

# $^{137}\text{Cs}$ および娘核種 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の新体内動態モデルに基づく プルシアンブルー投与による内部被ばく線量低減効果の検討

## Study on Effects of Prussian Blue Treatment for $^{137}\text{Cs}$ Internal Exposure by using a New Biokinetic Model of its Progeny $^{137\text{m}}\text{Ba}$

梅田 健太郎\* 小林 悌二\*\*  
Kentaro UMEDA \* and Teiji KOBAYASI \*\*

Prussian blue (PB) is expected to reduce the internal dose following an intake of caesium(Cs) isotopes. Recently updated biokinetic models for Cs are provided. The models include the Cs circulation to alimentary tract through enterohepatic circulation and transfer from plasma and also the biokinetic models for caesium progeny which are different from one for Cs. In this report we simulate behavior of  $^{137}\text{Cs}$  and its progeny  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  in human body by using the biokinetic models to confirm the efficacy of PB treatment for acute oral intake. We quantitatively discuss the residual activities in tissues, the activities excreted by feces and urine and the mechanism of reducing internal dose by PB treatment.

### 1. はじめに

経口摂取された放射性核種  $^{137}\text{Cs}$  (セシウム 137) は、ほぼ 100% が小腸から血液に吸収され、全身の筋肉や肝臓中に滞留・蓄積される。 $^{137}\text{Cs}$  の体内からの排泄は、主に血液が腎臓を通る循環で生成される尿を介して行われる。成人における  $^{137}\text{Cs}$  の生物学的半減期は約 90 日で次第に体内から消滅するが、この間に人体は内部被ばくを受ける[1]。

内部被ばく線量を減らすには、体内に滞留する  $^{137}\text{Cs}$  の体外への排泄を促進しなければならない。プルシアンブルー (Prussian Blue : PB) は鉄原子混合原子価錯体として構造式  $\text{Fe}^{\text{III}}_4[\text{Fe}^{\text{II}}(\text{CN})_6]_3$  をもつ物質で、その空洞状サイトに金属原子イオンが捕捉されやすく、 $^{137}\text{Cs}^+$  などの吸着捕捉に利用される。すなわち、血液に吸収された  $^{137}\text{Cs}$  が腸肝循環や血液で胃腸管に再分泌されるとき、 $^{137}\text{Cs}$  を胃腸管で吸着し、糞を介して体外への排泄を促進する作用があるため、 $^{137}\text{Cs}$  の体内摂取による内部被ばくの低減効果があると期待され投与される。PB の投与で、糞により体外に排泄される  $^{137}\text{Cs}$  の放射エネルギーが増加することは実測で確認されている[2]。

前報告[3]では、腸肝循環を初めて考慮した Cs に対する体内動態モデル[4]を使用し、ICRP (International Commission on Radiological Protection : 国際放射線防護委員会) の内部被ばく

線量評価手法[5,6]に基づき、 $^{137}\text{Cs}$  を経口摂取した場合の PB 投与による内部被ばくの低減効果について検討を行った。腸肝循環で小腸に再分泌される  $^{137}\text{Cs}$  が PB に吸着され、糞として排泄される過程をシミュレーションし、体内摂取後の PB の投与時期、投与期間がおよぼす被ばく線量低減効果への影響を詳細に解析したものである。

ICRP から公表されている  $^{137}\text{Cs}$  の内部被ばく線量に対する線量係数 (摂取放射能 1 Bq (ベクレル) あたりの預託被ばく線量 [Sv/Bq]) [7] は、親核種  $^{137}\text{Cs}$  の  $\beta^-$  壊変 (半減期 30.17 y) で生成される娘核種  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  (バリウム 137 の励起状態。半減期 2.552m の IT 壊変により 0.66165MeV のガンマ線を放出) からの内部被ばくも含めた被ばく線量係数である。 $^{137}\text{Cs}$  の内部被ばく線量係数に対する  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与は 60% 前後で半分以上を占めている[8]。これまでの  $^{137}\text{Cs}$  の内部被ばく線量評価は、娘核種  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は  $^{137}\text{Cs}$  と放射平衡 (永続平衡に近い状態) にあるため、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内挙動は親核種  $^{137}\text{Cs}$  と同じと仮定され、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  に対して Cs と同じ体内動態モデルが用いられてきた。このため、体内で生成された  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は  $^{137}\text{Cs}$  と同じ移行経路・移行定数で体内を移行・滞留すると評価されてきた[9]。

最近、腸肝循環を考慮した Cs の体内動態モデル[4] がさらに改良され、また、 $^{137}\text{Cs}$  の娘核種である  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内挙動についても  $^{137}\text{Cs}$  と異なる

2019 年 12 月 2 日受理

\* 共通教育センター 教授

\*\* (元)新潟大学医学部 教授

新たな体内動態モデル[8]が提案された。

本稿では、新たに提案された Cs に関する体内動態モデル、および、親核種と異なる  $^{137m}\text{Ba}$  の体内動態モデル[8]を使用し、 $^{137}\text{Cs}$  を経口摂取・血液注入した場合の  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137m}\text{Ba}$  の体内挙動を検討するシミュレーションプログラムを作成する。そして、 $^{137}\text{Cs}$  の娘核種の体内挙動が親核種と異なる場合の PB 投与による被ばく線量低減効果についてシミュレーションを行い、被ばく線量低減効果にどのように影響するかを確認する。また、PB の被ばく線量低減効果は、小腸において Cs が血液へ再吸収される割合に依存すると考えられるため、血液への吸収割合の影響も確認する。新たに提案されたより現実的な  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137m}\text{Ba}$  の体内挙動モデルを用いた本稿の解析により、PB の被ばく線量低減効果のメカニズムに関する理解が深まると期待される。

## 2. 計算方法

本稿の目的は、新しく提案された Cs と Ba に対する体内動態モデル[8]を使用し PB 投与の効果を検討することである。このため、新体内動態モデルが正しく組み込んだことをはじめに確認する。

組み込みの妥当性は、新体内動態モデルを提案した論文[8]に示されている公衆成人に対する  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の血液注入に関する各標的器官の等価線量と実効線量の結果を比較することで行う。

Cs に関する体内動態モデルの組み込みについては  $^{134}\text{Cs}$  の線量係数の結果が論文の値を再現することで、Ba に関する体内動態モデルの組み込みについては  $^{137}\text{Cs}$  の線量係数および線量係数に占める娘核種  $^{137m}\text{Ba}$  の寄与率の結果が論文の値を再現することで確認する。 $^{134}\text{Cs}$  は壊変で直ちに安定核種となるため、Cs に関する体内動態モデルの組み込みの確認に有効である。

1Bq の  $^{134}\text{Cs}$  あるいは  $^{137}\text{Cs}$  を瞬時に血液注入、経口摂取した場合の内部被ばく線量は、以下に述べる新体内動態モデルのコンパートメントモデル[8]を用い、ICRP 評価手法 [5,6] に基づいて解析する。

Cs および Ba の体内挙動については最新の体内動態モデルを使用するが、モデルの組み込みの妥当性は、文献8 に掲載されている現体内動態モデル[9]で評価されている線量係数と比較するために、放射線荷重係数、組織荷重係数、および、線源器官・標的器官間の比実効エネルギー等については ICRP Publication 60(ICRP1990年勧告)[10]に従ったデータを使用する。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。なお解析は、ICRP が定める公衆成人の標準人を対象に行う。

### 2.1 Cs と Ba に関する新体内動態モデル

ICRP から現在公表されている等価線量係数、実効線量係数 (1Bq 当たりの預託等価線量、預託実効線量 [Sv/Bq]) [7] は ICRP Publication 60 [10] に基づいて評価され、使用されている体内動態モデルは Publ. 30[12]の胃腸管モデルと Cs 体内動態モデル[9] (以下、現モデル) である。

図 1 に Cs に関する現モデルを示す。経口摂取で胃に入った  $^{137}\text{Cs}$  は小腸に移行し、小腸において 100% (計算上は 99%) 血液に吸収され全身に移行し、全身に一樣に分布するモデルとなっている。図中の数値は後述するコンパートメント間移行速度である。

