《特集：ICRP の新しい内部被ばく・外部被ばく線量係数
—その放射線管理への適用を考える—》

新しい内部被ばく線量係数

——放射線管理適用上の問題点——

佐藤 裕 一^{*1}

Problems in Applying New Internal Dose Coefficients to Radiation Control

Yuichi SATO^{*1}

1. はじめに

現行の放射線障害防止法等の放射線防護関係法令（以後、法令という）の内部被ばくに関連する部分は、1977年の国際放射線防護委員会（ICRP）の放射線防護に関する基本勧告（刊行物 26¹⁾）とそれを実際に適用する際に必要な考え方やデータを収録した刊行物 30²⁾（作業者による放射性核種の摂取限度）、刊行物 35³⁾（作業者の放射線防護のためのモニタリングの一般原則）及び刊行物 54⁴⁾（作業者による放射性核種の摂取に関する個人モニタリング：立案と解釈）を取り入れている。そして、内部被ばく線量の算定の具体的な手法については、その手法が詳しく記述されている「内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」（原子力安全技術センター）⁵⁾に基づくこととなっている。

しかし、1991年にICRPより、1977年の基本勧告に取って代わるものとして、刊行物 60⁶⁾（いわゆる 90 年勧告）が世に出され、それ以後、この 90 年勧告を実際に適用するための刊行物が最新の知見を基に多数 ICRP より出版されている。

例えば、吸入摂取の場合の内部被ばく線量計算に用いる新しい「呼吸気道モデル」（刊行物 66⁷⁾）、また、公衆の構成員の線量係数を求める際に用いる新しい「体内動態

モデル」（刊行物 67⁸⁾、刊行物 69⁹⁾、刊行物 71¹⁰⁾）など、新しい生物学的モデルが矢継ぎ早に発表された。そして、それらのモデルを基に、職業被ばくについては、刊行物 68¹¹⁾ で従来の年摂取限度（ALI）に代わり核種ごとの“線量係数”{1 Bq 摂取当たりの実効線量（Sv）}がその計算手法とともに勧告され、また、公衆被ばくについては、刊行物 72¹²⁾ で被ばく時の年齢別の線量係数が刊行物 56¹³⁾、刊行物 67、刊行物 69、刊行物 71 で既に発表された分を含め、多数の核種について勧告された。

このような国際的な状況から、近い将来、90 年勧告以降の新しい内部被ばく線量の計算手法が国内の法令に取り入れられ、同時に、前述の「内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」もかなり大きな変更を余儀なくされるのではないと思われる。

そこで、ここでは、もし、この新しい線量係数の計算手法が現行法令のスタイルで法令に反映されると仮定した場合に放射線管理上影響を受けると推測される点、並びに発生する問題点等を考察する。

2. 新しい内部被ばく線量係数の登場によって影響を受ける点

放射線管理上影響を受けると推測される主な項目を職業被ばくに関連する部分と公衆被ばくに関連する部分に分けて考察する。

職業被ばくに関して、ICRP は、実効線量限度は 5 年間で 100 mSv（平均 20 mSv/年、ただし、いかなる 1 年間も 50 mSv を超えないこと）とし、年摂取限度（ALI）は、直接には与えていない。しかし、年摂取限度は、20

^{*1} 株式会社千代田テクノ大洗研究所；茨城県東茨城郡大洗町成田町 3681（〒311-1313）
Oarai Laboratory, Chiyoda Technol Corporation ; 3681 Narita-cho, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki 311-1313, Japan.

