

工作人员吸入氡子体的限值

国际放射防护委员会第32号出版物

原子能出版社



国际放射防护委员会第32号出版物

工作人员吸入氦子 体的限值

(委员会1981年3月通过)

孙世荃 李素云 译

原子能出版社

内 容 简 介

本报告根据 ICRP 第26号出版物关于辐射防护的新概念和近年矿工肺癌流行病学调查与氡子体组织剂量估算的新资料,提出了关于工作人员吸入氡子体限值的建议,用以代替 ICRP 早先的有关报告。书中介绍了导出建议限值(ALI、ALE、DAC)的途径与方法,在计算中采用近年提出的有效剂量当量与分区肺剂量概念,并一律采用 SI 单位。

本书可供辐射防护人员,包括核工业、冶金、地质及其他部门与氡有关的单位的卫生防护人员和管理人员,放射医学、生物学工作者以及大专院校有关专业师生参考。

ICRP Publication 32
Limits for Inhalation of Radon
Daughters by Workers,
ICRP, Pergamon Press, 1981

国际放射防护委员会第 32号出版物

工作人员吸入氡子体的限值

孙世荃 李素云 译

原子能出版社出版

(北京108信箱)

89920部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32·印张1 1/8·字数 23 千字

1984年2月 第一版·1984年2月 第一次印刷

印数1— ·统一书号: 15175·532

定价: 0.18元

前 言

1977年11月委员会邀请两位成员 D.J.Beninson 和 W. Jacobi 草拟一份关于制定氦及其子体产物职业性照射适当限值的合理基础的报告。

委员会在1980年的会议上发表了一个关于氦-222及其子体职业性照射的声明，刊登于 *Annals of the ICRP*, 4, (3/4), 1980。在该声明中曾提到委员会正在准备一份有关氦及其子体产物职业性照射的报告，它就是本报告。

目 录

前言	
引言.....	1
流行病学途径.....	3
剂量学途径.....	6
建议的限值的产生.....	14
附录	
A.放射性衰变特性	20
B.专用的量和单位	21
C. ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的有效剂量当量	26
参考文献.....	29

引 言

(1) 采矿的职业性危险之一来自矿工暴露于空气所含氡(^{222}Rn , ^{220}Rn)及其短寿命衰变产物(氡子体)之中^①。这些放射性核素的吸入构成了矿山特别是铀矿山中最重要的职业性照射。ICRP 早先的报告^[1C77b]中介绍了铀矿和其它矿山的辐射照射的监测及其限值的基本原则。应该指出,氡及其子体也存在于大气和室内空气中,对这些核素的吸入成了居民所接受的天然辐射源辐射照射的主要部分之一。

(2) 这些放射性核素对人体的照射主要是由于吸入了短寿命氡子体。它们在人体呼吸道内的剂量分布是不均匀的。在正常照射条件下,吸入氡后产生的剂量要小于吸入氡子体后产生的肺剂量(见附录C)。在委员会早先的关于内照射的建议书中(ICRP 第2号出版物,1960),短寿命氡子体在空气中的最大容许浓度是从被视为关键组织的大支气管上皮的最大容许剂量当量 0.15Sv (15rem) 导出的。在该计算中使用简化的肺模型,它主要关心吸入的未附着在气载粒子上的子体原子所产生的剂量。此后曾提出了一些估算吸入氡子体在呼吸道内剂量分布的改进的模型。

(3) 委员会目前的基本建议书中提出了一个剂量限制体系(ICRP 第26号出版物,1977)。它考虑到人体可能遭受危害的所有组织的剂量,对因随机性辐射效应(癌、遗传效应)

① 这些放射性核素的主要放射性衰变特性列于附录A。辐射防护中使用的这些放射性核素的专用照射量和单位(及其转换因数)汇集于附录B。

而造成的个体总危险度或健康危害进行限制。这个概念是基于这样的原则：在一定安全水平下，不论是全身受到均匀照射还是不均匀照射或身体部分受照射，其随机性危险度应该相等。为满足这个条件，引入“有效剂量当量”(H_E)这个量，其定义可由下列方程表示：

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad \left(\sum_T w_T = 1 \right) \quad (1)$$

