

《総説》

原子力緊急事態における RI 内用療法施設と仮設型内部被ばく患者治療施設での 内部被ばくの診療について

渡邊 直行* 佐々木康人**

要旨 原子力緊急事態の場合に、内部被ばく医療に既存の RI (ラジオアイソトープ) 内用療法施設を利用し、仮設型内部被ばく患者治療施設を併設することで、内部被ばく患者の診療のより高い実効性が確保される可能性があることが提言された。しかしながら、そこで内部被ばく患者のすべての診療を行うことは実際的ではない。既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の診療の目的は、1) すでに治療が開始された内部被ばく患者の治療を継続し、体内にある放射エネルギーを低減することで潜在的な将来の健康影響のリスクを減らすこと、2) 内部被ばく患者から排出される放射性核種などの放射線防護の視点から管理を行い一般公衆への二次的な被ばくの拡大を防止することにある。本稿では既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の診療に係る基本的な考え方が述べられている。

キーワード：原子力緊急事態，内部被ばく患者，RI 内用療法施設，仮設型内部被ばく患者治療施設，内部被ばく医療

(核医学 48: 393-418, 2011)

1. はじめに

われわれは、原子力緊急事態時により高い実効性が確保される内部被ばく医療の可能性を目指して、既存の RI (ラジオアイソトープ) 内用療法施設の改築利用と新しくデザインされた仮設型内部被ばく患者治療施設の併設利用について提言した¹⁾。それには内部被ばくを引き起こす可能性がある放射性物質は核医学の診療に用いられる放射性医薬品と異なり、きわめて長い物理学的半減期

を有する放射性核種があり、また崩壊により生成される幾多の娘核種から放出される α , β , γ 線を考慮し、内部被ばく患者の診療をするにあたって放射線障害防止の視点から新たな放射線管理の措置を講じておくことが欠かせない¹⁾。

吸入摂取，経口摂取，傷や皮膚を通じて体内への放射性物質の取り込みにより発生する内部被ばく患者の診療は、1) 内部被ばくの診断、2) 体内の放射エネルギーの低減などに係る治療、3) 経過観察に大きく分けられる。しかしながら、提言された既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設で内部被ばく患者のすべての診療を行うことは実際的ではない。このため、本稿で既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設で適切と考えられる内部被ばく患者の診療のあり方について考察することとする。

* 群馬県立県民健康科学大学診療放射線学部

** 社団法人日本アイソトープ協会

受付：23 年 7 月 14 日

最終稿受付：23 年 9 月 1 日

別刷請求先：前橋市上沖町 323-1 (☎ 371-0052)

群馬県立県民健康科学大学
診療放射線学部

渡邊 直行

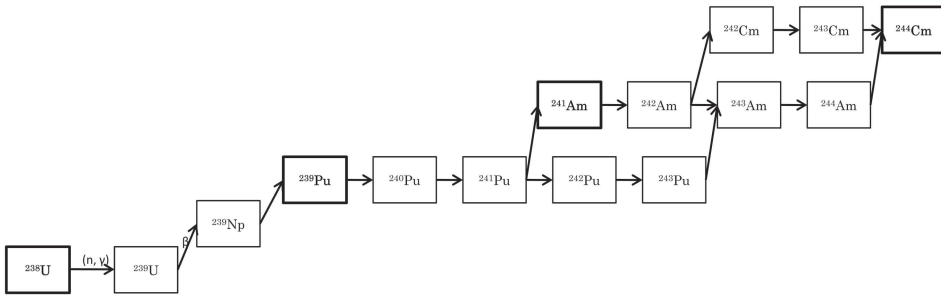


図1 ウラン-プルトニウムの生成崩壊系列
 ^{241}Am や ^{244}Cm などは ^{238}U の (n, γ) 反応や β 崩壊から生成される.

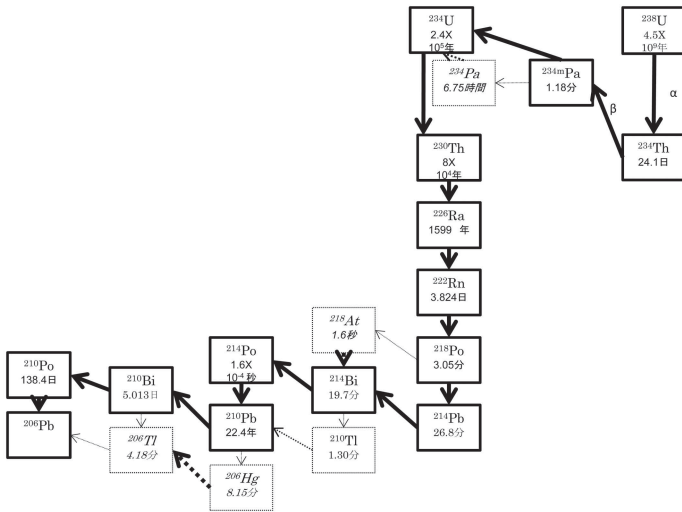


図 2.1 ^{238}U , ^{234}U の崩壊系列
 ^{238}U は 4.468×10^9 年の物理学的半減期の α 崩壊にて ^{234}Th が生成され、それから長い年月をかけて最終的に安定同位体の一つである ^{206}Pb となる.

2. 内部被ばくを引き起こす可能性のある放射性核種について

内部被ばく患者の診療にあたって内部被ばくを引き起こす可能性のある放射性核種やその体内挙動などについて理解することが欠かせない.

2-1. 放射性核種について

原子力発電所の原子炉では燃料棒内に装填されている、 ^{235}U (3%) と ^{238}U (97%) を焼き固めたペレットにある ^{235}U が熱中性子を吸収して核分裂する²⁾. 核分裂の際に飛び出す新たな熱中性子はほかの ^{235}U に吸収され、さらなる核分裂が生じる²⁾. 原子炉内で熱中性子は ^{238}U や制御棒に吸収されるため ^{235}U の核分裂は制御された状態にあ

り時間をかけて少しずつ熱エネルギーが取り出されていくこととなる²⁾. ^{235}U の核分裂の結果、生じる分裂片はそれぞれが新しい原子核を形成し核分裂生成物 (FP) と呼ばれる²⁾. FP は質量数 90~100 と 135~145 付近の 2 か所でピークを示し、等質量の破片に二分されることはない²⁾. ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs などの FP が生成され、燃料棒内に貯留する²⁾.

核燃料施設で天然ウラン中に 0.7% しか存在しない ^{235}U が遠心分離器で濃縮され 3~5% まで比率が高められ、核燃料とされる²⁾. ウランは $^{235}\text{UF}_6$ の化学形態であり常温で固体であるが、濃縮過程では加温して気体として取り扱われる²⁾.

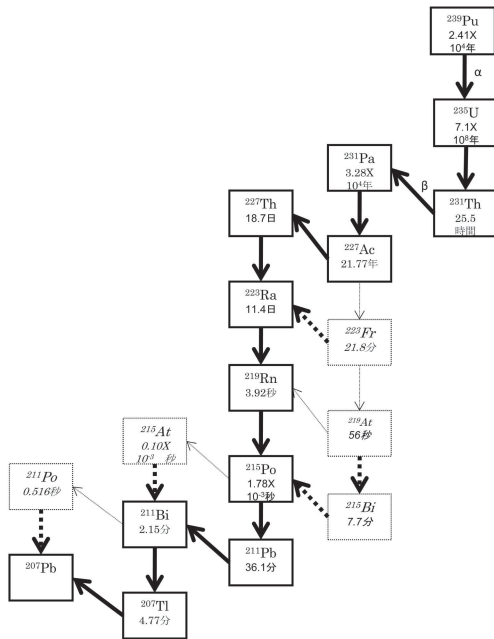


図 2.2 ^{239}Pu の崩壊系列

^{239}Pu は 2.412×10^4 年の物理学的半減期の α 崩壊にて ^{235}U が生成され、それから長い年月をかけて最終的に安定同位体の一つである ^{207}Pb となる。

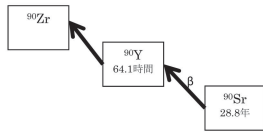


図 2.3 ^{90}Sr の崩壊系列

^{90}Sr は 28.8 年の物理学的半減期の β 崩壊にて ^{90}Y が生成され、それから最終的に安定同位体の一つである ^{90}Zr となる。

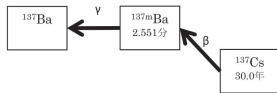


図 2.4 ^{137}Cs の崩壊系列

^{137}Cs は 30.0 年の物理学的半減期の β 崩壊にて $^{137\text{m}}\text{Ba}$ が生成され、それから最終的に安定同位体の一つである ^{137}Ba となる。

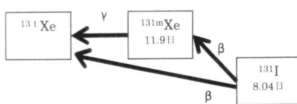


図 2.5 ^{131}I の崩壊系列

^{131}I は 8.04 日の物理学的半減期の β 崩壊にて一部 $^{131\text{m}}\text{Xe}$ が生成され、最終的に安定同位体の一つである ^{131}Xe となる。ゼノンは気体として人体から呼吸排泄されることに留意する。

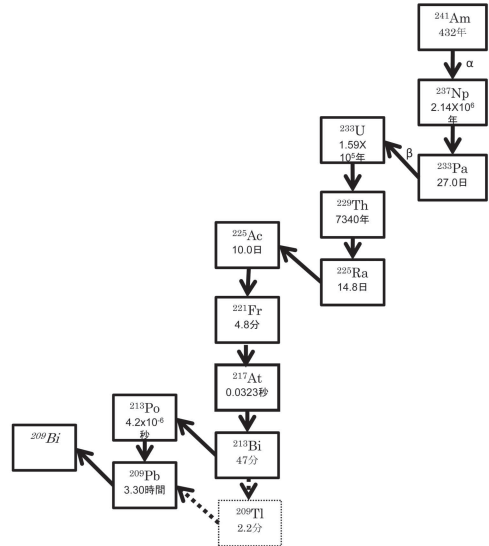


図 2.6 ^{241}Am の崩壊系列

^{241}Am は 432 年の物理学的半減期の β 崩壊にて ^{237}Np が生成され、それから長い年月を経て最終的に安定同位体の一つである ^{209}Bi となる。

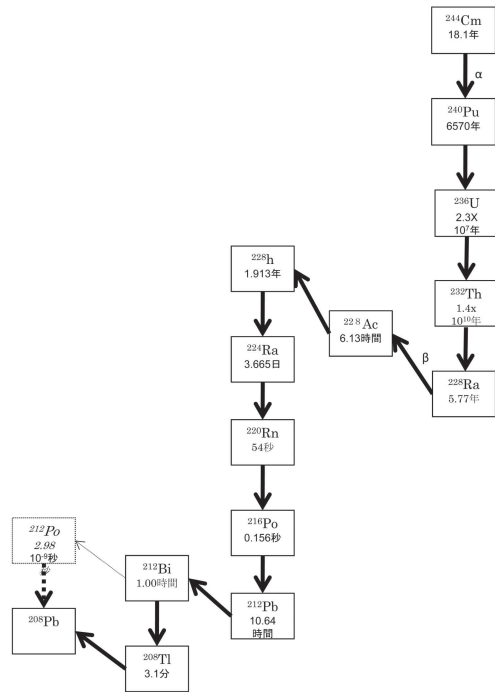


図 2.7 ^{244}Cm の崩壊系列

^{244}Cm は 18.10 年の物理学的半減期の β 崩壊にて ^{240}Pu が生成され、それから長い年月を経て最終的に安定同位体の一つである ^{208}Pb となる。

