

# 改良されたプルトニウム動態モデルを用いた $^{239}\text{Pu}$ に関する内部被ばく線量の評価

梅田 健太郎\* 小林 悌二\*\*

## Estimation of internal dose coefficients for $^{239}\text{Pu}$ based on the improved plutonium biokinetic model

Kentaro UMEDA \* and Teiji KOBAYASI \*\*

Committed effective dose coefficients for internal exposure due to  $^{239}\text{Pu}$  isotopes published in ICRP 119 was estimated by using the ICRP 67 biokinetic model specified for Pu (the current model). The current model has shown the rough consistency with observation of intravenous injection of plutonium isotopes regarding total-body retention, long term daily urinary and fecal excretion, but several weaknesses in the model were pointed out. Recently an improved biokinetic model for Pu has been proposed and the improved model has been confirmed to be consistent with recent many data obtained using Pu injection. Unfortunately detailed discussions on dose coefficients for Pu isotopes based on the improved biokinetic model have not been able to be found. In this report, we estimate the internal dose coefficients for Pu by applying this improved biokinetic model to internal exposure in adult workers and quantitatively discuss the effect of the modification on the simulation results of residual activity in organ and the internal dose coefficients.

### 1. はじめに

地球上に存在する Pu (プルトニウム) 元素は主に原子炉内で人工的に生成されたものであり、例えば、 $^{239}\text{Pu}$  は  $^{238}\text{U}$  (ウラン 238) を標的として中性子 n が吸収される ( $n, \gamma$ ) 反応とそれに続くベータ崩壊で生成され、 $^{238}\text{Pu}$  や  $^{241}\text{Pu}$  は  $^{239}\text{Pu}$  を標的とした ( $n, 2n$ ) 等の中性子吸収反応で作られる[1]。特に  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  核種は  $^{235}\text{U}$  と同様に核分裂性核種であり、U 燃料とともに核燃料の一部となっている。Pu 同位体は放射性核種であり、ほとんどの Pu 同位体は  $\alpha$  線を放出するため、内部被ばくに注意する必要がある。体内に摂取された Pu は肺に沈着したり、また、肺や胃腸管から血液内に吸収され肝臓、骨、生殖器官等に蓄積するため、臓器は被ばくし、放射性障害が発生する危険がある[2]。体内に摂取された Pu の影響は、米国においては、マンハッタン計画当初の 1940 年から 1970 年にかけて行われたボランティアを含む患者に Pu を注入した人体実験や核開発施設における体内汚染事故の被ばく患者で調べられてき

た[3, 4]。2000 年代に入り、旧ソビエト連邦のマヤーク核技術施設で起こった Pu 吸入被ばく患者 17740 人のデータに基づき、人に関する内部被ばく線量と肺、肝臓、骨のガン死についての関係が始めて報告された[5]。

現在 ICRP (International Commission on Radiological Protection : 国際放射線防護委員会) から公表されている Pu に関する内部被ばく実効線量係数 [6] は、ICRP Publication 60 勧告 [7] と評価モデル[8]に基づき、ICRP Publication 67 [9] で公表された Pu の動態モデル (以下、現モデルと呼ぶ) を使用して評価された。現モデルは、人間あるいは哺乳類の体内に Pu や Pu と類似した化学的性質をもつ元素 (ストロンチウム、カルシウム、バリウム等) を注入して観測された体内代謝データに基づき作成された。現モデルは、体内の滞留履歴、1 日当たりの尿による体外排出量や長期的な体内臓器中の分布の測定データをおおよそ再現するモデルであるが、モデル公開後に新たに発表された研究成果との差異が明らかになり、また、生理学的に不自然な Pu の移行経路が含まれていることが指摘されていた[10]。Pu 摂取後 10 日か

---

2017 年 10 月 4 日受理

\* 共通教育センター 教授

\*\* (元)新潟大学医学部 教授

ら1000日にかけて、肝臓や血液中のPu濃度、また、糞による1日当たりの排出量が過小に評価される欠点、および、膀胱への不自然な移行経路や肝臓に蓄積したPuに対する単純化しすぎた移行過程など、現モデルで明らかになった問題点を解決するため、新しい知見(新たに行われた健康人を対象にした血管からのPu注入実験の観測データ、マヤーク核技術施設で起こったPu被ばく事故の詳細な解析データなど)をもとに改良された動態モデル(以下、改良モデル)が提案された[10]。しかし、この論文には、改良モデルを使用したPuの内部被ばく線量の評価について具体的な記述はない。その後も、現モデルで評価されたPuの内部被ばく実効線量係数(1Bq当たりの預託実効線量)と改良モデルで評価された実効線量係数の差違について詳細に論じた報告は見当たらない。

本稿では、改良モデルを組み込んだICRP Publication60に基づく内部被ばく評価プログラムを作成し、文献10に報告されている $^{239}\text{Pu}$ を直接血液内に注入した(以下、血液注入)場合について、Pu注入後の各組織におけるPuの残留放射能濃度、および、糞や尿により体内から排出される1日当たりの放射能濃度の時刻歴を解析し、評価プログラムが文献10に報告されている結果を再現することを確認する。また、現モデルの計算結果と比較し、改良されたモデルが各組織における残留放射能の計算結果におよぼす影響を評価する。続いて、改良モデルを使用し $^{239}\text{Pu}$ に関する血液注入、経口摂取、および、吸入摂取(Fクラス、Mクラス、Sクラス)の摂取形態について内部被ばく線量の解析を行い、各組織の預託等価線量と預託実効線量を求める。そして、改良されたモデルが預託線量に及ぼす影響を評価する。

## 2. 計算方法

1Bq(ベクレル)の $^{239}\text{Pu}$ を血液注入した場合の、注入後の体内の各組織に残留する $^{239}\text{Pu}$ の放射能濃度を改良モデルのコンパートメントモデルで評価し、文献10に報告されている結果と比較し、文献の結果を再現しているか確認する。続いて、この改良モデルのコンパートメントモデルに基づき、ICRP Publication60(ICRP1990年勧告)の評価モデル[7, 8]に従って、ICRPが定める標準作業員を対象として、血液注入、経口摂取、および、吸入摂取Fクラス、Mクラス、Sクラスについて1Bqの $^{239}\text{Pu}$ を瞬間摂取した場合の各評価組織の預託

等価線量と預託実効線量を解析する。ICRPの内部被ばく評価モデルの詳細については文献11とそこで参照している文献に譲り、ここでは概略を述べる。

### 2.1 現モデルの概要と問題点

ICRP Publication 67[9]に公表されている現モデルを図1に示す。この動態モデルでは、Blood(血液)、Liver1(肝臓1)、Liver2(肝臓2)、Urinary path(尿管)、Other kidney tissues(腎臓その他組織)、Urinary bladder contents(膀胱)、Cortical surface(皮質骨表面)、Cortical volume(皮質骨体積)、Cortical marrow(皮質骨髄)、Trabecular surface(梁骨表面)、Trabecular volume(梁骨体積)、Trabecular marrow(梁骨髄)、臓器と骨などの硬組織を除いた体の組織である軟組織(Soft Tissues)は3つコンパートメントに分割されたRapid turnover(ST0:その他軟組織0)、Intermediate turnover(ST1:その他軟組織1)、Slow turnover(ST2:その他軟組織2)、および、Testes(精巣)、Ovaries(卵巣)、Stomach(胃)、Small intestine(小腸)、Upper large intestine(大腸上部)、Lower large intestine(大腸下部)のコンパートメントが定義されている。図1に示す数値はコンパートメント間のPuの移行速度で、単位は1/日である。ICRP 胃腸管モデル[8]では、胃腸管から血液への吸収は小腸で起こるものとし、血液への吸収割合はパラメータ $f_1(=\lambda_b/(\lambda_b+\lambda_{st}))$ で与えられる。ここで、 $\lambda_b$ 、 $\lambda_{st}$ はそれぞれ小腸から血液、小腸から大腸上部へのPuの移行速度である。図1中のRSI\_BLは $\lambda_b$ を示し、その値は一般に $f_1$ を与えることにより決まる。

現モデルについて以下の問題点が指摘されている[10]。

- 1) 肝臓におけるPu残留放射能が摂取時から約1000日後にかけて低めに評価される。
- 2) 血液注入後に観測される血液中のPu放射能濃度が注入後約2週間当たりで観測値よりも落ち込み、その後約1000日過ぎまで観測値に比べて少なく評価される。
- 3) 1日当たりに糞により排出されるPu放射能量が摂取後約2週目から数週間にかけて低めに評価される。
- 4) モデルで設定されている、体内に摂取されたPuが膀胱へ移行する経路が非現実的である。
- 5) 体内に摂取されたPuが肝臓に蓄積される過程が単純すぎる。



$$\begin{aligned} \frac{dq_{Sj}(t, t_0)}{dt} = & I_{Sj}(t) + \sum_{S'} \lambda_{S' \rightarrow S} \cdot q_{S'j}(t, t_0) \\ & + \sum_j \lambda_j \cdot q_{Sj}(t, t_0) \\ & - \sum_{S''} \lambda_{S \rightarrow S''} \cdot q_{Sj}(t, t_0) - \lambda_j \cdot q_{Sj}(t, t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $q_{Sj}(t, t_0)$  は、年齢  $t_0$  において放射性核種  $j$  を摂取したとき、摂取後の年齢  $t$  における線源器官  $S$  での核種  $j$  の残留放射能[Bq]である。