体内からの排泄は、腎臓で濾過され早期に尿として排泄される過程と、一旦体内組織に分布した後に、尿・糞を介して漸進的に排泄される過程を反映するために、胃腸管・膀胱・血液を除いた体内組織を生物学的半減期が異なる 2 つの滞留コンパートメント Body Tissue A (全身 A)、Body Tissue B (全身 B) を用いてモデル化されている。体内から排泄される Cs の割合は、80%が尿、残り 20%が糞を介すると仮定されている。 $^{137}\text{Cs}$  の壊変で生成される  $^{137m}\text{Ba}$  もこの体内動態モデルに従っている。

現モデルには、 $^{137}\text{Cs}$  が腸肝循環の経路で小腸に再分泌される過程が考慮されていないため、小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の PB による吸収過程を現モデルでは直接模擬することはできない。

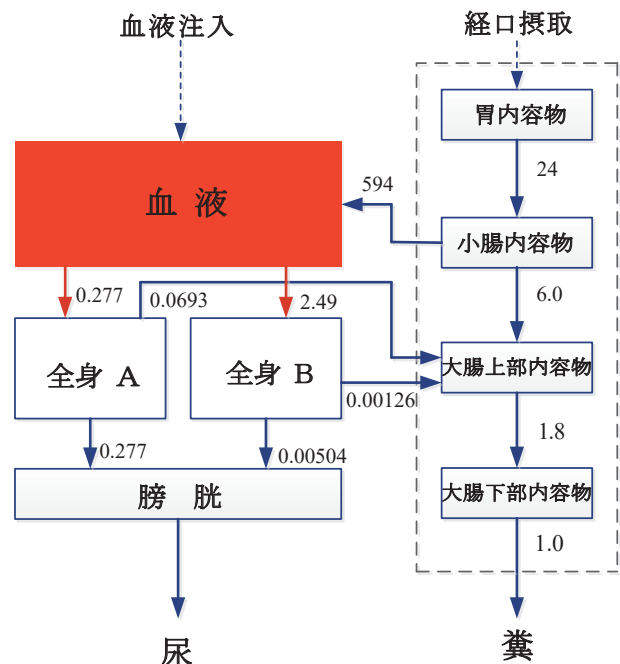


図1 Csに関する現在の体内動態モデル  
(文献9に基づき作成)

Cs に関する新体内動態モデル[8] (以下, 新モデル) は, 成人に対する血流, 血液灌流 (血液-組織間移行血流), 体内組織における Cs の平衡濃度, 血液が体内組織を通過する際の Cs の除去率などに関する最新のデータを用いて提案された腸肝循環を考慮した新モデルの原型モデル[4]をさらに改良し, また,  $^{137}\text{Cs}$  娘核種である  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  については親核種と異なる体内動態モデルが追加された。図 2, 図 3 にそれぞれ Cs と Ba に関する新モデルを示す。図中の数値は後述のコンパートメント間移行速度である。

新モデルには, 胃腸管組織を除く体内組織として, Plasma(血液), Red blood cell(RBC:赤血球), Brain(脳), Heart wall (心臓壁), Pancreas(膵臓), Spleen(脾臓), Liver(肝臓), Skin(皮膚), Other1(その他組織 1), Other2(その他組織 2), Lung tissue(肺組織), Adipose tissue(脂肪組織), Red marrow(赤色骨髄), Trabecular bone surface(梁骨表面), Cortical bone surface(皮質骨表面), Cartilage(軟骨), Skeletal muscle(骨格筋), Kidneys(腎臓), Urinary bladder contents(膀胱)の 19 コンパートメントが定義されている。

胃腸管組織は, これまでの ICRP Publ.30 の胃腸管モデルに替わりヒト消化管モデル(HATM:

Human Alimentary Tract Model) [13] が採用され, Stomach contents(胃内容物), Small intestine contents(小腸内容物), Right colon content(右結腸内容物), Left colon content(左結腸内容物), Rectosigmoid colon content(直腸・S字結腸内容物), Stomach wall(胃壁), Small intestine wall(小腸壁), Right colon wall(右結腸壁), Left colon wall(左結腸壁), Rectosigmoid colon wall(直腸・S字結腸壁)の 10 コンパートメントが定義されている。

Ba に関する新体内動態モデルには, 図 3 に示すように, 臓器と骨などの硬組織を除いた体の軟組織(Soft tissue)の中で代謝速度が速い Rapid turnover(通称 ST0:その他軟組織 0)が追加されている。このコンパートメントは, 親核種 Ba の動態モデル[9]の中で定義されている軟組織(Soft tissue)を 3 つコンパートメントに分割した 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)の一つである。Ba の新モデルは, 人体に Ba を血液注入したときの血液中の Ba 濃度の時間変化実測データを再現している[8]。

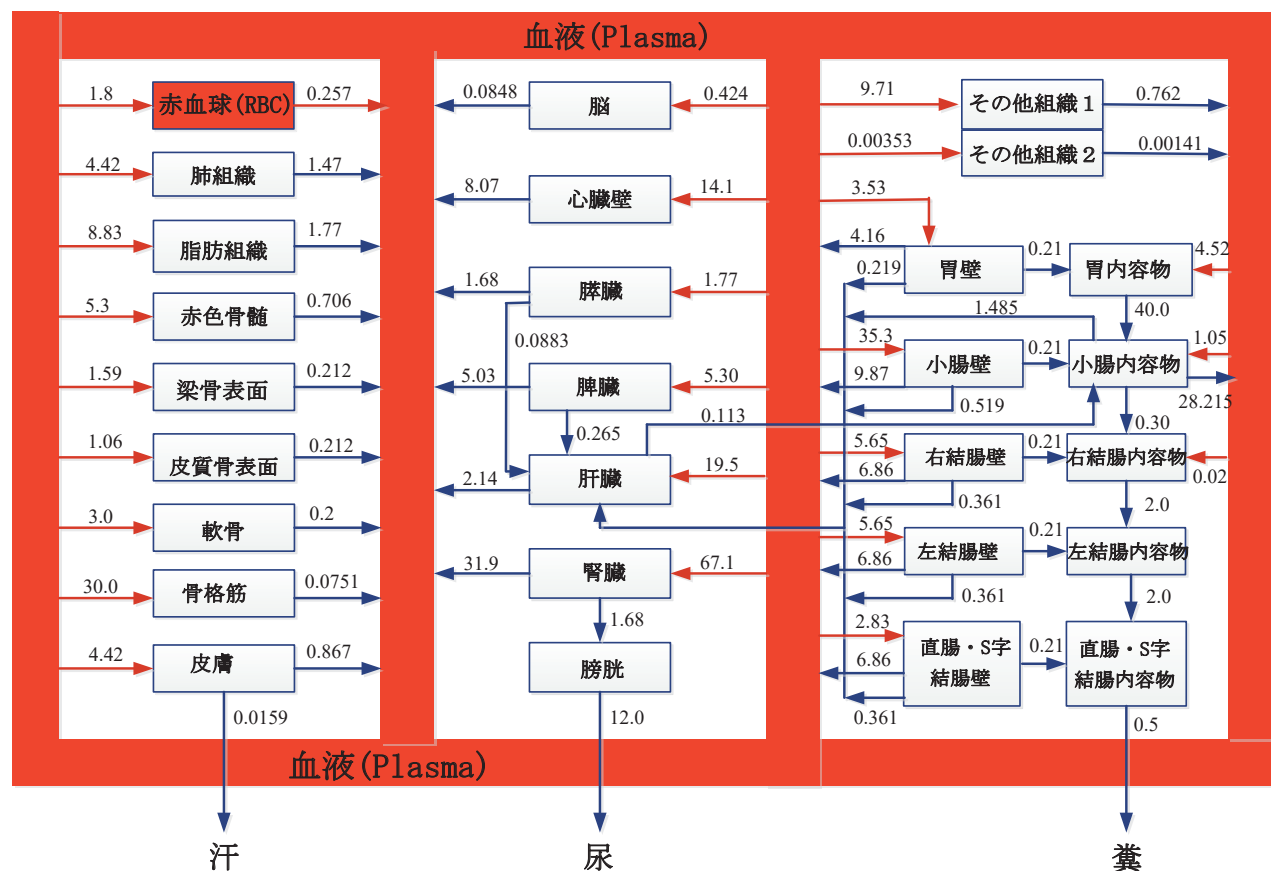


図 2 Cs に関する新体内動態モデル (文献 8 に基づき作成)



