

# 体内吸収線量の算定と評価

—MIRD 法の人体への適用について—

川崎医療短期大学 放射線技術科

西村 明久

(昭和57年9月11日受理)

Calculation and Estimation of Internal Absorbed Radiation Dose

—On the Application of MIRD Method for Various physiques—

**Akihisa NISHIMURA**

*Department of Radiological Technology, Kawasaki Paramedical College*

*Kurashiki 701-01, Japan*

*(Received on Sept 11, 1982)*

## 概 要

体内の特定の部位を検査する目的で放射性医薬品を人体に投与する場合、そのR I投与に基づく被験者の体内吸収線量に考慮を払うことはきわめて重要である。線量の算定および評価は、核種に関する物理的情報および体格データや医薬品の代謝データ等の生物学的情報をもとに、今日まで種々の方法で行われてきている。その内、時代的要請に応えうる新しい線量の計算法として提唱されているMIRD法について、現実的モデルの適用を考慮に入れて検討した。前半で、本法の基本的考え方および算定と評価における問題点を考察し、後半で、実際の計算例をもとに日本人について適用する場合の若干の問題点について検討を行なった。

## Abstract

In case that radio-pharmaceuticals are administered on the purpose of diagnosing a specific region of a human body, it is very important to take care of internal absorbed dose of the subject. Up to now, absorbed dose has been calculated and estimated by various methods based on physical informations about radio-nuclides and biological informations including data of body dimensions and metabolism on pharmaceuticals.

This paper offers a discussion of the MIRD committee method, a newly developed and accepted calculation method of dose, by applying it to phantom models.

In the first half, the basic theory of the method is presented and problems on calculation and estimation are examined. In the latter, an example of calculation is shown and a few problems on application of this method are discussed.

## §1. はじめに

線量評価について論ずる場合、まず何の線量かを規定する必要がある。集団線量、臓器線量、組織線量、細胞線量の言葉があるから、どの立場から語るかを明らかにする必要がある。放射線管理者として、医師として、生物学者としての立場が考えられ、それぞれ視点が異なる。線量について MIRD 法をとりあげる場合は上記の前3つに限られる。ここでは、各立場に共通している算定と評価について若干の考察を加えながら概論し、人体への適用について検討する。体内摂取の放射性核種の内部吸収線量の評価については、30年以上も前に L. D. Marinelli 等により検討されている。若干の計算式が論じられたが用いる核種の時代的变化によりその精度に問題点が出て来た。

放射性医薬品の移りかわりには目を見張るものがあり、時間の経過と共に体内の吸収線量が低減して来ている。1960年代の初期までは、原子炉を中心として生成核種が中性子過剰核種であり、従って  $\beta^-$  崩壊 ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ) をするものが主流を占めていた。この頃は飛程の短い  $\beta$  線による線量計算を主に行った。また、吸収線量の計算も手計算を中心としていたのでファントムも単純な幾何学形しか用いていない<sup>1)2)</sup>。人体を半径 30cm の球で行った Marinelli 等の方法を基礎として、ICRP publication 2 が刊行された。年々、被曝の低減に関心が集まり、 $\beta$  線による吸収線量の寄与が核医学の分野でも問題とされて来た。同年代の中期に  $^{99m}\text{Tc}$  が到来したのもタイムリーであった。 $^{99m}\text{Tc}$  は、親核種  $^{99}\text{Mo}$  が  $\beta^-$  崩壊して出来た娘核種で、主としてミルクングという操作で簡単に抽出される。 $\gamma$  線のエネルギーが約 140keV なので検出器にとって計数効率が良く、種々の医薬品にラベリングされ、大いに用いられる時代となった。 $^{99m}\text{Tc}$  等の準安定核種は、 $\gamma$  線のみを放出するので線量計算も  $\gamma$  線が中心となる。1970年代になるとサイクロトロン加速装置が全国各地に製造され、陽子過剰核種を中心として寿命の短いものが出現した。短寿命核種は必然的に体内の吸収線量の減少に十分寄与することは当然である。また、用いられた核種の殆んどは  $\beta^+$  崩壊 ( $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ) および EC 崩壊 ( $P + e^- \rightarrow n + \nu$ ) なので、2本の消滅放射線 (0.51MeV)、ECにより放出される特性X線や Auger 電子に対しての線量計算に関心が向けられる。結局、 $\beta$  線や  $\gamma$  線ばかりでなく、核内、核外から放出される全ての放射線が計算の対象となり、算定と評価も総合的に行っていかなければならず、今までの手による単純計算では (精度を上げる意味では) 不都合になり、コンピューターの導入をもたらしている。種々の要求に少しでも応えようとしているのが MIRD 法である。