表1 内部被ばくを引き起こす可能性のある放射性核種の物理学的特性^{4,5)}

核種	半減期	比放射能 (Bq/g)	α, β 線エネルギー (MeV) (放出割合)	γ 線エネルギー (MeV) (放出割合)
²³⁴ U	2.451 × 10 ⁵ 年	2.31 × 10 ⁸	α 線 4.77 (72%) 4.72 (28%)	0.053 (0.12%) 0.121 (0.04%)
²³⁵ U	7.038 × 10 ⁸ 年	8.0 × 10 ⁴	α 線 4.217 (6%) 4.325 (4%) 4.364 (17%) 4.396 (55%) 4.598 (5%) 他	0.144 (11%) 0.163 (5%) 0.186 (58%) 0.205 (5%) 0.0934 Th-X
²³⁸ U	4.468 × 10 ⁹ 年	1.24 × 10 ⁴	α 線 4.147 (23%) 4.196 (77%)	0.0496 (0.075) 0.0130 Th-LX
²³⁹ Pu	2.412 × 10 ⁴ 年	2.30 × 10 ⁹	α 線 5.106 (12%) 5.144 (15%) 5.157 (73%)	0.0387 (0.010%) 0.0516 (0.027%) 0.0988 (0.0012%) 0.129 (0.0064%) 0.375 (0.0015%) 他 0.0136 U-LX
⁹⁰ Sr	28.8 年	5.18 × 10 ¹²	β 線 0.546 (100%) ⁹⁰ Y β 線 2.28 (100%)	
¹³⁷ Cs	30.0 年	3.22 × 10 ¹²	β 線 0.512 (94%) 1.17 (6%)	^{137m} Ba 0.662 (90%) 0.0322 Ba-X
¹³¹ I	8.04 日	4.6 × 10 ¹⁵	β 線 0.248 (2%) 0.334 (7%) 0.606 (89%) 他	0.0802 (2.6%) 0.284 (6.1%) 0.364 (81%) 0.637 (7.3%) 他 ^{131m} Xe 0.164 (2%) 0.0298 Xe-X
²⁴¹ Am	432.2 年	1.30 × 10 ¹¹	α 線 5.388 (1%) 5.443 (13%) 5.486 (85%) 他	0.0263 (2.4%) 0.0595 (36%) 他 0.0139 Np-LX
²⁴⁴ Cm	18.10 年	3.03 × 10 ¹²	α 線 5.763 (24%) 5.805 (76%)	0.0428 (0.024%) 他 0.0143 Pu-LX

次に ^{235}U は酸化物の化学形態として取り扱われ、焼き固められペレットとして燃料棒に装填される²⁾。

使用済み核燃料再処理施設で使用済み燃料からウランやプルトニウムが回収される²⁾。使用済み燃料を燃料集合体のまま受け入れ、プール内で貯蔵する²⁾。一定期間後、貯蔵プールから取り出された使用済み燃料はそのまません断され 5 cm ほどの小断片にされる²⁾。一定期間貯蔵された使用済み燃料には初期に存在した ^{235}U 、 ^{238}U に加えて、プルトニウムや ^{241}Am 、 ^{244}Cm などの長い半減期を有する放射性物質であるマイナーアクチノイドが存在する(図 1)²⁾。その小断片は硝酸で溶かされ、ウラン、プルトニウムの硝酸塩の溶液とマイナーアクチノイドの溶液に分けられる²⁾。ウランやプルトニウムは精製され、抽出されたプルトニウムは酸化物に転換されウラン酸化物と混合されて MOX (Mixed Oxide) 燃料となる²⁾。

このため、原子力緊急事態時に各施設内で、また各施設から周辺環境へ ^{235}U 、 ^{238}U 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 、 ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm などの放射性核種が漏出する³⁾。空中に浮遊する、また沈着する放射性物質から人体の外部被ばくが、またそれらの放射性物質を体内に取り込むことで内部被ばくが発生する³⁾。それら放射性核種の壊変は図 2 に、物理学的特性は表 1 にまとめられている^{4,5)}。

2-2. 放射性核種の体内挙動について

一般に、吸入摂取された放射性核種は鼻腔、咽頭、気管、細気管支、肺胞に到達する⁶⁾。気管、細気管支、肺胞に沈着した放射性核種は血液などへ移行し、一部は気道粘液の嚥下により消化管へ移動する⁶⁾。飲食物の経口摂取などにより放射性物質は消化管に到達する⁶⁾。消化管は大きく胃、小腸、大腸に分けられそれぞれの区分で放射性核種の動態として滞留時間が異なるが、放射性核種は消化管から血液などへ移行する⁶⁾。また、無傷の皮膚や傷口から摂取される放射性核種は血液などへ移行する⁶⁾。一般的に放射性核種が無傷の皮膚を通過することは多くはないが、いくつかの放射性核種が急速に移行することが知られてい

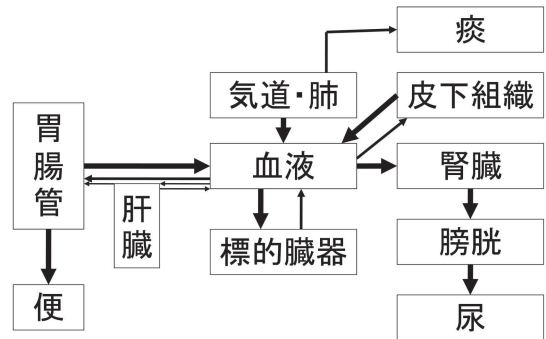


図 3 放射性核種の体内挙動のコンパートメントモデル一般に、経口、経気道、経皮的に取り込まれた放射性核種は血液に移行し全身へ分布する。その後、特定の臓器や組織に沈着したり、痰、尿、便中へ排泄されたりする。

る⁶⁾。血液の血漿に分布する放射性核種は全身に拡がり細胞外液や細胞内液へ移行する⁶⁾。その後、放射性核種は臓器や組織で複雑な移行で局在化し、また、局在化せず比較的均等に全身に分布する⁶⁾。体内に分布した、臓器や組織中に局在化した一部の放射性核種は細胞外液や血漿から尿中へ移行し尿中排泄される⁶⁾。体液中に分布した放射性核種の一部は消化管内へ移行し糞中排泄される⁶⁾。また、消化管へ到達したが、吸収されなかった放射性核種はそのまま消化管を通過し便中排泄される⁶⁾。体内挙動の基本的なコンパートメントモデルが図 3 に示されている。

放射性核種の動態についてはその種類や化学形態などによって異なる。ICRP は放射線の安全管理を目的とした線量評価のために放射性核種の代謝モデルを構築している。ICRP Publication 23⁷⁾ で標準男性(身長 170 cm、体重 70 kg、reference man)を定義し、ヒトや実験動物より得られたデータから Publication 30^{8,9)} で放射性核種の体内動態モデルを示した。その後、呼吸気道モデル、消化管モデル、組織系動態モデル、リサイクルモデルの導入などで Publication 30 で示された体内動態モデルなどを Publication 56¹⁰⁾、60¹¹⁾、66¹²⁾、67¹³⁾、68¹⁴⁾、69¹⁵⁾、70¹⁶⁾、72¹⁷⁾、78¹⁸⁾ で改訂している。この代謝モデルは定量的で内部被ばく

患者の診療の考え方の参考になると思われるので ICRP Publication 30^(8,9), 68⁽¹⁴⁾, 72⁽¹⁷⁾, 78⁽¹⁸⁾ を基に下記にまとめる。

1) セシウム (¹³⁷Cs)

経口摂取されたセシウムのすべての化合物は急速にかつほとんど完全に消化管から吸収される(胃腸管吸収割合: $f_1 = 1$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、セシウムのすべての化合物は気管以下に沈着したほとんどすべてが急速に吸収される(タイプ F: Fast)。また、血液などに移行したセシウムは人体全体に均等に分布するが、その 10% が 2 日の生物学的半減期、残りの 90% は 110 日の生物学的半減期で体外へ排泄される。排泄については、80% は尿中へ、20% は便中へ排泄されるとされている。小児は成人と比べ、セシウムの排泄率が増加するが、乳児や新生児では腎機能の発達が未熟であるため排泄率は減少するとされ、体内挙動が異なる。

2) ヨウ素 (¹³¹I)

経口摂取されたヨウ素のすべての化合物は主に消化管、主に小腸から血液へ急速にほとんど完全に吸収される ($f_1 = 1$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、ヨウ素の化合物すべては、気管以下に沈着したほとんどすべての物質が急速に吸収されるとしている(タイプ F)。甲状腺へのヨウ素の取り込み量は食物に含まれる安定ヨウ素の毎日の摂取量に大きく左右されるが、一般に血液中のヨウ素の 30% が甲状腺へ移行し、残り 70% は体外へ排泄されるとされている。その 20% は糞便中へ排泄される。甲状腺に取り込まれたヨウ素は 80 日の生物学的半減期で残留し、有機ヨウ素の形で甲状腺から消失する。有機ヨウ素は甲状腺以外の人体のすべての器官および組織に均等に分布し、そこに 12 日の生物学的半減期で残留し、この有機ヨウ素の 10% は糞便中へ排泄され、残り 90% は無機ヨウ素として血液などへ再移行する。このため甲状腺に取り込まれたヨウ素の実効半減期は 120 日とされる。¹³¹I は崩壊して ^{131m}Xe を生成するが、これは、線量算定の目的には問題となるほど崩壊しないうちに人体から排出されるとされて

いる。なお、実効半減期とは放射性核種の放射能が半分になる時間である物理学的半減期と生体に取り込まれた放射性核種の量が体外排出により半分になる時間である生物学的半減期の 2 つの半減期を考慮したものである。元素状ヨウ素の蒸気として吸入の場合はエアロゾルの場合と異なる。ほとんどすべての吸入されたガス状分子は気道表面と接触するが、その表層で溶解するかまたはそれと反応する場合を除いて通常は空気中に戻る。沈着は呼吸気道全体にわたり血液への急速な吸収があるとされている(クラス SR-1)。

3) ストロncioウム (⁹⁰Sr)

経口摂取されたチタン酸ストロncioウム (SrTiO_3) は消化管からの吸収は小さい ($f_1 = 0.01$)。一方、経口摂取されたストロncioウムの可溶性の塩は消化管からある程度吸収される ($f_1 = 0.3$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、チタン酸ストロncioウムは肺に長く残留するが、肺胞領域に沈着した量の約 10% 程度がゆっくりと吸収される(タイプ S: slow)。ストロncioウムの可溶性の化合物は、吸入摂取の場合、ほとんどすべて迅速に吸収される(タイプ F)。若い年齢ほど血液への吸収割合が大きいとされている。体内に取り込まれたストロncioウムは主に尿中へ排泄されるが、骨に沈着したストロncioウムは骨全体に一樣に分布し、また崩壊により生成する ⁹⁰Y は骨に残留するとされている。

4) アメリシウム (²⁴¹Am)

経口摂取の場合、アメリシウムのすべての化合物について消化管からの吸収は小さいが食餌やその他の要因で促進される可能性があると考えられている ($f_1 = 10^{-3}$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、アメリシウムのすべての化合物は、肺胞領域に沈着した量の約 70% 程度が中位の速度で吸収される(タイプ M: moderate)。血液などに移行したアメリシウムの 45% は骨に、45% は肝臓に沈着し、0.035% は精巣に、0.011% は卵巣へ分布する。骨に沈着したアメリシウムは骨全体に一樣に分布し、50 年の生物学的半減期で、肝臓では 20 年の生物学的半減期で、また生殖腺に分布し

たアメリカシウムは永久に、残留するとされている。

5) キュリウム (^{244}Cm)

