

# プルトニウムを燃料とする原子炉の立地評価上 必要なプルトニウムに関するめやす線量について

昭和56年 7月20日  
原子力安全委員会決定

一部改訂 昭和58年 5月26日 原子力安全委員会  
一部改訂 平成元年 3月27日 原子力安全委員会  
一部改訂 平成13年 3月29日 原子力安全委員会

## 1. 「めやす線量」の再評価の必要性

原子力委員会は、昭和44年11月13日付けで、「プルトニウムに関するめやす線量について」を指針として定めた。これは、動力炉安全基準専門部会が、同月11日付けで原子力委員会に提出した「プルトニウムを燃料とする原子炉の立地評価上必要なプルトニウムに関するめやす線量について」(以下、昭和44年指針という。)を妥当と認めたものである。

原子炉安全基準専門部会は、昭和54年9月より昭和44年指針を再評価する作業を開始した。本報告書は、その結果を述べたものである。

昭和44年指針は、当時において入手し得る科学的情報に基づいて、慎重な検討・考察を経て作成されたものであり、今日まで十分にその役割を果たして来た。

昭和56年において、昭和44年指針を再評価する作業を行った理由は、次の3点である。

- (1) 昭和44年指針において、「適当な時期に本めやす線量を再検討する必要があると考える。」と述べられている。
- (2) 昭和44年指針以降、プルトニウムおよびその他の放射性物質に関する若干の新しい生物学的知見が得られ、また、プルトニウムに関するめやす線量の検討に役立つ原子炉技術に関する経験が増えた。
- (3) 国連科学委員会(以下、UNSCEARと略称する。)国際放射線防護委員会(以下、ICRPと略称する。)その他のこれに準ずる国際的機関において行われた、放射線被ばくによる人体への影響の評価に関する作業の成果が、昭和44年指針以降も公表されている。

昭和56年の指針見直し以来、ICRP 1977年勧告の法令への取り入れ、ICRP Publication 48でのアクチニド核種の代謝データの改訂の反映による見直しがなされてきたが、今回ICRP 1990年勧告(Publication 60)の法令への取り入れを反映し、本指針のうち同勧告に係わる部分を再度見直した。

## 2. 本報告でいう「めやす線量」とは

原子炉の立地審査に当たっては、公衆の安全を確保するため、原子炉と公衆が居住する

区域との間に「ある適当な距離」を保つことになっている。

本報告書でいう「めやす線量」とは、プルトニウムを燃料とする原子炉の立地審査に際して、プルトニウムにかかわる「ある適当な距離」を判断する際のめやすとするものである。

本報告書に書かれている「めやす線量」の数値を用いる場合は、その適用範囲を逸脱することのないように注意しなければならない。この数値を、プルトニウムを燃料としない原子炉および原子炉以外の施設の立地審査に適用すべきではない。また、事故時においてとられる措置に関する基準として用いることも避けるべきである。

### 3．再評価作業に際しての基本方針

「めやす線量」の再評価作業にあたって、当部会がとった基本方針は次の通りである。

- (1) - 放射体が人体におよぼす影響に関するデータに重点をおいて調査を加える。  
これは、昭和44年指針作成にあたってとられた方針と同じである。 - 放射体によって人体に生じた影響に関しては、昭和44年指針作成以降、特記すべき新しい事例についての報告はない。しかし、すでに公表されている事例について、新しい視点から検討を加えた報告はある。
- (2) 調査対象とする科学的情報は、原則として、UNSCEAR報告、ICRPおよびそれに準ずる国際的機関の刊行物に掲載されているものとする。  
UNSCEAR報告は、放射線の線源とそれによる人体への影響に関する科学的情報を集大成した、国際的に権威を持った報告書であり、改訂の都度、最新の知見がその内容に導入されている。
- (3) 人体におよぼす放射線の影響は、放射線防護の観点から、確率的影響と確定的影響に大別される。「めやす線量」を決めるに際して考慮する必要があるのは、確率的影響のうちの発がんである。確率的影響には、発がんと遺伝的影響とがあるが、「めやす線量」の対応において評価される想定事象におけるプルトニウムによる人体の被ばくでは、生殖腺が受ける放射線量は、問題となる他の臓器に比べてかなり少ないので、遺伝的影響は考慮しなくてもよい。
- (4) 「めやす線量」は、公衆の構成員がその線量を被ばくしても、健康に対する有意な損失をもたらさないものであることが必要である。
- (5) 「めやす線量」は、公衆の個々の構成員の線量をもって表わす。
- (6) 「めやす線量」は、骨、肺、および肝の等価線量で表わす。
- (7) 昭和44年指針に示されている「めやす線量」の数値を、その後得られた科学的情報によって検討した結果、また、「めやす線量」の適用経験の結果、変更する必要があると認められる場合は、それを改める。

## 4．プルトニウムの人体内挙動に影響を与える因子について

### 4 - 1．影響を与える因子の区分

原子炉から放出されたプルトニウムによって原子炉周辺の公衆が放射線を被ばくすることを想定した場合、被ばくの対象となる公衆の構成員が被ばくする放射線量に影響を与える因子は、人体への侵入経路、プルトニウムの物理化学的性状、および人体側の条件の3つに大別できる。

### 4 - 2．摂取経路

放射性物質の人体への侵入経路は、一般論としては、吸入摂取、経口摂取および経皮吸収が考えられる。しかし、「めやす線量」が適用される事態を考えると、吸入摂取のみを考えればよい。

### 4 - 3．物理化学的性状

プルトニウムの物理化学的性状として、とくに注目すべきものは、化学形態および粒子径分布である。

「めやす線量」の適用対象となる原子炉事故に際して、公衆の構成員の身体に入るプルトニウムの代表的な化学形態は、酸化プルトニウムである。したがって、「めやす線量」を決めるに際しては、原則として、酸化プルトニウムによる被ばくについて考えればよい。その他の化学形態のもの、たとえば、炭化プルトニウム、ナトリウム－酸化プルトニウム複合体などを問題とする必要がある場合については、「めやす線量」の適用に際して、特別の考慮を払うべきである。

### 4 - 4．粒子径分布

粒子径分布は、吸入による被ばく、とくに肺の被ばくする線量に大きな影響を与える。「めやす線量」を決めるに際して問題となるのは、原子炉の格納施設から漏れ出てきたエアロゾルである。このうち、肺に対して有意な被ばくを与えるエアロゾル粒子は、ある一定の範囲の粒子径のものである。粒子の呼吸気道内における挙動と粒子径との関係に関しては、国際的機関によって公表された有用なデータがあるので、「めやす線量」の適用に際しての、想定される事故の評価にあたっては、これらのデータを用いて肺が受ける放射線量を求めるべきである。