MIRD 法とは、アメリカ核医学会内に設置された Medical Internal Radiation Dose Committee (略称 MIRD Committee) によって発表された一連のパンフレット<sup>3)-13)</sup>に展開されている内部被曝線量評価法である。MIRD 委員会の活動の発端は、1964年、Dr. John Hidalgo が提唱した時点にさかのぼるが、1968年発行のパンフレット1から、1975年発行の同11まで、詳細な資料が公表されている。MIRD 法の特筆すべき点は、(1) Dosimetry に必要な物理量を理論的にもよりしっかりした根拠で核データから計算して、その値を使い易いように表にしていること。即ち、原子核から放出される放射線のみならず原子から放出される放射

線の放出率やエネルギーが系統的に供給された。(2) 現在得ることの出来る最も現実に近い人体模型で Photon による吸収エネルギーを求めている。ICRP で検討された、欧米の大人標準人 (reference man 身長 170 cm, 体重 70 kg) のデータをもとに MIRD ファントムが作製された。(3) 吸収率 (absorbed fraction) を積極的に導入し、 $\beta$  線および  $r$  線の線量計算を統一化し、さらに  $r$  線に対する計算が詳細になったこと。

## §2. MIRD 法の基本的概念

放射性医薬品が人体に投与されると、それはいくつかの臓器  $S$  に特異的に取り込まれる。 $S$  を線源臓器とよぶ。放射能は  $S$  内に一様に分布すると仮定する。線量評価をする臓器  $T$  を標的臓器とよぶ。平均吸収線量  $\bar{D}(T)$  は次式で与えられる。

$$\bar{D}(T) = \sum_i A_i \sum_S \bar{A}_S \varphi_i(T \leftarrow S) / m_T \quad (1)$$

$$= \sum_S \bar{A}_S S(T \leftarrow S) \quad (2)$$

ここで、 $m_T$  : 臓器  $T$  の質量 (g),  $A_i = 2.13 n_i E_i$  (g-rad/ $\mu$ ci-h) : 1 崩壊あたり  $n_i$  個のエネルギー  $E_i$  の  $i$  種放射線の equilibrium absorbed dose constant,  $\bar{A}_S = \int_0^\infty A_S(t) dt$  ( $\mu$  Ci-h) :  $RI$  の  $S$  内での放射能の経時変化  $A_S(t)$  の累積放射能 (cumulated activity),  $\varphi(T \leftarrow S)$  :  $i$  種放射線の吸収率 (absorbed fraction) で、 $S$  から放出された全エネルギーのうち臓器  $T$  へ吸収された割合,  $S(T \leftarrow S) = \sum_i A_i \varphi_i(T \leftarrow S) / m_T$  (rad/ $\mu$ ci-h) :  $S$  内で  $RI$  の累積放射能が / $\mu$ ci-h であるときの  $T$  での吸収線量 (absorbed dose per unit cumulated activity) で, pamphlet 11 はこの値の表である。 $RI$  の  $S$  内での経時変化  $A_S(t)$  は数個の指数関数の和で表現されている。即ち,