経口摂取されたキュリウムのすべての化合物について消化管からの吸収は小さい ($f_1 = 10^{-3}$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、キュリウムのすべての化合物は、肺胞領域に沈着した量の約 70% 程度が中位の速度で吸収される (タイプ M)。血液などに移行したキュリウムの 45% は骨に、45% は肝臓に沈着し、0.035% は精巣に、0.011% は卵巣へ移行する。骨に沈着したキュリウムは 50 年の生物学的半減期で、肝臓では 20 年の生物学的半減期で、生殖腺に分布したキュリウムは永久に残留するとされている。

6) プルトニウム (^{239}Pu)

経口摂取されたプルトニウムの消化管からの吸収の程度は化学形によって異なる。PuO₂ などのプルトニウムの不溶性酸化物について消化管からの吸収は小さい ($f_1 = 10^{-5}$)。プルトニウムの硝酸塩の吸収はそれより大きく ($f_1 = 10^{-4}$)、また、その他のプルトニウムの化合物の吸収はさらに大きいとされている ($f_1 = 10^{-3}$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、プルトニウムの酸化物は肺胞領域に沈着した量の約 10% 程度がゆっくりと吸収される (タイプ S)。その他のすべての化合物は肺胞領域に沈着した量の約 70% 程度が中位の速度で吸収される (タイプ M)。血液などに移行したプルトニウムは、45% は骨に、45% は肝臓に沈着し、0.035% は精巣に、0.011% は卵巣へ移行する。骨に分布したプルトニウムは 50 年の生物学的半減期で、肝臓では 20 年の生物学的半減期で、生殖腺に分布したプルトニウムは永久に残留するものとされている。

7) ウラン (^{235}U , ^{234}U , ^{238}U)

経口摂取された水溶性の無機ウラン化合物 (6 価ウラン) については消化管からの吸収は少ない ($f_1 = 0.05$)。UF₄、UO₂、U₃O₈ のような、ウランが通常 4 価である比較的不溶性化合物の吸収も小さい ($f_1 = 0.002$)。エアロゾルとして吸入摂取の場合、UF₆、UO₂F₂ および UO₂(NO₂)₂ のようなウラ

ン化合物はほとんどすべて迅速に肺から吸収される (タイプ F)。溶けにくい UF₄、UO₃、UCl₄ のような化合物は肺胞領域に沈着した量の約 70% 程度が中位の速度で吸収される (タイプ M)。UO₂、U₃O₈ の著しく不溶性ウラン酸化物は肺胞領域に沈着した量の約 10% 程度がゆっくりと吸収される (タイプ S)。血液などに移行したウランの 20% と 2.3% は骨に、それぞれ 20 日と 5,000 日の生物学的半減期で分布する。またウランの 12% と 0.052% は腎臓に、それぞれ 6 日および 1,500 日の生物学的半減期で分布するとされている。

ICRP は Publication 89¹⁹⁾ で線量評価モデルのための標準男性 (身長 176 cm, 体重 73 kg, reference male)、標準女性 (身長 163 cm, 体重 60 kg, reference female) を設定。標準男性および標準女性の対応する線量を平均化することによって臓器または組織線量を計算するための理想化した標準人 (reference person) を定義している。2007 年の ICRP 新勧告が掲載されている ICRP Publication 103²⁰⁾ は Publication 60 の改訂を行い、逐次、かかる見直しが行われる予定である。

3. 内部被ばくの定量化

ICRP では標準人の体内に取り込まれた放射性核種による内部被ばくは以下のように預託実効線量として定量化される。この概念は放射線防護の目的に使用されるが、内部被ばく患者の診療の考え方の参考になると思われるので以下に ICRP Publication 103²⁰⁾ をもとに簡単に説明する。

1990 年 ICRP 勧告から 17 年経過して刊行された最も新しい 2007 年勧告では、放射線加重係数 (W_R) について陽子の場合 5 から 2 へ、中性子の場合階段関数から連続関数へ変更、組織加重係数 (W_T) は新しく唾液腺 (0.01) と脳 (0.01) を追加、乳房 (乳がん) で 0.05 から 0.12 へ、生殖腺 (遺伝的疾患) で 0.20 から 0.08 へと変更されている²⁰⁾。そして、将来にわたり内部被ばく患者が受けると推測される線量 (吸収線量: D_T , 等価線量: H_T , 実効線量: E) は、体内に取り込まれた放射性核種による内部被ばくの時点から作業者に対し 50

年、一般公衆に対し70歳に達するまでの期間にわたる線量率の積分値の総和とした預託線量として推測される²⁰⁾。

内部被ばくに係る預託実効線量は以下の式で評価される²⁰⁾。

預託実効線量 (Sv)

$$= \text{摂取量 (Bq)} \times \text{実効線量係数 (Sv/Bq)}$$

体内への放射性物質の摂取の仕方(吸入, 経口摂取), 体内に取り込まれた放射性物質の化学形態や放射性核種の種類, 患者の対象者(作業員, 一般公衆など)を考慮した実効線量係数を用いて預託実効線量として内部被ばくは定量化される。実効線量係数は付属資料1, 2にまとめられている^{14,15,17)}。吸入摂取の場合, 作業員は5 μm 粒子径を1.2 m^3/h の呼吸率で, 一般公衆(成人)は1 μm 粒子径を0.93 m^3/h の呼吸率が条件などとして設定されている⁷⁾。摂取量はホールボディカウンタ(Whole Body Counter, WBC)などで測定された時点での体内へ取り込まれた放射性核種の放射エネルギーを事故などによる漏出による放射性物質の体内への取り込み時から測定時までの経過時間, 体内への放射性物質の摂取の仕方(吸入, 経口摂取), 体内に取り込まれた放射性物質の化学形態や放射性核種の種類を考慮した体内残留率や尿・便中排泄量(率)で除して補正し推定する¹⁸⁾。付属資料3に作業員の摂取による予測値を参考としてまとめられている¹⁸⁾。

本稿で記載している預託実効線量は, ICRP Publication 23⁷⁾で示された標準人データ, Publication 30^{8,9)}, 66¹²⁾, 67¹³⁾, 69¹⁵⁾, 71²¹⁾の体内動態モデル, Medical Internal Radiation Dose (MIRD) 数学ファントム, モンテカルロコード, ICRP Publication 38²²⁾の壊変データから得られた預託等価線量にICRP Publication 60¹¹⁾の組織荷重係数を考慮して求められたものである。今後は, ICRP Publication 89⁸⁾で示された標準男性, 標準女性ファントム, Publication 100²³⁾の消化管モデル, これから示される組織系動態モデル, 呼吸気道モデル, 医療断層撮影に基づいた人体の参考計算ファントム(reference computational phantom) (3次元の体積ピ

クセル(voxel)で構成されたコンピュータファントム), モンテカルロコード(2008年), 改訂された壊変データ(2008年)に基づき, 性平均された預託等価線量にICRP Publication 103²⁰⁾の改訂された年齢・性平均組織荷重係数より求められる預託実効線量係数に改められることに留意しなければならない。また, 今後, 見直された線量係数などは逐次公表される予定である。

ICRP Publication 103²⁰⁾で, 計画段階および放射線防護の最適化のための事前線量評価や線量限度の遵守の証明, あるいは線量拘束値や種々のリファレンスレベルとの比較のための事後の線量評価を目的とした実効線量の使用を明確化している。このため, 人体の組織反応の評価, 医療行為に係る意思決定, 被ばくした個人のリスクの評価, 放射線リスクの疫学研究への実効線量の利用は目的にかなっていないことに留意されなければならない。

4. 内部被ばく患者の診療について

内部被ばくの診断は患者の, 1) 症状, 2) 身体所見, 3) 衣服や皮膚の表面放射能測定, 4) 鼻粘膜スワブによる気道入口部の放射能測定, 5) 居室や周囲のエアサンプルとその場所のふき取りテストによる空中・表面放射能測定などの解析結果と診療で行われる^{6,24,25)}。制御しなければならない, また制御できる内部被ばくがあると診断された患者は治療が必要である。一方, 内部被ばく患者に治療を実施することなく長期間にわたる経過観察となる場合もある。胃洗浄や瀉下剤・吸着剤などの経口投与による消化管からの放射性核種の吸収の低減, 肺洗浄やキレート剤などの吸入投与による気道や肺からの放射性核種の吸収の軽減, 強制輸液, 利尿薬やキレート剤の経静脈性投与による腎臓からの放射性核種の排泄の増加などの治療行為が考慮される^{6,24,25)}。治療が終了した患者や治療を必要としない内部被ばく患者は長期にわたる健康観察を実施することとする。

内部被ばく患者で内部被ばくを引き起こす放射性核種の種類と放射エネルギーは, 1) 体内の放射性核種

から放出される X 線や γ 線を体外から測定するゲルマニウム (Ge) 半導体検出器を備えたホールボディカウンタ, 2) 肺に沈着したプルトニウムやアメリカシウムから放出される X 線や γ 線を体外から胸部領域を測定する肺モニター, 3) 甲状腺に取り込まれた放射性ヨウ素から放出される γ 線を測定する甲状腺モニターの体外計測装置を用いた体外計測法によって, また, 4) 患者の血液, 尿, 糞便などの生体試料に含まれる放射性核種から放出される α 線, β 線を主に測定するバイオアッセイ法によっても, それぞれ同定, 定量化される^{24,25)}. また, 内部被ばく線量は ICRP の考えを用いて預託実効線量として推測されることがある. 預託実効線量は標準人に基づいたもので内部被ばく患者個人の線量としては不確実であることを留意しておかなければならない. 内部被ばくに関する情報を可能な限り収集することがより正確な内部被ばく線量評価に欠かせない.

5. RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設の内部被ばく患者の診療の考え方について

国の「緊急被ばく医療のあり方」²⁴⁾ では内部被ばく患者の診療については高次被ばく医療機関で実施される旨が示されている. しかしながら, 多数の内部被ばく患者が発生した場合にその対応能力を超える恐れがあり, 既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設の併設利用について提言された¹⁾. この RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者施設の利用は既存の緊急被ばく医療体制を補完するものであり, 緊急被ばく医療に必要な資機材などを完備することは実際的でない. また, 新しい被ばく医療機関として既存の RI 内用療法施設を整備することは意図していない. 1) 内部被ばくの診断, 2) 体内に在る放射エネルギーの軽減などに係る治療, 3) 経過観察に大きく分けられる内部被ばく患者の診療のすべてを RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設で実施することは実際的でない. このため, RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の診療は, 救急処置が終了し, 制御する必

要がある内部被ばく患者に対する体内に在る放射エネルギーの軽減などに係る治療が主たるものであることが想定されている.

内部被ばく患者の治療は, 前述したように体内に取り込まれた放射性核種の量を軽減するために創傷組織の外科的切除による物理的清浄, 肺洗浄や胃洗浄などの物理的体内洗浄, 催吐剤や緩下剤などの化学的体内洗浄, 吸着剤などによる吸収軽減, キレート剤による体外排出の増加など薬物治療など種々の治療方法がある^{24,25)}. RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の治療は, 施設や対応する医療専門家の特性を考慮すると薬剤を経静脈性や経口性に患者に投与することで放射性核種の体内への吸収を軽減させる, また体外への排出を増加させる薬物治療を想定している. それには, 1) 放射性核種に対する適切な薬剤の選択, 2) 内部被ばく後のタイミングのよい投与が欠かせない⁸⁾.