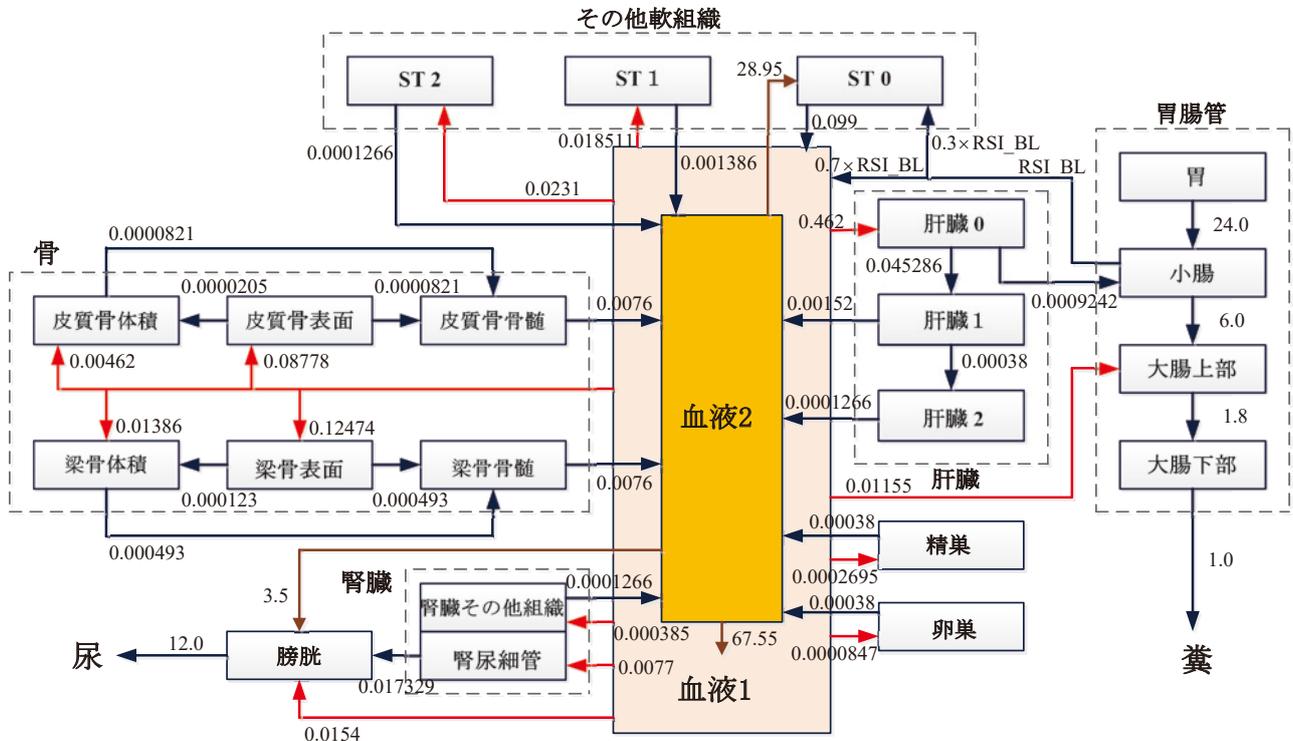


図 2 改良モデルに対するコンパートメントモデル (文献 10 に基づき作成)

(1)式の右辺第 1 項は年齢  $t$  における単位時間当たりの線源項 (供給項), 第 2 項は核種  $j$  が線源器官  $S'$  から線源器官  $S$  に移行してくる流入項で、 $\lambda_{S' \rightarrow S}$  はその移行速度である。第 3 項は放射性核種  $j'$  が壊変し放射性核種  $j$  が生成される供給項で、 $\lambda_j$  は核種  $j$  の壊変定数である。第 4 項は線源器官  $S$  から線源器官  $S''$  へ核種  $j$  が移行する流出項, 第 5 項は核種  $j$  の自然壊変による消滅項であり、 $\lambda_j$  は核種  $j$  の壊変定数である。図 1, 2 に示すように、核種の体内挙動を模擬するためのコンパートメントは複数で構成され、また、摂取した  $^{239}\text{Pu}$  の壊変で生成される娘核種を含め複数の放射性核種から放出される放射線を考慮する。このため、残留放射能を評価する方程式は連立微分方程式となる。微分方程式は各線源領域に取り込まれる放射性核種の放射能を初期値として解かれる。本解析では瞬間的な  $^{239}\text{Pu}$  の体内摂取を仮定する。

### 2.4 等価線量・実効線量の評価[11]

$^{239}\text{Pu}$  の体内摂取で内部被ばくする組織・器官 (以下、標的器官) の等価線量, および実効線量は、ICRP の内部被ばく評価モデル[8]に従い、各線源器官の残留放射能を用いて下記の (2), (3) 式で評価する。

放射性核種  $j$  を年齢  $t_0$  で摂取した後の年齢  $t$  における標的器官  $T$  の等価線量を  $H_T(t, t_0)$ , および、実効線量を  $E(t, t_0)$  とし、線源器官  $S$  での残留放射能  $q_{Sj}(t, t_0)$  を既知としたとき、等価線量  $H_T(t, t_0)$  の時間変化は(2)式の微分方程式で表されるとする。

$$\frac{dH_T(t, t_0)}{dt} = \sum_S \sum_j q_{Sj}(t, t_0) \cdot SEE(T \leftarrow S; t)_j \quad (2)$$

ここで、 $SEE(T \leftarrow S; t)_j$  は比実効エネルギー[12]であり、年齢  $t$  において線源器官  $S$  に存在する放射性核種  $j$  が 1 壊変したときに放出される放射線

のエネルギーが標的器官Tに吸収される量である。等価線量 $H_T(t, t_0)$ は、この微分方程式を積分して(3)式から得られる。

$$H_T(t, t_0) = \int_{t_0}^t \left\{ \frac{dH_T(t', t_0)}{dt'} \right\} dt' \quad (3)$$

等価線量が求められれば、実効線量は(4)式により

$$E(t, t_0) = \sum_T w_T H_T(t, t_0) \quad (4)$$

で与えられる。ここで、 $w_T$ は標的器官Tの組織荷重係数である。

摂取後の積分時間は、成人の場合には評価の基準として採られる50年間とし、その期間に対応する等価線量、実効線量をそれぞれ、預託等価線量、預託実効線量と呼ぶ[7, 8]。

なお、現モデルのコンパートメントモデル図1に基づいて評価された<sup>239</sup>Puに関する各組織の残留放射能、預託等価線量および預託実効線量について、文献11に詳細な解析結果が与えられている。

### 3. 計算結果と考察

文献10では、<sup>239</sup>Puを直接血液中に注入した場合の注入後のいくつかの臓器・器官における<sup>239</sup>Pu残留放射能、および、尿や糞により排出される1日当たりの<sup>239</sup>Pu放射エネルギーを観測データと比較し、改良した動態モデルの妥当性を検証している。

はじめに、本解析で得られた血液注入の計算結果を文献10の結果と比較し、改良モデルを組み込んだ内部被ばく線量評価プログラムが正常に動作しているか確認するとともに、文献10に報告されていない組織・器官も含め、改良モデルによる<sup>239</sup>Pu残留放射能の評価結果への影響を現モデルの計算結果と比較しながら考察する。

なお、比較されるべき最近の研究で得られたデータを含む多数の観測データとその分布は文献10に掲載されており、観測値と本解析値との詳しい比較については文献10を参照していただきたい。

#### 3.1 血液注入後の残留放射能の評価

図3に、血液注入後の全身に残留する<sup>239</sup>Puの放射能の時間変化を示す。現モデルは人体実験で測定された全身中の<sup>239</sup>Pu残留放射能の時間変化を良く再現するモデルであったが、改良モデルの全身中の残留放射能に関する結果も、現モデルの結果とほぼ同じである。

図4に、血液中の<sup>239</sup>Pu残留放射能の時間変化

を示す。現モデルでは注入後約10日から約30日にかけて急激に減少する傾向を示し、観測結果(文献10の図5参照)の約1/10となり低めの評価になっていた。改良モデルはこの欠点を改善し、文献10の結果をほぼ再現し、問題点を解決している。また、注入から約30日後の減少の仕方は現モデルに比べ緩やかであり、最近の観測結果を再現する結果となっている。本解析でも同様な結果を得た。