$$A_S(t) = A_0 \sum_{j=1}^n f_j e^{-(\lambda_j + \lambda)t} \quad (3)$$

である。ここで、 $A_0$  は投与された放射能、 $f_j$  は  $j$  番目の指数成分の占める割合 ( $t=0$ )、 $T_{b,j} = 0.693/\lambda_j$  は  $j$  番目の生物学的半減期、 $\lambda$  は物理的崩壊定数である。計算するにあたり、放射線は組織中での透過性と臓器の大きさを考慮して、非透過性 (non-penetrating)、透過性 (penetrating) 放射線に分けられている。非透過性放射線とは、 $\alpha$  粒子、 $\beta$  粒子、内部転換電子、Auger 電子、およびエネルギーが 0.015 MeV より小さい光子等をいい、透過性放射線はそれ以外の全ての光子をいう。この 0.015 MeV の線引きは Dillman, L. T. によって行われたのだが根拠ははっきりしない<sup>14)</sup>。約束のようなものである。非透過性放射線の吸収率は次のごとく定義される。

$$\varphi_{np}(T) = \begin{cases} 1 : T \text{ と } S \text{ が同じ} \\ 0 : T \text{ と } S \text{ が異なる} \end{cases} \quad (4)$$

透過性放射線の吸収率  $\varphi_p(T \leftarrow S)$  は、体重 70 kg の MIRD phantom について計算値が pamphlet No. 5 にある。

### § 3. 算定と評価における問題点

問題点を明確にするために、この項で新たな記号を導入する。吸収線量を求める部位である標的領域を  $r_k$ 、線源領域を  $r_h$  とし、平均吸収線量  $\bar{D}(r_k)$  は次式で与えられる。

$$\bar{D}(r_k) = \sum_h \bar{A}_h \sum_i A_i \phi_i(r_k \leftarrow r_h) / m_k \quad (5)$$

$$= \sum_h \bar{A}_h \sum_i A_i \Phi_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (6)$$

$$= \sum_h \bar{A}_h S(r_k \leftarrow r_h) \quad (7)$$

$np$  成分と  $p$  成分に分けて、

$$S(r_k \leftarrow r_h) = S_{np}(r_k \leftarrow r_h) + S_p(r_k \leftarrow r_h) \quad (8)$$

$$= \Delta_{np} \Phi(r_k \leftarrow r_h) + \Delta_p \Phi_p(r_k \leftarrow r_h) \quad (9)$$

ここで、 $\Delta_{np} = \sum_i^{np} A_i$ 、 $\Delta_p = \sum_i^p A_i$  である。 $S(r_k \leftarrow r_h)$  が表として与えられているから (5) 式はすぐ吸収線量値を与えるはずである。しかし実際には若干の数値計算をしなければならない。 $r_k$  への吸収線量を求める場合に、 $r_h$  に高濃度の蓄積があり、 $r_k$  にも  $RB$  (remaining body 残余身体) と同程度の蓄積があることを示している。 $r_k$  への吸収線量は、

$$\bar{D}(r_k) = \bar{A}_k S(r_k \leftarrow r_k) + \bar{A}_h S(r_k \leftarrow r_h) + \bar{A}_{RB} S(r_k \leftarrow RB) \quad (10)$$

ここで、 $\bar{A}_{RB} = \bar{A}_{TB} - \bar{A}_k - \bar{A}_h$  である。

また、 $S_p(r_k \leftarrow TB) = S(r_k \leftarrow TB) - \Delta_{np}/m_{TB}$ 、 $S_p(r_k \leftarrow RB)$  の近似式は従って、

$$S_p(r_k \leftarrow RB) = \frac{1}{m_{RB}} [m_{TB} S_p(r_k \leftarrow RB) - m_k S_p(r_k \leftarrow r_k) - m_h S_p(r_k \leftarrow r_h)] \quad (11)$$

ここで、 $m_{RB} = m_{TB} - m_k - m_h$  である。(11) 式を (10) 式へ代入して  $\bar{D}(r_k)$  が得られる。

この同じ場合について、

$$\bar{A}_{RB} = \bar{A}_{TB} - m_k, \quad m_{RB} = m_{TB} - m_k \quad (12)$$

(11) 式は

$$S_p(r_k \leftarrow RB) = \frac{1}{m_{RB}} [m_{TB} S_p(r_k \leftarrow TB) - m_k S_p(r_k \leftarrow r_k)] \quad (13)$$