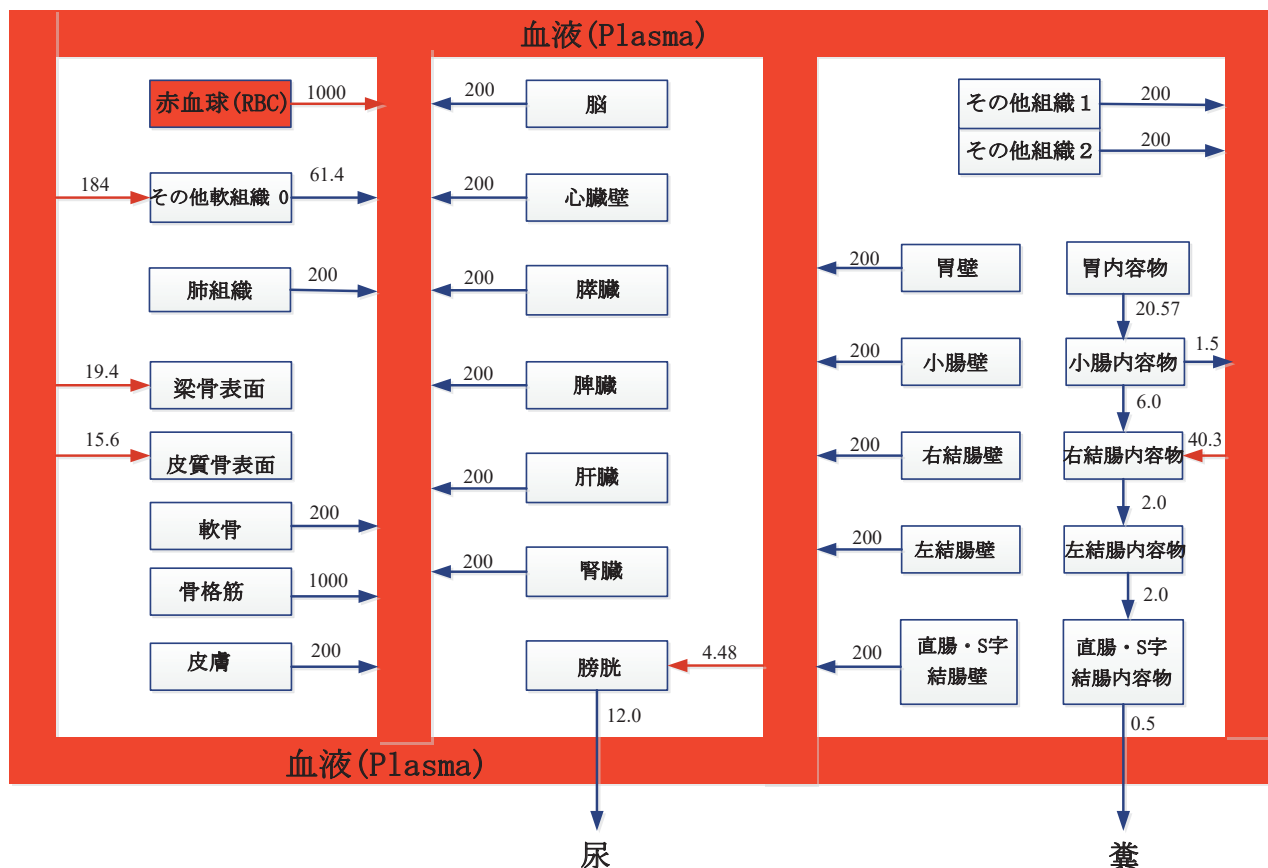


図 3 Ba に関する新体内動態モデル (文献 8 に基づき作成)

提案された Cs の新モデルには、肝臓から小腸内容物への移行経路の他に、血液から直接胃内容物へ、血液から胃壁を通して胃内容物へ、血液から小腸内容物へ、血液から小腸壁を通して小腸内容物への移行経路も含まれている。さらに、血液から右結腸内容物へ、血液から右結腸壁、左結腸壁、直腸・S 字結腸壁へ、それらの腸壁を通してそれぞれ右結腸内容物、左結腸内容物、直腸・S 字結腸内容物への移行経路も含まれている。

このように、小腸から血液に吸収された  $^{137}\text{Cs}$  の胃腸管への循環経路が含まれているため、血液に吸収された  $^{137}\text{Cs}$  が胃腸管に再分泌されたときに PB で吸着され、PB とともに大腸に移行して糞を介して体外に排泄される過程を直接模擬することができる。

ICRP の内部被ばく評価モデル[5,6]では、ある組織・器官からの Cs および Ba の移行は、その組織・器官に存在する残留放射能に比例するとしてモデル化され、その比例定数は一般に  $\lambda$  と表記され移行速度と呼ばれる。図 1～図 3 中の数値はコンパートメント間の Cs あるいは Ba の移行速度であり、単位は 1/日 (以下、 $\text{d}^{-1}$ ) である。

$^{137\text{m}}\text{Ba}$  の物理的半減期は 2.55 m と短い、図 3 に示すように、提案された Ba の体内動態モデルでは骨格筋あるいは軟組織に存在する Ba はそれぞれ移行速度 (生物学的半減期)  $1000 \text{ d}^{-1}$  (1 m),

$200 \text{ d}^{-1}$  (5 m) の短い時間で再び血液に戻るモデルとなっており、体内挙動は Cs とは異なる。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内分布は  $^{137}\text{Cs}$  と異なると予想され、また、 $^{137}\text{Cs}$  の実効線量係数に占める  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与が約 60%であることが、PB を投与したときの被ばく線量の低減効果にどのように影響するかを確認しておく必要がある。

文献 8 には、新モデルで評価された各被ばく線量について Publ.68 [5]で評価された値に対する比の情報が掲載されている。Publ.68 では Publ.30 [12] の胃腸管モデルが使用されている。線量評価で使用する比実効エネルギーには SEECAL データ[14]を適用するため、新モデルには胃腸管モデルとしてヒト消化管モデル[13]が組み込まれているが、標的器官の線量評価においては、文献 8 に述べられているように、右結腸内容物と右結腸壁をそれぞれ大腸上部内容物と大腸上部壁に、左結腸内容物と直腸・S 字結腸内容物を大腸下部内容物に、左結腸壁と直腸・S 字結腸壁を大腸下部壁に対応づけた。

文献 8 で報告された新モデルには、小腸からの Cs の血液への移行に関する記述は含まれていない。このため、小腸から血液への Cs の移行については新モデルの基になっている文献 4 のモデルの値を採用する (図 2 の Cs 新動態モデルに文献 4 における小腸内容物→血液  $28.215 \text{ d}^{-1}$  の値を組み

込まないと今回の解析では文献8の値を再現できなかった。なお、図3のBa新動態モデルに小腸内容物→血液 1.5 d<sup>-1</sup>の値はヒト消化管モデル[13]の標準値とBaの経口摂取に対する胃腸管吸収割合( $f_1$ )の標準値から求めた値である)。

## 2.2 残留放射能の評価[11]

<sup>137</sup>Cs 摂取後の体内の組織・器官が受ける被ばく線量を評価するには、各組織・器官における摂取後の <sup>137</sup>Cs 残留放射能を求める必要がある。<sup>137</sup>Cs 残留放射能は、新モデルで定義された組織・器官(以下、線源器官)をコンパートメントとし、コンパートメント間の <sup>137</sup>Cs の移行および自然壊変による消滅を考慮した(1)式の微分方程式で評価する。<sup>137m</sup>Ba への壊変に伴い、<sup>137</sup>Cs を経口摂取した場合には、<sup>137</sup>Cs と <sup>137m</sup>Ba の残留放射能が評価対象となる。

$$\begin{aligned} \frac{dq_{s,j}(t, t_0)}{dt} = & \dot{I}_{s,j}(t) + \sum_{s'} \lambda_{s' \rightarrow s} \cdot q_{s',j}(t, t_0) \\ & + \sum_{j'} \lambda_{j'} \cdot q_{s,j'}(t, t_0) \\ & - \sum_{s''} \lambda_{s \rightarrow s''} \cdot q_{s,j}(t, t_0) - \lambda_j \cdot q_{s,j}(t, t_0) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 $q_{s,j}(t, t_0)$  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。