mSv (預託実効線量) を線量係数 (ICRP では、線量係数を Sv/Bq として表しているが、mSv 単位の方が馴染み易いので、ここでは、以後、線量係数を mSv/Bq として取り扱う) で割って求めることができるため、一般に、現行の 50 mSv/年 を基にした値より引き下げられることになり、年摂取限度から計算される空气中濃度限度は影響を受ける。また、個人モニタリングにおいて内部被ばく線量を算定する場合、現行では年摂取限度に対する摂取量の比に年線量限度を掛けて実効線量当量を算定することになっていることから、年摂取限度が与えられるのか、それとも線量係数が与えられるのかで、実効線量の算定方法も影響を受けることになる。また、新しい生物学的モデルが核種の体内残留や排泄を表すために取り入れられると思われることから体外計測法、あるいはバイオアッセイ法による摂取量の計算方法も影響を受ける。

公衆被ばくに関して、現行法令では、非密封放射性物質取扱施設からの排気・排液についての「排気中又は空气中濃度限度」および「排液中又は排水中の濃度限度」が、成人の職業被ばくにおける吸入摂取および経口摂取に対する年摂取限度を基にして計算され、成人、子供を問わず、一律に適用されている。ところが、刊行物 72 において、公衆の構成員を 6 年齢群に分けて核種ごとの線量係数が与えられ、刊行物 71 においては、身体活動量を考慮して各年齢群の 1 日当たりの呼吸量が与えられたことから、核種の濃度限度は、公衆の実効線量限度 1 mSv を当該核種の線量係数と各年齢群の 1 年間の呼吸量で割った値になると考えられる。しかし、このような計算では、ある核種の濃度限度は各年齢群に対して与えられることになり、一体どのように取り扱われるのか。おそらく、実際の放射線管理を踏まえ、安全側に考えて、核種の 6 年齢群の濃度限度のうち、その濃度限度が最も小さい年齢群の濃度限度を当該核種の濃度限度として、最終的に採用するようになるのではないかと推測されるが、実際、どのように法令に反映されるかわからない。このように「排気中又は空气中濃度限度」および「排液中又は排水中の濃度限度」が従来の値から、より大きい値あるいはより小さい値に変更され、大きな影響が出るものと考えられる。

3. 新しい内部被ばく線量係数を実務に適用する場合の問題点

以上述べてきた放射線管理上影響を受けると推測される主な項目のうち、内部被ばくに関する個人モニタリングにおける実効線量の算定に焦点を当て、以下、“新しい生物学的モデル”と“個人モニタリングにおける内部被

ばく実効線量の算定と線量係数との関係”について触れ、それらを踏まえて、最後に、“内部被ばくにおける実効線量算定の際の問題点”について考える。

3.1 新しい生物学的モデル

内部被ばく実効線量の計算に用いられる生物学的モデルの役割は二つあり、その一つは、線量係数の計算に用いられるもので、核種摂取後のある期間 (例えば 50 年間) の各組織・臓器内の核種の壊変数を与えること、もう一つは、個人モニタリング時の摂取量の算出に用いられるもので、核種摂取後の“ある時刻”の各組織・臓器内の核種の体内残留割合および排泄率割合を与えることである。個人モニタリング時の実効線量の算定に関しては、後の節で詳しく述べる。

以上のような役割を持った新しい生物学的モデルは、従来のモデル (刊行物 30) に比べ、生物学的によりリアリスティックなモデルであり、成人だけでなく、子供にも適用できるようになっている。これらのモデルは従来のモデルに比べ複雑になっているが、簡単に説明すると、呼吸気道モデルでは、放射性物質の初期沈着領域として、前鼻道から肺泡までの呼吸気道を大きく胸郭外と胸郭内の 2 領域に分け、それら領域を更に細分化して計 5 領域とした。また、放射性物質がそれら各領域から他の領域へ移行するときの速度の違いを表現するために一領域に複数のコンパートメントを与え、更に放射性物質の化学形に起因する血中への吸収速度の違いを表すために初期状態の粒子と変換状態の粒子という二つの粒子状態を与えた。その結果、計算上用いられる呼吸気道部分のコンパートメントの数は 27 にのぼっている。また、体内動態モデルについては、血液に入った元素が各組織・臓器へ移行した後また血液に戻るという複雑な循環モデルになっていることが最大の特徴である。この新しい循環モデルは、大きく分けて 3 種類で、鉄、アルカリ土類元素、超ウラン元素に対して適用されるが、同類のモデルであっても、元素ごとに異なった移行速度定数となっている。また、組織系に入った元素の排泄経路も、従来とは違い、尿中排泄の場合、膀胱を経由し、また、糞中排泄の場合、体内動態モデルで特定されていないときには大腸上部に入るになっている。