となる。 $RB$  は  $r_k$  を含んでいるので  $np$  成分を考慮する必要がある。即ち、

$$S_{np}(r_k \leftarrow RB) = \Delta_{np}/m_{RB} \quad (14)$$

これは、 $r_h = TB$  の類推から得られる。従って、吸収線量は、

$$\bar{D}(r_k) = \bar{A}_k S(r_k \leftarrow r_k) + \bar{A}_{RB} \left[ S_p(r_k \leftarrow RB) + \frac{\Delta_{np}}{m_{RB}} \right] \quad (15)$$

となる。線源領域  $r_h$  が複数でも基本計算は同じで、その時  $np$  成分がどのような効果を示すのか、 $m_k$  は放射線を放出している質量になっているか (消化器、膀胱等) 等に注意を払う必要がある。MIRD 法による線量の評価における問題点を具体的に描出するために、在来の方法との比較計算例を示す。Quimby 等の方法<sup>15)16)</sup>では次のような基本式を用いている。

$$\left. \begin{aligned} D_\beta &= 73.8 CE_\beta T_{eff}(\text{rads}) \\ D_\gamma &= 33.1 \times 10^{-3} \rho CK \bar{g} T_{eff}(\text{rads}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ここで、 $C$ ：放射性核種の初期濃度 ( $\mu\text{ci/g}$ )、 $\bar{E}_\beta$ ： $\beta$ 線の平均エネルギー、 $T_{eff}$ ：有効半減期 (day)、 $\rho$ ：密度、 $K$ ： $r$ 線放射定数 ( $r/m\text{ci}\cdot\text{h at cm}$ )、 $\bar{g}$ ：平均幾何学的因子、 $D$ ：吸収線量とする。また、ICRPの方法<sup>17)</sup>では線量率の式を経て次のような基本式を用いている。

$$\begin{aligned} R_{\beta+r} &= 2.13 \times C \times \sum_i f_i \cdot E_i \cdot \phi(\mu_{en} \times R)_i \text{ (rad/s/h)} \\ &= 51.1 \times D \times \sum_i f_i \cdot E_i \cdot \phi(\mu_{en} \times R)_i \text{ (rad/s/h)} \end{aligned}$$

従って、 $\beta$ 線および $r$ 線を含めた total dose は、

$$D_{\beta+r} = 3.07 \times T_{eff} \times C \times \sum_i f_i \cdot E_i \cdot \phi(\mu_{en} \cdot R)_i \text{ (rad/s)} \quad (17)$$

ここで、 $T_{eff}$ ：有効半減期(h)、 $f_i$ ：frequency/disintegration、 $E_i$ ：有効エネルギー/disintegration、 $\phi(\mu_{en} \times R)$ ：問題とする臓器への摂取率(absorbed fraction)、 $\mu_{en}$ ：線エネルギー吸収係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )、 $R$ ：臓器の半径 (cm) とする。MIRD法の算定式についてはすでにふれているが、ここでは比較のために基本式のみについて記すと、

$$\left. \begin{aligned} \bar{D}(v \leftarrow r) &= \frac{\bar{A}_r}{m_v} \sum_i A_i \phi_i(v \leftarrow r) \text{ (rad/s)} \\ \bar{A}_r &= \int_0^\infty A(t) dt, \quad A_i = A_0 e^{-\lambda_i t} (\mu\text{ci}) \\ A_i &= 2.13 n_i \bar{E}_i (g \cdot \text{rad} / \mu\text{ci} \cdot \text{h}) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

ここで、 $D$ ：absorbed dose (rad)、 $n$ ：meannumbers/disintegration、 $A$ ：activity ( $\mu\text{ci}$ )、 $E$ ：mean energy (MeV)、 $m$ ：mass(g)、 $A$ ：Equilibrium dose constant とする。

