器からの被曝がこの右の方、右端にはこれらを加え合わせた各標的臓器の被曝線量が載っている。

V. 計算値と TLD 値の比較の値

以上のような方法で我々は各臓器の内部被曝線量を算出するが、この計算の有効性を調べるために、核医学用の胴体ファントム (千代田保安用品 KK 製) を使って計算値と TLD 値の比較を行った。Fig. 5 はファントムの概観と、各臓器及び胴体部の容積で、これらに水を満たし、ポリエチレンチューブに等間隔に TLD 素子 [極光, MSO-S (Mg₂)

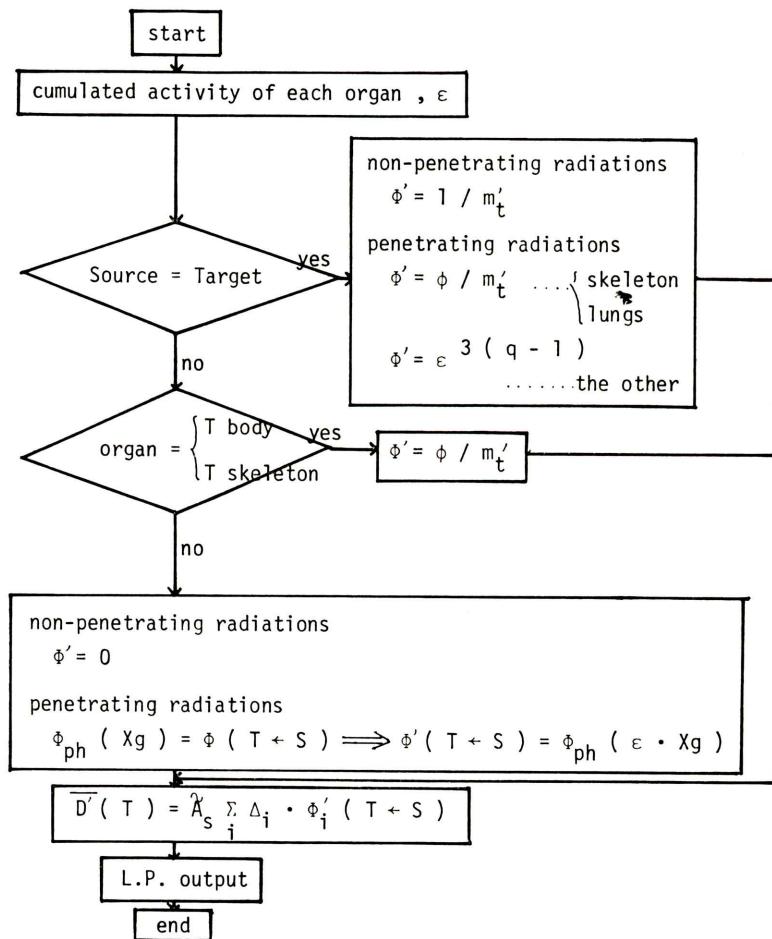


Fig. 4 Flow chart of computer program for the absorbed dose calculations.

Table 1 L.P. output

99M Tc-DMSA HOSEI KEISU 0.93

	Bladder	Heart	Kidneys	Liver	Lungs	Pancreas	T Skele	R Body	T Body
Activity	0.18E 04	0.76E 03	0.49E 04	0.00E 00	0.00E 00	0.00E 00	0.00E 00	0.75E 04	
Adrenals	0.0000	0.0000	0.0588	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0116	0.0704
Bladder	0.2974	0.0001	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0127	0.3119
Brain	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0116	0.0116
Stomach	0.0007	0.0019	0.0204	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0154	0.0384
S Intes	0.0059	0.0002	0.0170	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0166	0.0398
UL Intes	0.0038	0.0003	0.0138	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0155	0.0334
LL Intes	0.0180	0.0001	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0152	0.0372
Heart	0.0002	0.1042	0.0050	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0185	0.1279
Kidneys	0.0008	0.0008	1.1813	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0131	1.1959
Liver	0.0004	0.0025	0.0227	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0155	0.0413
Lungs	0.0002	0.0053	0.0052	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0129	0.0236
Ovaries	0.0152	0.0000	0.0055	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0187	0.0394
Pancreas	0.0004	0.0028	0.0400	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0179	0.0610
T Skele	0.0021	0.0008	0.0090	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0174	0.0293
Spleen	0.0004	0.0015	0.0514	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0136	0.0669
Testicles	0.0130	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0183	0.0318
Thyroid	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0087	0.0093
T Body	0.0041	0.0016	0.0101	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0125	0.0282