(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～図3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、摂取した核種の壊変で生成される娘核種を含む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が、本解析では瞬間的な <sup>137</sup>Cs の経口摂取あるいは血液注入を仮定するため、それぞれ、胃あるいは血液における <sup>137</sup>Cs の残留放射能の初期値を1Bqとし、その他のコンパートメントの残留放射能初期値はすべてゼロとする。

連立微分方程式のソルバーには、硬い系の数値解に有効な Gear 法[15]を用いた。

PB を投与しない場合には新モデルの移行速度を標準値として使用する。新モデルでは、小腸からの移行経路は血液、肝臓、大腸への3つの経路であり、小腸からの移行速度は 30.0 d<sup>-1</sup> である。このうち、血液への移行速度が 28.215 d<sup>-1</sup>、肝臓への移行速度が 1.485 d<sup>-1</sup>、大腸への移行速度が 0.3 d<sup>-1</sup> である。大腸への移行割合は 0.01 となっている。PB が投与される期間中は、<sup>137</sup>Cs の小腸から血液への吸収は阻害されるものとし、<sup>137</sup>Cs の大腸への移行割合を 0.99、残りの 0.01 が血液、肝臓に移行するとしてモデル化する。この場合、PB 投与期間中の <sup>137</sup>Cs の血液への移行速度は 0.285 d<sup>-1</sup>、肝臓への移行速度は 0.015 d<sup>-1</sup>、大腸への移行速度は 29.7 d<sup>-1</sup> となる。PB の投与を止めたときには、体内動態モデルの移行速度に直ちにに戻ると仮定し、解析を行う。

また、胃腸管においてCsがPBに取り込まれる割合は不確定であると考えられるため、小腸に循環してきたCsが小腸で血液内に再吸収される割合を変化させてみることによって、PBの効果を検討する。

## 2.3 等価線量・実効線量の評価[11]

<sup>137</sup>Cs 摂取後に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  $q_{s,j}(t, t_0)$  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。

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

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

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

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。以下の3節以降に示す被ばく線量の計算結果は、いずれも1Bq の放射性核種を体内摂取にしたときの預託線量である。

### 3. 評価結果と考察

新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を、 $^{137}\text{Cs}$  だけでなく、確度を上げるため  $^{134}\text{Cs}$  を含めて成人標準人に対する血液注入の内部被ばく線量結果を文献 8 の結果と比較し確認する。

次に、新モデル組み込みの妥当性確認済みの線量評価プログラムで解析した PB 投与による成人標準人を対象とした  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取に関する内部被ばく線量の低減効果を示し、PB を投与しない場合と投与した場合の  $^{137}\text{Cs}$  と娘核種  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内挙動の様子を残留放射能および体内からの排泄の時間変化から確認し、線量低減が起こるメカニズムについて議論する。

また、PB 投与による小腸における Cs の血液への再吸収をブロックする割合をパラメータとした内部被ばく線量の低減効果の検討結果を示す。

#### 3.1 新モデルによる内部被ばく線量評価

表 1 および表 2 はそれぞれ新モデルを組み込んだプログラムで評価した  $^{134}\text{Cs}$  および  $^{137}\text{Cs}$  に関する、成人標準人・血液注入 1Bq に対する各標的器官の等価線量[Sv]、実効線量 [Sv]、Publ.68 モデルで評価した値に対する比、および、新モデルを発表した文献 8 の掲載値を示す。

表 2 には、本稿で評価した  $^{137}\text{Cs}$  に関する血液注入の場合の各標的器官の等価線量・実効線量に占める娘核種  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与率、および、Ba の新モデル掲載論文の文献 8 の値を示す。

Publ.68 モデルに従った本稿の計算は、ICRP Publication 60 1990 年勧告[10]に従った内部被ばく線量評価コード IDEEC (Internal Dose Easy Calculation code) [16]を用いて行った。

表 1 および表 2 に示すように各標的器官の等価線量・実効線量および  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与率に関する結果は、文献 8 に掲載されている値をよく再現しており、新モデルの組み込みは妥当に行われていると判断できる。

実効線量に関しては、現モデルと今回提案された新モデルで計算された値に大きな差はない。現モデルでは、全身に分布した放射エネルギーが体内の組

表 1 新モデルによる  $^{134}\text{Cs}$  血液注入 1Bq に対する被ばく線量 [Sv]と現モデルの計算値に対する比、文献 8 掲載値

	新モデル 被ばく線量	対現モデル比	比 文献 8
骨表面	1.55E-08	0.8	0.8
胃壁	1.62E-08	0.9	0.9
小腸壁	1.67E-08	0.8	0.8
結腸	1.85E-08	0.9	0.8
腎臓	1.76E-08	0.9	0.9
肝臓	1.60E-08	0.8	0.8
筋肉	1.95E-08	1.1	1.1
脾臓	2.22E-08	1.0	1.0
赤色骨髄	1.66E-08	0.9	0.9
脾臓	1.68E-08	0.8	0.9
精巣	1.18E-08	0.7	0.7
甲状腺	1.30E-08	0.7	0.7
実効線量	1.54E-08	0.8	0.8

表 2 新モデルによる  $^{137}\text{Cs}$  血液注入 1Bq に対する被ばく線量 [Sv]と現モデルの計算値に対する比および  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与率、文献 8 掲載値

	新モデル 被ばく線量	対現 モデル 比	比 文献 8	Ba 寄 与率	Ba 寄 与率 文献 8
骨表面	2.62E-08	1.9	1.9	0.34	0.32
胃壁	1.05E-08	0.8	0.9	0.66	0.67
小腸壁	1.32E-08	0.9	0.9	0.72	0.73
結腸	2.12E-08	1.4	1.4	0.79	0.79
腎臓	1.18E-08	0.8	0.9	0.64	0.65
肝臓	1.09E-08	0.8	0.9	0.66	0.68
筋肉	1.57E-08	1.2	1.3	0.40	0.42
脾臓	1.55E-08	1.0	1.1	0.57	0.59
赤色骨髄	1.41E-08	1.1	1.1	0.65	0.64
脾臓	1.07E-08	0.8	0.9	0.65	0.67
精巣	6.86E-09	0.5	0.5	0.88	0.84
甲状腺	7.26E-09	0.6	0.5	0.88	0.85
実効線量	1.54E-08	0.8	0.9	0.75	0.74



組織の質量に応じて分配され、実効線量が評価される。これに対して、新モデルでは詳細に定義された線源器官について残留放射能が評価され、各線源器官残留放射能に基づき等価線量・実効線量が計算される。このため、新モデルで個別に定義された線源器官の等価線量が現モデルに比べて高めに評価されているが、組織荷重係数を考慮して実効線量を求める段階で数値的に現モデルとの差が小さくなる傾向に働いた結果、実効線量は両者でほぼ同等の値になっている。

### 3.2 プルシアンブルーの投与による実効線量の低減効果

$^{137}\text{Cs}$  の経口摂取後に PB を投与した場合の内部被ばく実効線量の低減効果について、投与開始時期および投与期間を変えて解析し、投与開始時期および投与期間の影響を検討した。

英国保健省の指針[17]と比較できるように、開始時期に関しては摂取後直後、1 日目、7 日 (1 週) 目、14 日目、28 日 (1 月) 目、84 日 (3 月) 目、168 日 (6 月) 目の 7 通り、投与期間については、これらの開始時期から連続で 28 日間、84 日間、168 日間、252 日間、365 日 (1 年) 間、1095 日間の 6 通りの投与期間について検討した。計算はいずれも  $^{137}\text{Cs}$  を 1 Bq 経口摂取した場合について行った。