它总括了所有受照射的有关组织 T 。在该方程中， H_T 是组织 T 的平均剂量当量， w_T 是权重因子，代表组织 T 的随机性危险度与全身受到均匀照射时的总危险度的比值^①。肺脏包含几种不同的组织，但作为单一器官而推荐的权重因子为 $w_T=0.12$ 。有效剂量当量概念（取代以前的关键组织概念）用于评价放射性核素的摄入量限值（ICRP 第30号出版物，1979），也适用于氦及氦子体。

(4)委员会推荐有效剂量当量的职业性年限值为0.05 Sv。该限值的确定，应使放射性工作人员的平均职业性危险度不超过具有较高安全水平的其它工业的平均职业性危险

① 推荐的权重因子 w_T 的数值为：

性腺	0.25	甲状腺	0.03
乳腺	0.15	骨表面	0.03
红骨髓	0.12	其余(合计)	0.30
肺	0.12		

对其余组织是把其它五个接受剂量当量最高的组织各取 $w_T=0.06$ 。胃肠道按四个独立组织（胃、小肠、大肠上段和大肠下段）对待。皮肤、眼晶体、手、前臂、足和踝未包括在其余组织内。

现已明确，一定水平的照射所产生的危险度将因受照个体的年龄和性别而有所不同。但是所列 w_T 值是为适用于所有工人的防护而建议的，因此不必考虑由这些因素产生的误差。

度。委员会认为，该有效剂量当量限值或辐射危险度的相应水平也应适用于暴露于氡及其子体的矿工。

(5) 氡子体摄入量或照射量的职业性限值可由两种不同途径导出。其一是根据近15年来从几组暴露于较高 ^{222}Rn 浓度的井下矿工特别是铀矿工中获得的关于肺癌增加的大量流行病学调查资料。根据这些资料，可以估计出氡子体照射量与肺癌危险度增加之间的关系。参照委员会建议的放射性工作人员随机性辐射效应的基本危险度限值（ICRP 第26号出版物，1977），这种流行病学途径使得能对短寿命 ^{222}Rn 子体的照射量限值作更直接的评价。第二种方法是根据剂量学模型给出摄入量或照射量与肺剂量或有效剂量当量之间的关系。这种剂量学途径是从所推荐的有效剂量当量年限值0.05 Sv得出的。流行病学和剂量学这两种途径都有一些不确定的因素。因此，委员会认为，应该在对这两种途径进行比较的基础上作出最后的决定。

流行病学途径

(6) 在几组暴露于 ^{222}Rn 及其子体的井下矿工中，已经观测到肺癌危险度的增加，如美国科罗拉多、捷克斯洛伐克、加拿大安大略的铀矿工，纽芬兰的萤石矿工以及瑞典和英国硬岩矿中工作的少数几组非铀矿矿工。这些流行病学研究的结果曾在 UNSCEAR^[UN77] 报告中进行了详细讨论，并列出了文献。1977年以后，除了发表过关于捷克铀矿工的更详细的分析报告^[KU79] 和美国铀矿工的1974年以前资料的总结性文章 [AR78, 另见BE80] 外，委员会不知道有其它重要的

新资料发表。

⁰ (7) 美国和捷克两大组铀矿工人的流行病学研究具有特殊的重要性。他们已被追踪近 30y, 接受的平均照射量分别约为 700 和 300 WLM[●]。这些研究指出, 肺癌发生率增加与 ²²²Rn 子体 α 潜能照射量之间直到数百 WLM 仍呈现无阈的正比相关的可能性不能被排除。图 1 表示捷克铀矿工中肺癌危险度的增加情况^[KU79]。这些矿工于 1948—1952 年间开始采矿, 追踪到 1975 年末 (平均追踪 24y)。

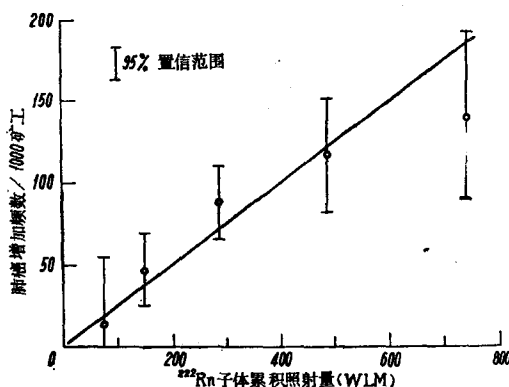


图 1 在捷克铀矿工中 (1948—1975) 观察到的肺癌增加频数与短寿命 ²²²Rn 子体 α 潜能照射量间的关系 (引自 Kunz 等, 1979)

