

作業者による  
ラドン娘核種の  
吸入の限度

**ICRP** *Publication* **32**

---

作業者による

---

ラドン娘核種の

---

吸入の限度

---

国際放射線防護委員会の報告

1981年3月に採択されたもの

社団法人 **日本アイソトープ協会**





Japanese Translation Series of ICRP Publications  
*Publication 32*

This translation was undertaken by the following colleagues.

Translated by

Jiro INABA, Kenzo FUJIMOTO, Sadayoshi KOBAYASHI

Editorial Board

The Committee for Japanese Translation of ICRP Publications,  
Japan Radioisotope Association

.....  
Eizo TAJIMA\* (Chair)      Tatsuji HAMADA (Vice-chair)  
Masami IZAWA\*\*      Sukehiko KOGA\*\*      Sadayoshi KOBAYASHI  
Shinji TAKAHASHI\*\*,<sup>†</sup>      Ichiro MIYANAGA  
.....

\* ICRP member at the time.

\*\* Former ICRP member.

<sup>†</sup> Passed away in April, 1985.

## 邦訳版への序

本書は ICRP Publication 32 として刊行された ICRP の報告書  
Limits for Inhalation of Radon Daughters by Workers  
(*Annals of the ICRP*, 6, No.1 (1981) に発表)

を、ICRP の了解のもとに翻訳したものである。

放射性物質の摂取に起因する体内被曝については ICRP Publication 30 で詳述され、多数の核種の年摂取限度 (ALI) や誘導空气中濃度 (DAC) が与えられたが、ラドンとその娘核種の吸入に関しては別の報告書にゆだねるとされていた (1980 年ブライトン会議の声明)。

この報告書はラドンと娘核種を含む環境中で作業する、主として鉱山労働者の被曝を取り扱っている。娘核種の肺への沈着パターンを考慮に入れて Publication 30 で述べられている線量算定法を用い、一方、多数の疫学的調査結果を解析して、妥当と考えられる限度を勧告している。

翻訳は放射線医学総合研究所環境衛生研究部の稲葉次郎、藤元憲三氏によって行われた。この原訳に小林委員が手を加え、さらに翻訳検討委員会により必要な調整が行われてできあがった。原訳にあたった両氏のご努力に厚く感謝したい。

昭和 61 年 7 月

ICRP 勧告翻訳検討委員会

(ii)

日本アイソトープ協会

ICRP 勧告翻訳検討委員会

委員長 田島 英三 (立教大学名誉教授)

副委員長 浜田 達二 (日本アイソトープ協会)

委員 伊沢 正実 (日本原子力発電㈱)

古賀 佑彦 (藤田学園保健衛生大学)

小林 定喜 (放射線医学総合研究所)

高橋 信次 (愛知県がんセンター) (昭和 60 年 4 月逝去)

宮永 一郎 (日本原子力研究所)

## 目 次

	頁 (項)
まえがき .....	v
緒 言 .....	1 ( 1)
疫学的方法 .....	4 ( 6)
線量算定による方法 .....	8 (11)
勧告限度の設定 .....	17 (24)
付 録	
A. 放射性崩壊特性 .....	24
B. 特殊な量と単位 .....	26
C. $^{222}\text{Rn}$ および $^{220}\text{Rn}$ からの実効線量当量 .....	31
文 献 .....	34

(iii)

# 目 次

(I) 頁	
v	序 文
(A) 1	第 1 章 概 論
(B) 1	第 2 章 基本的事象
(C) 8	第 3 章 代 数 的 同 型 論
(D) 11	第 4 章 環 の 同 型 論
	附 録
12	A 環 の 同 型 論
16	B 環 の 同 型 論
17	C 環 の 同 型 論
18	文 献 考 査



## まえがき

国際放射線防護委員会は1977年11月に、委員の中のD. J. BeninsonとW. Jacobiの両氏に、ラドンとその娘核種による職業上の被曝に関し適切な限度を設定するための基礎となりうる情報の概要を示す報告書の作成を依頼した。

1980年の会合において委員会は、 $^{222}\text{Rn}$ とその娘核種に対する職業上の被曝に関し声明を発表した。これはAnnals of the ICRP, 4, (3/4), 1980に発表された。その声明の中で委員会は、ラドンとその娘核種に対する職業上の問題に関し報告書を準備中であると述べたが、これがその報告書である。



## 緒 言

(1) 鉱石採掘の職業上のリスクの一つは、空気中に存在するラドンガス ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ) とその短寿命崩壊生成物 (ラドン娘核種)\* に鉱山労働者が被曝することに由来する。これら放射性核種の吸入は、鉱山、とくにウラン鉱山における最も重要な職業上の被曝の原因となっている。既刊の ICRP 報告書 (IC 77 b) は、ウランその他の鉱山での放射線被曝のモニタリングと制限との原則について概略を述べた。ラドンとその娘核種は大気および室内空気中にも存在することに留意すべきである。これら放射性核種の吸入による被曝は、自然放射線源による集団の放射線被曝のかなりの部分を占めている。

(2) これら放射性核種に対する被曝はおもに短寿命のラドン娘核種の吸入によるものであり、その結果人の呼吸器気道中の線量分布は不均等になる。通常の被曝条件下では、この吸入された娘核種による肺線量と比較すれば、吸入されたラドンガスそのものの線量寄与は小さい(付録C)。委員会の体内被曝に関する以前の勧告 (ICRP Publication 2, 1960) では、短寿命ラドン娘核種に関する空気中の最大許容濃度は、決定組織であるとみなされた大気管支の上皮に対し 0.15 Sv (15 rem) という最大許容線量当量から導かれた。その評価では、空気中に存在している粒子に付着していない娘原子の吸入による線量に主として注目した、単純化された肺モデルが用いられた。吸入されたラドン娘核種による呼吸器気道の中での線量分布を推定するため

---

\* これら放射性核種のおもな放射性崩壊特性は、付録Aに表として示した。放射線防護上これら放射性核種に関して用いられる。被曝を表す特殊な量と単位 (および換算係数) は、付録Bにまとめてある。

(2)

の改良モデルがその後開発されている。

(3) 現行の基本勧告で、委員会は線量制限の一つの体系を導入した(ICRP Publication 26, 1977)。これは、リスクにかかわるすべての人体組織中での線量を考慮に入れて、確率的放射線影響(がん、遺伝的影響)による個人の全リスク、すなわち健康損害を制限するものである。この概念は、ある与えられた安全レベルにおいて、身体が均等に照射された場合も不均等にあるいは部分的に照射された場合も、確率的リスクは等しくなるべきであるという原則に基づいている。この条件を満たすため、被曝したすべての該当組織 $T$ に関し合計した、次の式で定義される“実効線量当量”( $H_E$ )という量を導入した。

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (\sum_T w_T = 1 \text{ である}) \quad (1)$$

この式において、 $H_T$  は組織 $T$ の平均線量当量、 $w_T$  は全身が均等に照射されたとき組織 $T$ で生ずる確率的リスクの全身のリスクに対する比を表す荷重係数である\*。肺については、いくつかの組織からなる一つの臓器と考え、荷重係数  $w_T = 0.12$  が勧告されている。この実効線量当量という概念は以前の決定組織の概念にとって代わるもので、放射性核種の摂取限度の算出に用いられており(ICRP Publication 30, 1979)、ラドンとラドン娘核種について

\* 荷重係数  $w_T$  の勧告値は次のとおりである。

生殖腺	0.25	甲状腺	0.03
乳房	0.15	骨表面	0.03
赤色骨髓	0.12	残りの組織(合計)	0.30
肺	0.12		

「残りの組織」については、そのうちの最高の線量当量となる5つの組織の各々に  $w_T = 0.06$  を適用する。胃腸管は4つの別個の組織として扱う(胃、小腸、大腸上部および大腸下部)。皮膚、眼の水晶体、手、前腕、足およびくるぶしは「残りの組織」に含めない。

ある与えられた被曝に伴うリスクは被曝した個人の年齢と性で変わることが認められている。しかしながら、 $w_T$  の値は、これら変動の源いかにかわらず、任意の作業者の防護にとり適切なものとして勧告されている。

も適用できる。

(4) 委員会は実効線量当量の職業上の年限度として 0.05 Sv という値を勧告している。この限度の算定は、放射線作業者の平均の職業上のリスクが、高い安全基準にある産業で経験されている平均の職業上のリスクより高いものであるべきでないという要件に基づいてなされたものである。実効線量当量のこの限度あるいはこれに相当する放射線のリスクレベルを、ラドンとその娘核種に被曝する鉱山労働者にも適用すべきであるというのが委員会の考え方である。

(5) ラドン娘核種の摂取あるいは被曝に関する職業上の限度は2つの異なった方法で導くことができる。第一の手法は、比較的高濃度の  $^{222}\text{Rn}$  にさらされた数グループの地下鉱山労働者、とくにウラン鉱山労働者の中で観察された肺がんリスクの増加分に関し過去 15 年間に得られた有力な疫学的情報に基づくものである。これらのデータからラドン娘核種被曝と肺がんリスクの増加分との間の関係が推定できる。委員会が放射線作業者について勧告した放射線の確率的影響に関するリスクの基本的な限度 (ICRP Publication 26, 1977) を考慮に加えれば、この疫学的方法によって、 $^{222}\text{Rn}$  の短寿命娘核種の被曝限度をいっそう直接的に算定することが可能になる。第二の手法は、摂取あるいは被曝と肺線量あるいは実効線量当量との関係を与える線量算定モデルに基づくものである。この線量算定による方法は実効線量当量の勧告年限度 0.05 Sv を出発点とする。疫学的方法と線量算定による方法のどちらも不確かさを伴う。この不確かさのため、最終的な決定はこの2つの方法を比較したうえ行うべきであると委員会は考えた。

## 疫学的方法

(6)  $^{222}\text{Rn}$  とその娘核種にさらされたいくつかのグループの地下鉱山労働者の中に、肺がんリスクの増加分が観察されてきた。その例は米国のコロラド州、チェコスロバキア、およびカナダのオンタリオ州のウラン鉱山労働者、ニューファウンドランドの蛍石鉱山労働者、およびスウェーデンとイングランドの硬岩鉱山で働く非ウラン鉱山労働者のもっと小人数のいくつかのグループである。これらの疫学的研究の結果は UNSCEAR 報告書 (UN 77) で詳細に検討されており、その報告書には文献も掲載されている。1977 年以降に公表された新しいデータは、チェコスロバキアのウラン鉱山労働者の調査結果をもっと詳細に解析した一論文 (KU 79)、および 1974 年までの米国のウラン鉱山労働者についてのデータをまとめた論文 (AR 78; BE 80 も参照) だけであり、それ以外の重要なものを委員会は知らない。