1 Gy を超す急性被ばくを全身に受けると, 骨髄障害, 皮膚障害, 消化管障害, 中枢神経障害, 心臓血管障害などの放射線による確定的影響が被ばく線量に応じて発現する^{25,26)}. これらの一連の symptom complex は急性放射線症候群 (acute radiation syndrome: ARS) と呼ばれる^{25,26)}. 骨髄障害は, 放射線感受性が高い骨髄の造血幹細胞が加速化された細胞死により減少するために, 白血球減少による免疫不全症, 易感染性, 血小板減少による出血傾向などの血液細胞が担う諸機能の低下が引き起こされる病態である^{25,26)}. 2~3 週間の潜伏期を経て, 出血や紫斑, 感染による発熱などの症状が出現する^{25,26)}. 2~4 Gy の急性放射線被ばく線量では 10~20 日以降無菌室へ被ばく患者の隔離が必要となる^{25,26)}. このため, 無菌室への隔離や造血幹細胞移植などの治療を必要としない急性放射線全身総被ばく線量として 2 Gy を超えない内部被ばく患者の RI 内用療法施設と仮設型内部被ばく患者治療施設への受け入れを想定している.

内部被ばくを引き起こす可能性のある放射性核種に対して用いられる治療薬剤は表 2 にまとめら

表2 放射性核種に対する治療薬剤²⁴⁻³³⁾

核種	治療薬剤
ウラン (²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U)	炭酸水素ナトリウム
プルトニウム (²³⁹ Pu)	Ca-DTPA/Zn-DTPA
ストロンチウム (⁹⁰ Sr)	乾燥水酸化アルミニウムゲル
セシウム (¹³⁷ Cs)	プルシアンブルー
ヨウ素 (¹³¹ I)	ヨウ化カリウム / チアマゾール
アメリカシウム (²⁴¹ Am)	Ca-DTPA/Zn-DTPA
キュリウム (²⁴⁴ Cm)	Ca-DTPA/Zn-DTPA

れている²⁴⁻³³⁾。それらの薬剤の機序は図4に示され、薬剤の用法などについては表3にまとめられている²⁴⁻³³⁾。内部被ばく後の治療開始のタイミングについては、一般に放射性核種が吸収される前に、また放射性核種が血液などに分布し特定の臓器・組織に沈着する前に薬物治療をはじめることがより高い治療効果が期待できるので、内部被ばく後できるだけすみやかに治療が開始されることが望ましい^{24,25)}。針刺し事故による⁹⁰Yの内部被ばくを想定した実験動物にキレート剤であるCa-DTPAを投与した時、事故後15分以内の針刺し部位へのCa-DTPAの投与の場合、骨への⁹⁰Yの集積については対照群に比べて平均47.8%の抑制が見られた³⁴⁾。事故後15分を超える投与は平均30.1%、事故後15分以内のCa-DTPAの静脈投与により⁹⁰Yの骨への集積については平均15.7%が抑制された³⁴⁾。このように動物実験では適切な薬物治療を実施した場合、その治療効果は3倍程度増強されることが示されている³⁴⁾。

RI内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設で内部被ばく患者への薬物治療の開始の判断を実施することは想定していない。施設に搬送されるまでの時間経過とともに期待される薬物治療効果が減少するので^{25,34)}高次被ばく医療機関で速やかに治療が開始される必要があると考えられるからである。治療がすでに開始された内部被ばく患者が搬送され、治療に係るインフォームドコンセントが得られた状況下で、そこで内部被ばく患者の治療が継続されることがRI内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の診療の主たる活動であると考えられる。

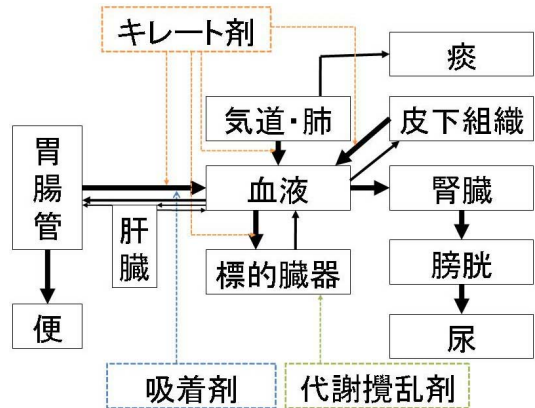


図4 内部被ばくに用いられる治療薬物の作用。治療薬物の作用場所を体内挙動のコンパートメントモデルで示している。キレート剤は、消化管、気道・肺、皮膚から血液などへ移行する過程、また、血液などの体循環から特定の臓器や組織へ移行する過程で放射性核種をキレート剤に抱合し腎臓から尿中へ排泄させる。吸着剤は、消化管で放射性核種を吸着剤に取り込むことで吸収を低減し、そのまま糞便中で排泄させる。代謝攪乱剤は、安定同位体により放射性核種の濃度を希釈し、また薬剤により臓器や組織の一部の代謝を抑制することで放射性核種の特定の臓器や組織への取り込みを低減させる。

6. 内部被ばく患者の薬物治療の開始の判断について

RI内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設では内部被ばく患者の薬物治療の決定を実際に判断することはないがここでその基本的な考え方について考察する。

内部被ばく患者の薬物治療について医師が決定を行うが、明確な指針はない。治療の決定にあたって、一般に体内の放射性核種からの被ばく線量が急性放射線障害を引き起こすことは稀であり、また、不安や心配を除く身体的な症状を呈することも稀であるため、晩発性の健康影響、主に放射線誘発による発がんの危険性が治療開始の意思決定に大きな位置を占めると考えられている。ヒト集団の疫学調査または動物実験などから甲状腺がん、骨腫瘍、肺腫瘍などが内部被ばくにより発生しうるがんとして知られている³⁵⁻³⁷⁾。¹³¹Iの吸入や経口摂取による甲状腺がんが誘発される。

表 3 治療薬剤の用法

治療薬剤	剤型	投与量, 用量, 機序
Ca-DTPA ^{26,27)} Na ₃ Ca ₁₄ H ₁₈ N ₃ O ₁₀	液体 (1 g/5 ml)	<p>初日は Ca-DTPA 投与, 1 g/回 (12 歳以上), 14 mg/kg/回 (12 歳未満, 1 g を超えないこと), 1 回/1 日: 原液の経静脈投与 (3~4 分かけて) 原液を 100~250 ml の 5% ぶどう糖や生理食塩水に溶いた点滴静脈投与 (30 分以上かけて) 原液を同量の滅菌水または生理的食塩水に溶いてネブライザーによる吸入投与</p> <p>2 日目からは Zn-DTPA に切り替える. Ca-DTPA を継続投与する場合は Zn を投与しなければならない.</p> <p>組織に沈着する前の放射性同位元素は Ca と入れ替わり, DTPA と結合することで腎臓から排泄される.</p> <p>禁忌: なし.</p>
Zn-DTPA ^{26,28)} Na ₃ Zn ₁₄ H ₁₈ N ₃ O ₁₀	液体 (1 g/5 ml)*	<p>初日は Ca-DTPA 投与, 2 日目から Zn-DTPA を 1 g/回 (12 歳以上), 14 mg/kg/回 (12 歳未満, 1 g を超えないこと), 1 回/1 日: 原液の経静脈投与 (3~4 分かけて) 原液を 100~250 mL の 5% ぶどう糖や生理食塩水に溶いた点滴静脈投与 (30 分以上かけて) 原液を同量の滅菌水または生理的食塩水に溶いてネブライザーによる吸入投与</p> <p>組織に沈着する前の放射性同位元素は Zn と入れ替わり DTPA と結合し腎臓から排泄される.</p> <p>禁忌: なし.</p>
プルシアンブルー ^{26,29)} Fe ₄ [Fe(CN) ₆] ₃	粉末 (500 mg/カプセル)	<p>3 g/日 (12 歳以上, 3 回に分けて), 1 g/日 (12 歳未満, 3 回に分けて) カプセルの経口投与 カプセルを開けて食物や液体に混ぜ摂取させる</p> <p>不溶性のプルシアンブルーはイオン交換, 吸着, 機械的トラッピングにより消化管内の放射性同位元素を取り込み糞便中に排泄する.</p> <p>禁忌: 本剤成分に対する過敏症の既往のある患者.</p>
炭酸水素ナトリウム ^{26,30,32)} NaHCO ₃	液体 (8.4%/20 ml)	<p>炭酸水素ナトリウムを 0.028 g/kg (体重)/分以下で総量 0.084 g を静脈投与 アルカリ性尿を維持するために血液ガス, 血液電解質, 尿 pH を確認しながら, 必要に応じた炭酸水素ナトリウム量を 0.028 g/kg (体重)/分以下の速度での静脈投与</p> <p>アルカリ性尿下でウラニルイオン (UO₂²⁺) から炭酸ウラニル錯体 (UO₂(HCO₃)⁺) 形成させることで尿細管への化学毒性を軽減させる.</p> <p>禁忌: ナトリウム摂取の制限を必要とする患者.</p>

ヨウ化カリウム ^{24,25,32)} KI	粉末	初めの 12 時間はヨウ化カリウム投与, 16.3 mg/回 (新生児), 32.5 mg/回 (生後 1 ヶ月~3 歳未満), 50 mg/回 (3 歳~13 歳未満), 100 mg/回 (13 歳~40 歳未満), 1 回/1 日: 医薬品ヨウ化カリウム粉末を適当量を精製水に溶解し, 経口投与
		2 日目からチアマゾールの経口投与に切り替える.
		ヨウ化カリウムの投与により安定ヨウ素の存在により放射性ヨウ素の濃度が相対的に減少し (希釈効果), また, ヨウ素過剰状態により (代謝阻害効果), 甲状腺へ取り込まれる放射性ヨウ素の濃度を減少させる.
		禁忌: ヨウ素過敏症の患者, 肺結核の患者.
チアマゾール ^{31,32)} C ₄ H ₆ N ₂ S	錠剤 5 mg	初めの 12 時間はヨウ化カリウム投与. 2 日目からチアマゾール投与 初期: 30 mg/日 (成人), 10~20 mg/日 (5 歳~10 歳未満), 20~30 mg/日 (10 歳~15 歳未満), 15~30 mg/日 (妊婦), 3 回に分けて経口投与 維持期: 5~10 mg/日, 2 回に分けて経口投与
		甲状腺のペルオキシダーゼを阻害し甲状腺ホルモンの合成を阻害し (代謝阻害効果), 甲状腺へ取り込まれる放射性ヨウ素の濃度を減少させる.
		禁忌: 本剤成分に対する過敏症の既往のある患者, 本剤使用後肝機能が悪化した患者.
乾燥水酸化アルミニウム ゲル ^{32,33)}	細粒	1~3 g/日 (成人), 3 回に分けて経口投与
		アルミニウムとの非選択的交換により消化管からの吸収が軽減される.
		禁忌: 透析療法を受けている患者.

*: 日本では 1,055 mg と記載されている (日本メジフィジックス).

²³⁹Pu の場合, ヒトでがんが発生する確証は未だ明確に得られていない³⁸⁾. しかしながら, 実験動物ではその吸入により肺腫瘍が誘発される^{39,40)}. 肺腫瘍の大部分は腺腫や腺がんなどであり扁平上皮がんは少ないという報告もある⁴¹⁾. ²³⁹Pu, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am などは骨親和性核種と分類されるように骨に局在化し骨腫瘍を誘発する知見が動物実験から得られている^{36,42)}. その多くは悪性の腫瘍である骨肉腫である. ²³⁹Pu の骨肉腫誘発性は ²⁴¹Am と比べ 3 倍ほど強い³⁶⁾. 骨親和性核種は骨基質のみならず骨内膜表面に分布するので周囲に

ある骨髄組織も内部照射されるが, α線放出性核種の場合, 骨髄性白血病などの造血系腫瘍の発生率は大きくないとされている^{43,44)}. ²³⁹Pu や ²⁴¹Am は, また肝臓親和性核種でもあり, 動物実験でこれらにより肝腫瘍が発生することが知られている³⁵⁾. 肝細胞がんは少なく, 胆管がん, 血管腫瘍が多い³⁵⁾. しかしながら, その発生率は骨肉腫に比較して低い^{40,44)}.