该曲线的斜率相当于每 WLM 照射量的肺癌危险度大约

● WLM (Working Level Month) 及 WL (Working Level) 单位的定义以及转换为 SI 单位的系数见本报告附录 B。

为 $(2-3) \times 10^{-4}$ 。低照射量组 ($<100\text{WLM}$) 所接受的平均照射量低于 $10-20\text{WLM}$ ，其肺癌危险度的超过值在5%置信水平下是没有意义的。每个矿工组的相应曲线的斜率并不相同。观察结果表明，危险系数随开始采矿时年龄的降低而下降，也随高照射量水平下照射量率的增大而下降^[KU79]。

(8) 每单位短寿命 ^{222}Rn 子体 α 潜能照射量的平均肺癌危险率的超过值可以暴露于 ^{222}Rn 子体的矿工的一些流行病学研究中获得，其结果为 $2-20\text{WLM}^{-1} \cdot 10^{-6}\text{人} \cdot \text{年}$ ^[UN77, AR78, CO80, BE80]。数值这样分散的原因之一，是由于危险系数与观察对象的年龄有关。可以把 $5-15\text{WLM}^{-1} \cdot 10^{-6}\text{人} \cdot \text{年}$ 看成是对职业性作业期间的所有年龄求平均的最可能的范围。假定平均期为30y，则相当于终生的肺癌危险度是

$$(1.5-4.5) \times 10^{-4} / \text{WLM} = (0.043-0.13) / \text{Jhm}^{-3} \quad (2)$$

这和 UNSCEAR1977 年报告^[UN77]中的结论是一致的。委员会认为，所假定的其它放射性工作人员每年2000h职业性作业期间的平均呼吸率 $1.2\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 作为矿工的呼吸率也是合适的。根据这种假定，按方程(2)可得吸入 ^{222}Rn 短寿命子体 α 潜能的肺癌危险度超过值为

$$0.036-0.11\text{J}^{-1} \quad (3)$$

当呼吸率增加时，该值将低些。应该指出，科罗拉多铀矿工的危险度值位于该范围的下部，而捷克铀矿工的危险度值位于其上部。

(9) 委员会所建议的工人的有效剂量当量年限值 0.05Sv 〔见第(4)段〕是根据危险度概念在假定剂量与危险度间呈正比的基础上制定的。根据这个原则，应该把每个矿工的 ^{222}Rn 子体年照射量限制在与有效剂量限值 0.05Sv 相应的

同一危险度水平上，并采用危险度转换因数 $1.65 \times 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$ [107]。考虑到方程(3)给出的矿工肺癌危险系数的范围，根据流行病学途径得到的吸入短寿命 ^{222}Rn 子体混合物总 α 潜能的职业性年摄入量限值(ALI)范围是：

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

在平均呼吸率为 $1.2\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 时，它相当于 α 潜能年照射量限值(ALE)为：

$$0.0063-0.020\text{Jhm}^{-3}=1.8-5.5\text{WLM} \quad (5)$$

(10)委员会愿意指出，第(8)段给出的危险系数包括矿下 γ 射线外照射和矿工暴露于其它致癌化学剂所造成的肺癌危险度的超过值，也计入了可能存在的辅癌或协同作用的影响。所以单独吸入 ^{222}Rn 子体的实际危险度将比这低些。因此，对于只暴露于氡子体的工作人员，其摄入量或照射量限值可能稍高些。不过流行病学途径的主要误差来自死于肺癌的矿工照射量资料的可信性较差。根据矿下现场监测资料计算个体照射量时不能排除出现系统误差的可能性[DO79, ZES]。