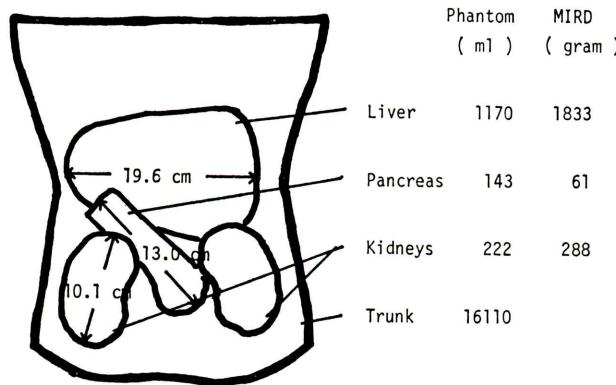


Fig. 5 Volume of each organ of this phantom and mass of MIRD phantom.

Si O₄: Tb), Reader 極光 1300] 4, 5 本をはりつけ^{99m}Tc 100 ~ 700 μ Ci を均一になるように注入し, 線源がほとんど減衰する 2 昼夜程度放置した。臓器の放射能量, 累積線量, 計算結果及び TLD 値を Table 2 に示す。かなり良く合っている。なお TLD は ^{99m}Tc の内部転換電子, オージュ電子等のエネルギーには, ガラスの厚みのため不感であり, 計算値も比較のため γ 線による被曝だけを考慮してある。又, TLD のエネルギー依存性は

Table 2 Comparison of calculated and T.L.D.

Organ	Activity (μ Ci)	Cumulated activity (μ Ci-hr)	Calculated	TLD
Kidneys	100	866	0.0989	0.102
Liver	700	6061	0.216	0.220
Pancreas	100	866	0.127	0.145
Trunk	100	866		

^{216,17)}, ラド変換係数は 0.96 を採用した。計算は (2) 式を用い, 体格の違いを評価する係数 ϵ は

(5)式より求めるべきものであるが、このファントムが MIRD 標準人との相似形とはかなりかけはなれているため、ここでは臓器自身の被曝では MIRD 標準人と ファントムの各臓器の重さの比の立方根を、又、他の臓器からの被曝については $\epsilon = 1$ として計算した。

VI. 結 果

日本人での値を得るために、体格の違いを評価する係数 $\epsilon = 0.93$ (を体の各部が同じ割合で縮少ならば身長 158 cm に相当) を想定し計算したが、得られた結果は MIRD そのまでの値と比較して 20% 程度高い値である。

今回測定したのは ^{99m}Tc -phytate, ^{99m}Tc -MAA, ^{99m}Tc -DMSA, ^{99m}Tc -EHDP の 4 種であるが、臨床上実際に使用する程度の各々、2, 2, 2, 10 m Ci 投与した時の各臓器別被曝線量を Table 3 に示す。主に被曝する臓器は ^{99m}Tc -phytate で肝と脾、 ^{99m}Tc -MAA (静脈注射) で肺、 ^{99m}Tc -DMSA で腎、 ^{99m}Tc -EHDP で骨等のこれら標識化合物が集まる臓器であり、全身では ^{99m}Tc -EHDP 以外で 0.03 rad 程度、 ^{99m}Tc -EHDP で 0.08 rad である。又、被曝を考える時いちばん重要な臓器は生殖腺であるが 0.01 ~ 0.17 rad であり、X 線の腰椎、仙骨、消化管下部、逆行性腎孟撮影等の生殖腺を直接曝射する検査の 1 回曝射と比較してはこれよりかなり少ない線量であるし、又、上部消化管、胆囊、胆道撮影等の生殖腺を直接には曝射しない