表 3 に預託実効線量の低減率を示す。表中の数字は 1 行目が摂取後の投与開始時期[日]、1 列目が投与期間[日]、そして、各投与開始時期と投与期間に対応する PB による被ばく線量の低減率である。色づけしたセルは低減率が 35% 以上となっているセルである。

低減率 ( $R_{\text{eff}}$ ) は、PB を投与しない場合の預託実効線量を  $D_{\text{eff\_noPB}}$ 、PB を投与した場合の預託実効線量  $D_{\text{eff\_PB}}$  として(5)式で定義する。

$$R_{\text{eff}} = \frac{D_{\text{eff\_noPB}} - D_{\text{eff\_PB}}}{D_{\text{eff\_noPB}}} \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

表 3 預託実効線量低減率[%]

	0	1	7	14	28	84	168
28	81.4	23.2	19.1	17.8	16.0	10.6	5.70
84	81.6	40.6	36.7	34.6	31.2	20.7	11.1
168	81.7	48.3	44.5	42.1	37.9	25.1	13.6
252	81.7	50.0	46.2	43.7	39.4	26.1	14.1
365	81.7	50.4	46.6	44.1	39.7	26.3	14.2
1095	81.7	50.4	46.7	44.2	39.8	26.4	14.2

- ・ 1 行目は摂取後投与開始時期[日]を示す
- ・ 1 列目は投与期間[日]を示す

PB 投与の効果の目安として英国保健省の指針[17]にならい低減率 40%~50%を採用すると、この範囲の低減率を達成するには、PB の投与開始時期は遅くとも摂取後 1 ヶ月以内でなければならず、また、投与期間は短くとも 3 ヶ月以上必要であることを示している。投与期間が 6 ヶ月を超えても低減効果は低いため、投与を 6 ヶ月以上継続することの有効性は低いと判断できる。PB 投与の効果を上げるには、摂取後できるだけ早く投与を開始し、3 ヶ月から 6 ヶ月程度投与を続ける必要があることが分かる。

### 3.3 プルシアンブルーの投与による等価線量の低減効果

図 4-1 は、PB を投与しない場合と経口摂取後 7 日目に PB の投与を開始し 168 日間投与を続けた場合の、各組織・器官の預託等価線量と預託実効線量を比較したものである。図 4-2 には、これら 2 つの場合の線量の比を示す。

PB を投与しない場合には骨表面、大腸壁、結腸、筋肉、脾臓、赤色骨髄、投与した場合には大腸壁、結腸、骨表面の預託等価線量大きい。投与した場合には大腸下部壁、結腸を除く組織・器官の預託等価線量は約半分に減少するが、大腸下部壁の預託等価線量が約 40%増大している。組織荷重係数で重み付けされて評価される預託実効線量の低減率は約 50%になっている。

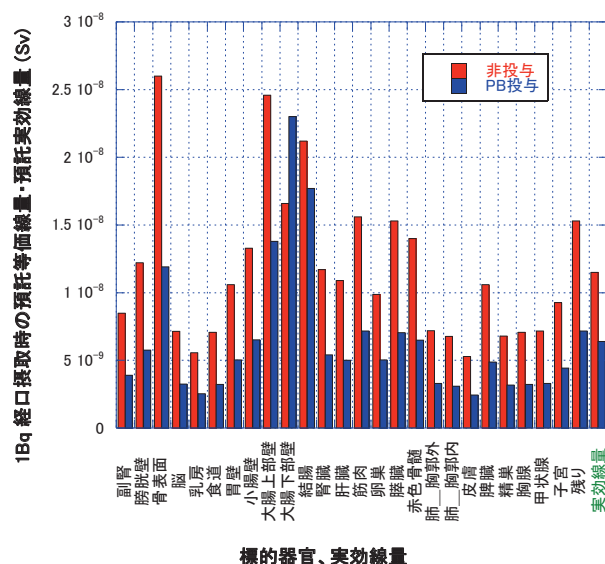


図 4-1 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始し 6 ヶ月間投与を継続した場合と投与しない場合の預託等価線量、預託実効線量の比較

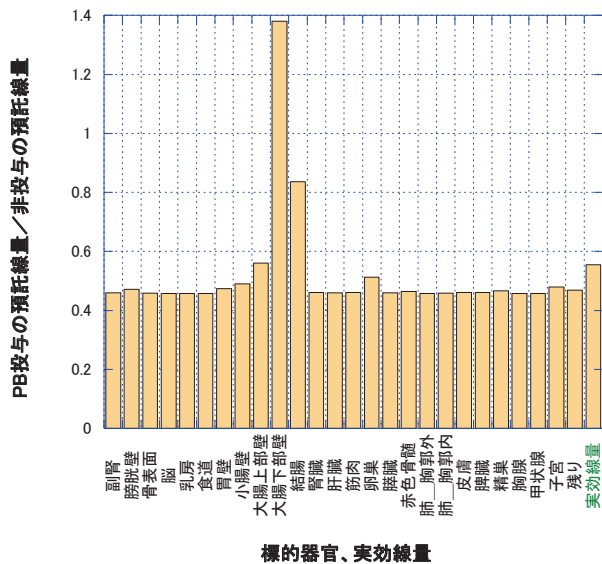


図 4-2 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始し 6 ヶ月間投与を継続した場合と投与しない場合の予測等価線量、予測実効線量の比率

### 3.4 プルシアンブルーの投与による残留放射能への影響

PB の投与により等価線量・実効線量が低減される過程を、新モデルで予測される主な線源器官における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能の時間変化から検討するとともに、両核種の残留放射能の時間変化を比較することにより、親核種と娘核種の体内動態モデルの違いの影響を調べる。

以下に示す図中の残留放射能時間変化は、いずれも成人標準人が  $^{137}\text{Cs}$  を 1 Bq 経口摂取したときに、PB を投与しない場合と、経口摂取後 7 日目に PB の投与を開始し 168 日間投与を続けた場合の、各線源器官における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  のそれぞれの残留放射能の時間変化である。そして、PB を投与している期間中は、肝臓・血液から小腸に循環してきた  $^{137}\text{Cs}$  の 99%は大腸上部に移行し、残り 1%が血液に再吸収されると仮定している。

図 5-1 に、全身および筋肉における経口摂取後の残留放射能時間変化を示す。PB の投与により、線源器官中の残留放射能は投与しない場合に比べて減少し、被ばく線量は低減することを示している。PB を投与しないときは、摂取後 50 日以上経過すると  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の全身における残留放射能はほぼ同じ時間変化を示し、全身中では放射平衡になっている。筋肉中の残留放射能は摂取後約 10 日で、 $^{137}\text{Cs}$  は 0.65Bq、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は 0.19Bq で最大となり、親核種と娘核種の体内動態モデルの違いが現れている。Ba の新体内動態モデルでは、筋肉中の Ba は 1000  $\text{d}^{-1}$  (生物学的半減期 1 m) で血液に移行するモデルになっているからであると考えられる。

図 5-2 に、血液および肝臓における経口摂取後の残留放射能時間変化を示す。PB の投与により残留放射能は減少している。小腸から血液への  $^{137}\text{Cs}$  の再吸収が阻止されて血液および血液から肝臓への  $^{137}\text{Cs}$  の供給が阻止されるためであると考えられる。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の血液内の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  に比べて 10~100 倍以上大きい。Ba の新体内動態モデルでは、筋肉と同様に、すべての軟組織から Ba は 200  $\text{d}^{-1}$  (生物学的半減期 5 m) で血液に移行するモデルとなっているからであると考えられる。このため、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の肝臓の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  に比べて小さい。