なお, ウランの体内への摂取の場合, 化学毒性が非常に強く数 mg の摂取で腎機能障害を引き起こす^{25,45)}. 濃縮 ²³⁵U でない場合, ウランは比放射

能が低いので放射線による人体への晩発影響が起る可能性は少ないと考えられる^{25,45)}。このため、ウランの内部被ばく患者の治療については重金属の化学毒性を低減させる治療も考慮しなければならず他の放射性核種の対応と異なることに留意しなければならない。

6-1. ICRP の考え方

ICRP は作業員について 5 年間で平均した場合の実効線量限度として年間 20 mSv を推奨しており、さらにどの年も実効線量が 50 mSv を超えないことと規定している¹¹⁾。一方、内部被ばくの放射線防護の視点より 20 mSv の預託実効線量に基づいた年摂取限度 (Annual Limit of Intake, ALI) を提案している¹⁸⁾。これは 1 年間に吸入、経口摂取または経皮吸入により取り込み、適切な線量限度に相当する預託線量を生じる放射性核種の量である²⁶⁾。この ALI の 10 倍以上の放射性核種の量の体内への摂取を認める場合、その内部被ばく患者の治療の開始を勧告することが提案されている²⁶⁾。しかしながら、一般公衆に対して ALI の概念は確立されていない。

6-2. 年線量限度に基づく考え方

放射線防護の視点から、作業員は年実効線量が 50 mSv を超えないこと、一方、一般公衆に対して 1 mSv を超えないことが規定されている²⁰⁾。これらの年線量限度 (ALI) を考慮するのも薬物治療の開始の一案かもしれない。しかしながら、ICRP を参考にすれば、10 mSv 未満の極低線量被ばくでは薬物治療は正当化されない介入レベルであると考えられる⁴⁶⁾。

6-3. リスクベネフィットバランスからの考え方

内部被ばく患者の薬物治療の開始についてリスクベネフィットバランスの視点から正当化される全身に対する放射線リスクである預託実効線量をここで考えてみたい。ここでは以下のリスクベネフィットバランスの式⁴⁷⁾を用い、この B が正になるとき治療の開始が正当化されることとする。

$$B = Y_0 - (Y + R + X + A_i + A_s - B_c)$$

B: あらゆる対策に関連する正味の便益

Y_0 : 対策を講じないことによる放射線の損害

Y: 対策を講じた場合に残存する放射線の損害

R: 防護対策を採ることにより生じる身体的リスク

X: 防護対策を実施するために必要な資源と努力

A_i : 防護対策により生じる個人の不安と混乱

A_s : 防護対策により生じる社会の混乱

B_c : 防護対策により得られる安心の便益

それぞれのファクタを以下のように設定する。

Y_0 : 直線しきい値なし (LNT) 仮説を採用する。全集団に対するがん罹患率を考慮したがんに関する損害リスク係数である $5.5 \times 10^{-5} \text{ mSv}^{-1}$ ²⁰⁾ を採用し、患者の内部被ばくが預託実効線量として D mSv であると設定する。これにより $Y_0 = D \text{ mSv} \times (5.5 \times 10^{-5} \text{ mSv}^{-1})$ となる。

Y: 治療により残存する放射線の損害は原則 0 であると考える。

R: 用いるそれぞれの薬剤の副作用の発生率、0.0082386 (Ca-DTPA, Zn-DTPA, プルシアンブルーの投与の場合、29 例 / 352 例で副作用が見られた^{27~29)} が解析にあたって母集団の数が小さいのでここでは不確実性係数 10 を考慮する), 6×10^{-4} (ヨウ化カリウム)⁴⁷⁾, 頻度不明 (チアマゾール, 炭酸水素ナトリウム, 乾燥水酸化アルミニウムゲル)^{30,31,33)} を合計した 0.0088386 を採用する。これらは適切な対応により非致死性の副作用である。

X: 構築された内部被ばく医療体制下で実施されるために新たに資源と努力は必要なく 0 と考える。

A_i : 個人の不安と混乱はないと考えられ 0 とする。

A_s : 社会の混乱はないと考えられ 0 とする。

B_c : 対策により得られる安心の便益の定量化は難しくここでは考慮しないこととする。

$B = 5.5 \times 10^{-5} \times D - 0.0088386 > 0$ より、 $D > 160.7$ となる。

よって 160.7 mSv を超える預託実効線量の時、治療の開始が正当化されると考えられる。

以上のように ICRP の考え方やリスクベネフィットバランスの考え方などから預託実効線量として 160.7 mSv ~ 200 mSv を超える内部被ばくの場合に内部被ばく患者の薬物治療の開始が正当化される可能性があると考えられる。しかしながらこれらは放射線を安全に管理する放射線防護の視点から考慮されたもので通常の診療の視点からではない。また、これらは内部被ばく患者を集団としてとらえたもので個々の患者に対するものではないことに十分留意する必要がある。このため薬物治療開始の正当化について目安とするも、個々の患者の薬物治療の実際の決定にあたっては、患者の体内に取り込まれた放射性核種は制御可能かどうか、また制御すべきものかどうか、さらに患者の年齢、健康状態、治療効果などを考慮し、医師によって総合的に判断されることが肝要であると考えられる。

また、診療にあたって内部被ばく患者は推測された放射性核種の摂取量と ICRP の実効線量係数を利用した預託実効線量が推定されることがある。しかしながら、実効線量係数は標準人と仮定された代謝モデルから導かれたものであり、それを利用した実効線量は一つの目安となり得るかもしれないが、個人線量の推測としても不確かさを有するものであることを十分に理解していなければならない。

7. 内部被ばく患者の薬物治療について

内部被ばく患者の薬物治療は経験的なものが多く、様々な治療方法が紹介されている。このため、薬物治療の必要な内部被ばく患者を診断した時に、薬物治療の最適化が欠かせない。国内で調達可能な薬剤で、可能な限り適用が認められている薬物治療を採択すべきである。現時点で最適と考えられる薬物治療について表 2~3 にまとめられている。薬物治療による低減が期待できる生体内の放射線量は、動物実験では 20~56.5%³⁴⁾、またヒトの場合、20~30% 程度と考えられ^{26,48)}、その期待される薬物治療効果は治療開始を決定する要因の一つとなり得る。

なお、複数の放射性核種による内部被ばく患者の薬物治療の場合、患者の全身状態などを踏まえて晩発性影響のリスクが大きい放射性核種からの治療の開始、薬物治療効果が大きいと期待される放射性核種を対象とした治療の開始などを考慮すべきであろう。

8. 内部被ばく患者の薬物治療の効果の判定と治療の終了の考え方について

8-1. 内部被ばく患者の薬物治療の効果の判定について

内部被ばく患者の治療効果は、1週間に1回程度の頻度で、患者の尿、便などの生物試料(検体)を採取し、そこで同定された放射性核種の種類と測定された放射線量の測定より放射性核種の排泄率の亢進効果についての評価がなされる²⁵⁾。患者の生物試料の測定は RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設ではなく高次被ばく医療機関で実施される。放射性物質を含む生物試料の施設間輸送方法などについてはあらかじめ検討しておくことが望ましい。α線放出性核種を検出する場合はα線スペクトロメトリ、β線放出性核種の場合は液体シンチレーションカウンタを用いて測定が実施される^{24,25)}。また、患者の状態によるが、1ヵ月に1回程度の頻度で、高次被ばく医療機関でのホールボディカウンタなどによる患者の体外計測による放射線軽減効果の評価も欠かせない。

8-2. 薬物治療の終了の考え方について

内部被ばく患者の薬物治療の終了に資する指針はない。医学的な視点から、1) 必要にして十分な治療効果が得られ治療目標が達成された場合、2) 治療効果がそれ以上期待されない場合、3) 尿や便などの生体試料に放射性核種の排泄を認めなくなった場合、などが考えられる。治療の中止にあたっては、重篤な副作用が発生した場合などが挙げられる。なお、患者が継続治療を望まない場合は、一般公衆への二次的内部被ばくの拡大などが懸念されるために医学的な視点に加えて一般公衆への放射線防護の視点から治療の中止の是非について慎重な判断が求められるものと考えられる。

薬物治療が終了した内部被ばく患者は速やかにネットワーク会議¹⁾を介して高次被ばく医療機関へ搬送され、そこで治療後の患者の経過観察などが実施されることが適切であると考えられる。また、RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく医療に係る経費については国などにより弁済されるのが適当であろう。

9. 核医学診療に係る医療関係者の人材育成と研修

RI 内用療法施設と仮設型内部被ばく患者治療施設で内部被ばく医療を適切に進めるにあたっては、核医学専門医や核医学専門技師に加えて RI 内用療法施設を主とした核医学診療に係る看護師などの医療関係者の協力が欠かせない。これら核医学診療に係る医療関係者には要請に応じて、内部被ばく医療に関する知識を有する専門家として、万一それが必要となったときには万全の対応が求められる。一般に、被ばく医療は現実に行われる頻度は低く、また、被ばく医療を専門とする医療関係者は多くはない²⁴⁾。このため、放射線防護および線量評価を含む内部被ばく医療全般について、一定水準以上の知識ならびに技能を備え、被ばくに関する心理的影響や不安への対応の方法を理解し、日本核医学会などによって準備された、RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設内で必要にして十分な内部被ばく医療を実施できるように適切なプログラム下で繰り返し実施される研修などによってよく訓練された人材を育成、確保することが望ましい。

10. まとめ

既存の RI 内用療法施設や仮設型内部被ばく患者治療施設での内部被ばく患者の診療の目的は、1) すでに治療が開始された内部被ばく患者の体内にある放射エネルギーを低減し、これから受けるであろうと予測される放射線量を軽減し、また、それにより健康に影響するかもしれない潜在的な将来の影響のリスクを減らすこと、2) 内部被ばく患者から排出される放射性物質などの放射線防護の視点から管理を行い一般公衆への二次的な被ばくの拡

大を防止することにある。原子力緊急事態における RI 内用療法施設の利用や仮設型内部被ばく患者治療施設の併用とともに、核医学施設などを活用したより実効性のある原子力緊急事態における内部被ばく医療のあり方の議論が期待される。

11. 参考文献

- 1) 渡邊直行, 佐藤弘之, 河原 浩, 佐々木康人: 原子力緊急事態における内部被ばく医療のための RI 内用療法施設利用と仮設型内部被ばく患者治療施設の併設に係る提言. 核医学 2011; 48: 121-137.
- 2) 軽水炉燃料のふるまい. 軽水炉燃料のふるまい編集委員会, (財) 原子力安全研究協会, 東京, 1998 年.
- 3) 原子力防災施設等の防災対策について. 内閣府原子力安全委員会, 1980 年 (2010 年 8 月一部改訂).
- 4) アイソトープ手帳 (11 版), (社) 日本アイソトープ協会, 東京, 2011 年.
- 5) *Handbook of Radioactivity Analysis*. L'Annunziata MF (ed), Academic Press, California, USA, 1998.
- 6) 人体放射能の除去技術 挙動と除染のメカニズム. 放射線医学総合研究所 (監修), 青木芳朗, 渡利一夫 (編), 講談社サイエンティフィック, 東京, 1996 年.
- 7) ICRP, 1975. Report on the Task Group on Reference Man. ICRP Publication 23.
- 8) ICRP, 1972. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 1), Ann ICRP 2 (3-4).
- 9) ICRP, 1988. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: An Addendum. ICRP Publication 30 (Part 4), Ann ICRP 19 (4).
- 10) ICRP, 1990. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides-part 1. ICRP Publication 56, Ann ICRP 20 (2).
- 11) ICRP, 1991b. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Ann ICRP 21 (1-3).
- 12) ICRP, 1994. Human Respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66, Ann ICRP 24 (1-3).
- 13) ICRP, 1992. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2 Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67, Ann ICRP 22 (3-4).
- 14) ICRP, 1994. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68, Ann ICRP 24 (4).
- 15) ICRP, 1995. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3 Ingestion