下腹部検査と比較しては少ないか同程度である¹⁸⁾。

これら医薬品は比較的最近になり使用されはじめたものであるが、従来より使用されていた主な薬品の文献値^{19,20)}との比較を Table 4 に示す。これからわかるように投与量が 10 ~ 100 倍になっていてもかかわらず、ほとんどの臓器での被曝が数分の 1 から数百分の 1 に減っており、この放射線源の開発が核医学の発展に大きく貢献したことが理解される。

VII. 考 察

内部被曝線量の算出には、物理的データと生物

Table 3 Absorbed dose of each organ

^{99m}Tc	-phytate	-MAA	-DMSA	-EHDP
Activity	2 mCi	2 mCi	2 mCi	10 mCi
Adrenals	0.068	0.046	0.070	0.055
Bladder	0.127	0.079	0.312	2.211
Stomach	0.053	0.036	0.038	0.040
Small i	0.036	0.010	0.040	0.085
Upper large i	0.044	0.011	0.033	0.061
Lower large i	0.022	0.010	0.037	0.167
Heart	0.051	0.110	0.128	0.048
Kidneys	0.071	0.020	1.196	0.300
Liver	0.517	0.048	0.041	0.043
Lungs	0.043	0.981	0.024	0.037
Ovary	0.027	0.010	0.039	0.170
Pancreas	0.097	0.047	0.061	0.050
Skeleton	0.029	0.031	0.029	0.217
Spleen	0.689	0.043	0.067	0.043
Testicles	0.020	0.008	0.032	0.156
Thyroid	0.007	0.013	0.009	0.011
Total body	0.034	0.031	0.028	0.077

Table 4 Comparison of absorbed dose between ^{99m}Tc labeled compound and other radiopharmaceuticals.

Radiopharma- ceutical	^{198}Au	^{99m}Tc phytate	^{131}I MAA	^{99m}Tc MAA	^{203}Hg chlorome- rodrin	^{99m}Tc DMSA	^{87m}Sr	^{99m}Tc EHDP
Activity	150 μCi	2 mCi	300 μCi	2 mCi	300 μCi	2 mCi	3 mCi	10 mCi
Total body	0.35	0.03	0.14	0.03	0.48	0.03	0.02	0.08
Liver	6.4	0.52	0.24	0.05	1.11	0.04		
Spleen	11.0	0.69	0.23	0.04				
Uterus	0.09	0.03			2.7	0.04		
Testicles	0.06	0.02			2.7	0.03		
Kidneys			0.18	0.02	24.1	1.20		
Skeleton							0.3	0.12
Thyroid			22.2	0.01				
Heart			0.05	0.98				
Lungs			0.88	0.98				

的データの2つが必要である。比吸収率 $\Phi(T \leftarrow S)$ の物理的データは前述のような補正法を用い一般的日本人について計算したが、被曝線量を算出するとき普通用いられている MIRD 値そのままを使用するよりは日本人に近い値を得ることができるとと思われこの方法を用いた。

放射能の経時的变化から求めうる各臓器の累積線量は、体外計測で全身スキャナーと核医学専用のミニコンを使用し、時間を追って投与後、何回か実測して求めた。この方法では、投与直後の薬品が各臓器に取り込まれるまでの過渡的状態は考慮されていないし、又、各臓器の放射能量は CRT と light pen を使用し推定するが、輪郭のとり方によって、得られる放射能量に差が生じる。しかし、これらによる誤差はモンテカルロ法を用いることによる吸収率 $\phi(T \leftarrow S)$ の統計誤差や補正法を用いることによる誤差等を考慮すればそれ程大きな問題ではないと思われるし、又、動物実験や解剖で得るよりは、はるかに簡便な方法である。