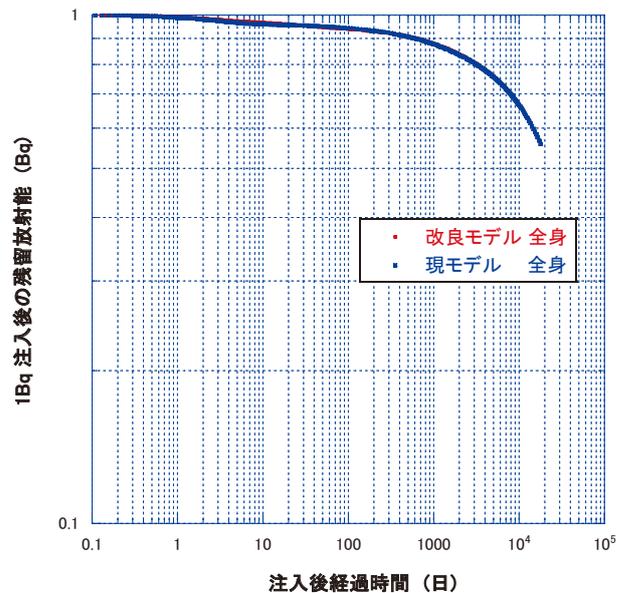


図3 血液注入後の全身中の残留放射能

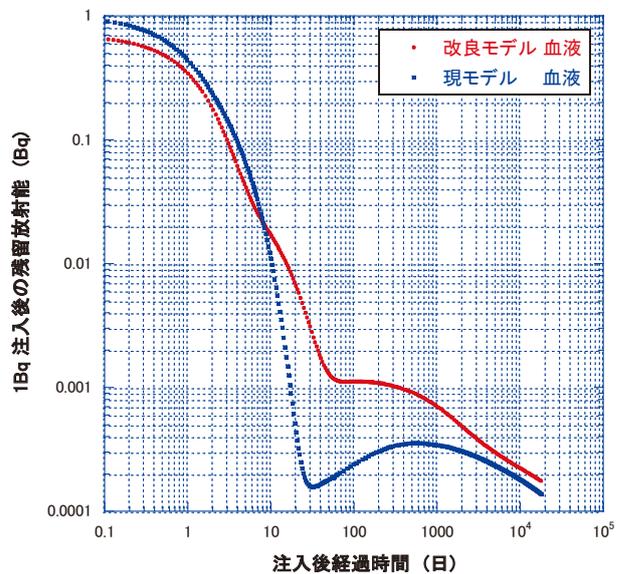


図4 血液注入後の血液中の残留放射能

図5に、肝臓中の<sup>239</sup>Pu残留放射能の時間変化を示す。現モデルの結果は、注入後500日にかけて観測データの約半分となり、過小評価のモデルとなっていた。改良モデルでは、肝臓中の<sup>239</sup>Pu

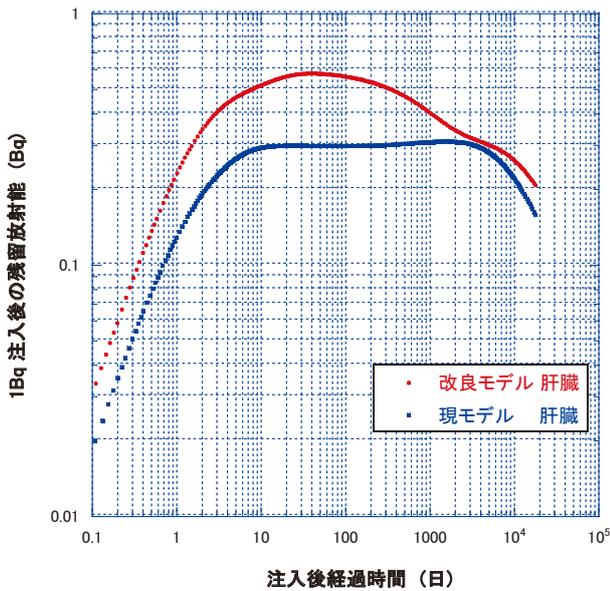


図5 血液注入後の肝臓中の残留放射能

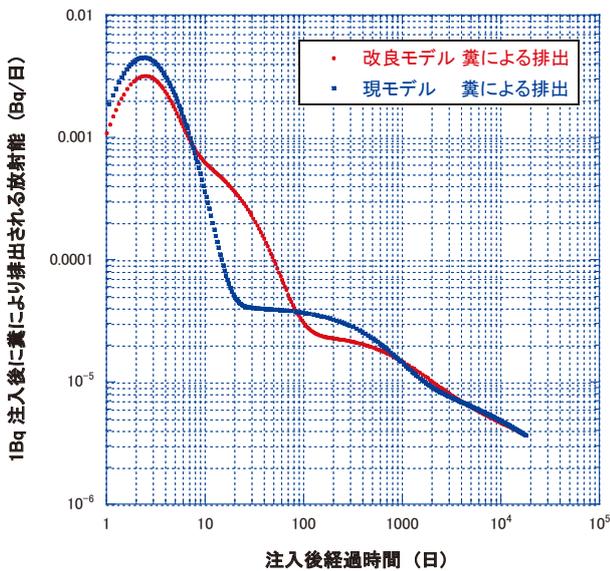


図6 血液注入後、1日当りに糞により排出される<sup>239</sup>Puの放射エネルギー

残留放射能は注入後約40日前後にピークとなり、現モデルの約2倍になっている。この結果は、文献10の図6の結果と同じであり、本解析結果も観測結果を再現している。

図6に、血液注入後、1日当りに糞で排出される<sup>239</sup>Pu放射エネルギーの時間変化を示す。現モデルでは注入後10日前後から100日にかけて、観測結果に比べ過小評価を与える結果となっていた。改良モデルの結果は、この期間中の排出量は現モデルに比べて高めになっており、この結果は、文献10の図8に示す結果と同様な傾向を示してお

り、本解析結果もこの図中に示されている観測結果を再現している。

次に、文献10に報告されていない組織の<sup>239</sup>Pu残留放射能について、改良されたモデルの評価結果への影響を、図7から図17を参照しながら報告する。

<sup>239</sup>Puのように壊変でα線を放出する核種の内部被ばく線量は、α線の飛程が短いため、モデルの変更に伴う各組織の残留放射能評価への影響が、3.2節で議論する各組織の内部被ばく線量評価に直接影響することになる。

図7, 8, および9にそれぞれ、小腸, 大腸上部, および大腸下部における<sup>239</sup>Pu残留放射能の時間変化を示す。

血液注入された<sup>239</sup>Puが糞により排出されるまでの経路として動態モデルに組み込まれているものは、肝臓から小腸への腸肝循環経路, および、血液から大腸上部へ移行する経路である。糞による排出が少なめに評価される現モデルの欠点を改善するためにこれらの移行経路について改良がなされた。現モデルで糞による排出量が観測値に比べて過小評価される注入後の経過時間範囲で、改良モデルで計算される小腸, 大腸上部, および大腸下部の<sup>239</sup>Pu残留放射能は、現モデルに比べて高めになり、糞による排出量が観測結果を再現する結果になっている。