(7) とくに重要な意味をもつのは、米国とチェコスロバキアの 2 つの比較的大きなウラン鉱山労働者のグループに関する疫学的研究であり、それぞれ平均約 700 WLM\* と 300 WLM の被曝をした人々について、30 年近くの期間にわたって追跡調査が続けられてきている。それらの研究によれば、肺がん発生率の増加と  $^{222}\text{Rn}$  娘核種のポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝との間には、数百 WLM のレベルまでしきい値のない比例関係が存在することを否定し得ない。図 1 は、1948 年から 1952 年の間に採鉱に従事し始め、1975 年末まで追跡調査 (平均追跡調査期間 24 年) された、チェコのウラン鉱山労働者

---

\* “作業レベル月 (working level month, WLM)” と “作業レベル (working level, WL)” という単位の定義およびそれらの SI 単位への換算係数は、この報告書の付録 B に示した。

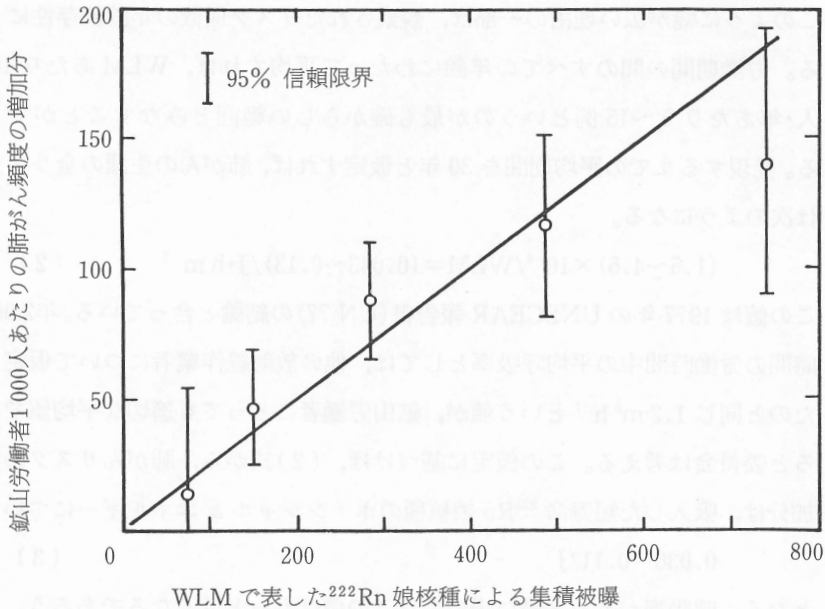


図1 短寿命 $^{222}\text{Rn}$ 娘核種によるポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝の関数で表したチェコスロバキアのウラン鉱山労働者に観察された(1948~1975)肺がん頻度の増加 (Kunz ら、1979)。

働者 (KU 79) の中に見られた肺がんリスクの増加分を示している。

この線の傾きは、肺がんリスクが単位 WLM 被曝あたり約  $(2 \sim 3) \times 10^{-4}$  に相当している。平均年被曝が 10~20 WLM よりも低い低被曝グループ(個人の被曝は <100 WLM) では、がんの増加は 5% レベルでは有意でなかった。しかしながら、このような線の傾きは鉱山労働者のサブグループごとに異なり、鉱山労働を開始した年齢が低いほど、また高被曝レベルでは被曝率が大きいほど、リスク係数は小さいことをこの観察結果は示している (KU 79)。

(8)  $^{222}\text{Rn}$  に被曝した鉱山労働者に関する種々の疫学的研究が示すところによると、短寿命  $^{222}\text{Rn}$  娘核種に対する単位ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝あたりの平均肺がんリスク率の増加分の値は、 $10^6$  人・年あたり WLM あたり約 2~20 例の範囲にわたっている (UN 77, AR 78, CO 80, BE 80)。

(6)

このように幅が広い理由の一部は、観察されたリスク係数の年齢依存性による。労働期間の間のすべての年齢にわたって平均すれば、WLMあたり10<sup>6</sup>人・年あたり5~15例というのが最も確からしい範囲とみなすことができる。発現するまでの平均期間を30年と仮定すれば、肺がんの生涯の全リスクは次のようになる。

$$(1.5\sim 4.5)\times 10^{-4}/\text{WLM}=(0.043\sim 0.13)/\text{J}\cdot\text{h m}^{-3} \quad (2)$$

この値は1977年のUNSCEAR報告書(UN 77)の結論と合っている。年2000時間の労働時間中の平均呼吸率としては、他の放射線作業員について仮定したのと同じ1.2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>という値が、鉱山労働者にとっても適切な平均値であると委員会は考える。この仮定に基づけば、(2)式から、肺がんリスクの増加分は、吸入した短寿命<sup>222</sup>Rn娘核種のポテンシャル $\alpha$ エネルギーについて

$$0.036\sim 0.11/\text{J} \quad (3)$$

となる。呼吸率がもっと高い場合にはこの値はもっと低くなるであろう。コロラドのウラン鉱山労働者のリスク値はこの範囲の中で低い方にあり、チェコのウラン鉱山労働者のリスク値はこの範囲の中間より高い方にあることは注目すべきである。

(9) 作業員に関する0.05 Svという実効線量当量の年限度が、線量-リスクの比例関係を仮定したリスクの概念(4項参照)を根拠として、委員会により勧告されている。この根拠に基づいて、個々の鉱山労働者の<sup>222</sup>Rn娘核種に対する年被曝は、リスク換算係数 $1.65\times 10^{-2}\text{Sv}^{-1}$ を適用したとき0.05 Svという実効線量(当量)限度に対応するリスクと同じリスクに制限されるべきである(IC 77)。(3)式に与えられている鉱山労働者の肺がんリスク係数の範囲を考慮すれば、この疫学的方法により、職業上の年摂取限度(ALI)は、短寿命<sup>222</sup>Rn娘核種の混合物の全吸入ポテンシャル $\alpha$ エネルギーに関し

$$0.0075\sim 0.023 \text{ J} \quad (4)$$

の範囲となる。平均呼吸率を1.2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>として、この数値はポテンシャル $\alpha$



エネルギー被曝の年限度 (ALE)

$$0.0063 \sim 0.020 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} = 1.8 \sim 5.5 \text{ WLM} \quad (5)$$

に相当する。

(10) 委員会は、8項で与えられたリスク係数は鉱山労働者がさらされた坑内の体外γ線および他の発がん性の化学物質による肺がんリスクの増加分を含んでいる点を指摘したい。さらに、考えられる発がん補助効果あるいは相乗効果もかぞえ込んでいることになる。したがって、<sup>222</sup>Rn 娘核種の吸入だけからの実際のリスクはもっと低いかもしれない。したがって、このことを考慮すれば、ラドン娘核種だけに被曝する作業者の摂取限度あるいは被曝限度は、いくぶん高い値になろう。しかし、疫学的方法のおもな不確かさは、肺がんで死んだ鉱山作業者の被曝データの信頼性の低さからきている。鉱山でのエリアモニタリング測定値に基づいた労働者個人個人の被曝の計算における系統誤差を排除することはできない (DO 79, ZE 81)。

## 線量算定による方法

(11) 体内残留の実験によれば、吸入した<sup>222</sup>Rn娘核種および<sup>220</sup>Rn娘核種の人の肺での生物的半減期は数時間からおよそ1日までの間である。このことは、肺に沈着した<sup>222</sup>Rn娘核種のポテンシャル $\alpha$ エネルギーの大部分がこの臓器に吸収されることを意味し、他の組織に与えられる線量は実効線量(当量)にほとんど寄与しない。肺がんあるいは他の確率的放射線影響の誘発に関する決定細胞は、気管支上皮の基底細胞層および肺胞上皮に存在すると仮定される(IC 80)。したがって、これら2つの組織が、吸入されたラドン娘核種の線量算定にあたっての肺の中の標的組織とみなすことができる。もっと長寿命の<sup>220</sup>Rn娘核種である<sup>212</sup>Pb(ThB)の場合だけは、肺に沈着した放射能のかなりの部分が他の組織、とくに血液(赤血球)、腎および骨表面に移行する(IC 79, JAC 80)。

(12) 肺がんのような放射線の確率的影響に関するリスクの概念は、放射線防護の目的で委員会が勧告しているように、リスクにかかわる標的組織に対する線量とそれによるがん誘発確率の増加との間に低線量域できい値のない比例関係を仮定している。ラドンにさらされた鉱山労働者にみられる肺がん発生率の増加(7項参照)は、ポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝として約 $2 \text{ J}\cdot\text{h m}^{-3}$ すなわち数百WLMまで、そのような比例関係が成り立つ可能性を否定していない。この概念に基づけば、肺の中のラドン娘核種に関するリスクにかかわる線量算定上の量は、前述の2つの標的組織、すなわち気管・気管支(tracheo-bronchial, TB)領域の基底細胞層および肺胞(pulmonary, P)領域の上皮の平均線量あるいは平均線量当量である。

(13) ICRP 専門委員会2の最初の勧告(IC 60)以来、吸入したラドン

娘核種による気管支樹での線量分布に関するよりよい推定値がいくつか公表された (たとえば AL 64, JA 64, HA 67, WA 70, HA 72)。これらの研究はいずれも区域-亜区域気管支の基底細胞が最大の線量をうけるであろうという結論になっている。これらの研究から、また  $\alpha$  線の線質係数を 20 と仮定して、 $^{222}\text{Rn}$  娘核種による単位ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝あたりのこれら気管支の気道中の標的細胞に対する線量当量を導くことができ、その結果  $\text{J}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$  あたり約 20~400 Sv (WLM あたり 0.07~1.4 Sv) の範囲の値が得られる。

線量換算係数にこのような広い幅があるのは、主として、これら線量算定モデルの中で用いられた生物学的および物理的パラメータが異なっていることによる。しかし、新しいいっそう現実的な解析によれば、通常条件下では区域-亜区域気管支の基底細胞に対する線量は、前述の範囲のうちの低い方に入るであろうと考えられる (HA 80, JAC 80, JAM 80)。以下の線量算定による方法は最近刊行された 2 つの詳しい研究 (JAC 80, 81; JAM 80, 81) の結果に基づいている\*。とくに、これら 2 つのモデルは、最も鋭敏なパラメータの一つである幹細胞の深さが気管支樹全体を通じて場所により大きく変動する (GA 72) という観察結果を考慮に入れている。鉱山における通常の状態では、吸入したラドン娘核種による気管支分岐全体にわたっての線量分布が以前に仮定したものよりも均一で、葉気管支から上部細気管支に至る部位にわたってゆるやかな最高値が続く、という点で、2 つのモデルの結論は一致している。