以上のように、生物学的によりリアリスティックなモデルが取り入れられた今度の新しい内部被ばく線量の計算手法は、手計算でも年摂取限度が求められた従来の刊行物 30 の手法とは大きく異なり、かなり複雑になっているため、コンピュータによる計算を前提とした計算手法といえる。

3.2 個人モニタリングにおける内部被ばく実効線量の算定と線量係数との関係

個人モニタリングにおいて内部被ばく実効線量を算定する場合、次の二通りの方法が考えられる。一つは、現行法令下で行われているような方法で、線量係数（あるいは年摂取限度）を用いて算定する簡便な方法である。すなわち、この方法では、例えば、吸入摂取の場合、標準人が呼吸率 $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ で粒子径 $5 \mu\text{m}$ の核種を吸入摂取したという一律な条件（いわゆるデフォルト）の下で計算された線量係数（あるいは年摂取限度）がまず与えられる。その線量係数（あるいは年摂取限度）を計算したときと同じ条件の下での体外計測による全身（臓器）残留放射能測定、あるいはバイオアッセイによる尿・糞中の放射能測定、あるいは空气中放射能濃度測定により、摂取量の推定を行い、その摂取量と線量係数を掛けるか、あるいは摂取量と年摂取限度との比例計算によって実効線量を算出する。もう一つは、線量係数（あるいは年摂取限度）を算出したと同様な計算過程を経て実効線量を算出する方法である。この方法では、デフォルト以外の様々な条件を考慮することができ、推定された摂取量を基に各組織・臓器の等価線量を計算し、各組織の組織荷重係数を用いて実効線量を算出する。この方法を用いるためには、臓器残留量の50年間の壊変数と、各臓器の50年間の壊変数と比実効エネルギーの積を求めるためのコンピュータとソフトが不可欠と考えられる。ユーザーにとって扱い易いという観点から、英国 NRPB から販売されているパーソナルコンピュータソフト LUDEP¹⁴⁾ は、その一例である。しかし、現バージョン (Ver. 2.04) においては、呼吸気道モデルと新しい組織荷重係数が取り入れられているにすぎず、各核種に対する新しい動態モデルが取り入れられていないので完全なものではない。

個人モニタリングが法令に従って行われることを考慮すると、現行法令下で行われているような簡便な線量算定方法が、今後も採用されるのではないかと考えられる。

3.3 内部被ばくにおける実効線量算定の際の問題点

ここで、線量係数（あるいは年摂取限度）を用いる簡便な方法によって、内部被ばく実効線量を算定する場合の問題点を次に述べる。

(1) 粒子径の補正について

現時点では、ICRP は刊行物 30 で採用されているような粒子径の補正方法を明示していない。そのため、吸入粒子の空気力学的放射能中央径 (AMAD) が $5 \mu\text{m}$ 、呼吸率 $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ の条件の下で算定される実効線量（いわゆ

るデフォルト）を、 $5 \mu\text{m}$ (AMAD) 以外の場合の実効線量に補正することはできない。

この問題は、ICRP が粒子径の補正式と必要なデータを示すか、あるいは、たとえば、 $0.1 \mu\text{m}$ 、 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $3 \mu\text{m}$ 、…等のようないくつかの粒子径について線量係数を与えれば解決する。しかし、特に、後者については、線量係数を必要とする粒子径の範囲が広い場合には、そのようなデータ集は膨大な量となり、“法令の下で行う実効線量の算定”という観点からは現実的ではない。