計算例として、“肝臓のシンチスキャンを行うために  $100\mu\text{ci}$  の  $^{198}\text{Au}$  コロイドを静注した。肝臓および体全体の吸収線量を求めること。ただし、全身 (whole body) および肝臓 (liver) の質量をそれぞれ  $70 \times 10^3\text{g}$ 、 $1.8 \times 10^3\text{g}$  とする。まず、Quimby 等の方法では (16) 式を用いて、whole body の場合、 $D_\beta = 0.0924$  (rad/s)、 $D_r = 0.0401$  (rad/s)、従って  $D_{\beta+r} = 0.133$  (rad/s) となる。ただし、算定中で、 $\bar{E}_\beta = 0.326$  (MeV)、 $T_{eff} = 2.69$  (day)、 $K = 2.5$ 、 $\bar{g} = 126^{18)}$  を用いた。また、liver では  $D_\beta = 3.60$  (rad/s)、 $D_r = 0.585$  (rad/s)、従って  $D_{\beta+r} = 4.19$  (rad/s) となる。ただし  $\bar{g} = 47.3^{18)}$  とした。次に、ICRP法では、(17) 式を用いて、Whole body の場合、 $D_{\beta+r} = 0.139$  (rad/s)、liver では  $D_{\beta+r} = 4.29$  (rad/s) となった。ただし、 $R = 7.5$  (cm)、 $\mu_{en} = 0.0326$  ( $\text{cm}^{-1}$ )、 $\phi(\mu_{en} \cdot R) = 0.160^{19)}$ 、従って  $\sum_i f_i \cdot E_i \cdot \phi(\mu_{en} R)_i = 0.390$  を計算に用いた。最後に、本論の目的である MIRD 法では (18) 式を用いて、Whole body の場合  $D_{\beta+r} = 0.148$  (rad/s)、一方 liver では、 $D_{\beta+r} = 4.35$  (rad/s) となり最も高い吸収線量値を示した。本法での数値計算例として、 $^{66}\text{Ga}$ -citrate 静注の場合<sup>19)</sup>を簡単にふれておく。放射性医薬品の全身の残留曲線は 2つの指数関数の和で表現される。 $f_1 = 0.83$ 、 $f_2 = 0.17$ 、また  $\lambda_1 = 0.00113$  ( $\text{h}^{-1}$ )、 $\lambda_2 = 0.0231$  ( $\text{h}^{-1}$ ) である。 $^{66}\text{Ga}$ の崩壊定数は  $0.07453$  ( $\text{h}^{-1}$ ) だから、全身の  $\bar{A}_{TB} = 12.71 A_0$  となる。

線源領域としては adrenal (副腎)、kidney (じん臓)、liver (肝臓)、spleen (脾臓) 等を取り入れている。臓器別の activity の時間的変化は全身と同一としておるので、取り込み

比率に  $12.71$  (residence time  $\bar{A}_h/\bar{A}_0$ ) をかければ臓器別の滞留時間 (累積放射能/投与量) が得られる。 $RB$  の  $T_{RB}$  は,

$$\begin{aligned} T_{RB} &= T_{TB} - \sum_h T_h \\ &= 12.71 - (0.00762 + 0.295 + \dots + 1.37) \\ &= 6.22 \text{ (h)} \end{aligned}$$

また,  $S(STW \leftarrow RB)$  は,

$$\begin{aligned} S_p(STW \leftarrow TB) &= S(STW \leftarrow TB) - \Delta_{np}/m_{TB} \\ &= (5.6E-5) - (2.14/700) \\ &= 2.54E-5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_p(STB \leftarrow RB) &= \{m_{TB} S_p(STW \leftarrow TB) - \sum_h m_h S(STW \leftarrow r_h)\} / m_{RB} \\ &= 2.62E-5 \end{aligned}$$

従って, 吸収線量  $\bar{D}(STW)$  は,

$$\begin{aligned} \bar{D}(STW) &= \sum_h T_h S(STW \leftarrow r_h) + T_{RB} \{S_p(STW \leftarrow RB) + \Delta_{np}/m_{RB}\} \\ &= 5.41E-4 \text{ rad}/\mu\text{ci} \\ &= 0.54 \text{ rad}/\text{mci} \end{aligned}$$