(14) 12項で指摘したように、肺に関するリスクにかかわる線量は気管支基底細胞層に対する平均線量および肺胞上皮に対する平均線量とされる。

\* これら 2 つのモデルとその結果の詳しい比較は OECD/NEA 専門家グループにより準備中<sup>†</sup>である。

† 訳注 JAM 81 参照。

この基本的な考え方は前述の線量算定上の知見によって支持されている。さらに、これら線量算定の研究から、肺の中でのラドン娘核種の沈着、移行、残留を規定する種々のパラメータへの、これら2つの標的組織に対する平均線量の依存性は比較的小さいことがわかる。表1には、肺の標的組織に対する平均線量当量および肺全体に対する平均線量当量に関する線量換算関数を示した。それらは、 $\alpha$ 線の線質係数として20を用い、短寿命 $^{222}\text{Rn}$ 娘核種に対する職業上の被曝に関する最良の推定式として、これら2つの線量計算研究から導かれたものである。

表1 吸入 $^{222}\text{Rn}$ 娘核種から肺の標的組織および肺全体への平均線量当量についての推定された換算関数(職業被曝)<sup>1,2</sup>

標的組織, 線量算定モデル	平均線量当量 (Sv)	
	吸入ポテンシャル $\alpha$ エネルギーの J あたり	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー 被曝の WLM あたり
気管支基底細胞		
JACOBI-EISFELD モデル	$18+170f_p$	$0.076+0.72f_p$
JAMES-BIRCHALL モデル	$14+560f_p$	$0.060+2.4 f_p$
ICRP 肺モデル <sup>3</sup>	$15+100f_p$	$0.064+0.42f_p$
肺泡領域		
JACOBI-EISFELD モデル <sup>2</sup>	$5.2(1-f_p)$	$0.022(1-f_p)$
JAMES-BIRCHALL モデル <sup>2</sup>	約 2	約 0.01
ICRP 肺モデル	$8(1-f_p)$	$0.033(1-f_p)$
肺全体 ( $m=1\text{kg}$ )		
JACOBI-EISFELD モデル	$7+3f_p$	$0.030+0.013f_p$
JAMES-BIRCHALL モデル		算出せず
ICRP 肺モデル	$10+4f_p$	$0.042+0.016f_p$

1. 平均呼吸率として $1.2\text{ m}^3\text{ h}^{-1}$ 、娘核種が付着したキャリアーエアロゾルとして $\text{AMAD}^*=0.2\sim 0.3\ \mu\text{m}$ を想定。
2. Jacobi-Eisfeldの研究からの値はWeibelの解剖学的肺モデル(A)を想定し、James-BirchallのそれはYeh-Shum肺モデルを想定している。
3. TB領域全体の平均線量。この領域の重量を $0.04\sim 0.05\text{ kg}$ と仮定している(IC75)。

\* 訳注 activity median aerodynamic diameter (空気力学的放射能中央径)

表 2  $^{222}\text{Rn}$  娘核種による職業被曝に関して推定された平均線量換算係数。  
娘核種混合物 (AMAD=0.2~0.3  $\mu\text{m}$ ) の全ポテンシャル  $\alpha$  エネルギーのうち  
エアロゾル粒子に付着していないものの割合を  $f_p=0\sim 0.05$  と仮定。

標的組織, 線量算定モデル	平均線量当量 (Sv)	
	吸入ポテンシャル $\alpha$ エネルギーの J あたり	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー 被曝の WLM あたり
気管支基底細胞層		
JACOBI-EISFELD モデル	18~27	0.076~0.11
JAMES-BIRCHALL モデル	14~42	0.060~0.18
ICRP 肺モデル	15~20	0.064~0.085
肺胞領域		
JACOBI-EISFELD モデル	5.2~4.9	0.022~0.021
JAMES-BIRCHALL モデル	約 2	約 0.01
ICRP 肺モデル	8.0~7.0	0.033~0.031
肺全体 ( $m=1\text{kg}$ )		
JACOBI-EISFELD モデル	7.1	0.030
JAMES-BIRCHALL モデル		算出せず
ICRP 肺モデル	10	0.042

線量の値は、娘核種混合物の全ポテンシャル  $\alpha$  エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合  $f_p$  の関数として与えられる。表 1 には  $^{222}\text{Rn}$  娘核種の吸入について、クリアランスのクラス D の ICRP 肺モデル (IC 79) が適用できるとして得られた換算関数も記してある (JA 72, UN 77)。このモデルを用いたときの線量は、対象とした肺領域の全質量にわたっての平均値である。この ICRP 肺モデルは、肺の TB 領域および P 領域へのラドン娘核種の沈着確率を過大評価していることに注意すべきである。

(15) これまでの経験によれば、大部分の職業上の被曝条件下では、娘核種混合物のポテンシャル  $\alpha$  エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合は、年間の全労働期間の平均値として  $f_p=0\sim 0.05$  の範囲にある。この範囲について種々の線量算定モデル (表 1 参照) を使って、表 2 に与えられているような線量換算係数が得られる。

(12)

(16) 結論として、職業被曝条件について、いろいろな線量算定モデルにより、吸入された短寿命<sup>222</sup>Rn娘核種のポテンシャル $\alpha$ エネルギーJあたり15~40 Svの範囲の気管支基底細胞層に対する平均線量当量を導くことができる。この値はWLMあたりおよそ0.064~0.17 Svに相当する。鉱山の粉塵濃度が高い区域では、線量換算係数はこの範囲の中の低い方の値と予想されるが、粉塵発生率が低く換気率の高い区域では、線量換算係数はこの範囲のうちの間より高い値の方があてはまると思われる。気管支基底細胞層に対する平均線量は、平均肺胞線量の約4~10倍である。線量を肺全体について平均するとすれば、Jあたり7~10 Sv、あるいはWLMあたり0.03~0.04 Svという線量換算係数が得られる。

(17) 委員会はその基本勧告において、肺全体(NP+TB+P+L領域)\*を一つの複合臓器と考えるべきであると提案した。このことは、肺について勧告したリスク荷重係数 $w_T=0.12$ は肺全体の平均線量に適用するものであることを意味している。この“平均肺線量 (mean lung dose, MLD)”概念は肺の肺胞領域に対する線量が主要因子であるときには合理的である。しかし、短寿命ラドン娘核種の吸入という特殊な場合には、気管支上皮に対する線量が肺胞領域あるいは肺全体に対する平均線量よりかなり高いものとなる。気管支上皮と肺胞組織の決定細胞が同じ程度の放射線感受性であることを考慮して、胃腸管について勧告したのと同様に、肺全体の荷重係数 $w_T=0.12$ を分割するのが適切かもしれない。MLD概念に代わるものとして、気管-気管支領域の基底細胞層と肺胞領域に対する平均線量に別々の荷重係数( $w_T=0.06$ )を適用することにより、吸入されたラドン娘核種による実効線量当量が導かれる。この代わりに概念を“分割肺線量 (regional lung dose,

\* 訳注 NP : nasal passage (鼻道の), TB : tracheo-bronchial (気管・気管支の), P : pulmonary [肺胞 (肺実質)] の, L : lymphatic (リンパ組織の) を、それぞれ示す。

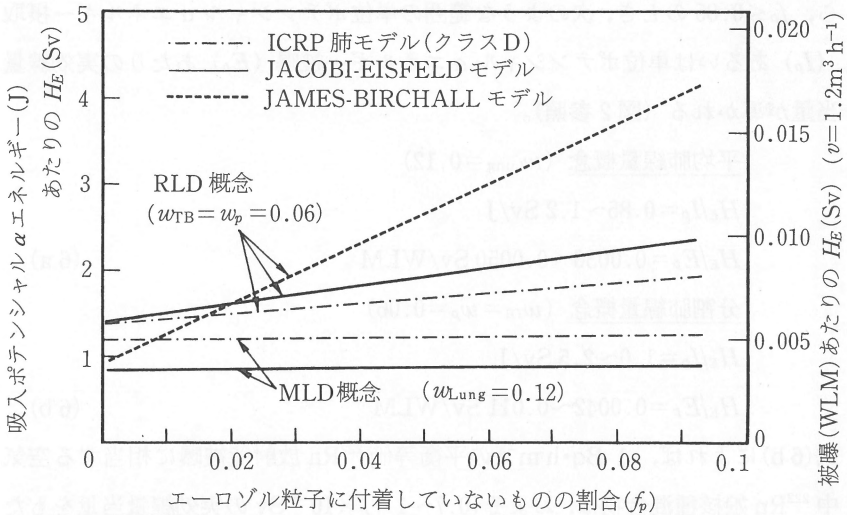


図2 娘核種混合物のポテンシャル $\alpha$ エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合の関数として表した $^{222}\text{Rn}$ 娘核種の吸入による実効線量当量。種々の線量算定モデルおよび荷重概念の比較。

RLD)” 概念と呼ぶ。

(18) この両方の荷重概念によって得られる $^{222}\text{Rn}$ 娘核種による実効線量当量を、吸入された空気中の $^{222}\text{Rn}$ 娘核種の全ポテンシャル $\alpha$ エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合の関数として図2に示した。曲線は表1に示した線量換算係数から導いたものである。 $^{222}\text{Rn}$ 娘核種の場合は肺以外の組織からの荷重された線量は小さく、無視しうる。鉱山での経験によれば、鉱山内の空気中のラドン娘核種混合物の $\alpha$ エネルギーのうち、エアロゾル粒子に付着していないものの時間平均の割合 $f_p$ は数%以下である( $f_p \leq 0.05$ )。図2は、このような条件下では、放射線防護の目的で $^{222}\text{Rn}$ 娘核種の任意の混合物による実効線量当量を表すには、全ポテンシャル $\alpha$ エネルギー摂取あるいはポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝がそれぞれ適切な量であろうということを示している。

(19)  $^{222}\text{Rn}$ 娘核種による職業上の被曝に関し、この2つの荷重概念が

(14)