(2) 被検者個人のパラメータによる補正について

新しい呼吸気道モデルの最大の特徴は、ヒトの解剖学的パラメータ、生理学的パラメータ等の数値を自在に変更し、例えば、沈着割合をより正確に評価できることである。しかし、この特徴を活かして、実効線量を算定することは實際上困難である。たとえば、運動量を反映した呼吸率、呼吸方法（鼻呼吸か口呼吸）に関する被検者個人のパラメータ値をデフォルト以外の値に変更して実効線量を算定しようとした場合、それらパラメータ値ごとの線量係数が必要となる。しかし、粒子径の場合と同様に、そのようなデータ集は膨大な量となり、現実的ではない。

(3) 体外計測法あるいはバイオアッセイ法により摂取量を計算するための計算式について

新しい生物学的モデルではコンパートメントの数が多く、核種によっては循環式になっていることから、体内残留割合あるいは排泄率割合を表す式はかなり複雑になり、従来のような簡単な取り扱いには困難なように思われる。この点を以下明らかにしたい。

摂取量 I の計算式は、次式のように表され、被検者の体外計測（あるいはバイオアッセイ）から求めた摂取 t 日後の体内残留放射能 $Q(t)$ （あるいは排泄率放射能 $E(t)$ ）を、生物学的モデルを用いて計算された摂取 t 日後の体内残留割合 $q(t)$ （あるいは排泄率割合 $e(t)$ ）で割って、摂取量を求めることができる。

$$I = Q(t) [\text{or } E(t)] / q(t) [\text{or } e(t)] \quad (1)$$

(1) 式の分母の体内残留割合 $\{q(t)\}$ を

$$\text{体内残留割合} = \text{生物学的な残留割合} \times \exp(-\lambda_r t) \quad (2)$$

（ただし、 λ_r は、核種の壊変定数）

として、一例を挙げて説明する。

「内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」では、胸部計測からの摂取量の算定において、吸入摂取（クラス Y）の場合の生物学的モデルから得られる体内残留割合（粒子径は AMAD で $1 \mu\text{m}$ ）の部分は、次式で表されている。

$$\text{摂取量} = \frac{\text{吸入摂取 } t_i \text{ 日後の体内残留放射能}}{(\text{吸入摂取 } t_i \text{ 日後の体内残留割合}) \times e^{-\lambda_i t_i}}$$

例) データ表

吸入摂取 後の日数 t	胸郭内残留割合 S 型
0	8.20E-02
:	:
1	6.43E-02
2	6.27E-02
3	6.19E-02
4	6.13E-02
5	6.07E-02
6	6.01E-02
7	5.95E-02
8	5.90E-02
9	5.84E-02
10	5.79E-02
:	:
15	5.54E-02
:	:
45	4.50E-02
:	:
120	3.51E-02

● データ表

数値表で与えられた残留割合を用いる。
例えば、左データ表の吸入摂取 3 日後の残留割合は、6.19E-02 として摂取量を計算する。

● 関数形

データ表を基に導出された関数において、例えば、 $t = 3$ として吸入摂取 3 日後の残留割合を求め、その値を用いて摂取量を計算する。

$$m_{\text{bio}}(t) = \sum_{i=1}^n a_i \exp(-\lambda_i t) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$

$m_{\text{bio}}(t)$: 吸入摂取 t 日後の生物学的な残留割合

例) S 型の胸郭内残留関数 ($n = 5$)

項	a_i	λ_i
1	1.0183E-02	1.0039E+01
2	2.3065E-02	2.5877E-02
3	7.9508E-03	1.9943E+00
4	1.6003E-02	4.5532E-03
5	2.4797E-02	7.6239E-06

第 1 図 吸入摂取における摂取量の計算方法

$$\begin{aligned} \text{体内残留割合} = & (0.0788 e^{-0.00139t} + 0.0675 e^{-0.000693t} \\ & + 0.00375) \times \exp(-\lambda_r t) \quad (3) \end{aligned}$$