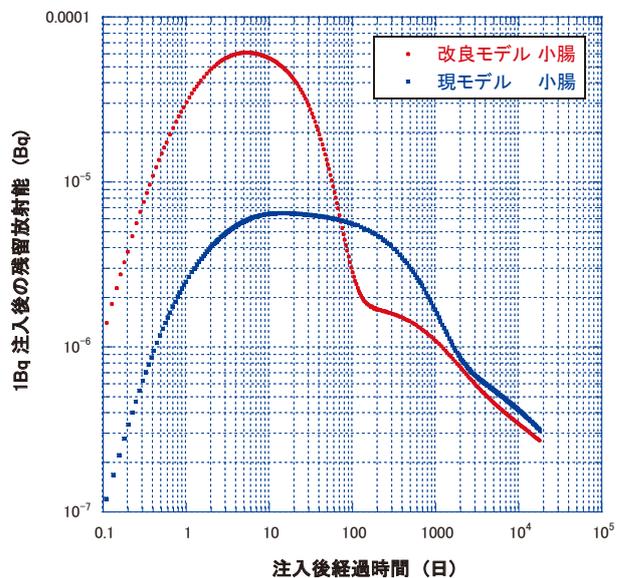


図7 血液注入後の小腸中の残留放射能

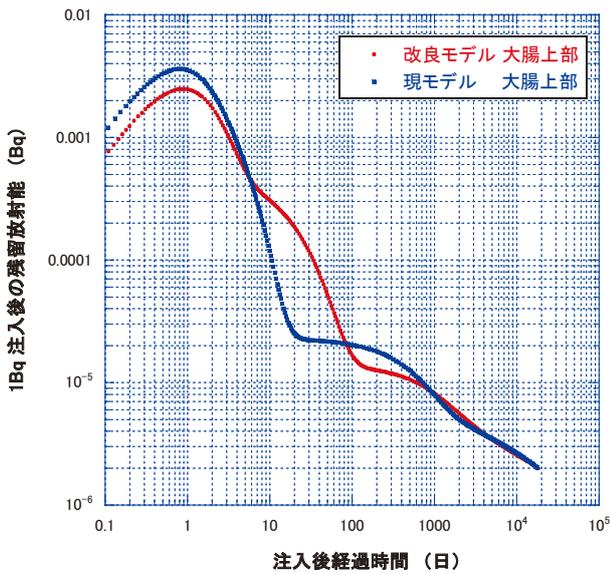


図 8 血液注入後の大腸上部の残留放射能

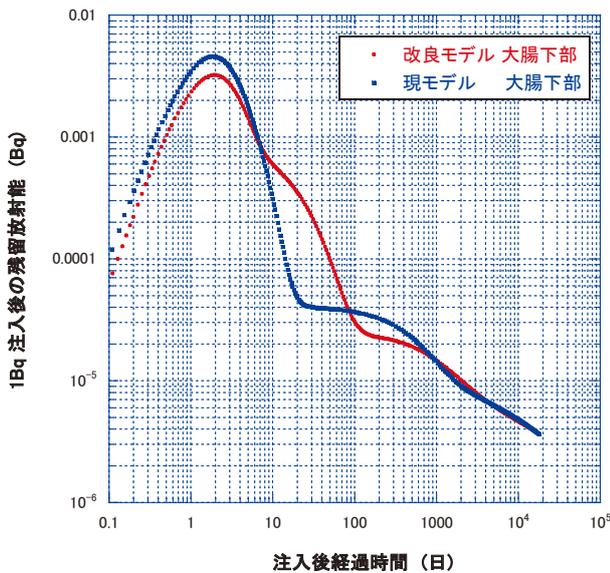


図 9 血液注入後の大腸下部の残留放射能

れる。1000 日以降は、骨表面および骨体積とも両モデルともほぼ同じ結果になっている。骨髄への  $^{239}\text{Pu}$  移行は両モデルとも骨表面と骨体積から生じるが、 $^{239}\text{Pu}$  は主に骨表面に沈着するため、改良モデルで評価される赤色骨髄における  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は注入後約 1000 日までは、現モデルに比べて低めになり、それ以降は両モデルともほぼ同じ値になっている。

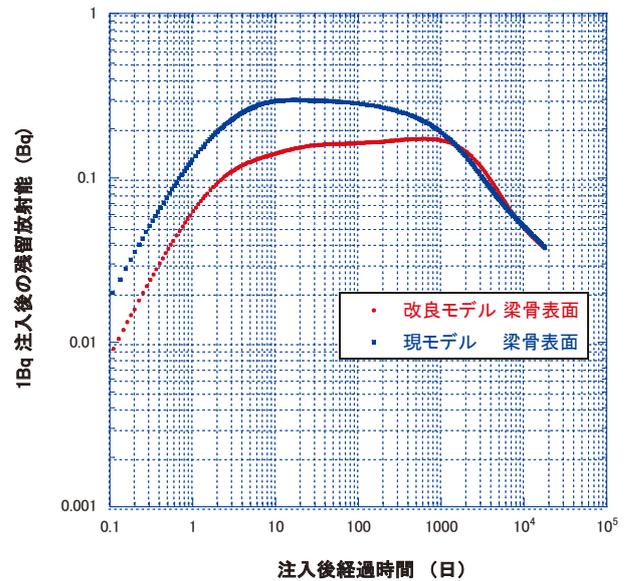


図 10 血液注入後の梁骨表面の残留放射能

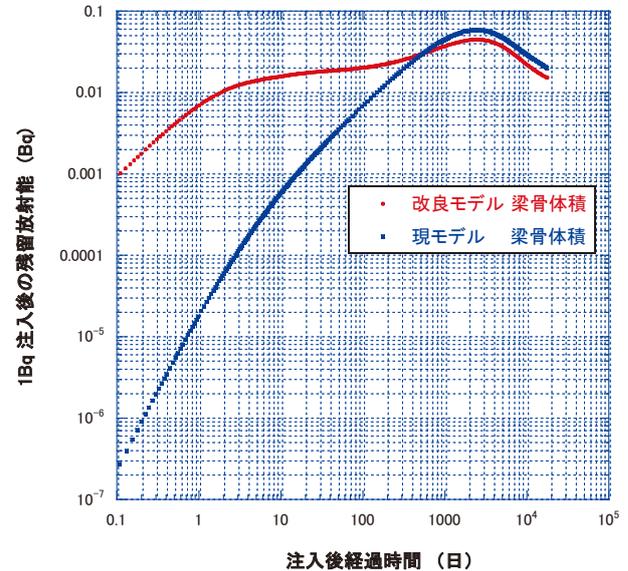


図 11 血液注入後の梁骨体積の残留放射能

図 10, 11, および 12 にそれぞれ、梁骨表面、梁骨体積、および赤色骨髄部における  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能の時間変化を示す。

現モデルでは、骨体積部の Pu の蓄積は骨表面からの移行で起こるとしていたが、改良モデルでは、その移行経路に加え、血液から骨体積部への直接的な移行過程も考慮している。

改良モデルで評価される骨表面における  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は血液注入後約 1000 日までは、現モデルに比べて低めになるが、骨体積部の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は、逆に現モデルに比べて高めに評価さ

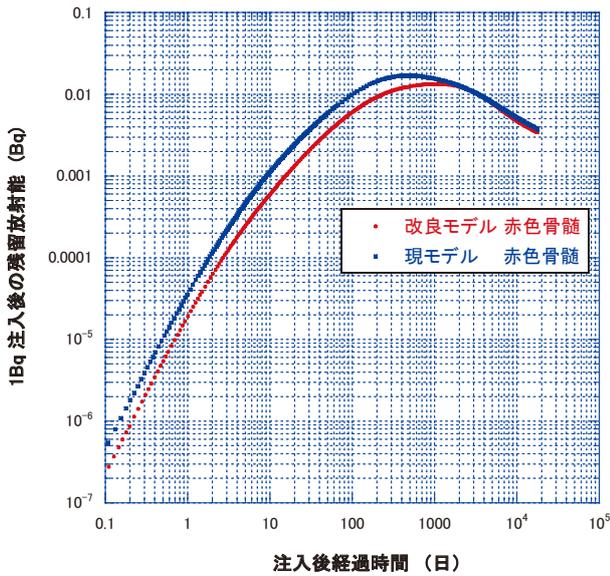


図 12 血液注入後の赤色骨髄中の残留放射能

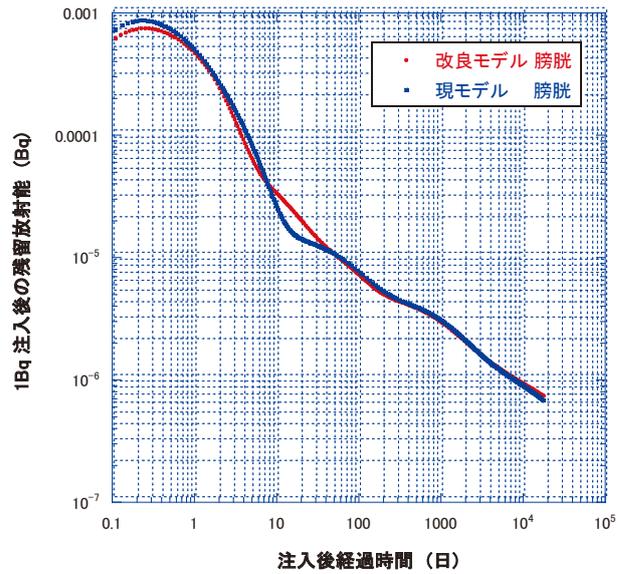


図 14 血液注入後の膀胱中の残留放射能

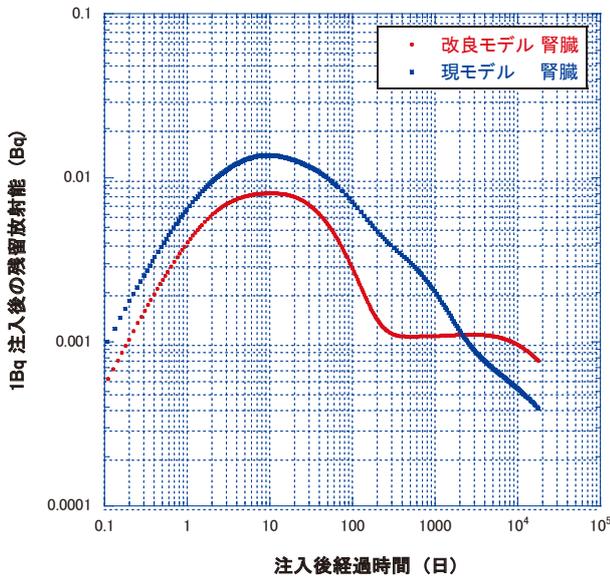


図 13 血液注入後の腎臓中の残留放射能

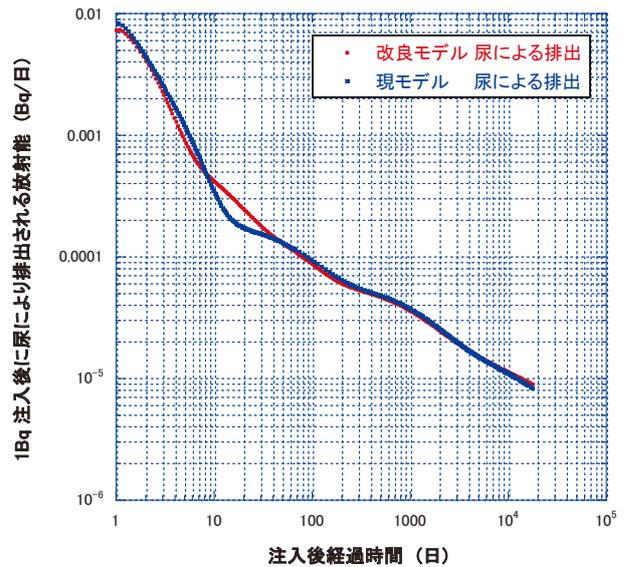


図 15 血液注入後、1 日当たり尿により排出される  $^{239}\text{Pu}$  の放射エネルギー

図 13, 14, および 15 にそれぞれ、腎臓中、膀胱中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能、および 1 日当たり尿により排出される  $^{239}\text{Pu}$  の放射エネルギーの時間変化を示す。