ら、 $f_p \leq 0.05$  のとき、次のような範囲の単位ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー摂取 ( $I_p$ ) あるいは単位ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝 ( $E_p$ ) あたりの実効線量当量が導かれる (図 2 参照)。

平均肺線量概念 ( $w_{\text{lung}}=0.12$ )

$$H_E/I_p = 0.85 \sim 1.2 \text{ Sv/J}$$

$$H_E/E_p = 0.0036 \sim 0.0050 \text{ Sv/WLM} \quad (6 \text{ a})$$

分割肺線量概念 ( $w_{\text{TB}} = w_p = 0.06$ )

$$H_E/I_p = 1.0 \sim 2.5 \text{ Sv/J}$$

$$H_E/E_p = 0.0042 \sim 0.011 \text{ Sv/WLM} \quad (6 \text{ b})$$

式(6b)によれば、 $1 \text{ Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$  の平衡等価  $^{222}\text{Rn}$  放射能被曝に相当する空气中  $^{222}\text{Rn}$  娘核種混合物は、およそ  $(0.7 \sim 1.7) \times 10^{-8} \text{ Sv}$  の実効線量当量をもたらすこととなる。この値は  $^{222}\text{Rn}$  単独の  $\text{Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$  被曝あたりの実効線量当量の 40~100 倍である ( $^{222}\text{Rn}$  からの  $H_E$  は  $\text{Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$  あたり約  $1.8 \times 10^{-10} \text{ Sv}$ , 付録 C 参照)。したがって、実効線量 (当量) に対する  $^{222}\text{Rn}$  からの寄与は、空气中的娘核種混合物の平衡係数\*  $F$  が 0.1 以下の場合にのみ重要である。

(20) 吸入された  $^{220}\text{Rn}$  娘核種による肺の標的組織に対する線量は、 $^{222}\text{Rn}$  娘核種の場合と同じモデルを用いて推定されている (HA 73, JAC 80, JAM 80)。 $^{212}\text{Pb}$  (ThB) の放射性半減期は肺におけるその生物学的半減期と同程度なので、肺胞線量に対する気管支線量の比は  $^{222}\text{Rn}$  娘核種の場合よりも小さく、沈着した  $^{212}\text{Pb}$  放射能のかなりの部分は血液および他の組織へ移行する。これら組織からの線量寄与は、ICRP Publication 30 (IC 79) およびその補遺に記述された代謝モデルおよび線量算定モデルに基づいて評価することができる。

\* 訳注 平衡係数  $F$  については付録 B, とくに (B.6) 式を参照。



表3 吸入された<sup>220</sup>Rnとその娘核種からの平均実効線量当量 (JAC 80)

吸入放射性核種	実効線量当量 (Sv)		
	吸入放射能の 10 <sup>10</sup> Bq あたり	吸入ポテンシャル α エネルギーの J あたり	ポテンシャル α エネルギー 被曝の WLM あたり
<sup>220</sup> Rn (Tn)	0.9	—	—
<sup>216</sup> Po (ThA) <sup>1</sup>	0.1	—	—
	} 1		
<sup>212</sup> Pb (ThB)	400	0.6	0.0025
<sup>212</sup> Bi (ThC)	60	0.9	0.0038

1. エロゾル粒子に付着していない原子のかたちで吸入されたと仮定する。

(21) 吸入された<sup>220</sup>Rn娘核種の吸入単位放射能あたりおよび単位ポテンシャル α エネルギーあたりの作業者に対する実効線量当量の推定平均値は表3にまとめてある。比較のため吸入<sup>220</sup>Rnガスについての値(付録C参照)も表3に示してある。<sup>212</sup>Pb(ThB)と<sup>212</sup>Bi(ThC)に関するデータはキャリアーエロゾルとしてAMADが0.2~0.3μmのものに対応する値であり、これはたいていの鉱山内雰囲気について適切な値と考えることができる。

空気中での<sup>220</sup>Rnと<sup>216</sup>Po(ThA)との放射平衡を考慮に入れて、両方の核種による全実効線量当量は吸入した<sup>220</sup>RnのBqあたり約 $1 \times 10^{-10}$  Svと計算できる。この値は、空気中の<sup>212</sup>Pb(ThB)/<sup>220</sup>Rn(Tn)放射能比が約0.02よりも大きい場合には、<sup>212</sup>Pb(ThB)+<sup>212</sup>Bi(ThC)による実効線量(当量)に比べて小さい。

(22) 表3からわかるように、単位ポテンシャル α エネルギー摂取あるいは単位ポテンシャル α エネルギー被曝あたりの実効線量当量は、<sup>212</sup>Pb(ThB)と<sup>212</sup>Bi(ThC)とで大きくは変わらない。したがって、これら2核種の全ポテンシャル α エネルギー摂取あるいはポテンシャル α エネルギー被曝がモニタリングのための適切な量として使用できる。これらの目的には、<sup>212</sup>Pb(ThB)と<sup>212</sup>Bi(ThC)との任意の混合物についての実効線量当量として、吸入ポテンシャル α エネルギーの J あたり

(16)

$$H_E/I_p=0.8 \text{ Sv} \quad (7 \text{ a})$$

また、ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝の WLM あたり

$$H_E/E_p=0.0034 \text{ Sv} \quad (7 \text{ b})$$

を勧告する。

(23) 先の諸項で与えた  $^{222}\text{Rn}$  娘核種と  $^{220}\text{Rn}$  娘核種に関する実効的な線量換算係数は成人の標準人の職業上の被曝のためのものである。公衆の構成員の室内および屋外被曝には補正係数を適用しなければならない。とくに子供と幼児には、呼吸率、沈着、残留および組織重量の年齢依存性を考慮に入れなければならない (HO 79)。

## 勧告限度の設定

(24) 委員会は、作業者のための実効線量当量の年限度 0.05 Sv を、ラドンとその娘核種にさらされる鉱山労働者にも適用すべきであると勧告する。前節で与えたこれら放射性核種についての実効的な線量換算係数を考慮に入れて、この基本限度から、 $^{222}\text{Rn}$ 、 $^{220}\text{Rn}$  とそれぞれの短寿命娘核種混合物についての年摂取あるいは年被曝についての補助限度を導くことができる。

(25) 空気中の  $^{222}\text{Rn}$  娘核種混合物に関する職業上の摂取限度および被曝限度の可能な設定範囲を、異なった線量算定モデルあるいはリスク荷重概念 (図 2 参照) を用いて、吸入された空気中の娘核種混合物の全ポテンシャル  $\alpha$  エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合  $f_p$  の関数として図 3 に示した。平均肺線量 (MLD) 荷重概念から導かれる限度は、分割肺線量 (RLD) 荷重概念から導かれる限度のおよそ 1.5~3 倍である。

(26) ほとんどのラドン雰囲気、とくに鉱山内の雰囲気では、 $^{222}\text{Rn}$  娘核種混合物のポテンシャル  $\alpha$  エネルギーのうちエアロゾル粒子に付着していないものの割合の長期平均値は 0.05 より小さい。このような条件のもとに、表 4 にまとめてある限度の範囲が線量算定による方法から求められており、比較のために疫学的方法から導かれた限度の範囲も同表に掲げた (9 項参照)。最終的な限度を勧告するためには、2つの方法のどちらにも含まれる不確かさについての注意深い判断が必要である。

(27) 線量算定による方法のおもな不確かさは、気管支および肺胞上皮のリスクにさらされている細胞の肺がん誘発に關しての固有の放射線感受性がほとんどわかっていないということに起因する。ラドンにさらされた鉱山労働者の中にみられる腫瘍は主として気管支型であるが、いくつかの動物実

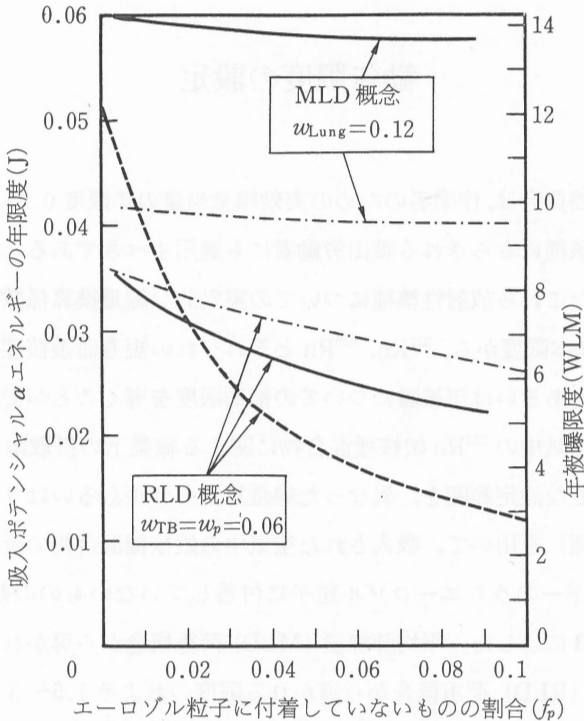


図3 種々の線量算定モデルおよび荷重概念から導かれた、短寿命の $^{222}\text{Rn}$ 娘核種に関する摂取限度および被曝限度の範囲。

— JACOBI-EISFELD モデル (JAC 80, 81);  
 --- JAMES-BIRCHALL モデル (JAM 80, 81);  
 - · - ICRP 肺モデルのクラスD

験は肺全体に対する線量のがん誘発の第一段階に大きく影響することを示している (CH 81)。

委員会が勧告 (IC 77) した肺全体に関する荷重係数  $w_T = 0.12$  は体外被曝をした症例から導かれたものであり、この場合肺全体がほぼ均等に照射されていることに注意する必要がある。ラドン娘核種の吸入という特別な場合には、肺胞上皮よりも気管支上皮の方がかなり高い線量となっていて、肺のこれら2つの標的組織中の平均線量を考慮してみるのがより現実的であると委

表4 線量算定による方法および疫学的方法から導かれた空気中の<sup>222</sup>Rn 娘核種に関する各種限度の比較

方法の種類	年限度 (ポテンシャル $\alpha$ エネルギー)	
	摂取限度 (J)	被曝限度 <sup>2</sup> (WLM)
線量算定による方法 <sup>1</sup>		
平均肺線量概念	0.042~0.059	10~14
分割肺線量概念	0.020~0.050	4.8~12
疫学的方法	0.0075~0.023	1.8~5.5

1.  $f_p=0\sim0.05$  についての値。
2. 平均呼吸率を  $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  と仮定。