人体側の条件としては、年齢差、個人差などがある。「めやす線量」は、成人年齢の者を対象として決められる。公衆の年齢構成は年齢巾が広く、若年者および高齢者も含まれるが、成人年齢の者を対象として決められた「めやす線量」を用いることで、大きな不安全側のミスをおかすことなく目的を達することができるかと判断される。

個人差は「めやす線量」を決めるに際しては考慮しない。「めやす線量」を決める場合に用いられるパラメータには、多くの場合、かなりの安全係数が考慮されて

いるので、個人差を考慮しないことでプルトニウム摂取による公衆の構成員の健康上の損失を不当に過小評価することはないと考えられる。

しかし、めやす線量を適用して原子炉の立地評価をするに際して、対象となる公衆の年齢構成が、成人年齢を対象とするには明らかに不適當であったり、また、個人差を考慮すべき明らかな理由があったり、しかも、それに代わるべき数値に関する情報の利用が可能である場合は、それを用いるべきである。

## 5．問題とすべき臓器について

「めやす線量」を決めるに際して問題とすべき臓器は、身体内におけるプルトニウムの分布および臓器の発がんに対する放射線感受性の2点を考慮して決める必要がある。

昭和44年指針では、肺、肝および骨を問題とすべき臓器としている。その後、これを変更する科学的情報は得られていない。

「めやす線量」が適用される事態におけるプルトニウムによる被ばくでは、人体内におけるプルトニウムの分布はかなり不均等である。線量評価に際して、もっとも問題とすべきものは骨であり、これに肺および肝を加え、3つの臓器について考慮すればよい。

## 6．問題とすべき各臓器のめやす線量について

### 6 - 1．骨

(1) 昭和44年指針においては、6,180Bq(0.167 $\mu$ Ci)<sup>226</sup>Raを持つ患者の顎骨に腫瘍が発生した事例、および3,700Bq(0.1 $\mu$ Ci)<sup>226</sup>Raを持つ患者にはX線写真で中等度の骨変化は見られなかったという事実に注目している。そして、この知見に種々の情報に基づく考察を加え、プルトニウムの放射線による骨腫瘍の発現の危険性がほとんどないと推定される線量として、0.6Gy(60rad)という値を示し、「めやす線量」を0.06Gy(6rad)としている。

(2) 骨の「めやす線量」の再評価にあたって考慮すべき問題点のうち、もっとも注目すべきものは、内部線量の計算にあたって従来用いられて来たICRP Publication 2が改訂され、それに代わるものとしてICRP Publication 30が刊行されたことである。

「めやす線量」の再評価の観点から注目される主な点は、

- a．発がんに関係ある骨細胞として、骨表面近くの細胞に着目すること
- b．線質係数を20とすること

の2点である。その後、アクチニドの代謝データについてICRP Publication 48において見直しが行われ、

- a．骨の生物学的半減期100年が50年に、肝の生物学的半減期40年が20年に

b. 胃腸管からの吸収率 $f_1$ が、公衆について、化学形によらず $10^{-3}$ になった。

その後、ICRP Publication 60が勧告され、それまでの組織線量当量は等価線量となり、線質係数を放射線荷重係数とするなどの線量の概念の変更がなされた。呼吸気道モデルおよび体内動態モデルについても、その後のPublicationで新たな知見を反映するなどPublication 30の線量評価方法の改良・修正が行われた。

昭和44年指針では、プルトニウムによる骨の発がんの下限值に相当するものとして、0.6Gy(60rad)という数値を示している。これは、骨平均線量として示されたものである。

ICRP Publication 72等の記述内容を中心として検討した結果、これを骨表面近くの細胞の線量として60Svとするのが妥当であるとの結論に達した。

なお、立地評価に際しての線量計算は、原則としてICRP Publication 72等に記載されている線量係数を用いるべきである。

(3) 骨の「めやす線量」は、骨表面の等価線量として2.4Svとする。

## 6 - 2 . 肺

(1) プルトニウムによる人体の肺がん誘発事例に関する知見はない。 - 放射体の吸入による人体の肺がん発生に関するデータは、ウラン鉱山作業者についての疫学的調査結果があるのみである。しかし、いずれも、発がんの危険性がほとんどないと推定される線量を求めるに際して直接に役立つ情報は提供していない。

これらの事実、および動物実験によって得られた知見に基づく検討結果として、昭和44年指針は、不確定要因があることを十分認識の上で、現時点では、プルトニウムの吸入によって肺障害の発現の危険性がほとんどないと推定される線量レベルとして、3Gy(300rad)を下回ることはないと述べている。そして、「めやす線量」として0.15Gy(15rad)をとるのが適当であるとしている。

(2) 前項で述べた事実、および、「めやす線量」の数値を変更する必要があると判断すべき科学的知見は、その後も得られていない。

ICRP Publication 66では、吸入したエアロゾルの呼吸気道内での挙動等について有用なデータ、および、線量計算の方法を提示している。また、ICRP Publication 72等では、アクチニド核種の線量係数として最新の数値が示されている。立地評価に際しては、原則としてこれらを用いるべきである。

吸入された粒子による肺の細胞に対する線量の不均一性について、ICRPは、“ホットスポット”中の高濃度の放射性物質は、均一に分布してもっと低い均等な線量を与える同量の物質よりも、発がん性については効率が低いことがわかっていると述べている。「めやす線量」の適用に際しては、この考え方

を採用する。

- (3) 現時点では、昭和44年指針で示された肺の「めやす線量」の数値を変更する必要はない。

したがって、肺の「めやす線量」は3Svとする。

### 6 - 3 . 肝

- (1) プルトニウムによる肝の発がんに関しては、人体についての経験例はない。人体についての肝の放射線発がんに関する経験としては、トロトラスト投与患者の発がんがある。しかし発がんの危険性がほとんどないと推定される線量として直接に役に立つ知見はない。

以上の問題点を認識したうえで、昭和44年指針では、「現時点では、プルトニウムの放射線によって人間の肝に腫瘍を誘発する最小の線量は10Gy(1,000rad)以下でおそらく5Gy(500rad)程度のものとする。」と述べ、この値の信頼度が骨に対する値より低い点を強調したうえで、「めやす線量」を0.25Gy(25rad)としている。