現モデルではその他軟組織 ST1 から膀胱への移行経路が定義されているが、この経路は生理学的に不自然であるとして、改良モデルでは削除され、血液から腎臓、膀胱への Pu 移行過程が改良された。

改良モデルで評価される腎臓中の残留放射能は注入後約 2000 日までには現モデルに比べて低めであるが、その後は高めに推移している。

膀胱中の残留放射能および尿により排出される放射エネルギーは、注入後 10 日から 40 日の経過時間を除けば、両モデルともほぼ同じ結果になっている。この経過時間中の改良モデルの結果は現モデルに比べて高めになり、観測値をより良く再現している。図 15 の結果は文献 10 の図 7 に報告されている結果を再現している。血液中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能の評価が改良モデルにより改善され、血液から膀胱への Pu の移行が増えたことを反映している。

図 16 にその他軟組織中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能の時

間変化を示す。

改良モデルでは、血液とその他軟組織の間の  $^{239}\text{Pu}$  の移行の仕方が現モデルの過程から変更された。特に改良モデルでは、血液に Pu が注入される時、あるいは、初めて血液に吸収される時、Pu は瞬時に 7:3 の割合で Blood1 と ST0 に配分される過程が設定されている。注入直後に ST0 に  $^{239}\text{Pu}$  が供給されるため、改良モデルでは注入直後のその他軟組織における残留放射能の計算結果はこの配分過程の効果を強く反映している。なお、改良モデルで評価される注入から約 10 日以降のその他軟組織中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は、現モデルに比べて低めとなっている。

図 17 に、血液注入後の精巣中の残留放射能の時間変化を示す。

改良モデルでは、Blood1 から生殖器官に Pu が供給され、Blood2 に生殖器官から戻る移行モデルになっており、現モデルと異なる。 $^{239}\text{Pu}$  残留放射能の時間変化は、注入後約 4000 日までは両モデルでほぼ同じであるが、それ以降は改良モデルの結果が現モデルに比べて低めに推移している。

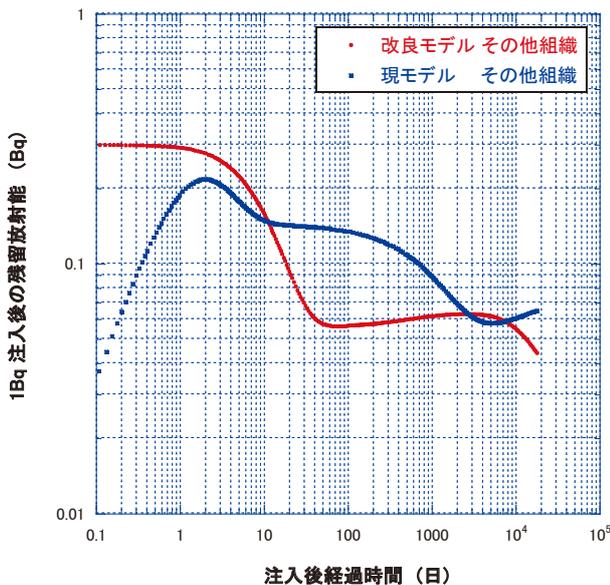


図 16 血液注入後のその他軟組織中の残留放射能

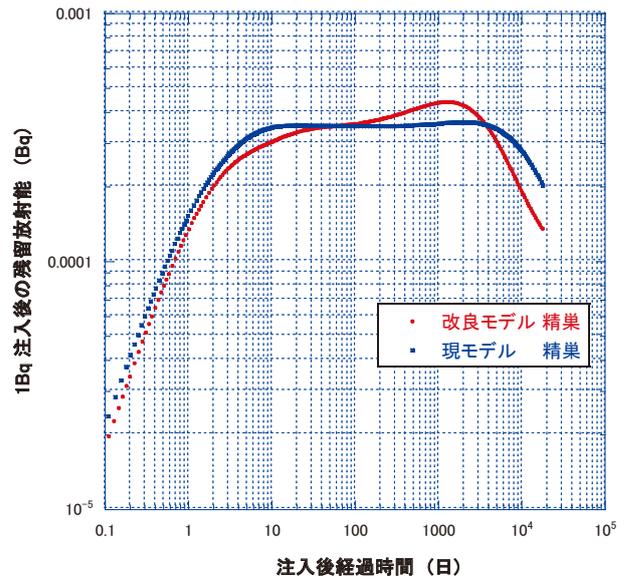


図 17 血液注入後の精巣中の残留放射能

### 3.2 改良モデルによる内部被ばく線量評価

改良された Pu の動態モデルを組み込んだ、本解析で作成した内部被ばく評価プログラムは、文献 10 に報告されている  $^{239}\text{Pu}$  を血液注入した場合の注入後の肝臓や血液中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能、および、1日に当たりに糞や尿で排出される  $^{239}\text{Pu}$  の放射エネルギーの時間変化、観測データを再現することができた。

次に、改良モデルを用いて評価した 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を血液注入、経口摂取、および、吸入摂取 (F クラス, M クラス, S クラス) で体内に摂取した場合の各臓器・組織 (標的器官) の預託等価線量・預託実効線量について、現モデルで求めた評価値と比較し、改良モデルの預託線量評価への影響を考察する。なお、1Bq 当たりの預託実効線量は実効線量係数である。

内部被ばく線量の評価は、ICRP Publication60 1990 年勧告[7]に従った内部被ばく線量評価コード IDEC (Internal Dose Easy Calculation code) [13] に改良された Pu の動態モデルを組み込んで行った。IDEC への組み込みの妥当性は、今回作成した改良モデルを使用した血液注入、経口摂取に関する残留放射能・内部被ばく線量評価プログラムの結果と比較検証して確認した。

本計算で仮定した  $f_i$  値は、血液注入、経口摂取、および、吸入摂取 F クラス、吸入摂取 M クラスについては 0.0005、吸入摂取 S クラスについては 0.00001 である。また、作業員に関する吸入摂取の評価は  $5\ \mu\text{m}$  の空気力学的放射能中央径 (activity median aerodynamic diameter : AMAD) に

ついて行った[13, 14]。これらの値を含め、Pu に対する作業員の内部被ばく評価は ICRP の標準値を使用した[8]。

3.2.1 血液注入の預託等価線量・預託実効線量

図 18a, 18b にそれぞれ、改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の <sup>239</sup>Pu を血液注入したときの各組織の預託等価線量，預託実効線量の比較，および，改良モデルで得られた預託線量値の現モデルで得られた預託線量値に対する比（以下，線量比）を示す。

血液注入時の被ばく線量が大きい組織は，両モデルとも骨表面，肝臓，赤色骨髄，そして，卵巣・精巣の生殖器官であり，両モデルに違いはない。また，預託等価線量，預託実効線量ともに評価値に大きな違いはなく，線量比は 0.9~1.2 である。改良モデルの肝臓や腎臓の預託等価線量は現モデルに比べて 1.2 倍程度大きい。

組織ごとの線量比の違いは，考察章 § 3.3 において議論するように，モデルの変更に伴う各組織の <sup>239</sup>Pu 残留放射能時刻歴の差異に起因した結果になっている。

3.2.2 経口摂取の預託等価線量・預託実効線量

図 19a, 19b にそれぞれ，改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の <sup>239</sup>Pu を経口摂取したときの各組織の預託等価線量，預託実効線量の比較，および，改良モデルで得られた預託線量値の現モデルで得られた預託線量値に対する線量比を示す。

経口摂取の被ばく線量は血液注入の被ばく線量の 1/1000 未満である。これは Pu が胃腸管から体内に吸収されにくく，摂取した大部分が糞で体外に排出されるからである。このため，大腸や結腸の被ばく線量が他の組織に比べて比較的大きくなる。小腸でわずかに吸収された <sup>239</sup>Pu は血液注入と同じ振る舞いを示し，骨表面，肝臓，赤色骨髄，そして，卵巣・精巣の生殖器官に蓄積される。両モデルで評価された預託等価線量，預託実効線量に大きな違いはなく，線量比は 0.8~1.2 の範囲にある。経口摂取の場合も，肝臓や腎臓の預託等価線量が現モデルの 1.2 倍大きい。