員会は信ずる。

(28) 疫学的研究に基づく推定はもっと明快であるようにみえる。しかし、すでに述べたように、この場合もかなりの不確かさを伴う。ラドンにさらされた鉱山労働者の中にみられる肺がんにかかわる放射線リスクの推定値は、鉱山内雰囲気中に含まれる他の発がん因子をリスク算定のさいまったく考慮に入れていないために、高い値の方に偏っている。二番目に、これらリスク推定値はいくつかのウラン鉱山で現在年あたり  $0.01 \text{ Sv}$  の桁のレベルにある体外  $\gamma$  線のリスクへの寄与について補正されていない。不確かさの大きな原因の三番目は、これら疫学的研究における被曝の推定値の質がさまざまであることである。初期のウラン採鉱ではとくにそうであるが、ラドン被曝の推定に用いられたエリアモニタリングの結果から示された値よりも、鉱山労働者個人の被曝の方が高く、約2倍であったことも否定できないというある証拠がある (DO 79, ZE 81)。このような不確かさのすべてが、リスク係数算定値を高い値に偏らせることになる。したがって、限度を疫学的方法から導けば、その値は安全側の推定値であり、とくに換気率の高い鉱山ではそうであるとみなすことができよう。

(29) これらの考察に基づいて委員会は、短寿命 <sup>222</sup>Rn 娘核種の任意の

(20)

混合物のポテンシャル  $\alpha$  エネルギーに関する年摂取限度 ( $ALI_p$ ) を、作業者について

$$ALI_p = 0.02 \text{ J} \quad (8 \text{ a})$$

と勧告する。平均呼吸率  $v = 1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  を考慮に入れると、この限度はポテンシャル  $\alpha$  エネルギー被曝の年限度

$$ALE_p = 0.017 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} = 4.8 \text{ WLM} \quad (8 \text{ b})$$

に相当する。年間労働時間として 2000 時間を適用すると、これらの限度から、“誘導空气中濃度 (derived air concentration, DAC)” として

$$DAC_p = 8.3 \times 10^{-6} \text{ J m}^{-3} = 0.40 \text{ WL} \quad (9 \text{ a})$$

を導くことができる。平衡等価  $^{222}\text{Rn}$  濃度  $EC_{\text{Rn}-222}$  (付録 B 参照) で表現すれば、誘導空气中濃度として

$$DAC(EC_{\text{Rn}-222}) = 1500 \text{ Bq m}^{-3} \quad (9 \text{ b})$$

が得られる。ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー摂取が委員会が限度を勧告する基本的な量であることに注意する必要がある。

(30) 娘核種を除いての  $^{222}\text{Rn}$  ガスのみによる被曝については、委員会は付録 C で導いた  $^{222}\text{Rn}$  についての実効的な線量換算係数を考慮に入れて、放射能被曝の年限度として

$$ALE(^{222}\text{Rn}) = 3 \times 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{h m}^{-3} \quad (10)$$

を勧告する。この限度から、娘核種を伴わない  $^{222}\text{Rn}$  の DAC は

$$DAC(^{222}\text{Rn}) = 1.5 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \quad (11)$$

となる。この値は、(9 b) 式で与えられた  $^{222}\text{Rn}$  娘核種に関する平衡等価 DAC ( $EC_{\text{Rn}-222}$ ) の 100 倍である。したがって、通常の状態では  $^{222}\text{Rn}$  ガス自体からの寄与は無視しうる。

(31) 空気中の  $^{220}\text{Rn}$  とその娘核種に関しては、委員会は線量算定による方法 (21 項と 22 項参照) に基づいて計算した次の年限度と DAC 値を作業者について勧告する。

$^{220}\text{Rn}(+^{216}\text{Po})$  について：

$$\text{ALE}=5 \times 10^8 \text{ Bq} \cdot \text{h m}^{-3} \text{ (基本限度)}$$

$$\text{ALI}=6 \times 10^8 \text{ Bq}$$

$$\text{DAC}=2.5 \times 10^5 \text{ Bq m}^{-3} \quad (12)$$

$^{212}\text{Pb}(\text{ThB}) + ^{212}\text{Bi}(\text{ThC})$  について：

$$\text{ALI}_p=0.06 \text{ J (基本限度)}$$

$$\text{ALE}_p=0.050 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3}=14 \text{ WLM}$$

$$\text{DAC}_p=2.5 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}=1.2 \text{ WL} \quad (13)$$

後者の値は、平衡等価  $^{220}\text{Rn}$  濃度で表した DAC として

$$\text{DAC}(\text{EC}_{\text{Rn}-222})=330 \text{ Bq m}^{-3} \quad (14)$$

に相当する。この  $^{220}\text{Rn}$  娘核種に対する DAC は  $^{220}\text{Rn}(+^{216}\text{Po})$  に対する DAC の約 1/500 である。したがって、ほとんどの場合、 $^{220}\text{Rn}$  による被曝は無視できる。

(32) ラドン娘核種と体外  $\gamma$  線の両方に職業上被曝する作業者に関しては、もし、

$$\left( \frac{H_E}{H_{E,\text{Limit}}} \right)_{\text{ext.}} + \sum \frac{I}{I_{\text{Limit}}} = 1 \quad (15)$$

という条件が満たされるならば、委員会が勧告する基本限度を超えることはないであろう。この式で、 $H_{E,\text{ext.}}$  は体外放射線による年実効線量当量、 $I$  は、放射性核種たとえば  $^{222}\text{Rn}$  娘核種と  $^{220}\text{Rn}$  娘核種の人体内へのポテンシャル  $\alpha$  エネルギーの年摂取あるいは放射能の年摂取である。摂取比  $I/I_{\text{Limit}}$  は対応する被曝比  $E/E_{\text{Limit}}$  で置きかえてもよい。体外実効線量(当量)を対応する年深部線量当量指標で表すこともできる。

(33)  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  とそれらの短寿命娘核種混合物について勧告した年摂取限度 (ALI) および年被曝限度 (ALE), ならびにそれに対応する誘導空气中濃度 (DAC) の値を表 5 にまとめて示した。実際に適用するためには、

導いた値を有効数字1個にまらめてよい。

委員会は、作業者のために勧告されたこれらの年限度は、線量の基本限度と同様に、職業被曝に関しての容認できない領域の下限值であると解釈されるべきであることを強調したい。この意味で、勧告されたこれら限度は、必要とされる最適化手法——これは、委員会が勧告した線量制限体系 (IC 77)

表5 年摂取限度 (ALI), 年被曝限度 (ALE) および誘導空气中濃度 (DAC)の勧告値;基本限度にはアンダーラインを付してある。実際への適用のためには、導かれた値を有効数字1個にまらめてよい。

ラドン				
限度の種類 およびDAC	単位	$^{222}\text{Rn}$ (Rn)	$^{220}\text{Rn} + ^{216}\text{Po}$ (Tn+ThA)	
<u>ALE</u>	$\text{Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$	$3 \times 10^8$	$5 \times 10^8$	
ALI	Bq	$3.6 \times 10^8$	$6.0 \times 10^8$	
DAC <sup>1</sup>	$\text{Bq m}^{-3}$	$1.5 \times 10^5$	$2.5 \times 10^5$	

ラドン娘核種				
限度の種類 およびDAC		単位	$^{222}\text{Rn}$ (Rn) 娘核種 <sup>2</sup>	$^{220}\text{Rn}$ (Tn) 娘核種 <sup>3</sup>
<u>ALI</u>	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー	J	<u>0.02</u>	<u>0.06</u>
	平衡等価 Rn 放射能	Bq	$3.6 \times 10^6$	$8.0 \times 10^5$
ALE	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー	$\text{J} \cdot \text{h m}^{-3}$ WLM	0.017 4.8	0.050 14
	平衡等価 Rn 放射能	$\text{Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$	$3.0 \times 10^6$	$6.6 \times 10^5$
DAC <sup>1</sup>	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー	$\text{J m}^{-3}$ WL	$8.3 \times 10^{-6}$ 0.40	$2.5 \times 10^{-5}$ 1.2
	平衡等価 Rn 放射能	$\text{Bq m}^{-3}$	1500	330

1. 年間2000時間の労働時間中の平均呼吸率を $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ と仮定。

2.  $^{218}\text{Po}$  (RaA) から $^{214}\text{Po}$  (RaC') まで。

3.  $^{212}\text{Pb}$  (ThB) から $^{212}\text{Po}$  (ThC') まで。



全体の中できわめて重要な部分を構成している——のための限界条件である。

(34) 表5に示した摂取あるいは被曝の勧告限度から、作業者に関する年あたり0.05 Svという実効線量当量限度を適用することによって、ポテンシャル $\alpha$ エネルギー摂取( $I$ )あるいはポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝( $E$ )の単位量あたりの実効線量当量 $H_E$ を、それぞれ導くことができる。

短寿命 $^{222}\text{Rn}$ 娘核種については、これらの線量換算係数として次の値が適用される：

$$H_E/I_F = 2.5 \text{ Sv/J}$$

$$H_E/E_F = 3.0 \text{ Sv/J} \cdot \text{h m}^{-3} = 0.010 \text{ Sv/WLM} \quad (16)$$

$^{220}\text{Rn}$ 娘核種( $^{212}\text{Pb} + ^{212}\text{Po}$ )については、対応する線量換算係数は $^{222}\text{Rn}$ 娘核種について与えられた値の1/3である [(7)式参照]。

委員会は、職業上の放射線防護における最適化計算にはこれらの線量換算係数を適用することを勧告する。

## 付 録 A

## 放射性崩壊特性

$^{222}\text{Rn}$ は $^{238}\text{U}$ 崩壊系列中の $^{226}\text{Ra}$  ( $T_r=1600$ 年)の崩壊により生成する。  
 $^{220}\text{Rn}$ は $^{232}\text{Th}$ 崩壊系列中の放射性核種で、 $^{224}\text{Ra}$  ( $T_r=3.64$ 日)の崩壊により生成する。表A.1とA.2に $^{222}\text{Rn}$ と $^{220}\text{Rn}$ の崩壊系列およびこれら放射性核種の主要崩壊データをUNSCEARの報告書(UN77)から引用して記載した。表には放射性半減期( $T_r$ )、放射性崩壊定数( $\lambda_r$ )および放出される