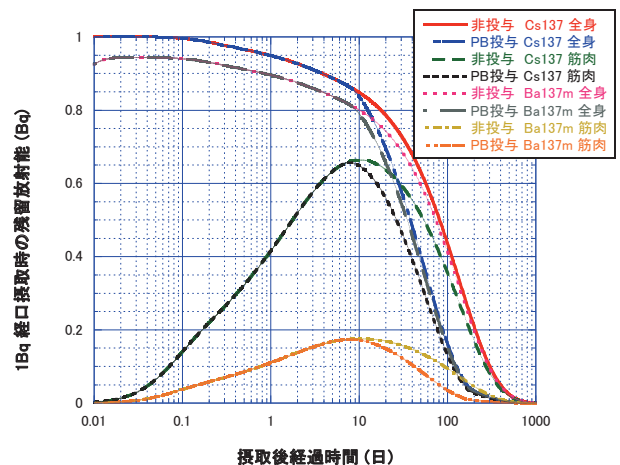


図 5-1 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の全身、筋肉における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能時間変化

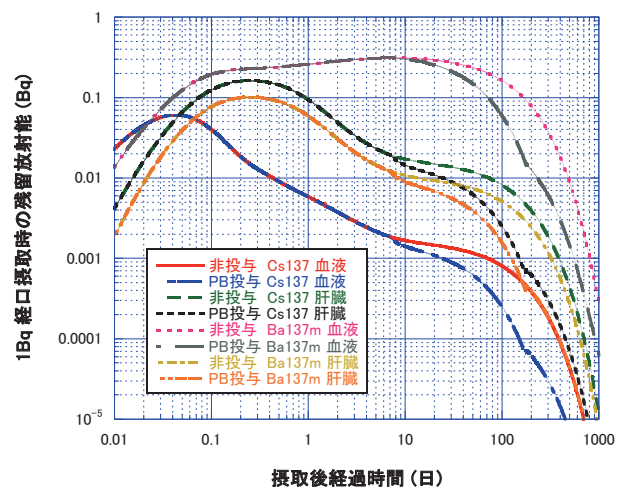


図 5-2 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の血液、肝臓における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能時間変化

図 5-3 に、小腸および大腸上部における経口摂取後の残留放射能時間変化を示す。 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$



の小腸における残留放射能の時間変化はほぼ重なり、PB の投与により残留放射能が減少している。PB を投与しないときの  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の大腸上部における残留放射能は、摂取後 1 日経過すると  $^{137}\text{Cs}$  より 10~100 倍以上大きい。この差は、Ba の新体内動態モデルに、血液から Ba が大腸上部に移行する経路が含まれているからと考えられる。PB の投与を開始すると  $^{137}\text{Cs}$  の大腸上部における残留放射能は小腸における血液への  $^{137}\text{Cs}$  の再吸収が阻止されるため、急激に 10 倍以上増大しているが、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の大腸上部における残留放射能は PB の投与とともに減少する。この傾向は、図 5-2 に示すように、投与により血液への  $^{137}\text{Cs}$  の供給が急減し、 $^{137}\text{Cs}$  の壊変で生成される血液内の  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  も減少するからと考えられる。

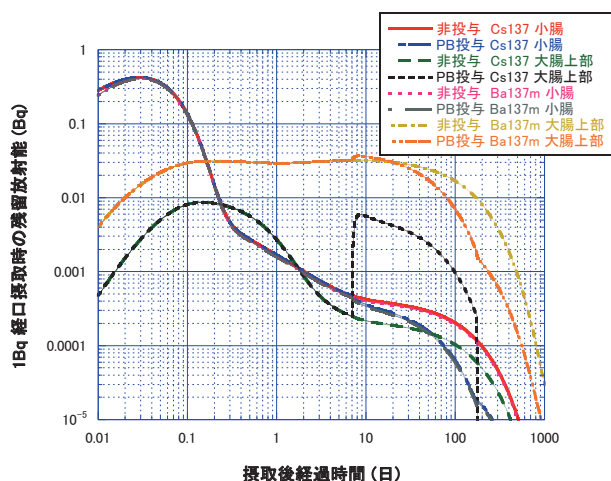


図 5-3 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の小腸、大腸上部における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能時間変化

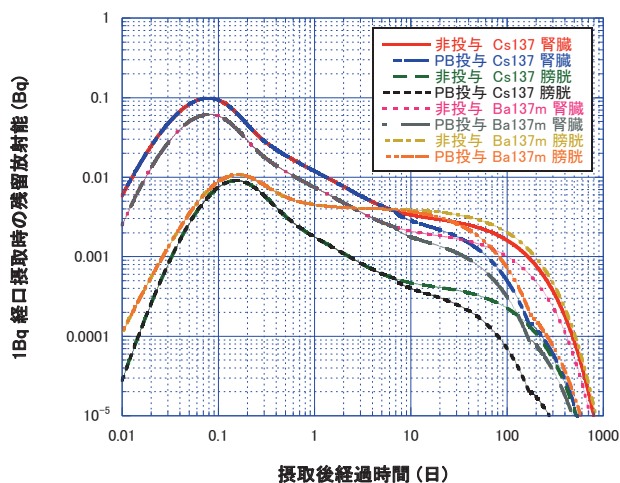


図 5-4 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の腎臓、膀胱における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能時間変化

図 5-4 に、腎臓および膀胱における経口摂取後の残留放射能時間変化を示す。 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の腎臓における残留放射能の時間変化の傾向は同じであるが、 $^{137}\text{Cs}$  の残留放射能は  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の約 1.6 倍大きい。Ba の新体内動態モデルでは、Ba が腎臓から  $200 \text{ d}^{-1}$  (生物学的半減期 5 m) で血液に移行するモデルとなっていることにより、この違いが現れていると考えられる。膀胱における残留放射能は摂取後約 0.15 日にピークになるまでは  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  でほぼ同じ傾向を示しているが、経過時間とともに違いが現れる。同じ傾向を示す早期の特徴は、経口摂取後に血液に吸収された  $^{137}\text{Cs}$  が腎臓を経て膀胱に移行し  $^{137}\text{Cs}$  の壊変で生成される  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  によると考えられる。ピークを過ぎた後の腎臓における両者の違いは、 $^{137}\text{Cs}$  は血液から腎臓を経て膀胱に移行するが、Ba の新体内動態モデルでは、各軟組織から血液に移行した  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  が直接膀胱に移行するモデルとなっているからと考えられる。PB の投与により  $^{137}\text{Cs}$  も  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  も残留放射能は減少している。

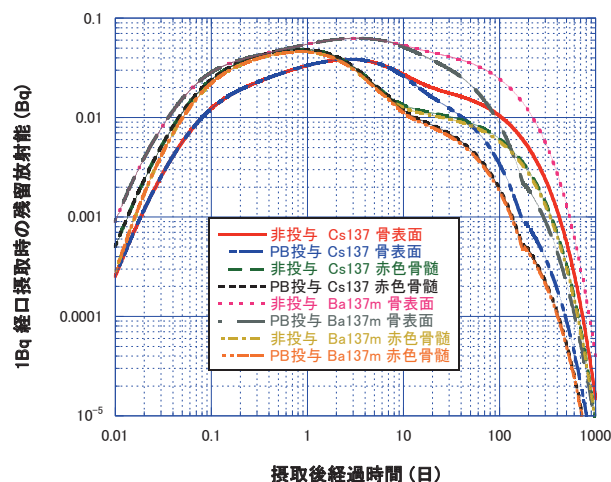


図 5-5 摂取後 7 日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の骨表面、赤色骨髄における  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能時間変化

図 5-5 に、骨表面および赤色骨髄における経口摂取後の残留放射能時間変化を示す。 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の骨表面における残留放射能の時間変化は、図 5-4 の腎臓と同様に傾向はほぼ同じであるが、腎臓と異なり  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能が  $^{137}\text{Cs}$  に比べて大きい。この違いは、新体内動態モデルでは、Cs に関しては血液から骨表面に移行・滞留した Cs が再び血液に移行するモデルとなっているが、Ba は骨表面にそのまま留まるモデル (図 3) となっているからと考えられる。両組織・両核種とも、PB の投与により残留放射能は減少している。

PBの投与により $^{137}\text{Cs}$ が小腸で血液に再吸収されない場合、大腸を除く体内組織の $^{137}\text{Cs}$ 残留放射能は投与しないときに比べて減少し、その結果、それらの組織を線源とする内部被ばくは低減することになる。一方、大腸の残留放射能は投与により増加するため、大腸および隣接する組織の被ばく線量は投与しないときに比べて増加することになる。この予想は図4-1および図4-2に示した結果を説明する。