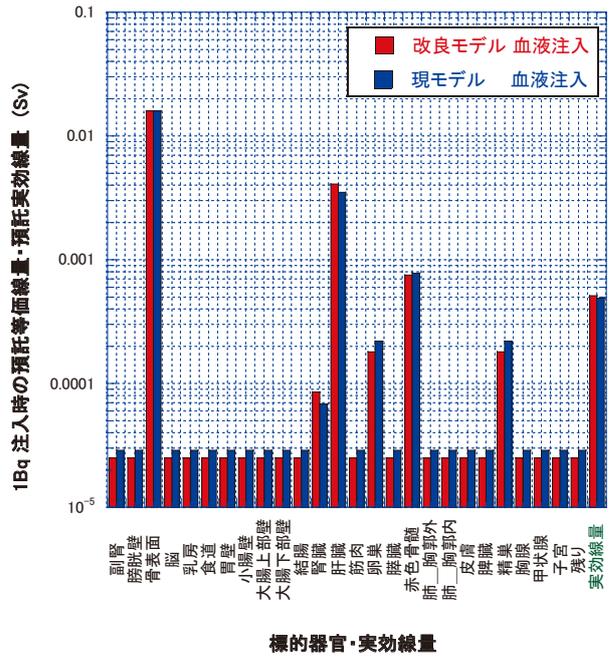


図 18a 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の <sup>239</sup>Pu を血液注入したときの預託等価線量，預託実効線量の比較

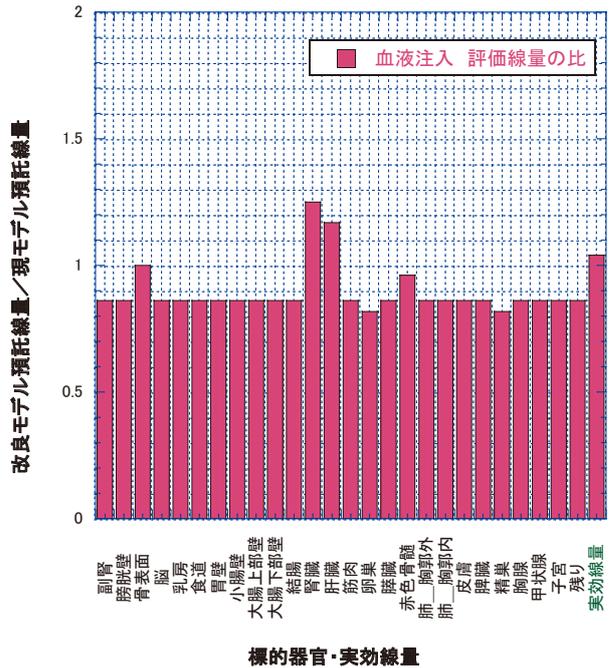


図 18b 改良モデルで求めた 1Bq の <sup>239</sup>Pu を血液注入したときの預託等価線量と預託実効線量の，現モデルで求められた値に対する比

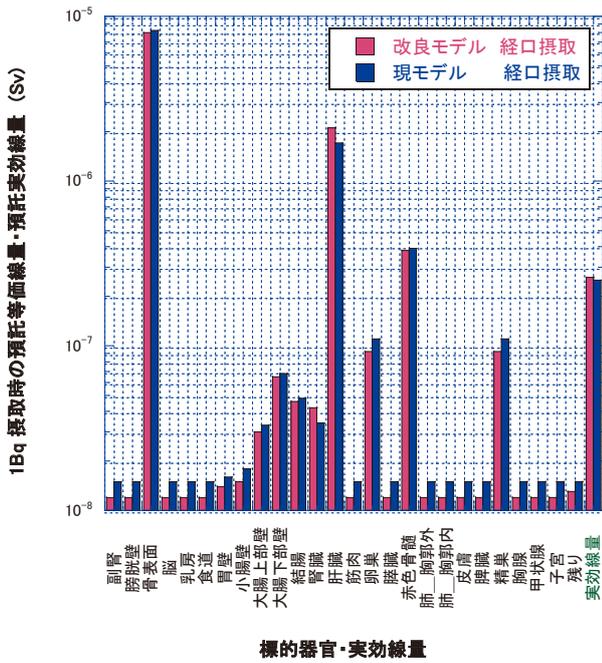


図 19a 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を経口摂取したときの預託等価線量，預託実効線量の比較

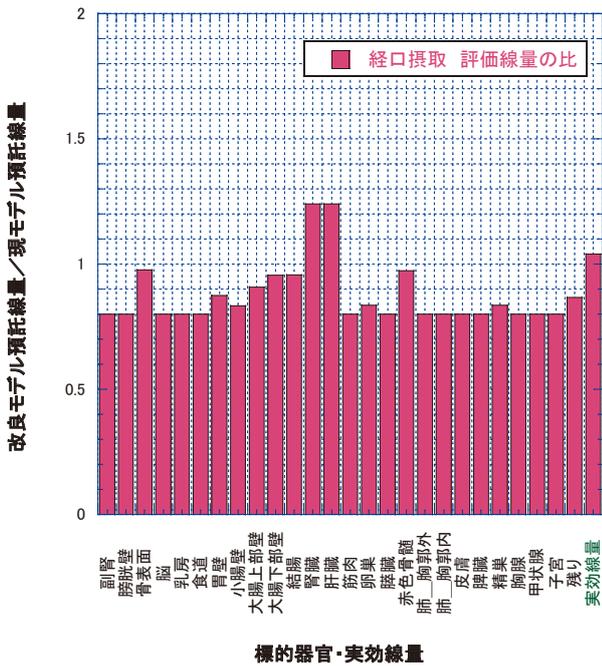


図 19b 改良モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を経口摂取したときの預託等価線量と預託実効線量の，現モデルで求められた値に対する比

### 3.2.3 吸入摂取 F クラスの預託等価線量・預託実効線量

図 20a, 20b にそれぞれ，改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取した F ク

ラスの場合の各組織の預託等価線量，預託実効線量の比較，および，改良モデルで評価された預託等価線の現モデルで得られた預託等価線に対する線量比を示す。

吸入摂取 F クラスの場合は，肺に沈着した  $^{239}\text{Pu}$  は肺から血液に吸収されるため，摂取後の  $^{239}\text{Pu}$  の体内挙動は血液注入の場合に類似する。預託等価線量，預託実効線量は血液注入の場合の約 1/3 程度であり，被ばく線量が高い組織は，両モデルとも骨表面，肝臓，赤色骨髓，そして，卵巣・精巣の生殖器官であり，血液注入の場合と同じである。また，預託等価線量，預託実効線量の両モデルの線量比は 0.9~1.2 であり，肝臓や腎臓の預託等価線量が現モデルに比べて 1.2 倍大きい。

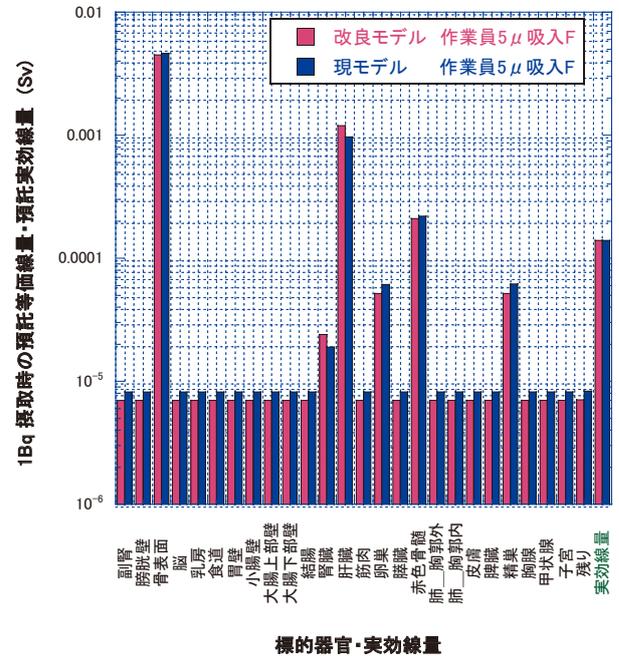


図 20a 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (F クラス) したときの預託等価線量，預託実効線量の比較

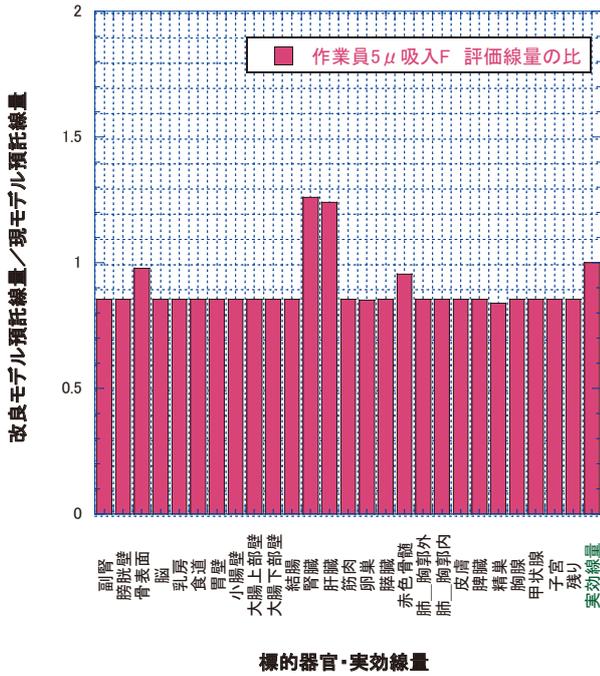


図 20b 改良モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (F クラス) したときの預託等価線量と預託実効線量の、現モデルで求められた値に対する比