計算はコンピューターを使用したが、これにより全身18の各臓器別被曝線量が短時間で求まる。手計算でも時間をかけなければ求められるが、かなりの労力が必要であるし、又、この種の計算をすることは多くて1年に数回程度であると思われ、そのつど必要な table を取り出し、計算法を思い出しながら計算するのでは非常に能率が悪い。コンピュータ化はかなり意義のあることと思われる。

以上ここで述べた方法を用いることにより今後新しい医薬品の開発に伴い、各臓器の被曝線量を求める時、容易にこれを算出することが可能である。

文 献

- 1) Loevinger R, Berman M: A schema for absorbed-dose calculations for biologically-distributed radionuclides. MIRD Pamphlet 1, 1968
- 2) Dillman LT: Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation. MIRD Pamphlet 4, 1969
- 3) Snyder WS, Ford MR, Warner GG, et al: Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. MIRD Pamphlet 5, 1969
- 4) Yamaguchi H: Estimation of internal radiation dose for various physiques using MIRD adult absorbed fractions. Acta Radiol 17: 429-439, 1978
- 5) 山口 寛: 大きさの異なる人体への MIRD 法を適用する際の変換法, 日医放 39: 252-266, 1979
- 6) Berger MJ: Energy deposition in water by photons from point isotropic sources. MIRD Pamphlet 2: 23, 1968
- 7) MIRD/Dose Estimate Report No. 1: Summary of current radiation dose estimates to humans from ⁷⁵Se-l-Selenomethionine. J Nucl Med 49-50, 1973
- 8) MIRD/Dose Estimate Report No. 2: Summary of current radiation dose estimates to humans from ⁶⁶Ga-, ⁶⁷Ga-, ⁶⁸Ga-, and ⁷²Ga-citrate. J Nucl Med 14: 755-756, 1973
- 9) MIRD/Dose Estimate Report No. 3: Summary of current radiation dose estimates to humans from ^{99m}Tc-Sulfar-Colloid. J Nucl Med 16: 108A-108B, 1975
- 10) MIRD/Dose Estimate Report No. 4: Summary of current radiation dose estimates to humans from ¹⁹⁸Au-Colloidal Gold. J Nucl Med 16: 173-174, 1975
- 11) MIRD/Dose Estimate Report No. 5: Summary of current radiation dose estimates to humans from ¹²³I, ¹²⁴I, ¹²⁵I, ¹²⁶I, ¹³⁰I, ¹³¹I, and ¹³²I as Sodium Iodide. J Nucl Med 16: 857-860, 1975
- 12) MIRD/Dose Estimate Report No. 6: Summary of current radiation dose estimates to humans from ¹⁹⁷Hg- and ²⁰³Hg-labeled Chlormerodrin. J Nucl Med 16: 1095-1098, 1975
- 13) MIRD/Dose Estimate Report No. 7: Summary of current radiation dose estimates to humans from ¹²³I, ¹²⁴I, ¹²⁶I, ¹³⁰I and ¹³¹I as Sodium Rose Bengal. J Nucl Med 16: 1214-1217, 1975
- 14) MIRD/Dose Estimate Report No. 8: Summary of current radiation dose estimates to humans from ^{99m}Tc as Sodium Pertechnetate. J Nucl Med 17: 74-77, 1976
- 15) Watson EE, Cloutier RJ, Gibbs WD: Whole-body retention of ⁶⁷Ga-citrate. J Nucl Med 14: 840-842, 1973
- 16) 極光テクニカルデータ 5
- 17) 山本千秋, 古賀佑彦: 臨床放射線 21: 819-824, 1976
- 18) 国際放射線防護委員会 (ICRP): X 線診断における患者の防護. ICRP publication 16, 日本アイソトープ協会 東京 1971 p 16
- 19) 上田英雄, 飯尾正宏: 核医学, 臨床生理診断法, 医歯薬出版 東京 1974 p 48
- 20) 飯尾正宏: 放射性医薬品の進歩と被曝線量, 内科 29: 623-633, 1972