表 A. 1  $^{222}\text{Rn}$  とその短寿命娘核種のおもな放射性崩壊特性 (UN 77)<sup>1</sup>

放射性核種の崩壊系列	$T_r$	$\lambda_r$ ( $\text{h}^{-1}$ )	おもなエネルギー (MeV) と強度		
			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
$^{222}\text{Rn}(\text{Rn})$ ↓ $\alpha$	3.823 d	$7.55 \times 10^{-3}$	5.49(100%)	—	0.51(0.07%)
$^{218}\text{Po}(\text{RaA})$ ↓ $\alpha$	3.05 min	13.6	6.00(~100%)	0.33(~0.019%)	—
$^{214}\text{Pb}(\text{RaB})$ ↓ $\beta, \gamma$	26.8 min	1.55	—	0.65(50%) 0.71(40%) 0.98(6%)	0.295(19%) 0.352(36%)
$^{214}\text{Bi}(\text{RaC})$ ↓ $\beta, \gamma$	19.7 min	2.11	5.45(0.012%) 5.51(0.008%)	1.0 (23%) 1.51(40%) 3.26(19%)	0.609(47%) 1.12 (17%) 1.76 (17%)
$^{214}\text{Po}(\text{RaC}')$ ↓ $\alpha$	164 $\mu\text{s}$	$1.52 \times 10^7$	7.69(100%)	—	0.799(0.014%)

1.  $^{218}\text{Po}$  と  $^{214}\text{Po}$  からの分岐は、その割合が0.02%と低いため無視できる。

(放射線の) 主要エネルギーとその相対強度が示してある。

表 A. 2  $^{220}\text{Rn}$  とその娘核種のおもな放射性崩壊特性 (UN 77)

放射性核種の崩壊系列	$T_r$	$\lambda_r$ ( $\text{h}^{-1}$ )	おもなエネルギー (MeV) と強度		
			$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
$^{220}\text{Rn}(\text{Tn})$	55 s	45.4	6.29(100%)	—	0.55(0.07%)
$\downarrow \alpha$					
$^{216}\text{Po}(\text{ThA})$	0.15 s	$1.58 \times 10^4$	6.78(100%)	—	—
$\downarrow \alpha$					
$^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$	10.64 h	0.06514	—	0.346(81%) 0.586(14%)	0.239(47%) 0.300(3.2%)
$\downarrow \beta, \gamma$					
$^{212}\text{Bi}(\text{ThC})$	60.6 min	0.686	6.05(25%) 6.09(10%)	1.55(5%) 2.26(55%)	0.040(2%) 0.727(7%) 1.620(1.8%)
$\swarrow 64\% \beta, \gamma$					
$^{212}\text{Po}(\text{ThC}')$	304 ns	$8.21 \times 10^9$	8.78(100%)	—	—
$\searrow 36\% \alpha$					
$^{208}\text{Tl}(\text{ThC}'')$	3.10 min	13.4	—	1.28(25%) 1.52(21%) 1.80(50%)	0.511(23%) 0.583(86%) 0.860(12%) 2.614(100%)
$\swarrow \alpha$					
$^{208}\text{Pb}(\text{ThC})$					

## 付 録 B

## 特殊な量と単位

ポテンシャル  $\alpha$  エネルギー

ある原子のポテンシャル  $\alpha$  エネルギー  $\varepsilon_p$  とは、この原子が崩壊系列に沿って  $^{210}\text{Pb}$  (RaD) あるいは  $^{208}\text{Pb}$  にまで崩壊する過程で放出される全  $\alpha$  エネルギーである。ある放射性核種の放射能の Bq あたりの全ポテンシャル  $\alpha$  エネルギーは、 $\varepsilon_p/\lambda_r$  であり、ここで  $\lambda_r$  は  $\text{s}^{-1}$  で表された崩壊定数である。 $\varepsilon_p$  および  $\varepsilon_p/\lambda_r$  の値を表 B.1 に示した。

表 B.1 原子あたりおよび Bq あたりのポテンシャル  $\alpha$  エネルギー

放射性核種	ポテンシャル $\alpha$ エネルギー			
	原子あたり ( $\varepsilon_p$ )		Bq あたり ( $\varepsilon_p/\lambda_r$ )	
	MeV で 表したとき	$10^{-12}\text{J}$ で 表したとき	MeV で 表したとき	$10^{-10}\text{J}$ で 表したとき
$^{222}\text{Rn}$ (Rn)	19.2	3.07	$9.15 \times 10^6$	14 700
$^{218}\text{Po}$ (RaA)	13.7	2.19	3 620	5.79
$^{214}\text{Pb}$ (RaB)	7.69	1.23	17 800	28.6
$^{214}\text{Bi}$ (RaC)	7.69	1.23	13 100	21.0
$^{214}\text{Po}$ (RaC')	7.69	1.23	$2.0 \times 10^{-3}$	$3.0 \times 10^{-6}$
$^{220}\text{Rn}$ (Tn)	20.9	3.34	1 660	2.65
$^{216}\text{Po}$ (ThA)	14.6	2.34	3.32	$5.32 \times 10^{-3}$
$^{212}\text{Pb}$ (ThB)	7.80	1.25	$4.31 \times 10^5$	691
$^{212}\text{Bi}$ (ThC)	7.80	1.25	$4.09 \times 10^4$	65.6
$^{212}\text{Po}$ (ThC')	8.78	1.41	$3.85 \times 10^{-6}$	$6.2 \times 10^{-9}$

### 空気中のポテンシャル $\alpha$ エネルギー濃度

$^{222}\text{Rn}$  あるいは  $^{220}\text{Rn}$  の短寿命娘核種の任意の混合物のポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度とは、空気の単位体積あたりに存在するすべての娘核種のポテンシャル  $\alpha$  エネルギーの合計である。空気中の娘核種  $i$  の放射能濃度を  $c_{a,i}$  とすれば、娘核種混合物のポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度  $c_p$  は、それぞれ  $^{210}\text{Pb}$  あるいは  $^{208}\text{Pb}$  までのすべての短寿命娘核種について合計した値：

$$c_p = \sum_i c_{p,i} = \sum_i c_{a,i} \cdot \epsilon_{p,i} / \lambda_{r,i} \quad (\text{B.1})$$

となる。この量は、SI 単位では次のように表示できる。

$$1 \text{ J m}^{-3} = 6.24 \times 10^{12} \text{ MeV m}^{-3} = 6.24 \times 10^9 \text{ MeV l}^{-1} \quad (\text{B.2})$$

次のように定義される 1 WL (作業レベル) という特殊単位が、この量を表すためにしばしば用いられる。

$$1 \text{ WL} = 1.3 \times 10^5 \text{ MeV l}^{-1} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3} \quad (\text{B.3})$$

1 WL は、 $100 \text{ pCi l}^{-1} = 3.7 \text{ Bq l}^{-1} = 3700 \text{ Bq m}^{-3}$  の放射能濃度の  $^{222}\text{Rn}$  と放射平衡にある空気中の短寿命  $^{222}\text{Rn}$  娘核種のポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度にほぼ相当する。 $^{220}\text{Rn}$  と放射平衡にある  $^{220}\text{Rn}$  娘核種に関しては、1 WL は  $7.43 \text{ pCi l}^{-1} = 0.275 \text{ Bq l}^{-1} = 275 \text{ Bq m}^{-3}$  の  $^{220}\text{Rn}$  濃度に相当する。

表 B.2 には、 $^{222}\text{Rn}$  の短寿命娘核種と  $^{220}\text{Rn}$  の短寿命娘核種について放射能濃度 ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) とポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度との間の換算係数を示した。

### 平衡等価ラドン濃度 ( $EC_{\text{Rn}}$ ) および平衡係数 (F)

空気中の短寿命 Rn 娘核種の非平衡混合物の  $EC_{\text{Rn}}$  とは、その  $EC_{\text{Rn}}$  をもつ非平衡混合物と同じポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度  $c_p$  をもつ短寿命娘核種と放射平衡にあるラドンの放射能濃度である。

したがって、 $^{222}\text{Rn}$  とその娘核種に関しては

表 B. 2 Bq m<sup>-3</sup>あたりのポテンシャル  $\alpha$  エネルギー濃度

放射性核種	MeV l <sup>-1</sup>	10 <sup>-10</sup> J m <sup>-3</sup>	10 <sup>-6</sup> WL
<sup>218</sup> Po (RaA)	3.62	5.79	27.8
<sup>214</sup> Pb (RaB)	17.8	28.6	137
<sup>214</sup> Bi (RaC)	13.1	21.0	101
<sup>214</sup> Po (RaC')	2.0 × 10 <sup>-6</sup>	3.0 × 10 <sup>-6</sup>	1.6 × 10 <sup>-5</sup>
<sup>216</sup> Po (ThA)	3.32 × 10 <sup>-3</sup>	5.32 × 10 <sup>-3</sup>	0.0256
<sup>212</sup> Pb (ThB)	431	691	3 320
<sup>212</sup> Bi (ThC)	40.9	65.6	315
<sup>212</sup> Po (ThC')	3.85 × 10 <sup>-9</sup>	6.2 × 10 <sup>-9</sup>	3.0 × 10 <sup>-8</sup>

$$\begin{aligned}
 EC_{Rn}(\text{Bq m}^{-3}) &= 2.85 \times 10^{-2} \cdot c_p(\text{MeV l}^{-1}) \\
 &= 1.78 \times 10^8 \cdot c_p(\text{J m}^{-3}) \\
 &= 3\,700 \cdot c_p(\text{WL})
 \end{aligned} \tag{B.4}$$

[注:  $EC_{Rn}(\text{pCi l}^{-1}) = 100 \cdot c_p(\text{WL})$ ]

であり, また <sup>220</sup>Rn とその娘核種については

$$\begin{aligned}
 EC_{Tn}(\text{Bq m}^{-3}) &= 2.12 \times 10^{-3} \cdot c_p(\text{MeV l}^{-1}) \\
 &= 1.32 \times 10^7 \cdot c_p(\text{J m}^{-3}) \\
 &= 275 \cdot c_p(\text{WL})
 \end{aligned} \tag{B.5}$$

となる。ポテンシャル  $\alpha$  エネルギーに関する“平衡係数”  $F$  は, 空気中のラドンの実際の放射能濃度  $c_{Rn}$  と  $EC_{Rn}$  との比として次のように定義される。

$$F = \frac{EC_{Rn}}{c_{Rn}} \tag{B.6}$$

### 放射能被曝およびポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝(E)

ある個人の <sup>222</sup>Rn あるいは <sup>220</sup>Rn に対する“放射能被曝”とは, それぞれの個人がある一定期間さらされている <sup>222</sup>Rn あるいは <sup>220</sup>Rn の放射能濃度の時間積分値である。その単位はたとえば, Bq · h m<sup>-3</sup> である。