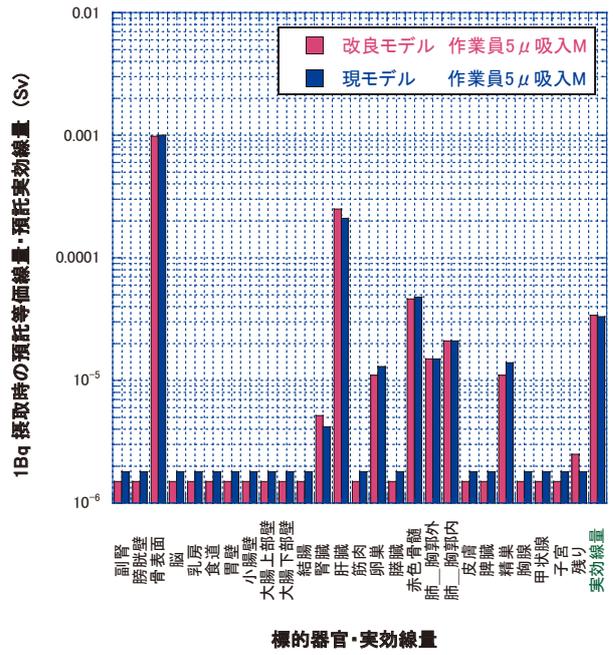


図 21a 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (M クラス) したときの預託等価線量、預託実効線量の比較

3.2.4 吸入摂取 M クラスの預託等価線量・預託実効線量

図 21a, 21b にそれぞれ、改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取した M クラスの場合の各組織の預託等価線量、預託実効線量の比較、および、改良モデルで評価された預託線量値の現モデルで得られた預託線量値に対する線量比を示す。

$^{239}\text{Pu}$  に対する吸入摂取 M クラスの場合の、肺から血液への吸収は前述の F クラスと次節で述べる S クラスの間になる。F クラスに比べて Pu の肺から血液への移行は少なく、また、長期間にわたり肺に沈着したままの Pu の量は S クラスに比べて少ない。預託等価線量の大きい組織は、両モデルとも骨表面、肝臓、赤色骨髄、卵巣・精巣の生殖器官、そして、肺である。預託等価線量、預託実効線量は F クラスの約 1/4 程度である。モデル間の各組織の預託等価線量、預託実効線量の線量比は 0.8~1.2 程度であり、大きな違いはない。改良モデルで評価される肝臓や腎臓の預託等価線量は現モデルの 1.2 倍大きい。

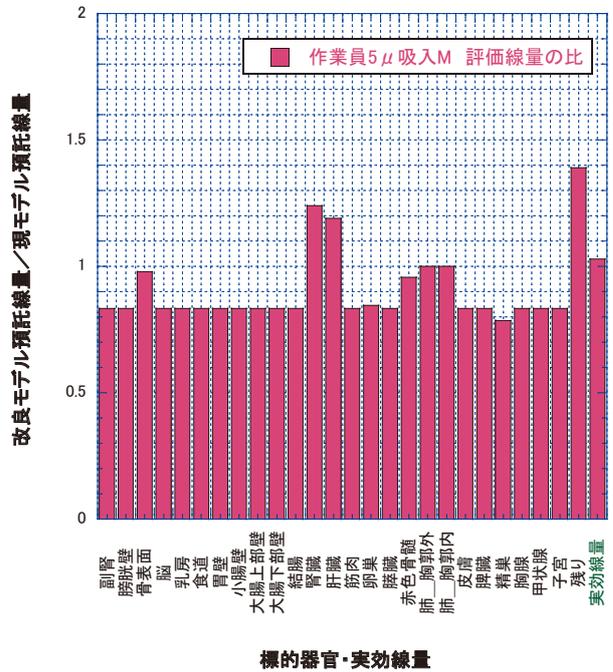


図 21b 改良モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (M クラス) したときの預託等価線量と預託実効線量の、現モデルで求められた値に対する比

3.2.5 吸入摂取 S クラスの預託等価線量・預託実効線量

図 22a, 22b にそれぞれ, 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取した S クラスの場合の各組織の預託等価線量, 預託実効線量の比較, および, 改良モデルで評価された預託線量値の現モデルで得られた預託線量値に対する線量比を示す。

吸入摂取 S クラスの場合は, 肺に沈着した Pu が血液に吸収されにくく肺組織に滞留するため, 肺組織の被ばく線量が他の吸入摂取に比べて顕著に大きくなる (M クラスの 3 倍前後)。少量ではあるが肺から血液に吸入された  $^{239}\text{Pu}$  が組織に滞留しやすい骨表面, 肝臓, 赤色骨髄, 卵巣・精巣の生殖器官の等価線量が他の組織に比べて高くなる (線量値は, M クラスの約 1/10)。両モデルで評価される預託等価線量, 預託実効線量の値に大きな違いはなく, その線量比は 0.9~1.2 の範囲であるが, 改良モデルで評価される肝臓や腎臓の預託等価線量は現モデルの 1.2 倍大きい。

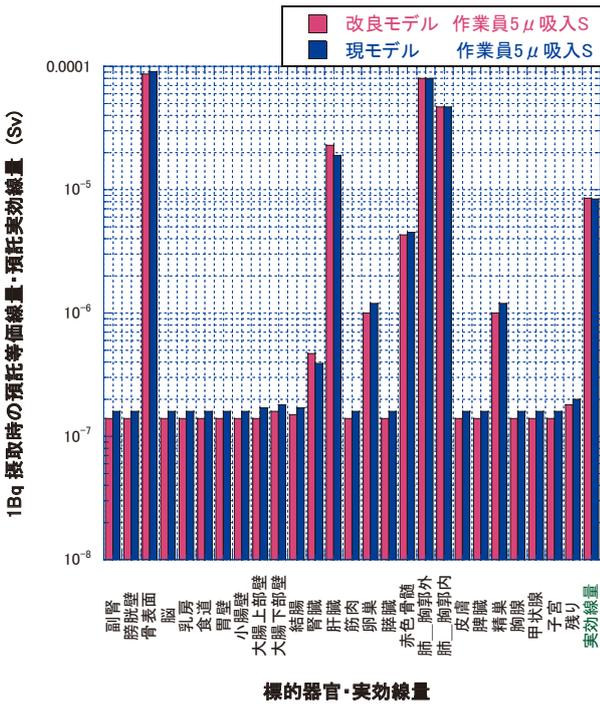


図 22a 改良モデルおよび現モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (S クラス) したときの預託等価線量, 預託実効線量の比較

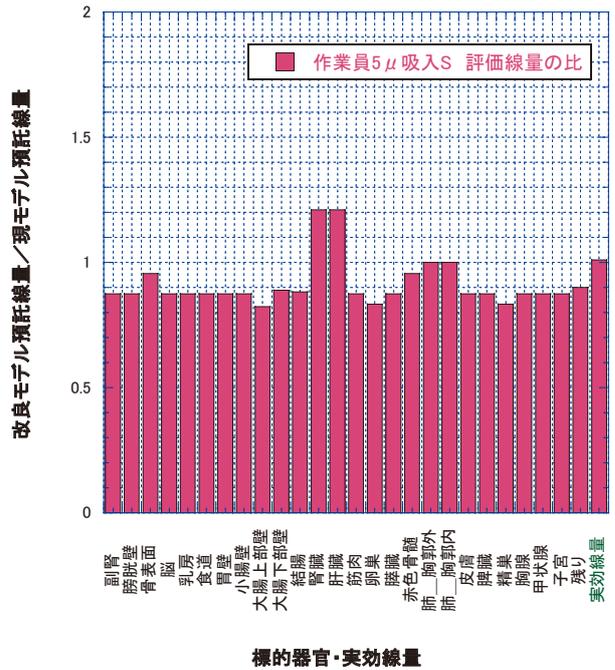


図 22b 改良モデルで求めた 1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を吸入摂取 (S クラス) したときの預託等価線量と預託実効線量の, 現モデルで求められた値に対する比

3.3 考察

現モデルの問題点の一つは, Pu を血液へ注入した場合の血液中の Pu 残留放射能の計算値が, 観測値に比べて注入後約 10 日から急速に減少し, その後も注入後約 1000 日後にかけて低めに評価されることであった。改良モデルでは, 血液コンパートメントが Blood1 と Blood2 に 2 分割され, Pu は Blood1 から各組織へ移行, 各組織の Pu は Blood2 を通して血液に戻るようにモデル化され, かつ, Blood2 からは大きな移行速度で Blood1 へ迅速に移行するように改良された。