- (2) 前項で述べた事実、および、「めやす線量」の数値を変更する必要があると判断すべき科学的知見は、その後も得られていない。

- (3) 現時点では、昭和44年指針で示された肝の「めやす線量」の数値を変更する必要はない。したがって、肝の「めやす線量」は5Svとする。

## 解 説

本めやす線量を適用するに当たって、運用上の注意事項ないしは解釈を明らかにしておく必要があると考えられるので解説を以下のとおり掲げた。

### 1. 「めやす線量」設定に際しての相対リスクの手法

- (1) 立地評価に際して用いられる、いわゆる「めやす線量」の設定に際して従来とられて来た方針の骨子を要約すると、つぎの2点である。
  - (a) 人体に関する過去の知見にもとづいて決める。
  - (b) 放射線被ばくによって、着目する影響が発生した人体に関する事例の文献を探索し、最低の線量による発生事例における線量(以下、最小限界線量という。)をもととして「めやす線量」を決める。
- (2) 前項で述べた方針によって「めやす線量」を設定した場合に伴う問題点のうち、注目すべきものは以下の2点である。
  - (a) 従来用いて来た最小限界線量に関する事例よりも少ない線量で着目する影響が現われた事例に関する文献が発表され、それが妥当な内容であると判断された場合は、「めやす線量」を変更することが必要となる。また、そのための文献探索の機能が常に働いていることも必要である。
  - (b) 放射線管理に際しての前提としての「しきい線量がない」という仮定は、常識として定着した。このことは、ICRPが1977年勧告において影響の出現を確率的に解釈し、放射線によるリスクを、他のリスクとの比較において評価するという相対リスク論の立場をとったことによって、その普遍性が強まった。ICRP 1990年勧告においてICRPは、公衆被ばくに関する線量限度の選択に際して、職業上の限度に採用したアプローチと、自然放射線源からの現存する線量レベルの変動に判断基準をおくアプローチの2通りを用い、年実効線量限度を勧告しているが、従来の「しきい線量がない」という仮定は変わっておらず、最小限界線量をもととして「めやす線量」を設定するという姿勢と矛盾するものである。
- (3) 事故を想定して線量レベルを設定する場合と、平常運転を想定して基準値を設定する場合とは本質的に異なるので、最小限界線量にもとづいて「めやす線量」を決めてもさしつかえないという考えかたもあり得る。この考えかたを採用するに際しては、これら2つの場合の違いについて明らかにしておくことが必要である。
- (4) 最小限界線量にもとづいて「めやす線量」に相当する値を求め、その値を相対リスク論の立場から評価して、その妥当性を説明するという方法を採用するのも、現時点でとりうる一つの方策である。

2．プルトニウムに関する「めやす線量」を定めるに際して、遺伝的影響を考慮しなくてもよいと判断した理由について

- (1) 遺伝的影響に関係する線量は、生殖腺が受けた線量である。
- (2) プルトニウムから放出される放射線のなかで、生体組織の被ばく評価に有意な寄与をするのは、飛程の短い放射線である。したがって、生殖腺の被ばくで問題となるのは、生殖腺内に沈着・存在するプルトニウムであり、生殖腺以外の組織・臓器に沈着したプルトニウムから放出される放射線による被ばくは、無視してさしつかえない。  
すなわち、線源組織 (source tissue) としての被ばくのみが問題であり、標的組織 (target tissue) としての被ばくは、實際上、問題とならない。
- (3) 身体内に存在するプルトニウムが、生殖腺に移行する割合は極めて少なく、ICRP Publication 67によると、成人では、血液からの移行率が、こう丸で $2.3 \times 10^{-4} (d^{-1})$ 、卵巣で $7.1 \times 10^{-5} (d^{-1})$ とされている。  
参考のために挙げると、成人では骨で $3.2 \times 10^{-1} (d^{-1})$ 、肝で $1.9 \times 10^{-1} (d^{-1})$ である。
- (4) 前2項で述べた理由から、プルトニウムの身体内汚染によって生殖腺が受ける線量は、実際上無視してさしつかえない。したがって、「めやす線量」を定めるに際しては、遺伝的影響を考慮しなくてもよいと判断される。

### 3．線量の種類と基準の目的

- (1) 人体の受ける放射線量を放射線防護の目的をもった基準とする場合、いかなる種類の線量を用いるかが、問題となる。選択の対象となる主な線量は、  
等価線量 (equivalent dose)  
実効線量 (effective dose)  
集団実効線量 (collective effective dose)  
である。
- (2) いずれを用いるのが妥当であるかは、どのような放射線影響を防護の対象とするかによって異なる。  
臓器の等価線量を用いる場合には、確定的影響の防止を目的とする場合と、確率的影響の制限を目的とする場合とがある。  
実効線量を用いるのは、個人を対象とした確率的影響の制限を目的とする場合である。  
集団実効線量を用いるのは、集団を対象とした確率的影響の制限を目的とする場合である。
- (3) 基準の設定に際しては、放射線防護の対象に応じて、線量の種類を決める必要がある。防護の対象を限定できない場合、あるいは対象が複数である場合は、適用に際し

て、該当するそれぞれの線量について評価を行い、基準にてらしてもっともきびしい値となった線量を対象として判断するのが、原則としてもっとも妥当な手順である。この方法を採用するには、それぞれの線量について判断基準を定めることが必要となる。

- (4) 公衆を対象として、確率的影響の防護を目的とした基準を定める場合は、原則として集団実効線量を用いるべきである。

#### 4 . プルトニウムの被ばくに関する人類の経験

プルトニウムの被ばくに由来する人体の障害の報告例はまだない。しかし、事故等によって最大許容身体負荷量以上のプルトニウムに被ばくした人達はすでにかかなりの数になり、また被ばく後の日数もすでに30年以上も経過した人達も出現している。したがってこれらの人体例はプルトニウムの人体での危険度を考えるうえでの一つのよりどころとなっているので概略を述べる。

- (1) マンハッタン計画作業者グループ。米国の原爆製造計画のなかで1944年～1945年にかけてプルトニウムの精製作業中、硝酸プルトニウムの蒸気を吸収し、ICRP Publication 2の最大許容身体負荷量以上を体内に沈着した26名の作業者があり、追跡検討されているが、37年経過後の調査によってもプルトニウムに由来すると考えられる有害な健康影響は見られていない。<sup>1)</sup>

なお、マンハッタン計画作業者についての<sup>239</sup>Pu吸入摂取に伴う身体負荷量の評価値が報告されている。<sup>2)</sup>それによると、摂取後30年間の身体負荷量の最大値は、7,955Bqである。

ICRP Publication 72等の代謝データにより、これに相当する当初の吸入摂取量を求めると約 $1.3 \times 10^2$ kBqが得られる。これによる30年間の等価線量の積分値は、骨表面に対し、約 $1.3 \times 10^2$ Sv (タイプM)となる。