ある個人の $^{222}\text{Rn}$ の短寿命娘核種あるいは $^{220}\text{Rn}$ の短寿命娘核種による“ポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝”とは、その個人がある一定期間さらされている娘核種混合物のポテンシャル $\alpha$ エネルギー濃度の時間積分値である。この量は次の単位で表すことができる。

$$1 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} = 6.24 \times 10^9 \text{ MeV} \cdot \text{h l}^{-1} = 4.80 \times 10^4 \text{ WL} \cdot \text{h}$$

$$1 \text{ WL} \cdot \text{h} = 1.3 \times 10^5 \text{ MeV} \cdot \text{h l}^{-1} = 2.08 \times 10^{-5} \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} \quad (\text{B.7})$$

鉱山労働者のポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝は、しばしばWLM(作業レベル月)の単位で表される。1WLMは、1か月の標準労働時間[(年間2000労働時間/12か月)≈約170時間]の間1WLにさらされることに相当する。

$$1 \text{ WLM} = 170 \text{ WL} \cdot \text{h} = 2.2 \times 10^7 \text{ MeV} \cdot \text{h l}^{-1} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3}$$

$$1 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} = 285 \text{ WLM} \quad (\text{B.8})$$

1WLは $3700 \text{ Bq m}^{-3}$ の平衡等価 $^{222}\text{Rn}$ 濃度(EC)に相当するので、1WLMの $^{222}\text{Rn}$ 娘核種のポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝は、 $6.3 \times 10^5 \text{ Bq} \cdot \text{h m}^{-3}$ の $EC_{\text{Rn}}$ に関係づけられる。

### 吸入による放射能摂取およびポテンシャル $\alpha$ エネルギー摂取

ラドン娘核種の吸入によるある個人の“ポテンシャル $\alpha$ エネルギー摂取”とは、ある一定期間に吸入された娘核種混合物のポテンシャル $\alpha$ エネルギーである。 $v$ をこの期間の平均呼吸率とすれば、ポテンシャル $\alpha$ エネルギー摂取 $I_p$ は、次式によりポテンシャル $\alpha$ エネルギー被曝 $E_p$ と関係づけられる。

$$I_p = v \cdot E_p \quad (\text{B.9})$$

標準的作業者( $v = 1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ )については、次の換算係数が適用できる。

摂取 $I_p$ から被曝 $E_p$ へ

$$1 \text{ J} \text{ は } 0.83 \text{ J} \cdot \text{h m}^{-3} = 5.2 \times 10^{12} \text{ MeV} \cdot \text{h m}^{-3}$$

$$4.0 \times 10^4 \text{ WL} \cdot \text{h} = 240 \text{ WLM}, \text{ に相当する。} \quad (\text{B.10})$$

被曝 $E_p$ から摂取 $I_p$ へ

(30)

1 MeV · h m<sup>-3</sup> は 1.92 × 10<sup>-13</sup> J に相当する

1 WL · h は 2.5 × 10<sup>-5</sup> J に相当する

1 WLM は 4.2 × 10<sup>-3</sup> J に相当する (B.11)

吸入による“放射能摂取”とは、ある一定期間に吸入された放射性核種の放射能である。<sup>222</sup>Rn あるいは <sup>220</sup>Rn の娘核種の放射能摂取  $I_a$  とポテンシャル  $\alpha$  エネルギー摂取  $I_p$  との間には、次の関係が成り立つ。

$$I_p = (E_p / \lambda_r) \cdot I_a \quad (\text{B.12})$$

換算係数  $E_p / \lambda_r$  は、考えている娘核種の単位放射能あたりのポテンシャル  $\alpha$  エネルギーであり、数値は表 B.1 に示されている。 $(I_p / I_a)$  および  $(I_a / I_p)$  の比として次のような (表 B.3) まるめた値を実用目的のために勧告する。

表 B.3 <sup>222</sup>Rn とその娘核種の放射能摂取 ( $I_a$ ) とポテンシャル  $\alpha$  エネルギー摂取 ( $I_p$ ) との間の換算係数

放射性核種	$I_p (10^{-10} \text{J})$	$I_a (10^8 \text{Bq})$
	$I_a (\text{Bq})$	$I_p (\text{J})$
<sup>218</sup> Po (RaA)	5.8	17.2
<sup>214</sup> Pb (RaB)	28.6	3.50
<sup>214</sup> Bi (RaC)	21.0	4.76
<sup>216</sup> Po (ThA)	0.0053	18 900
<sup>212</sup> Pb (ThB)	691	0.145
<sup>212</sup> Bi (ThC)	65.6	1.52



## 付 録 C

 $^{222}\text{Rn}$  および  $^{220}\text{Rn}$  からの実効線量当量

希ガスであるラドンは不活性なので、身体組織に化学的に結合することはない。したがって、ある組織  $T$  の中の  $^{222}\text{Rn}$  の比放射能  $a_T$  は環境空気中の  $^{222}\text{Rn}$  の放射能濃度  $c_{\text{air}}$  に比例する  $^{222}\text{Rn}$  の飽和溶解度によって決まる。

$$a_T (\text{Bq kg}^{-1}) = \frac{L_T}{\rho_T (\text{kg m}^{-3})} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (\text{C.1})$$

この式において、 $\rho_T$  は組織の密度、 $L_T$  はオストワルドの溶解度定数で、空気に対する組織  $T$  の中での Rn 濃度の飽和容積比である。

リスクにかかわる軟組織におけるラドンの溶解度定数  $L_T$  は 0.3~0.5 の範囲にある。平均値として  $L_T = 0.4$  および  $\rho_T = 1 \text{ g cm}^{-3} = 10^3 \text{ kg m}^{-3}$  とすれば、これらの組織に対して、溶解した  $^{222}\text{Rn}$  による平衡比放射能は

$$a_T (\text{Bq kg}^{-1}) \approx 0.4 \times 10^{-3} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (\text{C.2 a})$$

である。

肺の場合には、溶解したラドンのほかに肺の中の空気のラドン含有量も考えに入れなければならない。一回呼吸量と機能性残存量との間の空気の混合が早いことから、標準人の肺の中の Rn 含有空気の体積の総量は  $3.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$  とすることができる。この仮定に基づけば、肺の中の全ラドン放射能(組織および空気中の Rn) は次のようになる。

$$\begin{aligned} a_{\text{Lung}} (\text{Bq kg}^{-1}) &\approx (0.4 \times 10^{-3} + 3.2 \times 10^{-3}) \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \\ &\approx 3.6 \times 10^{-3} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \end{aligned} \quad (\text{C.2 b})$$

生成される短寿命娘原子は、その親原子と同じ組織の中で崩壊すると仮定

(32)

される。 $\alpha$ 線の線質係数  $Q_\alpha=20$  を代入すると、 $^{222}\text{Rn}$  1変換あたりの預託実効エネルギーは  $E_{\text{eff}}=Q_\alpha \times 19.2 \text{ MeV}=384 \text{ MeV}=0.62 \times 10^{-10} \text{ J}$  となる。肺空气中で生成される  $^{218}\text{Po}(\text{RaA})$  原子のほとんどは肺に沈着するであろうから、第一近似としては、同じ値が肺の空气中で崩壊する  $\text{Rn}$  原子にも適用できるであろう。

平衡状態では、線量当量率は次の関係式から算出できる。

$$\begin{aligned} \dot{H}_T (\text{Sv h}^{-1}) &\approx 3.6 \times 10^3 (\text{s/h}) \cdot E_{\text{eff}} (\text{J}) \cdot a_T (\text{Bq kg}^{-1}) \\ &\approx 2.2 \times 10^{-7} \cdot a_T (\text{Bq kg}^{-1}) \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

(C.2) の諸式を代入すれば、肺については次式を得る。

$$\dot{H}_{\text{Lung}} (\text{Sv h}^{-1}) \approx 8 \times 10^{-10} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (\text{C.4 a})$$

リスクにかかわるその他の軟組織については次のとおりである。

$$\dot{H}_{\text{Other Tissues}} (\text{Sv h}^{-1}) \approx 0.9 \times 10^{-10} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \quad (\text{C.4 b})$$

肺についての荷重係数として  $w_T=0.12$ 、他のリスクにかかわる組織に関し  $w_T=0.88$  を適用すれば、実効線量当量率として

$$\begin{aligned} \dot{H}_E (\text{Sv h}^{-1}) &\approx (0.12 \times 8 \times 10^{-10} + 0.88 \times 0.9 \times 10^{-10}) \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \\ &\approx 1.8 \times 10^{-10} \cdot c_{\text{air}} (\text{Bq m}^{-3}) \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

が、平衡状態での  $^{222}\text{Rn}$  による被曝について導かれる。平均呼吸率を  $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  とすれば、この値は空气中からの  $^{222}\text{Rn}$  の単位摂取あたりの預託実効線量 (当量)

$$H_E / I_{\text{Rn-222}} \approx 1.5 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bq} \quad (\text{C.6})$$

に相当する。

脂肪組織の放射線感受性が非常に低いことから、脂肪中で  $\text{Rn}$  の溶解度が高い ( $L \approx 5$ ) ことは、実効線量 (当量) にはほとんど影響しないということは強調しなければならない。

同様にして、吸入した  $^{220}\text{Rn}(\text{Tn})$  からの実効線量当量が推定できる。しかし、その放射性半減期が 55 秒と短いことから、肺を除けば組織中の濃度が平

衡に達することはないであろう。したがって  $^{220}\text{Rn}$  の崩壊と  $^{216}\text{Po}(\text{ThA})$  のビルドアップが肺に対する線量におもな寄与をする。しかし、生成する娘核種  $^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$  は主として血液細胞、腎および骨表面に移行する。

その結果としての吸入  $^{220}\text{Rn}$  からの全実効線量当量率は、平衡状態において、およそ

$$\dot{H}_E \approx 1.1 \times 10^{-10} \text{ Sv h}^{-1} / \text{Bq } ^{220}\text{Rn m}^{-3} \text{ air} \quad (\text{C.7})$$

と推定されている (JAC 80)。平均呼吸率を  $1.2 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  とすれば、これは、空気からの単位  $^{220}\text{Rn}$  摂取あたりの預託線量当量

$$H_E \approx 0.9 \times 10^{-10} \text{ Sv} / \text{Bq } ^{220}\text{Rn} \quad (\text{C.8})$$