- Dose Coefficients. ICRP Publication 69, Ann ICRP 25 (1).
- 16) ICRP, 1995. Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection: The Skeleton. ICRP Publication 70, Ann ICRP 25 (2).
 - 17) ICRP, 1995. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides Part 5 Complication of ingestion and inhalation dose coefficients. ICRP Publication 72, Ann ICRP 26 (1).
 - 18) ICRP, 1997. Individual Monitoring for Internal Exposure of Workers (preface and glossary missing). ICRP Publication 78, Ann ICRP 27 (3-4).
 - 19) ICRP, 2002. Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89, Ann ICRP 32 (3-4).
 - 20) ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, Ann ICRP 37 (2-4).
 - 21) ICRP, 1995. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides Part 4 Inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71, Ann ICRP 25 (3-4).
 - 22) ICRP, 1983. Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions. ICRP Publication 38, Ann. ICRP 11-13.
 - 23) ICRP, 2006. Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 100, Ann ICRP 36 (1-2).
 - 24) 緊急被ばく医療のあり方について．内閣府原子力安全委員会，2001年(2008年10月一部改訂)。
 - 25) 緊急被ばく医療テキスト．青木芳朗，前川和彦(監修)，医療科学社，東京，2004年。
 - 26) ICRP, 2005. Protecting People against Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack. ICRP Publication 96, Ann ICRP 35 (1).
 - 27) Product information: Pentetate calcium trisodium injection. Hameln pharmaceuticals, Hameln, Germany, 2004.
 - 28) Product information: Pentetate zin trisodium injection. Hameln pharmaceuticals, Hameln, Germany, 2004.
 - 29) Product information: Radiogardase® (Prussian blue insoluble capsules). Heyltx corporation, Texas, USA, 2011.
 - 30) 医薬品インタビューフォーム．日本薬局方，炭酸水素ナトリウム注射液(8.4%)，日本病院薬剤師会，2009年。
 - 31) 医薬品インタビューフォーム 抗甲状腺剤．日本薬局方，チアマゾール錠，日本病院薬剤師会，2010年。
 - 32) *Medical management of radiation accidents*. Second Edition. Gusev IA, Guskova AK, Mettler FA (ed). CRC Press, Florida, USA, 2001.
 - 33) 医薬品インタビューフォーム 制酸剤．日本薬局方，乾燥水酸化アルミニウムゲル細粒，日本病院薬剤師会，2008年。
 - 34) Watanabe N, Tanada S, Sasaki Y: Effect of calcium trisodium DTPA in rats with puncture wound contaminated by ⁹⁰Y-chloride. *Radiation Protection Dosimetry* 2005; 114: 509-513.
 - 35) Taylor GN, Mays CW, Wrenn ME, Shafestan G, Lloyd RD: Incidence of Liver Tumors in Beagles with Body Burdens of ²³⁹Pu or ²⁴¹Am. In *Life-Span Radiation Effects Studies in Animals: What Can They Tell/Us?* Thompson RC, MahaWey JA (ed). Office of Scientific and Technical Information, US Department of Energy, USA, 1986: 268-285.
 - 36) Mays CW, Lloyd RD, Taylor GN, Wrenn ME. Cancer incidence and lifespan vs. α -particle dose in beagles. *Health Phys* 1987; 52: 617-624.
 - 37) McClellan RO, Boecker BB, Hahn FF, Muggenburg BA: Lovelace ITRI studies on the toxicity of inhaled radionuclides in beagle dogs. In *Life-Span Radiation Effects Studies in Animals: What Can They Tell/Us?* Thompson RC, MahaWey JA (ed). Office of Scientific and Technical Information, US Department of Energy, USA, 1986: 74-96.
 - 38) 平成13年版原子力安全白書．内閣府原子力安全委員会，2002年。
 - 39) Sanders CL, Lauhula KE, McDonald KE: Lifespan studies in rats exposed to ²³⁹PuO₂ aerosol. III Survival and lung tumors. *Int J Radiat Biol* 1993; 64: 417-430.
 - 40) Dagle GE, Park JF, Gilbert ES, Weller RE: Risk Estimates for Lung Tumours from Inhaled ²³⁹PuO₂, ²³⁸PuO₂, and ²³⁹Pu(NO₃)₄ in Beagle Dogs. *Radiat Protect Dosimetry* 1989; 26: 173-176.
 - 41) 小木曾洋一: III リスク評価モデル 内部被曝による発がん．放医研シンポジウムシリーズNo.26 放射線生物影響とリスクのモデル化，1995年: 155-162頁。
 - 42) Wrenn ME, Taylor GN, Stevens W, Mays CW, Jee WSS, Lloyd RD, et al: DOE life-span radiation effects studies in experimental animals at University of Utah Division of Radiology. In *Life-Span Radiation Effects Studies in Animals: What Can They Tell/Us?* Thompson RC, MahaWey JA (ed). Office of Scientific and Technical Information, US Department of Energy, USA, 1986: 32-52.
 - 43) Humphreys ER, Loutit JF, Stones VA: The induction by ²³⁹Pu of myeloid leukemia and osteosarcoma in female CBA mice. *Int J Radiat Biol* 1989; 51: 331-339.
 - 44) Loutit JF, Carr TEF: Lymphoid tumors and leukemia induced in mice by bone-seeking radionuclides. *Int J Radiat Biol* 1978; 33: 245-263.
 - 45) ICRP, 1997. General Principles for the Radiation Protection of Workers. ICRP Publication 75, Ann ICRP 27 (1).

- 46) ICRP, 1999. Protection of the Public in Situations of Prolonged Radiation Exposure. ICRP Publication 82, Ann ICRP 29 (1-2).
- 47) 原子力災害時における安定ヨウ素剤予防服用の考え方について．内閣府原子力安全委員会，2002年．
- 48) Fritsch P, Grappin L, Guillermin AM, Fottorino R, Ruffin M, Mièle A: Modeling of bioassay data from a Pu wound treated by repeated DTPA perfusions: Biokinetics and dosimetric approaches. *Radiation Protection Dosimetry* 2007; 127: 120-124.

Summary

Medical Management of Patients Internally Contaminated with Radionuclides in Radionuclide Therapy Facility and Assembly-Temporary Type Therapeutic Facility in Nuclear Emergency

Naoyuki WATANABE* and Yasuhito SASAKI**

**Gunma Prefectural College of Health Sciences*

***Japan Radioisotope Association*

The utilization of radionuclide therapy facility and temporary therapeutic facility has been proposed for securing the effectiveness of the higher medical management of patients internally contaminated in nuclear emergency. However it is not then practical to conduct all of the medical management. The purpose of the medical management of contaminated patients in the facilities is to continue the medical treatment of the patients who already undergo medication in order to decrease the amount of radionuclides inside of the bodies and reduce possible cancer risks and, from the view point of radiation protection, to prevent the prolifera-

tion of radionuclides from the patients and the expansion of secondary radiation exposure from them to the general public. It is here described a basic idea for medical management for contaminated patients in the radionuclide therapy facility and temporary therapeutic facility to complement the current medical management scheme in nuclear emergency.

Key words: Medical management in nuclear emergency, Medical treatment for internal contamination, Medication, Radionuclide therapy facility, Assembly-temporary type therapeutic facility.

付属資料 1.1 経口摂取の時に考えられる放射性核種の化学形^{14,15,17)}

核種	作業者	一般公衆
¹³⁷ Cs	すべての化合物	すべての化合物
¹³¹ I	すべての化合物	すべての化合物
⁹⁰ Sr	不特定の化合物 チタン酸ストロンチウム	すべての化合物
²⁴¹ Am	すべての化合物	すべての化合物
²⁴⁴ Cm	すべての化合物	すべての化合物
²³⁹ Pu	不特定の化合物 硝酸塩 不溶性酸化物	すべての化合物
²³⁴ U	不特定の化合物 大部分の4価の化合物, たとえば UO ₂ , U ₃ O ₈ , UF ₄	すべての化合物
²³⁵ U	不特定の化合物 大部分の4価の化合物, たとえば UO ₂ , U ₃ O ₈ , UF ₄	すべての化合物
²³⁸ U	不特定の化合物 大部分の4価の化合物, たとえば UO ₂ , U ₃ O ₈ , UF ₄	すべての化合物

付属資料 1.2 放射性核種の経口摂取時の吸収係数 (f₁)^{14,15,17)}

核種	作業者	公衆 (3ヶ月)	公衆 (1歳)	公衆 (5歳)	公衆 (10歳)	公衆 (15歳)	公衆 (成人)
¹³⁷ Cs	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
¹³¹ I	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
⁹⁰ Sr	0.300 0.010	0.600	0.400	0.400	0.400	0.400	0.300
²⁴¹ Am	5.0×10^{-4}	0.005	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
²⁴⁴ Cm	5.0×10^{-4}	0.005	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
²³⁹ Pu	5.0×10^{-4} 1.0×10^{-5} 1.0×10^{-4}	0.005	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
²³⁴ U	0.020 0.002	0.040	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
²³⁵ U	0.020 0.002	0.040	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
²³⁸ U	0.020 0.002	0.040	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020

公衆：3ヶ月児，生後から3ヶ月；1歳，1～2歳未満；5歳，2～7歳未満；10歳，7～12歳未満；15歳，12～17歳未満；成人，17歳以上

付属資料 1.3 放射性核種の経口摂取時の内部被ばくの計算のための実効線量係数 (Sv/Bq)^{14,15,17)}

核種	作業者	公衆 (3 ヶ月)	公衆 (1 歳)	公衆 (5 歳)	公衆 (10 歳)	公衆 (15 歳)	公衆 (成人)
¹³⁷ Cs	1.3×10^{-8}	2.1×10^{-8}	1.2×10^{-8}	9.6×10^{-9}	1.0×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}
¹³¹ I	2.2×10^{-8}	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	5.2×10^{-8}	3.4×10^{-8}	2.2×10^{-8}
⁹⁰ Sr	2.8×10^{-8} 2.7×10^{-9}	2.3×10^{-7}	7.3×10^{-8}	4.7×10^{-8}	6.0×10^{-8}	8.0×10^{-8}	2.8×10^{-8}
²⁴¹ Am	2.0×10^{-7}	3.7×10^{-6}	3.7×10^{-7}	2.7×10^{-7}	2.2×10^{-7}	2.0×10^{-7}	2.0×10^{-7}
²⁴⁴ Cm	1.2×10^{-7}	2.9×10^{-6}	2.9×10^{-7}	1.9×10^{-7}	1.4×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.2×10^{-7}
²³⁹ Pu	2.5×10^{-7} 9.0×10^{-9} 5.3×10^{-8}	4.2×10^{-6}	4.2×10^{-7}	3.3×10^{-7}	2.7×10^{-7}	2.4×10^{-7}	2.5×10^{-7}
²³⁴ U	4.9×10^{-8} 8.3×10^{-9}	3.7×10^{-7}	1.3×10^{-7}	8.8×10^{-8}	7.4×10^{-8}	7.4×10^{-8}	4.9×10^{-8}
²³⁵ U	4.6×10^{-8} 8.3×10^{-9}	3.5×10^{-7}	1.3×10^{-7}	8.5×10^{-8}	7.1×10^{-8}	7.0×10^{-8}	4.7×10^{-8}
²³⁸ U	4.4×10^{-8} 7.6×10^{-9}	3.4×10^{-7}	1.2×10^{-7}	8.0×10^{-8}	6.8×10^{-8}	6.7×10^{-8}	4.5×10^{-8}