1) Voeltz, et al : A 37-year medical follow-up of Manhattan project Pu workers, Health Physics, vol.48, 249-259(1985)

2) Voelz, et al : Studies on health risks to Persons exposed to plutonium, LA-UR-79-3316(1979)

- (2) 末期ガン患者プルトニウム投与例。1945年～1946年に米国で18人の末期ガン患者に11～222kBq(0.3～6μCi)のプルトニウムが体内分布および排泄量の測定の目的で実験的に投与された。このグループから得られたデータが現在尿中排泄量から体内負荷推定の根拠となっている。大部分は投与後短期間で死亡したが、21年間生存し心臓病で死亡した例もあったという。

- (3) プルトニウム金属片皮ふ侵入例。旋盤切削中にプルトニウム金属片(185Bq(5nCi))を手の皮ふに侵入させた人の患部を4年後に摘出し、組織学的に検索したところ前癌症状類似の病変がみられたというLashbaughの報告が人体でみとめられた唯一の組織学的変化である。
- (4) ロッキーフラッツ火災被ばく例。1965年米国ロッキーフラッツのプルトニウム工場ではプルトニウム取扱グローブボックスの大規模な火災事故があり、約40名が被ばくした。そのうち25名の作業者がICRP Publication 2の肺の最大許容負荷量以上(1~17倍)のPuO<sub>2</sub>のエアロゾルの吸入被ばくを受けた。これらの人達について1987年の報告<sup>1)</sup>では異常はみとめられていない。

1)Tiejien,G.L., Plutonium and Lung Cancer, Health Phys. 52, 625-629(1987)

## 5 . <sup>224</sup>Raによる人体被ばくの経験例

<sup>224</sup>Raによる人体被ばくが<sup>239</sup>Puによる障害との関連で注目されている。<sup>224</sup>Raは西独で強直性脊椎症などの患者の治療の目的で投与されたが、これらの患者の中から骨肉腫が発生していることがSpiess等によって明らかにされている。<sup>1)</sup>

<sup>224</sup>Raは短半減期核種(Tr = 3.66日)であるため<sup>239</sup>Puと同様に エネルギーの大部分は骨表面から与えられる。ICRP Publication 67においても、<sup>224</sup>Raは、骨表面に移行するモデルとしている。従って、<sup>239</sup>Puによる骨腫瘍の発生は<sup>224</sup>Raによる発生例と比較するのがより妥当であろう。

Spiess and Mays<sup>1)</sup>によると、<sup>224</sup>Raによる平均骨格吸収線量が少なくとも0.55Gy(55rad)(85例)までは骨腫瘍(sarcoma)の発生は認められていない。

骨表面吸収線量と平均骨格吸収線量との比は約8である<sup>2)</sup>ので、平均骨格吸収線量55radを骨表面吸収線量に直すと、約4.4Gy(約88Sv)となる。

- 1) Spiess, H and Mays, C.W. : Radionuclide Carcinogenesis, AEC Symposium 29, 437 - 450(1973)
- 2)37kBq経口摂取時の50年間の平均骨格吸収線量は、0.4mGy ( Spiess & Mays ; Health Phys.19,713(1970) )、50年間の骨表面積吸収線量は約3.2mGy ( ICRP Publication 72等 )

## 6 . プルトニウムの体内挙動を支配する要因

プルトニウムの体内への侵入及び侵入後の挙動は、種々の要因によって支配されている。そして、これらの要因は、まず侵入するプルトニウム自身のもつ物理化学的な性質のものと、次に生体それ自身のもつ諸性格とに大別することができる。プルトニウム自身のもつ性質としては、その化学的形態、粒子径、粒子の形状そして化学毒性\*などが主なものである。更に、プルトニウムと共存するウラン、その他の金属などがプルトニウムの体内挙

動に影響を与える場合がある。

プルトニウムの化学形態は体内摂取にあたって、また摂取後の体内での挙動にかなりの影響を与える。原子力施設で用いられるプルトニウムには、代表的な酸化プルトニウム以外にも数種の化学形態のものが用いられ、また状況によっては共存するウランや他の金属との複合体も考えられる。

プルトニウムの化学形態の相違は、まず経口摂取の場合の消化管からの吸収率の差という形で関連し、また吸入摂取の場合は肺から他の臓器へのクリアランス\*\*の差異という形で関連する。吸収率が高いもの又はクリアランスの速度の速いものは、その標的臓器からも早く消失するので、化学形態による挙動の差異が、等価線量に及ぼす影響は小さい。

一般に硝酸塩は吸収性が高くクリアランスの速度も速い。また、酸化物は吸収性が低く、クリアランスの速度も遅い。クリアランスタイプについては、ICRPでは、不溶性の酸化物以外の硝酸プルトニウムのような化合物はタイプM、酸化プルトニウムなどの不溶性の酸化物はタイプSに分類されている。

プルトニウムが、エアロゾルとして吸入される場合には、粒子径も肺への沈着にあたっての重要な修飾要因となる。粒子径と呼吸気道への沈着との関係についてはICRPの出版物に詳しく論じられているが、一般に小型の粒子ほど肺深部への沈着率が高い。粒子の形態や他の金属との複合体の場合なども肺への沈着やクリアランスに変化を生ずる場合があり得る。

生体自身のもつ性格に由来する挙動との差としては、年齢による吸収率の差や、年齢や動物種による代謝のスピードの差などが考えられ、動物実験のデータを人体へ適用することの困難な理由の主要なものとなっている。一般に年齢の若いもの程、また体の小さい動物種程代謝のスピードは速い。

#### \* プルトニウムの化学毒性

プルトニウムはその化学的性質がウランと類似していることからウランと同様に腎臓に対する毒性をもつことが予想されている。しかし、プルトニウムの比放射能（単位重量当たりの放射能の強さ）がウランのそれと比べて著しく高いため、まだ化学毒性が出現し得ない量で放射性毒性を生じてしまうので実際上はプルトニウムの場合は、化学毒性は問題となり得ない。