に相当する。

## 文 献

- AL 64 Altshuler, B., Nelson, N. and Kuschner, M. (1964). Estimation of lung tissue dose from the inhalation of radon and daughters. *Health Phys.*, **10**, 1137-1162.
- AR 78 Archer, V.E., Radford, E.P. and Axelson, O. (1978). Factors in exposure-response relationships of radon daughter injury. *Proceedings Workshop on Lung Cancer Epidemiology and Industrial Applications of Sputum Cytology*. Colorado School of Mines Press, Golden/Co. (See also paper presented at the Minneapolis Meeting of Health Physics Society, June 1978.)
- BE 80 Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations (BEIR-Committee). The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiation. *Report of the Nat. Acad. of Sciences (USA)*, Washington, DC, 1980.
- CH 81 Chameaud, J., Perraud, R., Masse, R. and Lafuma, J. Contribution of animal experimentation to the interpretation of human epidemiological data. *Proceedings of the International Conference on Radiation Hazards in Mining*. Golden Colorado, October 1981 (準備中\*) (\* 訳注 Society of Mining Engineers, New York より出版された。)
- CO 80 Cohen, B.L. (1980). Tests of linearity assumption in the dose effect relationship for radiation-induced cancer. *Health Phys.*, **38**, 53-69.
- DO 79 Dory, A.B. Practical difficulties related to implementation of ICRP-recommended dose limitation in uranium mines; *Seminar on the practical implications of the ICRP recommendations* : IAEA, Vienna, 5-9 March 1979.
- GA 72 Gastineau, R.M., Walsh, P.J. and Underwood, N. (1972). Thickness of bronchial epithelium with relation to exposure to radon. *Health Phys.*, **23**, 857-860.
- HA 72 Harley, N.H. and Pasternack, B.S. (1972). Alpha absorption measurements applied to lung dose from radon daughters. *Health Phys.*, **23**, 771-782.
- HA 73 Harley, N.H. and Pasternack, B.S. (1973). Experimental absorption

- applied to lung dose from thoron daughters. *Health Phys.*, **24**, 379-386.
- HA 67 Haque, A.K.M.M. and Collinson, A.J.L. (1967). Radiation dose to the respiratory system due to radon and its daughter products. *Health Phys.*, **13**, 431-444.
- HA 80 Harley, N.H. (1980). Private Communication.
- HO 79 Hofmann, W., Steinhäusler, F. and Pohl, E. (1979). Dose calculations for the respiratory tract from inhaled natural radionuclides as a function of age—I. Compartmental deposition, retention and resulting dose. *Health Phys.*, **37**, 517-532.
- IC 60 *ICRP Publication 2, ICRP Committee II : Permissible Dose for Internal Radiation*. Pergamon Press, Oxford, 1959.
- IC 75 *ICRP Publication 23, Report of the Task Group on Reference Man*. A Report prepared by a Task Group of Committee 2 of ICRP. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- IC 77a *ICRP Publication 24, ICRP Committee 4 : Radiation Protection in Uranium and Other Mines*. *Annals of the ICRP*, **1**(1), Pergamon Press, Oxford, 1977.
- IC 77b *ICRP Publication 26, ICRP : Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. *Annals of the ICRP*. **1**(3), Pergamon Press, Oxford, 1977.
- IC 79 *ICRP Publication 30, ICRP Committee 2 : Limits for Intakes of Radionuclides by Workers*. Part 1: *Annals of the ICRP*, **2**(3/4), Pergamon Press, Oxford, 1979. Part 2: *Annals of the ICRP*, **4**(3/4), Pergamon Press, Oxford, 1980 (with supplements).
- IC 80 *ICRP Publication 31, Report of the ICRP Task Group on Biological Effects of Inhaled Radionuclides*. *Annals of the ICRP*, **4**(1/2), Pergamon Press, Oxford, 1980.
- JA 64 Jacobi, W. (1964). The dose to the human respiratory tract by inhalation of short-lived  $^{222}\text{Rn}$ - and  $^{220}\text{Rn}$ - decay products. *Health Phys.*, **10**, 1163-1174.
- JA 72 Jacobi, W. (1972). Relations between the inhaled potential  $\alpha$  energy of  $^{222}\text{Rn}$ - and  $^{220}\text{Rn}$ - daughters and the absorbed  $\alpha$  energy in the bronchial and pulmonary region. *Health Phys.*, **23**, 3-11.
- JA 80 Jacobi, W. and Eisfeld, K. Dose to Tissues and effective dose equivalent by inhalation of Radon-222, Radon-220 and their short-lived daugh-

- ters ; *Report Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung*, GSF-S-626, Neuherberg, Federal Republic of Germany, 1980.
- JAC 81 Jacobi, W. and Eisfeld, K. Internal dosimetry of Radon-222, Radon-220 and their short-lived daughters. *Proc. 2. Special Symposium on Natural Radiation Environment, 19-23 January 1981*. Bhabha Atomic Research Centre, Bombay, India. (訳注 Vohra, K.G., Mishra, U.C., D. Ijai K. C. and Sadasivan, S. (eds.) *Natural Radiation Environment*. John Willy and Sons Inc., New York, 1982. として出版された。)
- JAM 80 James, A.C., Greenhalgh, J.R. and Birchall, A. A dosimetric model for tissues of the respiratory tract at risk from inhaled radon and thoron daughters. *Radiation Protection: A Systematic Approach to Safety. Proceedings of the 5th Congress of the International Radiation Protection Association, Jerusalem, March 1980*. Vol. 2. 1045-1048. Pergamon Press, Oxford, 1980.
- JAM 81 James, A.C., Jacobi, W. and Steinhäusler, F. Dosimetry of radon and thoron daughters. *Draft Report Task Group I. NEA Expert Group on Radon Dosimetry and Monitoring*. February 1981. (訳注 Dosimetry aspects on exposure to radon and thoron daughter products. OECD, 1983. として出版された。)
- KU 79 Kunz, E., Sevc, I, Plaček, V. and Horaček, J. (1979). Lung cancer in man in relation to different time distribution of radiation exposure., *Health Phys.*, **36**, 699-706.
- UN 77 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) : Levels and effects of ionizing radiation. United Nations, New York, 1977.
- WA 70 Walsh, P.J. (1970). Radiation dose to the respiratory tract of uranium miners—a review of the literature ; *Environmental Res.* **3**, 14-36.
- ZE 81 Zettwoog, P. The  $\alpha$  individual dosimetry in French uranium mines. Commissariat a l'Energie Atomique, Service de Protection Technique, *SPT Internal Report No. 234*, February 1981.

日本アイソトープ協会  
丸善株式会社

Publ. 28 国際放射線防護委員会報告 (1977年1月17日採択)

Part 1 A-2-234頁 1,800円  
Part 2 A-2-235頁 1,200円  
Part 3 A-2-236頁 1,200円

Publ. 30 作業者による放射線被曝の限度 (Part 1-2)

Part 1 A-2-234頁 1,800円  
Part 2 A-2-235頁 1,200円  
Part 3 A-2-236頁 1,200円

Publ. 32 作業者の放射線防護のためのモニタリング

Part 1 A-2-234頁 1,800円  
Part 2 A-2-235頁 1,200円  
Part 3 A-2-236頁 1,200円

Publ. 36 科学の進歩における防護放射線に対する防護

Part 1 A-2-234頁 1,800円  
Part 2 A-2-235頁 1,200円  
Part 3 A-2-236頁 1,200円

Publ. 37 放射線防護の限度における費用-利益分析

Part 1 A-2-234頁 1,800円  
Part 2 A-2-235頁 1,200円  
Part 3 A-2-236頁 1,200円

作業者によるラドン娘核種の  
吸入の限度

定価 1,000 円

昭和61年 8月30日 初版第1刷発行

編集 社団 日本アイソトープ協会  
および 法人  
発行

〒113 東京都文京区本駒込二丁目28番45号

電話 (03) 946-7111

振替 東京 8-143345

発売所 丸善株式会社

印刷・製本 富士美術印刷株式会社

# ICRP 刊行物

日本アイソトープ協会翻訳・編集  
丸善(株)発売

---

**Publ. 26** 国際放射線防護委員会勧告 (1977年1月17日採択)  
——ストックホルム (1978), プライトン (1980),  
ワシントン (1983), スtockホルム (1984) 会議声明付——  
ICRPの基本的考え方と線量当量限度値を勧告。他の刊  
行物の基礎をなすもの。

A 5・129頁 800円

---

**Publ. 30** 作業による放射性核種の摂取の限度 Part 1—3  
作業者の体内被曝の制御に関する報告書。線量算定法,  
放射線防護上重要な放射性核種に関する代謝データ, 年  
摂取限度 (ALI) と誘導空気中濃度 (DAC) の計算値を  
記載。放射性物質を摂取う人に必携の書。

Part 1 A 5・234頁 2,000円  
Part 2 A 5・138頁 1,500円  
Part 3 A 5・231頁 2,300円

---

**Publ. 35** 作業者の放射線防護のためのモニタリングの  
一般原則  
作業者の放射線管理実務の中心的役割を果たすモニタリ  
ングの基本原則を詳述。

A 5・80頁 900円

---

**Publ. 36** 科学の授業における電離放射線に対する防護  
理科の実験で, 18歳以下の生徒がうける放射線に対する  
防護の基準と手法を詳述。

A 5・29頁 650円

---

**Publ. 37** 放射線防護の最適化における費用-便益分析  
“すべての被曝は, 経済的, 社会的要因を考慮に入れなが  
ら合理的に達成できる限り低く保たなければならない。”  
本書はこの放射線防護の最適化への道を費用・便益分析  
を用いて具体的に示した。

A 5・146頁 1,800円

---

**Publ. 39** 自然放射線源に対する公衆の被曝を制限するための  
諸原則  
室内空気中のラドンなど, 自然放射線源に対する被曝を  
制限するための新しい原則を勧告。

A 5・19頁 580円

---

**Publ. 42** ICRPが使用しているおもな概念と量の用語解説  
ICRPが現在使用している概念と量を互いに関連づけな  
がら, わかりやすく解説している。

A 5・46頁 700円

---

**Publ. 43** 公衆の放射線防護のためのモニタリングの諸原則  
Publ. 7の改訂版である。基本勧告の線量制限体系との  
整合を図り, かつその適用範囲を作業場外のすべての型  
のモニタリングに拡張している。

A 5・47頁 800円

---