公衆：3 ヶ月児，生後から 3 ヶ月；1 歳，1～2 歳未満；5 歳，2～7 歳未満；10 歳，7～12 歳未満；15 歳，12～17 歳未満；成人，17 歳以上

付属資料 2.1 吸入摂取時の放射性核種の化学形^{14,15,17)}

核種	作業者	一般公衆
¹³⁷ Cs	F: すべての化合物	F,M,S: 特定されていない
¹³¹ I	F: すべての化合物 元素状ヨウ素	F: すべての化合物 元素状ヨウ素
⁹⁰ Sr	F: 不特定の化合物 S: チタン酸ストロンチウム	F,M: 特定されていない S: チタン酸ストロンチウム
²⁴¹ Am	M: すべての化合物	F,M,S: 特定されていない
²⁴⁴ Cm	M: すべての化合物	F,M,S: 特定されていない
²³⁹ Pu	M: 不特定の化合物 S: 不溶性酸化物	F,M: 特定されていない S: 不溶性酸化物
²³⁴ U	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈
²³⁵ U	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈
²³⁸ U	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈	F: 大部分の 6 価の化合物, たとえば UF ₆ , UO ₂ F ₂ および UO ₂ (NO ₃) ₂ M: 難溶性の化合物, たとえば UO ₃ , UF ₄ , UCl ₄ および体部分の他の 6 価化合物 S: 非常に不溶性の化合物, たとえば UO ₂ , および U ₃ O ₈

F: タイプ F 物質, 呼吸気道から血液に容易に吸収される沈着物質 (速い吸収速度), M: タイプ M 物質, 呼吸気道から血液へ中位の速度で吸収される沈着物質 (中位の吸収速度), S: タイプ S 物質, 呼吸気道中で比較的不溶性の沈着物質 (遅い吸収速度) .

付属資料 2.2 放射性核種の吸入摂取時の内部被ばくの計算のための実効線量係数 (Sv/Bq)^{14,15,17)}

核種		作業者	公衆 (3 ヶ月)	公衆 (1 歳)	公衆 (5 歳)	公衆 (10 歳)	公衆 (15 歳)	公衆 (成人)
¹³⁷ Cs	F	6.7×10^{-9}	8.8×10^{-9}	5.4×10^{-9}	3.6×10^{-9}	3.7×10^{-9}	4.4×10^{-9}	4.6×10^{-9}
	M		3.6×10^{-8}	2.9×10^{-8}	1.8×10^{-8}	1.3×10^{-8}	1.1×10^{-8}	9.7×10^{-9}
	S		1.1×10^{-7}	1.0×10^{-7}	7.0×10^{-8}	4.8×10^{-8}	4.2×10^{-8}	3.9×10^{-8}
¹³¹ I	F	$1.1 \times 10^{-8*}$	7.2×10^{-8}	7.2×10^{-8}	3.7×10^{-8}	1.9×10^{-8}	1.1×10^{-8}	7.4×10^{-9}
	M		2.2×10^{-8}	1.5×10^{-8}	8.2×10^{-9}	4.7×10^{-9}	3.4×10^{-9}	2.4×10^{-9}
	S		8.8×10^{-9}	6.2×10^{-9}	3.5×10^{-9}	2.4×10^{-9}	2.0×10^{-9}	1.6×10^{-9}
⁹⁰ Sr	F	3.0×10^{-8}	1.3×10^{-7}	5.2×10^{-8}	3.1×10^{-8}	4.1×10^{-8}	5.3×10^{-8}	2.4×10^{-8}
	M		1.5×10^{-7}	1.1×10^{-7}	6.5×10^{-8}	5.1×10^{-8}	5.0×10^{-8}	3.6×10^{-8}
	S		7.7×10^{-8}	4.0×10^{-7}	2.7×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.6×10^{-7}	1.6×10^{-7}
²⁴¹ Am	F	2.7×10^{-5}	1.8×10^{-4}	1.8×10^{-4}	1.2×10^{-4}	1.0×10^{-4}	9.2×10^{-5}	9.6×10^{-5}
	M		7.3×10^{-5}	6.9×10^{-5}	5.1×10^{-5}	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	4.2×10^{-5}
	S		4.6×10^{-5}	4.0×10^{-5}	2.7×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.6×10^{-5}
²⁴⁴ Cm	F	1.7×10^{-5}	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}	8.3×10^{-5}	6.1×10^{-5}	5.3×10^{-5}	5.7×10^{-5}
	M		6.2×10^{-5}	5.7×10^{-5}	3.7×10^{-5}	2.7×10^{-5}	2.6×10^{-5}	2.7×10^{-5}
	S		4.4×10^{-5}	3.8×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.5×10^{-5}	1.3×10^{-5}
²³⁹ Pu	F	8.3×10^{-6}	2.1×10^{-4}	2.0×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.2×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-4}
	M		8.0×10^{-5}	7.7×10^{-5}	6.0×10^{-5}	4.8×10^{-5}	4.7×10^{-5}	5.0×10^{-5}
	S		4.3×10^{-5}	3.9×10^{-5}	2.7×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.6×10^{-5}
²³⁴ U	F	6.4×10^{-7}	2.1×10^{-6}	1.4×10^{-6}	9.0×10^{-7}	8.0×10^{-7}	8.2×10^{-7}	5.6×10^{-7}
	M		1.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}	7.0×10^{-6}	4.8×10^{-6}	4.2×10^{-6}	3.5×10^{-6}
	S		3.3×10^{-5}	2.9×10^{-5}	1.9×10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}	9.4×10^{-6}
²³⁵ U	F	6.0×10^{-7}	2.0×10^{-6}	1.3×10^{-6}	8.5×10^{-7}	7.5×10^{-7}	7.7×10^{-7}	5.2×10^{-7}
	M		1.3×10^{-5}	1.0×10^{-5}	6.3×10^{-6}	4.3×10^{-6}	3.7×10^{-6}	3.1×10^{-6}
	S		3.0×10^{-5}	2.6×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.1×10^{-5}	9.2×10^{-6}	8.5×10^{-6}
²³⁸ U	F	5.8×10^{-7}	1.9×10^{-6}	1.3×10^{-6}	8.2×10^{-7}	7.3×10^{-7}	7.4×10^{-7}	5.0×10^{-7}
	M		1.2×10^{-5}	9.4×10^{-6}	5.9×10^{-6}	4.0×10^{-6}	3.4×10^{-6}	2.9×10^{-6}
	S		2.9×10^{-5}	2.5×10^{-5}	1.6×10^{-5}	1.0×10^{-5}	8.7×10^{-6}	8.0×10^{-6}

公衆：3 ヶ月児，生後から 3 ヶ月；1 歳，1~2 歳未満；5 歳，2~7 歳未満；10 歳，7~12 歳未満；15 歳，12~17 歳未満；成人，17 歳以上

F: タイプ F 物質，呼吸気道から血液に容易に吸収される沈着物質 (速い吸収速度)，M: タイプ M 物質，呼吸気道から血液へ中位の速度で吸収される沈着物質 (中位の吸収速度)，S: タイプ S 物質，呼吸気道中で比較的不溶性の沈着物質 (遅い吸収速度)．*: エアロゾル，ヨウ素-131 蒸気の場合は 2.0×10^{-8} 。

付属資料 3.1 ^{90}Sr の吸入摂取における予測値
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	タイプ F	タイプ S
	一日当たりの 尿中排泄量(率)	一日当たりの 尿中排泄量
1	6.8×10^{-2}	8.1×10^{-4}
2	2.3×10^{-2}	3.4×10^{-4}
3	1.6×10^{-2}	2.2×10^{-4}
4	1.2×10^{-2}	1.6×10^{-4}
5	9.2×10^{-3}	1.3×10^{-4}
6	7.5×10^{-3}	1.1×10^{-4}
7	6.3×10^{-3}	9.0×10^{-5}
8	5.4×10^{-3}	7.7×10^{-5}
9	4.7×10^{-3}	6.8×10^{-5}
10	4.1×10^{-3}	6.1×10^{-5}

付属資料 3.2 ^{90}Sr の経口摂取における予測値
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	$f_1 = 0.300$	$f_1 = 0.010$
	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 尿中排泄量
1	5.6×10^{-2}	1.8×10^{-3}
2	2.2×10^{-2}	7.6×10^{-4}
3	1.4×10^{-2}	4.9×10^{-4}
4	1.1×10^{-2}	3.6×10^{-4}
5	8.3×10^{-3}	2.8×10^{-4}
6	6.8×10^{-3}	2.3×10^{-4}
7	5.7×10^{-3}	1.9×10^{-4}
8	4.8×10^{-3}	1.6×10^{-4}
9	4.2×10^{-3}	1.4×10^{-4}
10	3.7×10^{-3}	1.2×10^{-4}

付属資料 3.3 ^{131}I の吸入摂取における予測値(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	タイプ F		蒸気	
	甲状腺 (残留率)	一日当たりの 尿中排泄量	甲状腺	一日当たりの 尿中排泄量
1	1.2×10^{-1}	2.8×10^{-1}	2.3×10^{-1}	5.3×10^{-1}
2	1.2×10^{-1}	2.3×10^{-2}	2.2×10^{-1}	4.3×10^{-2}
3	1.1×10^{-1}	1.4×10^{-3}	2.0×10^{-1}	2.5×10^{-3}
4	9.9×10^{-2}	1.5×10^{-4}	1.9×10^{-1}	2.7×10^{-4}
5	9.0×10^{-2}	8.9×10^{-5}	1.7×10^{-1}	1.7×10^{-4}
6	8.2×10^{-2}	9.6×10^{-5}	1.5×10^{-1}	1.8×10^{-4}
7	7.4×10^{-2}	1.0×10^{-4}	1.4×10^{-1}	1.9×10^{-4}
8	6.8×10^{-2}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-1}	2.0×10^{-4}
9	6.2×10^{-2}	1.1×10^{-4}	1.2×10^{-1}	2.1×10^{-4}
10	5.6×10^{-2}	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-1}	2.1×10^{-4}

付属資料 3.4

^{131}I の経口摂取における予測値
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	甲状腺	一日当たりの 尿中排泄量
1	2.5×10^{-1}	5.8×10^{-1}
2	2.5×10^{-1}	5.1×10^{-2}
3	2.2×10^{-1}	3.0×10^{-3}
4	2.0×10^{-1}	3.1×10^{-4}
5	1.9×10^{-1}	1.8×10^{-4}
6	1.7×10^{-1}	2.0×10^{-4}
7	1.5×10^{-1}	2.1×10^{-4}
8	1.4×10^{-1}	2.2×10^{-4}
9	1.3×10^{-1}	2.3×10^{-4}
10	1.2×10^{-1}	2.3×10^{-4}