そこで、新しい生物学的モデルを用いた場合、吸入摂取によるこの式はどのように表されるか。

筆者は、核種の吸入摂取後の生物学的な体内残留割合や排泄率割合を求めるために、シミュレーションソフト STELLA II Ver. 3.0.61 (High Performance Systems 社) を用いた。このソフトの特徴を、簡単に言えば、真白い画面上に呼吸気道モデルと胃腸管モデルおよびその他の臓器における体内動態モデルを連結したブロックダイアグラムを作成し、そのプログラムを実行するだけで、各組織・臓器の体内残留割合や排泄率割合が計算される。胸部計測からの摂取量の算定の場合、胸郭内領域(呼吸気道モデル)の残留割合をこのソフトで計算すればよいことになる。

そこで、粒子の血液への吸収の型を S 型(現行法令下のクラス Y に対応)として、呼吸率 $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ の標準人が粒子径 $5 \mu\text{m}$ (AMAD) の粒子を吸入摂取したときの呼吸気道への初期沈着割合(刊行物 68)をこのソフトに入力し、胸郭内残留割合を経時的に求めた。また、この胸郭内残留割合のデータ群から、吸入摂取後 t 日の関数として残留関数を導くために、非線形最適化プログラム ASNOP Ver. m2 Rev. 6 (ASNOP 研究会編 日刊工業新聞社) 中の非線形最小二乗法適用プログラムを用いた。この残留関数を導くときのデータ群として、残留割合の変化率が大きい摂取 1 日後までの間は 0.2 日ごと、

1 日後以降 120 日までの間は 1 日ごとの、計 125 点の残留割合を用いた。残留関数の関数形と残留割合の使い方を第 1 図に示す。この図のデータ表には、用いられたデータ群のうち初期沈着割合($t=0$)と十数点の残留割合を例示した。また、関数形は、ある時刻における残留割合の値(もとのデータ)と関数値との差の残留割合に対する比が 1%未満になるように最適化した。最適化の精度にもよるが、導かれた関数形は 5 つの指数項からなることからわかるように、体内残留割合を関数として表した場合、従来の式に比べ複雑であることがわかる。

以上の例では、呼吸気道モデルのみが関与する胸部の残留割合を取り扱ったが、すべての生物学的モデルが関与する全身の残留割合の場合は、なお一層、複雑な関数形となることが予想される。

4. ま と め

新しい内部被ばく線量係数の計算手法が今後の法令にどの程度実際に反映されるかはわからないが、この新しい手法が現行法令のスタイルで法令に反映されると仮定した場合の放射線管理上影響を受けると推測される点(第 1 表参照)、並びに発生する問題点について述べた。

以上のように新しい生物学的モデルは複雑であるため、新しい内部被ばく線量算定法を現行法令のような体裁で掲載するには、いくつかの問題点がある。法令に掲載される手法は、法令という行政上の観点から、できるだけ平易な内容のものにならざるを得ないと考えられる。そこで、年摂取限度を取り扱った科学技術庁告示第

第1表 職業被ばくにおいて放射線管理上影響を受ける点

	現行の放射線管理	→	新しい放射線管理
線量限度	実効線量当量限度 50 mSv 組織線量当量限度 500 mSv		実効線量限度が5年間で100 mSv (平均 20 mSv/年), ただし, いかなる1年間も 50 mSv を超えない —
補助限度	年摂取限度 (ALI)		年摂取限度 (ALI) で与えるか, 線量係数 ($e_{inh}(50)$, $e_{ing}(50)$)* ¹ で与えるか?
線量係数	—		(年摂取限度を与える場合, 預託実効線量で <u>20 mSv</u> とする)
誘導限度	空气中濃度限度 (DAC)		空气中濃度限度 (DAC) ?
摂取量の 計算方法	体外計測の一例 (吸入区分 D) $I = q_w(0) / (0.48 + 0.15f_i)$		$I = Q(t) [\text{or } E(t)] / q(t) [\text{or } e(t)]$?
実効線量の 算定方法	実効線量当量の算定 $H_{E1} = 50 \times I / (ALI)_s$		現行のような年摂取限度を用いる方法 ($E = 20 \times I / ALI_{20}$)* ² 又は線量係数を用いる方法 $\left\{ \begin{array}{l} E = I \times e_{inh}(50) \\ \text{or} \\ E = I \times e_{ing}(50) \end{array} \right.$