### 3.5 プルシアンブルーの投与による放射能排泄量への影響

PBの投与により内部被ばく線量が減少することは、投与により放射線を放出する線源核種が投与しないときに比べて体内に存在しなくなった結果である。ここでは、PBの投与が、体内からの線源核種の排泄量にどのように影響を与えるか調べる。

図6-1および図6-2は、それぞれ成人標準人が $^{137}\text{Cs}$ を1 Bq 経口摂取したときに、PBを投与しない場合と、経口摂取後7日目にPBの投与を開始し168日間投与を続けた場合の、 $^{137}\text{Cs}$ と $^{137\text{m}}\text{Ba}$ に関する尿・糞を介して体外に排泄される経口摂取後の積算量の時間変化である。ここでも、PBを投与している期間中は、肝臓・血液から小腸に循環してきた $^{137}\text{Cs}$ の99%は大腸上部に移行し、残り1%が血液に再吸収されると仮定している。

図6-1に示すように、経口摂取された1Bqの $^{137}\text{Cs}$ の大部分は、尿と糞により体外に排泄される。PBを投与しないときは約80%が尿を介して排泄され、残りの20%が糞を介して排泄される。PBを投与した場合は、尿による排泄が約60%に減少し、糞による排泄が約40%に増大している。体内から50%排泄される摂取後の経過時間は非投与の場合は約90日であるが、投与した場合は約40日となり体内から半減する期間が約50日短縮されている。PBの投与により、 $^{137}\text{Cs}$ の体内からの排泄が促進されることを示している。その結果、被ばく線量が約半分に低減されると予想できる。

図6-2に、尿と糞により体外に排泄される $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の時間変化を示す。ただし、縦軸のメモリは、図6-1と異なり0~10 Bqの範囲である。 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の体外への排泄は尿による排泄が支配的であることがわかる。

1 Bqに相当する $^{137}\text{Cs}$ を経口摂取したとき、預託線量を評価する50年の期間に体内に残留する $^{137}\text{Cs}$ が壊変し体内で生成される $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の放射能の積算値は、PBを投与しないときに約46000 Bq、摂取後7日目に投与を開始し6ヶ月間持続したときに約22000 Bqと新モデルの解析結果から見積もられる。このうち、尿と糞により $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が体外

に排泄される放射エネルギーは、PBを投与しないときの尿による排泄が約7Bq、糞による排泄が約0.1Bq、PBを投与したときの尿による排泄が約3Bq、糞による排泄が約0.6Bqであることが、解析結果から示される。

尿・糞を介して $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が体外へ排泄される量は、 $^{137}\text{Cs}$ の壊変で体内に生成される $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の放射エネルギーの約0.02%であり、体内で生成される $^{137\text{m}}\text{Ba}$ のほとんどは体内で消滅している。したがって、PB投与による被ばく線量の低減効果に及ぼすBaの新体内動態モデルによる排泄過程の影響はほとんどないと考えられ、被ばく線量の低減効果は $^{137}\text{Cs}$ の体外への排泄で決まると解析結果から判断される。

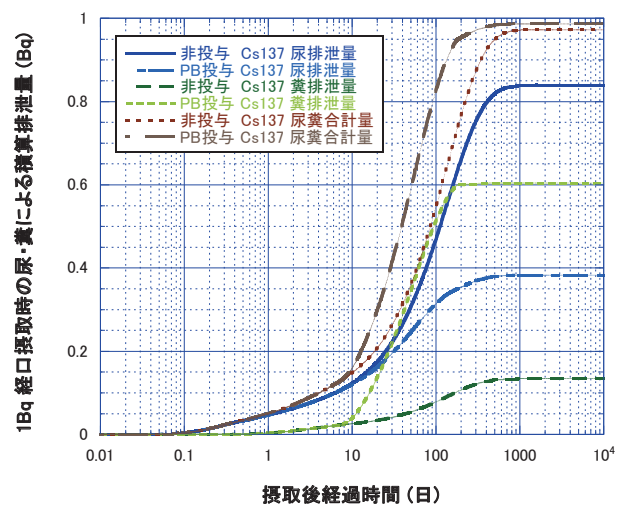


図6-1 摂取後7日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の糞・尿による $^{137}\text{Cs}$ の積算排泄量時間変化

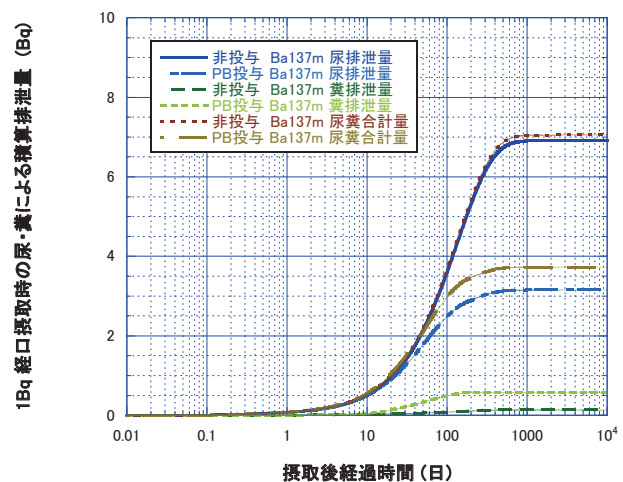


図6-2 摂取後7日目にプルシアンブルーの投与を開始した場合と投与しない場合の糞・尿による $^{137\text{m}}\text{Ba}$ の積算排泄量時間変化



### 3.6 プルシアンブルーの投与による小腸における血液吸収割合の影響

$^{137}\text{Cs}$  を体内摂取したときの PB 投与による内部被ばく線量の低減は、体内の  $^{137}\text{Cs}$  が肝臓・血液から小腸に再循環したとき、PB が  $^{137}\text{Cs}$  を取り込み、小腸で血液に再吸収されるのを阻止し、大腸を介して糞とし体外に除去されることで行われる。このため、線量低減効果は小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の血液への吸収割合に依存する。線量低減効果が、PB を投与したときの小腸における血液への吸収割合にどのように影響を受けるか調べた。

表 4 は、成人標準人が  $^{137}\text{Cs}$  を 1 Bq 経口摂取したときに、経口摂取後 7 日目に PB の投与を開始し 168 日間投与を続けたときの実効線量の低減率と血液への吸収割合の関係を示したものである。

表 4 血液吸収割合と実効線量低減率[%]

吸収割合	0.01	0.2	0.3	0.4	0.5
低減率	44.5	40.3	37.6	34.5	30.9

PB 投与に関する英国保健省の指針では、投与開始が摂取後 7 日以内、投与期間を約 3 ヶ月から 6 ヶ月が望まれ、このときの被ばく線量の低減効果は投与しない場合の 40～50% であると述べられている。表 4 の結果では、PB を投与したときの小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の血液への吸収割合が 20% より小さい場合には、英国保健省の指針を満たすことができるが、それより大きい場合は目安としている投与効果は期待できない。投与の効果を定量的に判断するために、血液吸収割合は重要な因子である。

## 4. まとめ

本稿では、新たに提案された腸肝循環過程を含む Cs の体内動態モデル、また、 $^{137}\text{Cs}$  の娘核種である  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内挙動が  $^{137}\text{Cs}$  と異なることを考慮した新たな体内動態モデルを使用し、PB の投与による内部被ばく線量の低減効果を解析した。さらに、PB の被ばく線量低減効果は、Cs が小腸において血液に再吸収される割合に依存すると考えられるため、線量低減効果に及ぼす血液への吸収割合の影響も検討した。

作成した線量評価プログラムに新モデルが妥当に組み込まれているかは、新モデルを発表した文献 8 に掲載されている  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  に関する、成人標準人を対象に 1Bq 血液注入したときの各標的器官の等価線量、実効線量、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の寄与率の計算結果と比較し確認した。文献 8 に掲載されている値は本解析でよく再現され、新モデルの組み込みは妥当に行われていると判断できた。