#### \*\* クリアランス

クリアランスは、粒子輸送及び血液への吸収による呼吸気道からの物質の除去を意味するものであり、クリアランスによって以下のとおり分類されている。

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）

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）

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）

## 7．プルトニウム同位体の存在比を考慮することの必要性

原子力産業でのプルトニウム取扱い量は、通常その重量で表示される。したがって事故等によって放出されるプルトニウムの量も当然まず重量で評価される。しかし、このプルトニウムによる人体への影響は、その放出する放射線（主として  $\alpha$  線）の量にもとづく線量を基準に評価されねばならない。したがってこの線量の計算にあたっては、プルトニウムの重量から放射能への変換が、比放射能の数値を用いてなされるのが通常である。原子力産業で用いられるプルトニウムは純粋の $^{239}\text{Pu}$ ではなく各種のプルトニウム同位体の混合物である。これらはそれぞれ  $\alpha$  線、  $\beta$  線、場合によって  $\gamma$  線を放出するし、またこれらの同位体のうち $^{241}\text{Pu}$ のようにそれ自身は 放射体であるが、13年の半減期で娘核種である $^{241}\text{Am}$ に変換され  $\alpha$  線を放出するようになるものもある。したがって、線量の評価にあたっては、同位体の存在比を考慮した実効的な比放射能を考えるか、それぞれ独立に同位体ごとに計算して集計することが安全上必要となる。何故ならば一般に核燃料に用いられるプルトニウムは $^{239}\text{Pu}$ にくらべ約300倍の比放射能をもつ $^{238}\text{Pu}$ がかなり混在するため、純粋の $^{239}\text{Pu}$ にくらべて実効的な比放射能は数倍程度高いのが普通であるからである。

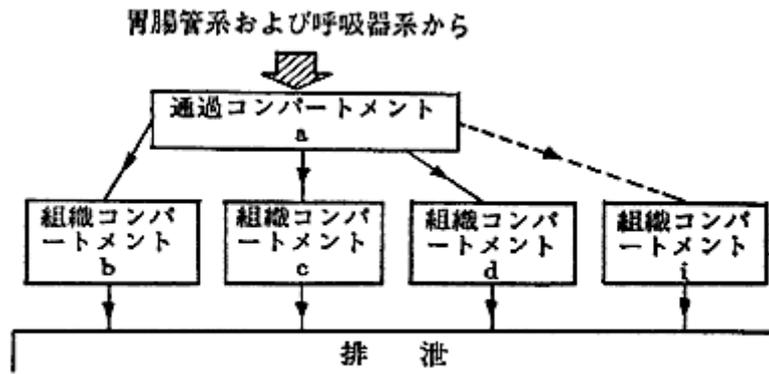
## 8．内部線量の評価方法について

この指針に示されたためやす線量は、ICRP Publication 72等にも示された体内動態モデルおよび線量係数に基づいて算定された線量と比較することとしている。ここではICRP Publication 72等にも示された内部線量評価法の概要を述べ、プルトニウム同位体と $^{241}\text{Am}$ とに対する計算結果を示す。

### 8 - 1 線量評価の基本

ICRP Publication 72等にも示された体内動態モデルはPublication 30（1979）の方法を改良したものである。Publication 30以降の体内動態モデル等の線量評価法とPublication 2（1959）のそれと基本的に異なる点は下記の2点である；

- ( ) 摂取した放射性核種の代謝モデルとして、単一コンパートメントに代って複数コンパートメント（第1図）を用いる。



第1図 放射性核種の体内挙動の記述に通常用いる数学的モデル

- ( ) 預託等価線量 ( $H_T(50)$ ) を求める場合は、標的臓器（または組織）と線源臓器とを決め、成人の場合、線源臓器中に沈着した放射性核種により標的臓器の受ける50年間の線量を算定する。

以下に、指針の線量評価と関係のある呼吸器系と骨に対する預託等価線量算定用モデルについて主にPublication 66およびPublication 67に従って述べる。

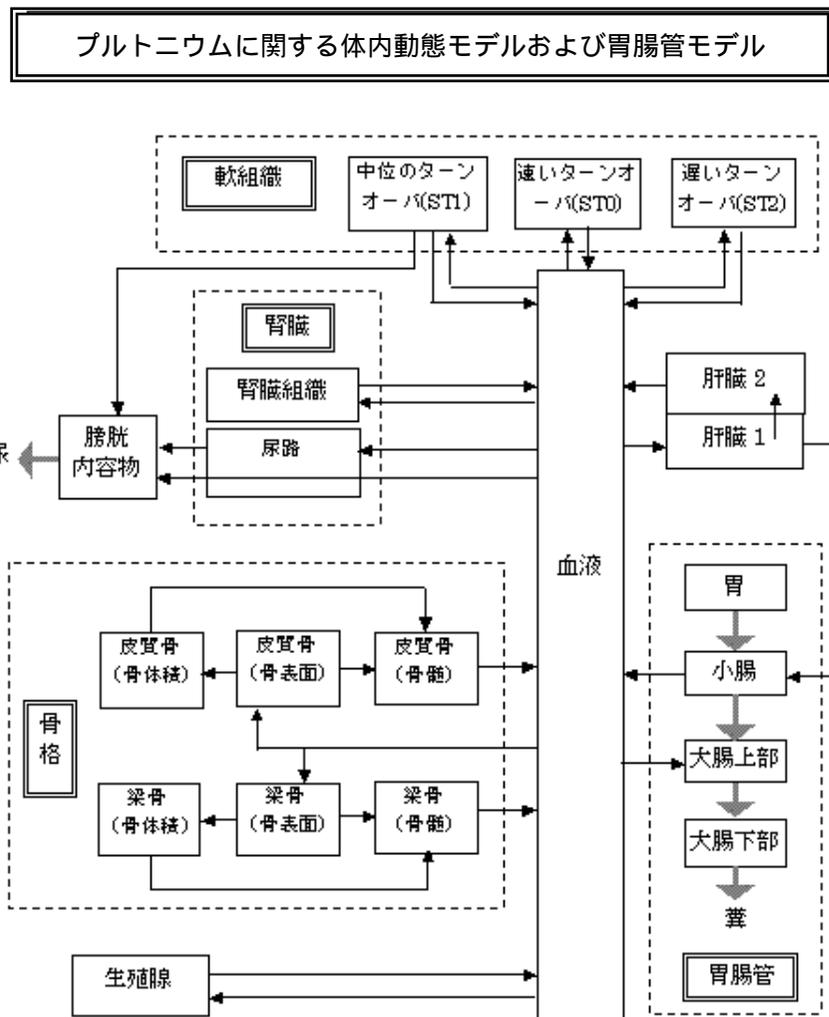
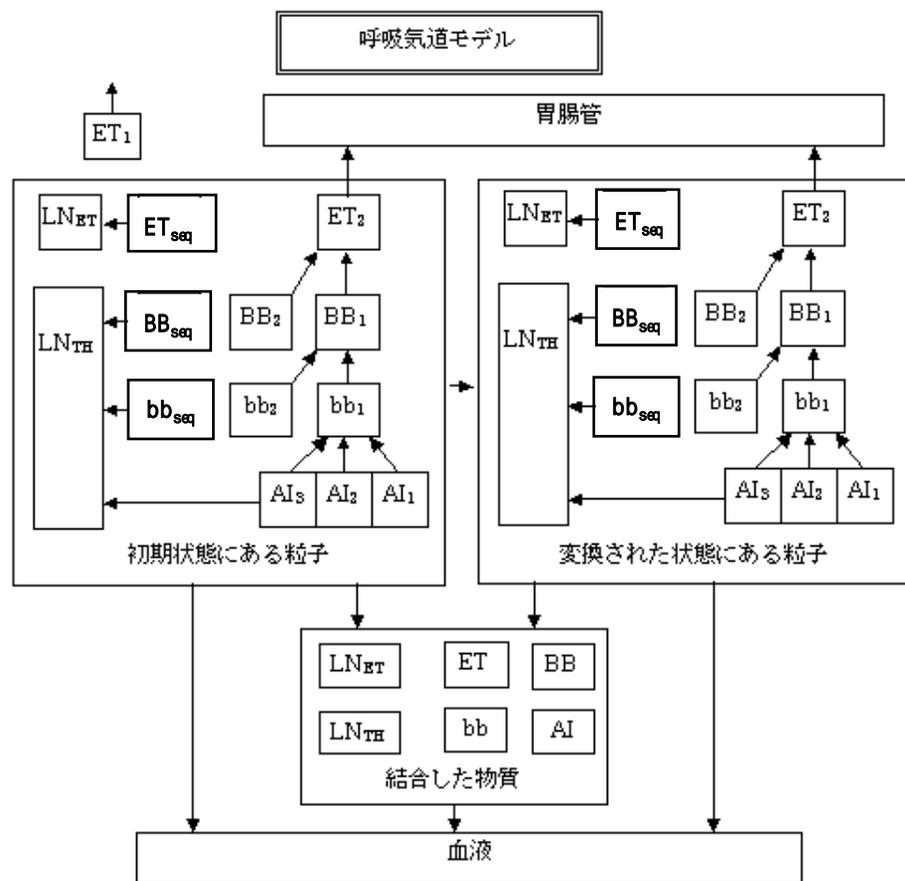
## 8 - 2 預託等価線量算定用モデル