となる。

#### §4. 大きさの異なる人体へ適用する際の問題点

特定の臓器への吸収線量の計算には, 大別して二つのタイプの情報が必要であると言われている。すなわち物理的情報 (核種, 放射能, 放射線のエネルギー・線質, 放出率, 半減期), と生物学的情報 (線源臓器が何か, 標的臓器が何か, その質量と形, 線源臓器内での放射能の空間分布, 経時変化, 線源臓器から放出された全エネルギーの何%が標的臓器で吸収されたか) とである。生物学的情報には, これ等に大きく影響する  $RI$  の化学形, 比放射能, 物理形, 摂取経路も含まれるし, それ等の原因をなす, 食生活を含めた環境, 人種, 大人か子供か, 性, 正常常人か病人か, 等も生物学的情報に入る。これ等多くの情報を加味して計算できるためには, どうしてもモデルが必要である。そして計算の最終結果の確からしさは, そのモデルのよし悪しに大きく依存するので生物的に重要な観点を可能な限り詳しく取り入れて, しかも計算が非常に複雑にならない程度に単純化したモデルを作ることが重要である。

その観点からみると, MIRD 法は ICRP 法の枠組の中にあり, ICRP 法の有効エネルギー  $\epsilon$  の計算モデルをより現実に近いものに発展させたと位置付けることができる。しかも MIRD 法は,  $\epsilon$  の中で純粋に物理的情報にかかわる部分とを分けて定式化しているので, 計算全体を見通し良く行える利点をもっている。また, ICRP 法のように決定臓器だけでなく, それ以外の臓器からの線量をも考慮できるように定式化されているので, ICRP 法よりも生物学的情報をより総合的にみる必要性がでて来ている。公表されている MIRD パンフレットは, 現在までのところ, 計算の枠組の説明が中心で, 最も困難な個々の核種についての生物学的情報によ

る肉付けは将来にゆだねられている。従って、ここでの大きさの異なる人体への適用、例えば日本人への適用する問題点もその枠組みに関するものに限られる。本法を日本人へ適用する際、代謝データ  $Ah(t)$  と吸収率の両方について欧米標準人との違いを考慮しなければならない。代謝データ（日本人用の）をまとめ、整備されるまでにはまだまだ困難を伴っている。

吸収率を変換する基本的考えは、日本人と MIRD phantom との体格の相違を数量化し、それを変数として体内の線量分布を考慮して日本人の吸収率を MIRD 値から推定する点にある<sup>20)21)</sup>。日本人に対する線量を  $\bar{D}'$  とすると

$$\bar{D}'(r_k) = \sum_h \bar{A}'_h \sum_i d_i \phi'_i(r_k \leftarrow r_h) \quad (19)$$

$$\phi'(r_k \leftarrow r_h) = S_m \cdot S(x, x') \phi(r_k \leftarrow r_h) \quad (20)$$

ここで、 $S_m = m'_T / m_T$ 、標的臓器の質量比で、標的臓器の違いに対する変換因子を示す。 $m_T$  は実測出来ないで、 $S_m$  は体重比と仮定した。 $S(x, x') = \phi_{ph}(x'g) / \phi_{ph}(xg)$  で、線源臓器  $S$  と標的臓器  $T$  の相対距離の違いに対する変換因子を示す。 $xg$  は  $S$  と  $T$  との間の相対距離を特徴付ける有効距離で、MIRD 値と  $\phi_{ph}(x)$  とから決めることが出来る。

$\Sigma$  は MIRD 人体模型からの縮小率を示す量で  $\Sigma = (\Sigma_A + \Sigma_B + \Sigma_H) / 3$ 、 $\Sigma_A = (\text{胴の幅}) / 40\text{cm}$ 、 $\Sigma_B = (\text{胴の厚さ}) / 20\text{cm}$ 、 $\Sigma_H = (\text{胴の長さ}) / 70\text{cm}$  と仮定した。これ等を用いて、Snyder 等が最近行った子供についての計算結果と比べたところ、良い一致を示した。Snyder 等の上記の仕事から、Berger の  $\phi_{ph}(x)$  が使えるということは  $\phi(r_k \leftarrow r_h)$  に関する限り原子組成の違いはほとんど考えなくて良く、臓器質量と位置関係に注意を払えば良いと結論付けることが出来る。