$^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内動態モデルが異なることによる残留放射能への主な影響と解析結果は次の通りである。

- 1)  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  が同一の体内動態モデルに従うときは、一般に  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は放射平衡になるため、各組織の残留放射能はほぼ同じになる。新モデルでは骨格筋および軟組織に存在する  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は素早く血液内に戻るため、骨格筋および軟組織の  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  に比べて小さくなり、血液内の  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  が大きくなると予想される。解析によりこの違いを定量的に明確に示すことができた。
- 2) 新モデルでは骨表面に移行してきた  $^{137}\text{Cs}$  は血液に再び戻り、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  は骨表面に留まる。このため、骨表面での  $^{137}\text{Cs}$  の残留放射能は、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$  に比べて小さくなると予想される。解析によりこの違いを定量的に明確に示すことができた。
- 3) 新モデルにおいて血液内の  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  に比べて大きく、また、血液から大腸上部への移行速度も  $^{137}\text{Cs}$  に比べて大きい。このため、大腸上部における  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の残留放射能は  $^{137}\text{Cs}$  より大きくなると予想される。解析によりこの違いを定量的に明確に示すことができた。

現モデルでは、全身に分布した放射エネルギーが体内の組織の質量に応じて分配され実効線量が評価されるが、新モデルでは詳細に定義された線源器官ごとに残留放射能を求め、その残留放射エネルギーに基づき等価線量・実効線量を計算する。このため、新モデルで個別に定義された線源器官の等価線量が現モデルに比べて高めに評価されている。しかし、新モデルで求められた実効線量と現モデルでの評価値には大きな差はなかった。組織荷重係数を考慮して実効線量を求める段階で現モデルとの差が打ち消され、実効線量は両者でほぼ同じ値になっている。

PB 投与による、成人標準人を対象とした  $^{137}\text{Cs}$  経口摂取に関する内部被ばく線量の低減効果のシミュレーションは、投与しない場合には小腸に移行してきた  $^{137}\text{Cs}$  が小腸において 100%（計算上は 99%）血液に吸収され、血液を介して全身に移行するとし、投与した場合には、腸肝循環や血液で小腸に再分泌された  $^{137}\text{Cs}$  の 1% が血液に再吸収され（表 4 第 1 セル）、残り 99% は大腸上部に移行すると仮定して行い、PB 投与の効果を解析した。以下に解析で得られた結果を整理する。



- 1) PB 投与の効果の目安として英国保健省の指針[17]に従い、低減率 40%~50%を採用すると、この範囲の低減率を達成するには、PB の投与開始時期は遅くとも摂取後 1 ヶ月以内でなければならず、また、投与期間は短くとも 3 ヶ月以上必要であることが示された。投与期間が 6 ヶ月を超えても低減効果は小さいため、投与を 6 ヶ月以上継続することの有効性は小さい。PB 投与の治療効果を上げるには、摂取後できるだけ早く投与を開始し、3 ヶ月から 6 ヶ月程度投与を続ける必要があることが解析結果から判断される。
- 2) PB を投与しない場合には、骨表面、大腸壁、結腸、筋肉、脾臓、赤色骨髄が、投与した場合には大腸壁、結腸、骨表面の等価線量が大きくなる。投与した場合には大腸下部壁、結腸を除く組織・器官の預託等価線量が約半分に減少するが、大腸下部壁の等価線量は約 40%増大する。組織荷重係数で重み付けされて評価される預託実効線量の低減率は約 50%になる。  
PB の投与により  $^{137}\text{Cs}$  が小腸で血液に再吸収されない場合、大腸を除く体内組織の  $^{137}\text{Cs}$  残留放射能は投与しないときに比べて減少し、その結果、それらの組織を線源とする内部被ばくは低減することになる。一方、大腸の残留放射能は投与により増加するため、大腸および隣接する組織の被ばく線量は投与しないときに比べて増加することになる。
- 3) PB を投与しないとき、経口摂取された  $^{137}\text{Cs}$  の約 80%が尿を介して排泄され、残りの 20%が糞を介して排泄されるが、投与した場合には、尿による排泄が約 60%に減少し、糞による排泄が約 40%に増大する。体外に 50%排泄される摂取後の経過時間は、投与しないときは約 90 日であるが、投与した場合は約 40 日になり、残留放射能が半減する期間は約 50 日短くなる。PB の投与により、 $^{137}\text{Cs}$  の体内からの排泄が促進され、その結果、被ばく線量が約半分に低減されることを示している。
- 4) 尿・糞を介して  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  が体外へ排泄される量は、 $^{137}\text{Cs}$  の壊変で体内で生成される  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の放射エネルギーの約 0.02%であり、体内で生成された  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の大部分が体内で消滅している。したがって、PB 投与による被ばく線量の低減効果に及ぼす Ba の新体内動態モデルによる排泄効果の影響はほとんどないと考えられ、被ばく線量の低減効果は  $^{137}\text{Cs}$  の体外への排泄で生じている。
- 5) PB を投与したときの小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の血液への吸収割合が 20%より小さい場合には、英国保健省の指針を満たすことができる。PB 投与

の効果を実量的に判断するために、血液吸収割合は検討すべき因子である。

新たに提案された体内動態モデル[8]で検討した  $^{137}\text{Cs}$  の経口摂取に対する PB の投与による被ばく線量低減効果は、提案されたモデルの基になったモデル[4]で評価した結果[3]とほぼ同じであることが示され、英国保健省の指針内容[17]に合致する結果であることが確認された。新体内動態モデルで評価された  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の全身・各組織における残留放射能および尿・糞による体外への排泄量の時間変化から PB の投与による被ばく線量低減のメカニズムが理解できた。

PB を投与したときの小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の血液への吸収割合は、PB 投与による線量低減効果に影響するため、小腸における  $^{137}\text{Cs}$  の血液吸収割合の実測値や  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  の体内挙動の観測値を体内動態モデルと比較・検証することにより、PB の投与による被ばく線量低減効果はより信頼できる確度をもって実量的に判断できるようになることが期待される。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 梅田健太郎, 小林悌二, "腸肝循環を含む動態モデルによるプルシアンブルー投与の  $^{137}\text{Cs}$  内部被ばく線量軽減効果の検討", 東北工業大学紀要: 理工学編・人文社会学編, 第 36 号, pp.1-11, 2016 年 3 月.
- [4] R.W.Leggett, L.R.Williams,D.R.Melo and J.L.Lipsztein,"A physiologically based biokinetic model for cesium in the human body", The Science of the Total Environment 317,pp. 235-255,2003.
- [5] ICRP, ICRP PUBLICATION 68,"Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, Replacement of ICRP Publication 61", Pergamon Press,1994,
- [6] 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.

- [7] ICRP, ICRP PUBLICATION 119, “Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60”, ELSEVIER, 2012.
- [8] R.W.Leggett, “Biokinetic models for radiocaesium and its progeny”, Journal of Radiological Protection 33, pp.123-140, 2013.
- [9] ICRP, ICRP PUBLICATION 67, “Age-dependent Doses to Members of Public from Intake of Radionuclides : Part 2 Ingestion Dose Coefficients”, Pergamon Press, 1993.
- [10] ICRP, ICRP PUBLICATION 60, “1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, Pergamon Press, 1991.
- [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] ICRP, ICRP PUBLICATION 30, “Limits for Intakes of Radionuclides by Workers”, Part 1, Pergamon Press, 1979.
- [13] ICRP, ICRP PUBLICATION 100, “Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection”, ELSEVIER, 2006.
- [14] RSIC COMPUTER CODE COLLECTION, “SEECAL 2.0 Program to Calculate Age-Dependent Specific Effective Energies”, RADIATION SHIELDING INFORMATION CENTER CCC-620, 1995.
- [15] A.C.Hindmarsh, “GEAR : Ordinary Differential Equation System Solver”, Lawrence Livermore Laboratory UCID-30002 Rev.3, December 1974.
- [16] 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.
- [17] Health Protection Agency, “Use of Prussian Blue (Ferric Hexacyanoferrate) for Decorporation of Radiocaesium Advice from the Health Protection Agency”, Documents of the Health Protection Agency, 2010.