線量算定に用いる代謝モデルをまとめて第2図に示す。

### (1) 呼吸器系

Publication 66の呼吸気道モデルは、基本的にはPublication 30で用いたモデルを新しい知見を取り入れて改良したものである。

- ( ) 呼吸気道は五つの領域によって表わされており、胸郭外 (ET) の気道は前鼻道 ET 1 と、後鼻道および口腔、咽頭および喉頭からなる ET 2 に分割されている。胸郭内の領域は、気管支領域 (BB)、細気管支領域 (bb) および肺胞 - 間質領域 (AI) である。リンパ組織は、胸郭外気道と胸郭内気道に関連する。
- ( ) 吸入した放射性粒子が、上記の五つの領域に沈着する割合は、粒子の物理学的パラメータである空気力学的放射能中央径 (AMAD) と熱力学的放射能中央径 (AMTD) に依存する。
- ( ) 化合物は各領域からの血液への吸収の速度に応じて、タイプF、タイプMおよびタイプSの三つのクラスに分類される。また、特定のガスなどについては、タイプVがある。プルトニウムの場合には、不溶性の酸化物がタイプS、それ以外の化合物がタイプMに区分されている。



ET: 胸郭外領域 (ET<sub>1</sub>: 前部鼻道 ET<sub>2</sub>: 後部鼻道、口腔、咽頭および喉頭、ET<sub>seq</sub>: 胸郭外領域の気道壁中に保持される分)  
 BB: 気管支領域 (BB<sub>1</sub>: 速く取り除かれる沈着分、BB<sub>2</sub>: ゆっくり取り除かれる沈着分、BB<sub>seq</sub>: 気管支領域の気道壁中に保持される分)  
 bb: 細気管支領域 (bb<sub>1</sub>: 速く取り除かれる沈着分、bb<sub>2</sub>: ゆっくり取り除かれる沈着分、bb<sub>seq</sub>: 細気管支領域の気道壁中に保持される分)  
 AI: 肺胞-間質領域 (AI<sub>1</sub>、AI<sub>2</sub>およびAI<sub>3</sub>の3つに分けられ、取り除かれる速度が順に遅くなっている。)  
 LN: リンパ組織 (LN<sub>RT</sub>: 胸郭外気道のリンパ組織、LN<sub>TH</sub>: 胸郭内気道のリンパ組織)

第2図 ICRP線量評価モデル

( ) 線量算定の対象となる肺は、胸郭内の領域( 気管支領域、細気管支領域、および肺胞 - 間質領域 ) および肺リンパ組織から成り、成人で質量約1.1 kgである。

## (2) 骨

ICRP Publication 2に示された骨の線量計算においては、骨格全体の平均吸収線量を算定し、障害係数  $n$  ( プルトニウムに対しては  $n = 5$  ) を乗じて線量を求めた。

その後、骨格の中で発がんのリスクを考えるべき細胞は

骨髄の造血幹細胞、および

骨内膜面の造骨細胞ならびに骨表面に近いある種の上皮細胞

であることが明らかとなった ( ICRP Publication 11 )。

Publication 72等でもPublication 30と同様に骨に対する線量算定は上記のと について行っている。すなわち、骨髄内の造血細胞に対しては、梁骨の内腔を完全に満たしている組織 ( 活性赤色骨髄 ) の受ける平均の等価線量を算定する。また、骨内膜面にあたる組織と骨表面の上皮に対しては、問題としている骨表面から10  $\mu\text{m}$ までの深さにある組織の受ける平均の等価線量を算定する。

従って、骨の場合には、標的組織は活性赤色骨髄と骨表面近くの細胞 ( 厚さ10  $\mu\text{m}$ の組織 ) である。一方、線源組織は普通、 放射体を除くすべての放射性核種について、皮質骨と梁骨である。

なお、Publication 72等の線量算定方式ではPublication 30と同様に、Publication 2で用いた障害係数  $n$  は考慮していない。その理由は以下のとおりである。

障害係数  $n$  は

( ) 放射性核種の骨における不均等分布、

( ) 放射性核種が沈着している骨の部分の放射線感受性がより大きいこと、

( ) 障害を受ける組織がより本質的であること、

を考慮してPublication 2で導入されたものである。しかし、Publication 30以降ではプルトニウムについて骨格におけるその不均等分布 ( 骨表面の無限に薄い層中に均等に分布 ) を考慮し、さらに先に述べたように、発がんのリスクの大きい骨の組織 ( 活性赤色骨髄と骨表面下の厚さ10  $\mu\text{m}$ の層 ) を標的組織として採用している。そのため、障害係数を導入する必要はない。