*¹; $e_{inh}(50)$ は, 吸入摂取の場合の線量係数を表し, $e_{ing}(50)$ は, 経口摂取の場合の線量係数を表す

*²; E は実効線量を表し, ALI_{20} は実効線量の 20 mSv に対応する年摂取限度を表す

15号(昭和63年5月18日)の別表第1のような基準となる表は, 必要最小限に止め, 個人モニタリング時の内部被ばく実効線量の算定に関する詳細な記述は, 「内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル」のようなマニュアルで取り扱われるべきものとする。

また, 標準的な方法を記載するであろうそのようなマニュアルを補完する形で, LUDEP (NRPB) に類似した内部被ばく線量算定のためのパソコンソフト (新しい内部被ばく線量計算方法を取り入れたソフト) があれば, 線量係数 (あるいは年摂取限度) を用いた簡便な方法によって内部被ばく実効線量を算定する場合の問題点のほとんどが解決できると考える。

最後に, 本発表をまとめるに当たり, 多くの助言をいただいた藤田稔氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) ICRP; ICRP Publication 26, *Ann. ICRP*, **1**(3), Pergamon Press, Oxford (1977).
- 2) ICRP; ICRP Publication 30, Parts 1-4, *Ann. ICRP*, **2**(3/4), **4**(3/4), **6**(2/3), **19**(4) (1979-88) and Supplements to Parts 1-3, *Ann. ICRP*, **3**, **5**, **7**(1-3), **8**(1-3), Pergamon Press, Oxford (1979-82).
- 3) ICRP; ICRP Publication 35, *Ann. ICRP*, **9**(4), Pergamon Press, Oxford (1982).
- 4) ICRP; ICRP Publication 54, *Ann. ICRP*, **19**(1-3),

Pergamon Press, Oxford (1988).

- 5) (財)原子力安全技術センター; 内部被ばくにおける線量当量の測定・評価マニュアル, (財)原子力安全技術センター, 東京 (1988).
- 6) ICRP; ICRP Publication 60, *Ann. ICRP*, **21**(1-3), Pergamon Press, Oxford (1991).
- 7) ICRP; ICRP Publication 66, *Ann. ICRP*, **24**(1-3), Pergamon Press, Oxford (1994).
- 8) ICRP; ICRP Publication 67, *Ann. ICRP*, **23**(3/4), Pergamon Press, Oxford (1993).
- 9) ICRP; ICRP Publication 69, *Ann. ICRP*, **25**(1), Pergamon Press, Oxford (1995).
- 10) ICRP; ICRP Publication 71, *Ann. ICRP*, **25**(3-4), Pergamon Press, Oxford (1995).
- 11) ICRP; ICRP Publication 68, *Ann. ICRP*, **24**(4), Pergamon Press, Oxford (1994).
- 12) ICRP; ICRP Publication 72, *Ann. ICRP*, **26**(1), Pergamon Press, Oxford (1996).
- 13) ICRP; ICRP Publication 56, *Ann. ICRP*, **20**(2), Pergamon Press, Oxford (1989).
- 14) N.S. JARVIS, A. BIRCHALL, A.C. JAMES, M.R. BAILEY and M.-D. DORRIAN; Personal computer program for calculating internal doses using the ICRP Publication 66 respiratory tract model, LUDEP 2.0. Chilton, NRPB-SR287 (1996).