付属資料 3.5 ^{137}Cs の吸入摂取における予測量
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	タイプ F	
	全身 (残留率)	一日当たりの 尿中排泄量
1	6.0×10^{-1}	7.9×10^{-3}
2	5.0×10^{-1}	1.1×10^{-2}
3	4.6×10^{-1}	8.8×10^{-3}
4	4.4×10^{-1}	6.8×10^{-3}
5	4.3×10^{-1}	5.4×10^{-3}
6	4.3×10^{-1}	4.5×10^{-3}
7	4.2×10^{-1}	3.8×10^{-3}
8	4.2×10^{-1}	3.3×10^{-3}
9	4.1×10^{-1}	2.9×10^{-3}
10	4.1×10^{-1}	2.6×10^{-3}

付属資料 3.6 ^{137}Cs の経口摂取における予測値
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	経口摂取	
	全身	一日当たりの 尿中排泄量
1	9.8×10^{-1}	1.6×10^{-2}
2	9.5×10^{-1}	2.3×10^{-2}
3	9.3×10^{-1}	1.8×10^{-2}
4	9.1×10^{-1}	1.4×10^{-2}
5	8.9×10^{-1}	1.1×10^{-2}
6	8.8×10^{-1}	9.2×10^{-3}
7	8.7×10^{-1}	7.8×10^{-3}
8	8.6×10^{-1}	6.7×10^{-3}
9	8.5×10^{-1}	6.0×10^{-3}
10	8.4×10^{-1}	5.5×10^{-3}

付属資料 3.7 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U の吸入摂取における予測量 (摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	タイプ F	タイプ M		タイプ S		
	一日当たりの 尿中排泄量	肺 (残留率)*	一日当たりの 尿中排泄量	肺	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	1.8×10^{-1}	5.8×10^{-2}	2.3×10^{-2}	6.4×10^{-2}	7.0×10^{-4}	1.1×10^{-1}
2	6.4×10^{-3}	5.6×10^{-2}	1.1×10^{-3}	6.3×10^{-2}	4.4×10^{-5}	1.6×10^{-1}
3	5.1×10^{-3}	5.5×10^{-2}	8.5×10^{-4}	6.2×10^{-2}	2.6×10^{-5}	8.4×10^{-2}
4	4.6×10^{-3}	5.4×10^{-2}	7.9×10^{-4}	6.1×10^{-2}	2.4×10^{-5}	3.5×10^{-2}
5	4.2×10^{-3}	5.3×10^{-2}	7.3×10^{-4}	6.1×10^{-2}	2.2×10^{-5}	1.4×10^{-2}
6	3.8×10^{-3}	5.3×10^{-2}	6.9×10^{-4}	6.0×10^{-2}	2.0×10^{-5}	5.7×10^{-3}
7	3.5×10^{-3}	5.2×10^{-2}	6.5×10^{-4}	6.0×10^{-2}	1.9×10^{-5}	2.5×10^{-3}
8	3.2×10^{-3}	5.1×10^{-2}	6.1×10^{-4}	5.9×10^{-2}	1.8×10^{-5}	1.3×10^{-3}
9	2.9×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.7×10^{-4}	5.8×10^{-2}	1.7×10^{-5}	8.2×10^{-4}
10	2.7×10^{-3}	5.0×10^{-2}	5.4×10^{-4}	5.8×10^{-2}	1.6×10^{-5}	6.5×10^{-4}

*肺モニタリングは ^{235}U だけに利用できる。

付属資料 3.8
 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U の経口摂取における予測量
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	$f_1 = 0.02$	$f_1 = 0.002$
	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 尿中排泄量
1	1.3×10^{-2}	1.3×10^{-3}
2	6.9×10^{-4}	7.0×10^{-5}
3	3.7×10^{-4}	3.7×10^{-5}
4	3.3×10^{-4}	3.3×10^{-5}
5	3.0×10^{-4}	3.0×10^{-5}
6	2.7×10^{-4}	2.7×10^{-5}
7	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-5}
8	2.3×10^{-4}	2.3×10^{-5}
9	2.1×10^{-4}	2.1×10^{-5}
10	1.9×10^{-4}	1.9×10^{-5}

付属資料 3.9 ^{239}Pu の吸入摂取における予測量 (摂取量 Bq 当たりの Bq^{18})

摂取後の 時間 (日)	タイプ M			タイプ S		
	肺	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量	肺	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	5.8×10^{-2}	2.3×10^{-4}	1.1×10^{-1}	6.4×10^{-2}	2.3×10^{-6}	1.1×10^{-1}
2	5.6×10^{-2}	1.3×10^{-4}	1.5×10^{-1}	6.3×10^{-2}	1.4×10^{-6}	1.6×10^{-1}
3	5.5×10^{-2}	7.8×10^{-5}	8.0×10^{-2}	6.2×10^{-2}	8.3×10^{-7}	8.4×10^{-2}
4	5.4×10^{-2}	5.3×10^{-5}	3.4×10^{-2}	6.1×10^{-2}	5.9×10^{-7}	3.5×10^{-2}
5	5.3×10^{-2}	3.9×10^{-5}	1.3×10^{-2}	6.1×10^{-2}	4.5×10^{-7}	1.4×10^{-2}
6	5.3×10^{-2}	3.0×10^{-5}	5.4×10^{-3}	6.0×10^{-2}	3.7×10^{-7}	5.7×10^{-3}
7	5.2×10^{-2}	2.4×10^{-5}	2.3×10^{-3}	6.0×10^{-2}	3.1×10^{-7}	2.5×10^{-3}
8	5.1×10^{-2}	2.0×10^{-5}	1.2×10^{-3}	5.9×10^{-2}	2.7×10^{-7}	1.3×10^{-3}
9	5.0×10^{-2}	1.7×10^{-5}	7.6×10^{-4}	5.8×10^{-2}	2.4×10^{-7}	8.2×10^{-4}
10	5.0×10^{-2}	1.5×10^{-5}	5.8×10^{-4}	5.8×10^{-2}	2.3×10^{-7}	6.5×10^{-4}

付属資料 3.10 ^{239}Pu の経口摂取における予測値 (摂取量 Bq 当たりの Bq^{18})

摂取後の 時間 (日)	$f_1 = 5 \times 10^{-4}$		$f_1 = 1 \times 10^{-4}$		$f_1 = 1 \times 10^{-5}$	
	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	3.4×10^{-6}	2.8×10^{-1}	6.7×10^{-7}	2.8×10^{-1}	6.7×10^{-8}	2.8×10^{-1}
2	2.6×10^{-6}	3.9×10^{-1}	5.2×10^{-7}	3.9×10^{-1}	5.2×10^{-8}	3.9×10^{-1}
3	1.4×10^{-6}	2.0×10^{-1}	2.9×10^{-7}	2.0×10^{-1}	2.9×10^{-8}	2.0×10^{-1}
4	9.3×10^{-7}	8.1×10^{-2}	1.9×10^{-7}	8.1×10^{-2}	1.9×10^{-8}	8.1×10^{-2}
5	6.5×10^{-7}	3.1×10^{-2}	1.3×10^{-7}	3.1×10^{-2}	1.3×10^{-8}	3.1×10^{-2}
6	4.7×10^{-7}	1.2×10^{-2}	9.4×10^{-8}	1.2×10^{-2}	9.4×10^{-9}	1.2×10^{-2}
7	3.6×10^{-7}	4.4×10^{-3}	7.1×10^{-8}	4.4×10^{-3}	7.1×10^{-9}	4.4×10^{-3}
8	2.8×10^{-7}	1.6×10^{-3}	5.5×10^{-8}	1.6×10^{-3}	5.5×10^{-9}	1.6×10^{-3}
9	2.2×10^{-7}	6.0×10^{-4}	4.4×10^{-8}	6.0×10^{-4}	4.4×10^{-9}	6.0×10^{-4}
10	1.8×10^{-7}	2.2×10^{-4}	3.6×10^{-8}	2.2×10^{-4}	3.6×10^{-9}	2.2×10^{-4}

付属資料 3.11 ^{241}Am の吸入摂取における予測値 (摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間 (日)	タイプ M			
	肺	骨格 (残留率)	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	5.8×10^{-2}	7.5×10^{-3}	1.8×10^{-3}	1.1×10^{-1}
2	5.6×10^{-2}	8.3×10^{-3}	2.3×10^{-4}	1.5×10^{-1}
3	5.5×10^{-2}	8.6×10^{-3}	1.3×10^{-4}	8.0×10^{-2}
4	5.4×10^{-2}	8.8×10^{-3}	9.0×10^{-5}	3.3×10^{-2}
5	5.3×10^{-2}	8.9×10^{-3}	7.2×10^{-5}	1.3×10^{-2}
6	5.3×10^{-2}	9.1×10^{-3}	6.3×10^{-5}	5.3×10^{-3}
7	5.2×10^{-2}	9.2×10^{-3}	5.8×10^{-5}	2.3×10^{-3}
8	5.1×10^{-2}	9.3×10^{-3}	5.4×10^{-5}	1.2×10^{-3}
9	5.0×10^{-2}	9.4×10^{-3}	5.1×10^{-5}	7.4×10^{-4}
10	5.0×10^{-2}	9.4×10^{-3}	4.9×10^{-5}	5.7×10^{-4}

付属資料 3.12 ^{241}Am の経口摂取における予測値
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間 (日)	経口摂取		
	骨格	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	1.3×10^{-4}	3.0×10^{-5}	2.8×10^{-1}
2	1.4×10^{-4}	4.6×10^{-6}	3.9×10^{-1}
3	1.5×10^{-4}	2.2×10^{-6}	2.0×10^{-1}
4	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-6}	8.1×10^{-2}
5	1.5×10^{-4}	9.5×10^{-7}	3.1×10^{-2}
6	1.5×10^{-4}	7.6×10^{-7}	1.2×10^{-2}
7	1.5×10^{-4}	6.6×10^{-7}	4.4×10^{-3}
8	1.5×10^{-4}	5.9×10^{-7}	1.6×10^{-3}
9	1.5×10^{-4}	5.4×10^{-7}	6.0×10^{-4}
10	1.5×10^{-4}	4.9×10^{-7}	2.2×10^{-4}

付属資料 3.13 ^{244}Cm の吸入摂取における予測量
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	経口摂取		
	肺	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	5.8×10^{-2}	1.8×10^{-3}	1.1×10^{-1}
2	5.6×10^{-2}	2.3×10^{-4}	1.5×10^{-1}
3	5.5×10^{-2}	1.3×10^{-4}	8.0×10^{-2}
4	5.4×10^{-2}	9.0×10^{-5}	3.3×10^{-2}
5	5.3×10^{-2}	7.2×10^{-5}	1.3×10^{-2}
6	5.3×10^{-2}	6.3×10^{-5}	5.3×10^{-2}
7	5.2×10^{-2}	5.8×10^{-5}	2.3×10^{-3}
8	5.1×10^{-2}	5.4×10^{-5}	1.2×10^{-3}
9	5.0×10^{-2}	5.1×10^{-5}	7.4×10^{-4}
10	5.0×10^{-2}	4.9×10^{-5}	5.7×10^{-4}

付属資料 3.14 ^{244}Cm の経口摂取における予測量
(摂取量 Bq 当たりの Bq)¹⁸⁾

摂取後の 時間(日)	経口摂取	
	一日当たりの 尿中排泄量	一日当たりの 糞中排泄量
1	3.0×10^{-5}	2.8×10^{-1}
2	4.6×10^{-6}	3.9×10^{-1}
3	2.2×10^{-6}	2.0×10^{-1}
4	1.3×10^{-6}	8.1×10^{-2}
5	9.5×10^{-7}	3.1×10^{-2}
6	7.6×10^{-7}	1.2×10^{-2}
7	6.6×10^{-7}	4.4×10^{-3}
8	5.9×10^{-7}	1.6×10^{-3}
9	5.4×10^{-7}	6.0×10^{-4}
10	4.9×10^{-7}	2.2×10^{-4}