### 8 - 3 吸入摂取による預託等価線量

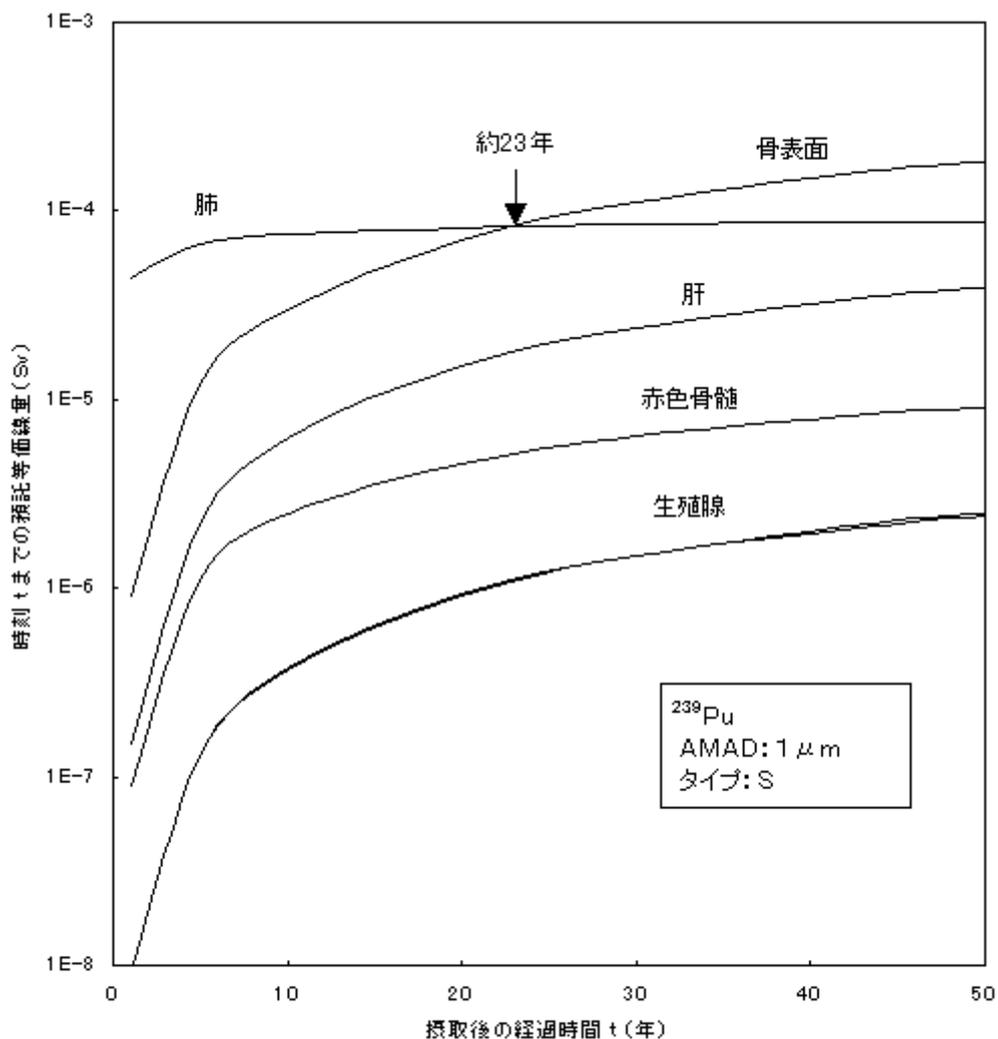
線量評価上問題となるプルトニウム同位体 (  $^{238}\text{Pu}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu}$ および $^{242}\text{Pu}$  ) および $^{241}\text{Am}$ をそれぞれ1Bq吸入摂取した場合、各臓器における成人の預託等価線量

$H_T(50)$ を第1表に示す。この表の値は、肺からのクリアランスがプルトニウムの同位体についてはタイプS、 $^{241}\text{Am}$ についてはタイプMに対するものであり、放射性エアロゾルのAMADは $1\mu\text{m}$ である。エアロゾルのAMADが $1\mu\text{m}$ 以外の他の値であることが明らかな場合は、The ICRP Database of Dose Coefficients : Workers and Members of the Public (Version One) により、第1表の値を補正することができる。放射性エアロゾルの粒子サイズが不明な場合はAMAD =  $1\mu\text{m}$ として計算する。

第1表 1 Bqの1回吸入摂取に対する成人の預託等価線量 $H_T(50)$

(単位 Sv)

タイプ	組織 核種	骨表面	肺	肝
S	$^{238}\text{Pu}$	$1.6 \times 10^{-4}$	$9.3 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-5}$
	$^{239}\text{Pu}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$8.7 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-5}$
	$^{240}\text{Pu}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$8.8 \times 10^{-5}$	$3.9 \times 10^{-5}$
	$^{241}\text{Pu}$	$4.1 \times 10^{-6}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$8.6 \times 10^{-7}$
	$^{242}\text{Pu}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$8.1 \times 10^{-5}$	$3.7 \times 10^{-5}$
M	$^{241}\text{Am}$	$1.7 \times 10^{-3}$	$3.7 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-4}$



第3図  $^{239}\text{Pu}$  の1回吸入後の時刻  $t$  までの各組織の預託等価線量

#### 8 - 4 身体各臓器における預託等価線量の比較

8 - 1および8 - 2に述べたことから分るように、Publication 72等の線量評価法および線量係数によると、吸入（または経口）摂取による、身体各臓器および組織の預託等価線量は一義的に決定される。プルトニウム等に対して与えた第1表について、各臓器の成人の預託等価線量 $H_T(50)$ を比較すると、タイプSの化学形のプルトニウムに対しても骨表面が最大である。また $^{239}\text{Pu}$  1Bq、1回吸入摂取後の時間の関数として計算した各臓器の預託等価線量 $H_T(t)$ を与える、第3図(タイプS、AMAD = 1 $\mu\text{m}$ )からも分るように、吸入摂取後約23年目からは骨表面の預託等価線量が肺のそれを上回る。

めやす線量は、三つの臓器、すなわち、骨、肺および肝に対してそれぞれ与えられているが、上に述べたことから、骨に対するめやす線量がプルトニウムエアロゾルの吸入摂取量に対する制限因子となることが分る。