体内吸収線量の算定と評価法は、1970年代、MIRD 法により大きく前進した。しかし、放射性医薬品の代謝データをどう評価して行くかの問題が残されている。今後、ますます新しい核種や放射性医薬品が開発されてくることが予想されるが、これに伴い体内の吸収線量に考慮を払うことは重要であると考えられる。

## 謝 辞

稿を終るに臨み有益なる御助言を頂いた、織田 暢夫教授（東工大大学院・放射線物理講座）、多くの貴重なコメントを下された、山口 寛研究官（科学技術庁・放医研）および西村 弘行助手（北海道大学・放射線化学教室）に深謝の意を表します。また、英文 Abstract、校正等で御協力頂いた、名木田 恵理子助手（本学・一般教養部・英語）および丸山 雅子助手（本学・医療秘書科）に感謝申し上げます。

## References

- 1) Marinelli, L. D., Quimby, E. H., Hine, G. J.: Dosage determination with radioactive isotopes I, *Nucleonics*, 2 (4), 56, 1948
- 2) Mayneord, W. V.: Some application of nuclear physics to medicine, *Brit. J. Radiol. supple-*

- ment 2, 1950
- 3) R. Loevinger and N. Berman: A schema for absorbed dose Calculation for biologically distributed radionuclides, MIRD Pamphlet No. 1 (1968)
  - 4) M. J. Berger; Energy deposition in water by photons from point isotropic source, MIRD Pamphlet No. 2 (1968)
  - 5) G. L. Brownell, W. H. Ellett and A. R. Reddy; Absorbed fractions for photon dosimetry, MIRD Pamphlet No. 3 (1968)
  - 6) L. T. Dillman; Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation, MIRD Pamphlet No. 4 (1969)
  - 7) W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner and H. L. Fisher; Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom, MIRD Pamphlet No. 5 (1969)
  - 8) L. T. Dillman; Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation, Part 2, MIRD Pamphlet No. 6 (1970)
  - 9) M. J. Berger; Distribution of absorbed dose around point sources of electrons and beta particles in water and other media, MIRD Pamphlet No. 7 (1971)
  - 10) W. H. Ellett and R. M. Humes; Absorbed fractions for small volumes containing photo-emitting radio-activity, MIRD Pamphlet No. 8 (1971)
  - 11) K. A. Lathrop, R. E. Lohnston, M. Blau and E. O. Rothschild; Radiation dose to humans from Se-L-selenomethionine, MIRD pamphlet No. 9 (1972)
  - 12) L. T. Dillman and F. C. Von der Lage; Radionuclide decay schemes and nuclear parameter for use in radiation dose estimation, MIRD Pamphlet No. 10 (1975)
  - 13) W. S. Snyder, M. R. Ford, G. G. Warner and S. B. Watson; "S," absorbed dose per unit cumulated activity for selected radionuclides and organs, MIRD Pamphlet No. 11 (1975)
  - 14) ICRU report 32: Methods of Assessment of Absorbed Dose in Clinical Use of Radionuclides. 1979
  - 15) Marinelli, L. D., Quimby, E. H.; Dosage determination with radioisotopes. II, Practical considerations in Therapy and Protection. Amer. J. Roentgenol. Radium Therapy, **59**, 260, 1948
  - 16) Quimby, E. H. et, al; Dosage calculations for radioactive isotopes. Radioactive isotopes in medicine and biology, Philadelphia, 1963
  - 17) ICRP, Committee II 1959; Permissible dose for internal radiation. Health Physics, **3**, 1960
  - 18) Holt, J. G., Loevinger, R. and Hine, G. J.; internally administered radioisotopes. Radiation Dosimetry. Hine, G. J. and Brownell, G. L., Eds. Academic Press, New York, 801, 1956
  - 19) H. E. Johns and J. R. Cunningham; "The Physics of Radiology." Third edition, 572, 1969
  - 20) 養島高; "日本人体正常数值表", 投報堂, 東京.
  - 21) Yamaguchi, H. Kato, Y.: The Transformation method for the MIRD absorbed fractions as applied to various physiques, Phys. Med. Biol., **20**, 593, 1975