また, 血液に初めて供給される Pu は瞬時に 7 : 3 の割合で Blood1 と ST0 に配分される過程が加わっている。この配分過程を考慮した場合と考慮しない場合の比較から, 注入後 10 日から 30 日に急減する問題点の改善に, この配分過程が非常に寄与していることがわかった。観測値との比較で問題になっていた, 摂取後の早い経過時間範囲で血液中の残留放射能が急減する問題が改善されたことにより, 現モデルで 1 日当たりに糞により排出される Pu 放射エネルギーが摂取後約 2 週目からの数週間にかけて観測値に比べて低めに評価される問題点の改善につながっていると考えられる。

現モデルのもう一つの大きな問題点は, 肝臓における Pu 残留放射能が摂取時からの約 1000 日後

にかけて低めに評価されることであるが、この問題点は改良モデルにおいて、肝臓と関係する各組織間の Pu 移行モデルを詳細にすることで改善されている。先に述べた血液に初めて供給される Pu が瞬時に 7:3 の割合で Blood1 と ST0 に配分される過程は、血液注入後から約 100 日にかけての肝臓中の Pu 残留放射能が、その過程を考慮しない場合に比べて低めに評価される効果を与えるが、改良モデルによる実測値の全体的な再現性を妨げるほどに大きな影響はない。

動態モデルの改良により、血液中、そして、肝臓や骨中の Pu 残留放射能がより正確に評価できるようになることは、Pu を体内摂取したときに DTPA (ジエチレントリアミン 5 酢酸) を投与し、血液内の  $^{239}\text{Pu}$  を取り込み尿により体外に排出することで内部被ばく線量を低減する効果を見積もるために重要なことであり、今回の改良モデルを使用した DTPA の被ばく線量低減効果について、より詳しい検討が必要である。

1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を血液注入、経口摂取、および、吸入摂取 (F クラス, M クラス, S クラス) により体内摂取した場合の改良モデルによる預託等価線量および預託実効線量の計算結果は、現モデルで求めた結果と比べて大きな違いはなかった。預託実効線量についてもほぼ同じ結果となった。各標的器官の預託等価線量の現モデルの評価値に対する改良モデルの評価値の線量比は 0.8~1.2 であった。

預託実効線量は各標的器官の荷重平均で求められるため、動態モデルの改良により現モデルに比べて低めに評価されることになった組織の等価線量と高めに評価される組織の等価線量の平均の結果として、預託実効線量の線量比は 1 程度になっていると考えられる。預託等価線量が現モデルに比べて改良モデルで高めに評価される組織は肝臓と腎臓、ほぼ同じ値になる組織は骨表面と赤色骨髄、それ以外の組織は一般に低めに評価される結果となっている。

動態モデルの改良により、体内摂取後の肝臓の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は全経過時間で現モデルより高めに、また、腎臓中の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能は摂取後約 2000 日以降には現モデルより高めに評価されるため、70 歳までの被ばく期間で積分することによる預託等価線量は現モデルに比べて高く評価される。骨表面や赤色骨髄については、被ばく期間に寄与する摂取後の経過時間 1000 日から 2000 日かけて両モデルとも  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能はほぼ同じ結果となっているため、両モデル間の線量比は約 1 になっていると考えられる。

精巣・卵巣の生殖器官を除く、預託等価線量が現モデルに比べて低めに評価される標的器官での評価線量低下は、改良モデルで評価されるその他の軟組織 (ST0, ST1, ST2 コンパートメント) の  $^{239}\text{Pu}$  残留放射能が摂取後約 10 日以降の経過時間に長期にわたり、現モデルに比べて低めに評価されることの反映結果と考えられる。ICRP 内部被ばくモデルにおいて、その他軟組織は体全体を線源領域とモデル化されているため[12]、各標的器官の被ばく線量への寄与が現モデルに比べて低めになったと考えられる。

#### 4. まとめ

現在 ICRP Publication119 [6]で公表されている、Pu に関する内部被ばく実効線量係数 (1Bq 当たりの預託実効線量) は、ICRP Publication67 [9]の Pu 動態モデルに基づき評価された値である。しかし、この動態モデルについては、公表後いろいろな問題点が指摘されていた。問題点を改善するために、Pu に関する新たな改良モデルが提案され [10]、Pu を血液に直接注入する人体実験で観測されたデータが、この改良モデルにより良く再現することが報告された。しかし、この改良モデルを用いた Pu に関する内部被ばく実効線量係数の結果についての報告はほとんど見当たらない。

本稿では、提案された Pu に関する改良モデルを組み込んだ、血液注入・経口摂取の摂取形態に関する各組織の残留放射能および預託等価線量・預託実効線量を評価するプログラムを作成し、このプログラムが文献 10 に報告されている人体実験で得られた組織の残留放射能や糞や尿により 1 日当たりに排出される Pu 放射エネルギーの観測データを再現することを確認し、プログラムの信頼性を検証した後、改良モデルの改良点が残留放射能の評価結果に及ぼす影響を検討した。

次に、改良モデルを IDEC コード[12]の組み込み、その IDEC コードで得られた血液注入と経口摂取に関する計算結果が、今回作成したプログラムの結果と同じ結果であることを確認した。

そして、改良モデル組み込みの信頼性を確認した IDEC コードを用い、1Bq の  $^{239}\text{Pu}$  を血液注入、経口摂取、および、吸入摂取 (F クラス, M クラス, S クラス) した場合の体内摂取について、各臓器・組織の預託等価線量および預託実効線量を評価し、改良された動態モデルの内部被ばく線量に及ぼす影響を検討した。

改良モデルで評価された血液注入、経口摂取、および、吸入摂取 (F クラス, M クラス, S クラス) に関する各組織の預託等価線量や預託実効線

量は、現モデルで求めた結果と大きな違いはなかった。改良モデルで評価された各組織の預託等価線量の現モデルで求めた評価値に対する線量比は0.8~1.2の範囲であった。組織ごとの線量比の違いは、改良モデルの改良点に起因した各組織の残留放射能の時間変化の違いを反映した結果であると考えられる。また、改良モデルで評価された預託実効線量は現モデルとほぼ同じ結果であったが、この理由は、預託実効線量は各標的器官の荷重平均で求められるため、動態モデルの改良により低めに評価されることになった組織の等価線量と高めに評価される組織の等価線量の平均の結果と考えられる。

改良されたPuの動態モデルで評価される内部被ばく線量の結果は、改良前の動態モデルで得られる結果と大きな違いはないが、動態モデルの改良により、血液中、肝臓、そして、骨中のPu残留放射能、また、1日当たりに糞や尿により排出されるPuの放射エネルギーがより正確に評価できるようになっている。したがって、Puを体内摂取したときの肝臓や骨に関する等価線量の評価の精度も良くなっていると考えられる。このため、Puで内部被ばくしたときに、DTPAの投与で内部被ばく線量を低減する効果を評価するには、改良モデルのもとでDTPAの体内挙動の詳細な解析を行うことが実効的であると期待される。

### 参 考 文 献

- [1] Richard B.Firestone, Virginia S. Shirley ed., "Table of Isotopes ,8th ed.", John Wiley & Sons. Inc, 1996.
- [2] 小澤俊彦, 安西和紀, 松本謙一郎著, "放射線の科学 生体影響および防御と除去", 東京化学同人, 2012.
- [3] 放射線医学総合研究所監修, 青木芳朗, 渡利一夫編, "人体放射能の除去技術 挙動と除染のメカニズム", 講談社サイエンティフィク, 1996.
- [4] 小木曾洋一, "プルトニウムの吸収被ばくによる発がん等生物影響—動物実験でどこまで明らかにされたか—", Isotope News 2013年7月号 No.711, pp.9-13.
- [5] Mikhail E.Sokolnikov, et al., "Lung, liver and bone cancer mortality in Mayak workers", Int. J.Cancer, 123,pp.905-911(2008).
- [6] ICRP, ICRP PUBLICATION 119, "Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60", ELSEVIER ,2012.
- [7] ICRP, ICRP PUBLICATION 60," 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Pergamon Press,1991.
- [8] ICRP, ICRP PUBLICATION 68,"Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, Replacement of ICRP Publication 61 ", Pergamon Press,1994, ICRP, ICRP PUBLICATION 71,"Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 4 Inhalation Dose Coefficients", Pergamon Press,1995, ICRP, ICRP PUBLICATION 72,"Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients",Pergamon Press,1995.
- [9] ICRP, ICRP PUBLICATION 67,"Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides : Part 2 Ingestion Dose Coefficients",Pergamon Press,1993.
- [10] R.W.Leggett, et al., "Mayak Worker Study : An Improved Biokinetic Model for Reconstructing Doses from Internally Deposited Plutonium", RADIATION RESEARCH 164, 111-122(2005).
- [11] 梅田健太郎, 小林悌二, "放射性核種の体内除去による内部被ばく線量の低減効果について", 東北工業大学紀要 I : 理工学編, 第34号, pp.1-17, 2014年3月.
- [12] M.Cristy, K.F.Eckerman, "SEECAL: Program to Calculate Age-Dependent Specific Effective Energies", ORNL/TM-12351(1993).
- [13] 山口武憲, "被ばく線量の測定・評価マニュアル 内部被ばくについて", 保健物理, 36(1), pp.11-17, 2001.
- [14] ICRP, ICRP PUBLICATION 66, "Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection", Pergamon Press,1994.