## 9. $^{226}\text{Ra}$ による骨線量について

### - 骨に対するめやす線量の検討 -

#### 9 - 1 $^{226}\text{Ra}$ による骨線量の比較

昭和44年指針における $^{226}\text{Ra}$  6,180Bq(0.167  $\mu\text{Ci}$ ) (顎骨の腫瘍の発生)は摂取後30年あるいは40年経過時における骨沈着量を示している。これによる線量をPublication 2およびPublication 72等に基づいて算定した結果を下に述べる(第2表に両方法の比較を示す)。

##### (1) ICRP Publication 2(およびICRP Publication 11)による算定

経口による1回摂取を考え、摂取後30年目に $^{226}\text{Ra}$  6,180Bqが骨格中に存在する時の当初摂取量を計算すると約4,800kBqであり、それによる30年間の平均骨格吸収線量は約3.1Gyとなる。

##### (2) ICRP Publication 72等による算定

1回の経口摂取後30年目に $^{226}\text{Ra}$  6,180Bqが皮質骨及び梁骨に存在する時の当初摂取量は約 $5.5 \times 10^3$  kBqであり、それによる30年間の骨表面線量(骨表面から深さ10  $\mu\text{m}$ までの組織の平均線量)は、約60Svとなる。

骨腫瘍発生の線量を、昭和44年の指針のように、吸収線量で比較すると、上の結果からPublication 72等による線量の方が低い値になっている。一方、Publication 72等による線量算定方法ではプルトニウムは骨表面(線源組織)に沈着するとして、それによる骨表面の線量を求めているのでPublication 2で用いた障害係数 $n$ を考慮する必要はない(8-2参照)。従って、骨表面線量で比較する限り、 $^{226}\text{Ra}$ に対しても、また $^{239}\text{Pu}$ に対しても約60Sv(3Gy)/30年(約66Sv(3.3Gy)/40年)が骨腫瘍発生の下限値(昭和44年指針では、0.6Gy(60rad))となる。この結果からめやす線量は2.4Svを採用した。

なお、めやす線量は、プルトニウム吸入摂取による50年間の線量と比較することとしているので、50年間に2.4Svを与える $^{239}\text{Pu}$ を吸入した場合(当初吸入量は約 $1.3 \times 10^4$  Bq)30年間の線量は約1.5Sv(40年間では約2.0Sv)となる。これは骨腫瘍発生の下限値に対して、約1/40の値である。

骨に対する新旧のめやす線量に対応する $^{239}\text{Pu}$ の吸入摂取量をそれぞれPublication 72等およびPublication 2に基づいて計算すると、第3表のようになる。この表から、めやす線量が0.06Gy(6rad)から2.4Svになっても、Publication 72等の算定方法を用いると、めやす線量に対応する吸入摂取量は約1/2に減少することが分る。

第2表 ICRP Publication 2およびPublication 72等に基づく<sup>226</sup>Raによる骨線量算定の比較  
(経口摂取)

		Publication 2の方法	Publication 72等の方法
線量算定式		$D = 51.2 \times \frac{\epsilon}{m} \times Q$ $Q = \int_0^t q_0 R_3(t) dt$ <p><math>R_3(t)</math> : Publication 11 (式中の記号については Publication 10 を参照)</p>	$H_T(t, t_0) = \sum_S q_s(t, t_0) SEE(T \leftarrow S; t)$ $H_T(t, t_0) = \int_0^t H_T(t, t_0) dt$ $SEE(T \leftarrow S; t) = \sum_R \frac{Y_R E_{RW} AF(T \leftarrow S; t)_R}{m_T(t)}$ <p>(式中の記号については Publication 71を参照)</p>
対象臓器 (組織)		骨格 ( $m = 7 \times 10^3$ g)	骨表面 ( $m_T(t) = 120$ g 成人)
摂取後 t 年 目に骨に 3,700Bqが残 留する場合、 t = 0 にお ける 1 回摂 取から t 年 間にわたる 積分線量	t (年) 30	1.9 Gy (19 Sv)	36 Sv
	40	2.4 Gy (24 Sv)	53 Sv
	50	3.1 Gy (31 Sv)	73 Sv

第3表 <sup>239</sup>Puの吸入摂取量の比較

計算方法	組織	1 Bqの 1 回の吸入摂取による成人の預託等価線量 $H_T(50)$	骨のめやす線量に 対応する 1 回摂取 量	摂取量の比
Publication 72等	骨表面	$1.8 \times 10^{-4}$ Sv	$1.3 \times 10^4$ Bq / 2.4 Sv	1
Publication 2	骨格	$1.1 \times 10^{-4}$ Sv ( $2.1 \times 10^{-6}$ Gy)	28,570 Bq / 6 rad (0.06 Gy)	2

## 9 - 2 めやす線量と実効線量との関係

ICRP Publication 60において、個々の臓器（または組織）の等価線量 $H_T$ をそれぞれの臓器（または組織）の荷重係数 $W_T$ で重みづけしたものの合計として実効線量 $H_E$ を定義している。

$$H_E = \sum W_T H_T$$

この指針では昭和44年指針を受けて、臓器ごとのめやす線量を与えている。このめやす線量と上の実効線量との関係について検討した。

骨、肺および肝の成人の預託等価線量 $H_T(50)$ がそれぞれ2.4Sv、3Svおよび5Svである時の他の臓器（または組織）の預託等価線量を求め、上式に従って試算した実効線量を第4表に示す。

第4表 実効線量（成人）の試算

（単位 Sv）

組織	$H_T(50)$	$W_T H_T(50)$	$H_T(50)$	$W_T H_T(50)$	$H_T(50)$	$W_T H_T(50)$
骨表面	<u>2.4</u>	0.024	6.2	0.062	23	0.23
肺	1.2	0.14	<u>3.0</u>	0.36	11	1.3
肝	0.52	0.026	1.3	0.065	<u>5.0</u>	0.25
赤色骨髄	0.12	0.014	0.31	0.037	1.2	0.14
実効線量	0.21		0.55		2.1	

注1：核種 $^{239}\text{Pu}$ 、タイプS、AMAD = 1  $\mu\text{m}$

注2：実効線量については、表中に記載されている組織以外の組織の預託等価線量についても考慮されている。

第4表から次のことが分る。

- ( ) 骨（骨表面）の成人の預託等価線量がめやす線量2.4Svに達した時の成人の実効線量は約0.21Svである。
- ( ) 骨（骨表面）以外の臓器の成人の預託等価線量がめやす線量に達した時は、骨に対する値はめやす線量を超すことになる。従って、骨に対するめやす線量がプルトニウムの吸入摂取量をきめる制限因子となる。