剂 量 学 途 径

(11)关于滞留量的研究指出，吸入的 ^{222}Rn 子体及 ^{220}Rn 子体在人肺内的生物半减期为几小时到大约一天。这意味着沉积在肺中的大部分 ^{222}Rn 子体 α 潜能将在这里被吸收，而其它组织的剂量对有效剂量的贡献可以忽略。诱发肺癌或其它随机性辐射效应的关键细胞可能位于支气管上皮基底细胞层和肺上皮中[108]。这两个组织可以被看作是计算吸入氡子体肺剂量的靶组织。只是对较长寿命的 ^{220}Rn 子体 $^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$

来说,才会有相当一部分沉积在肺内的放射性转移到其它组织,特别是血液(红细胞)、肾脏和骨表面^[IC79·JAC80]。

(12)像委员会为辐射防护目的所建议的那样,随机性辐射效应(如肺癌)的危险度概念是基于假定在低剂量范围内危险关联靶组织剂量与致癌几率超过数之间的关系是线性无阈的。在 α 潜能照射量高达约 2Jhm^{-3} 或数百WLM的情况下,暴露于氡的矿工中的肺癌发生率的超过数〔见第(7)段〕仍不能排除存在正比关系的可能性。根据这一概念,肺内氡子体危险关联的剂量学的量将是上述两个靶组织的平均剂量或平均剂量当量,即气管-支气管区(TB)基底细胞层和肺区(P)上皮的平均剂量。

(13)在ICRP第2专门委员会第一份建议书^[IC60]发表后的几年中,出版了一些关于吸入氡子体后支气管树的剂量分布估算的较好的著作(如AL64, JA64, HA67, WA70, HA72)。这些研究得出了最大剂量应出现于段-亚段支气管基底细胞的结论。根据这些研究,再假定 α 辐射的品质因数为20,则可以导出每单位 α 潜能的 ^{222}Rn 子体照射量在这些支气管呼吸道靶细胞内形成的剂量当量,其数值范围为20—400Sv/Jhm $^{-3}$ (0.07—1.4Sv/WLM)。

该剂量系数数值之所以这样分散,主要是因为在这些剂量学模型中采用了不同的生物学和物理学参数。不过,新的更可靠的分析表明,在正常状态下,段-亚段支气管基底细胞剂量将位于上述范围的下部^[HA80·JAC80·JAM80]。下面要介绍的剂量学途径是以最近发表的两份深入的研究结果为基础

的 [JAC80:81;JAM80:81]①。应特别指出，这两种模型都考虑到了整个支气管树干细胞的实测深度的较大变化^[GA72]，它是最敏感的参数之一。两种模型的结论一致：在矿井正常条件下，吸入的氡子体在支气管分支上的剂量分布比以前设想的更均匀，从叶支气管到上部细支气管有一个比较宽的峰。

(14)如第(12)段所述，肺的危险关联剂量学的量定为支气管基底细胞层的平均剂量和肺上皮的平均剂量。这种基本概念来自上述剂量学研究。这些剂量研究表明，这两个靶组织的平均剂量较少依赖于用来描述氡子体在肺内沉积、转移和滞留的参数。表1列出了由上述两种剂量学研究得出的肺内靶组织和全肺平均剂量当量的剂量转换函数。这是当 α 辐射品质因数取为20时，对短寿命 ^{222}Rn 子体职业性照射进行的最佳估算。

该剂量数值是以子体混合物总 α 潜能中未附着份额 f_p 的函数给出的。表1列出了将ICRP肺模型D类^[IC79]应用于吸入 ^{222}Rn 子体时得出的转换函数^[JA72,UN77]，采用该模型时，是把剂量平均到所考虑的整个肺部质量。应该指出，ICRP模型对氡子体在TB区及P区的沉积率估计偏高。

(15)现有经验指出，在多数职业性照射条件下，子体混合物 α 潜能的未附着份额在全年工作期间的平均范围为 $f_p = 0-0.05$ 。对于该范围，利用不同剂量学模型得出的剂量因数列于表2。

(16)最后，根据不同的剂量学模型，可以导出在职业性

● 这两种模型的详细结论及其结果正在由 OECD/NEA 专家小组进行准备。

表 1 吸入²²²Rn子体（职业性照射）造成的肺内靶组织
及全肺平均剂量当量估算的转换函数●●

靶 组 织 剂量学模型	平均剂量当量(Sv)	
	吸入 1 J α 潜能	1 WLM α 潜能照射量
支气管基底细胞层		
JACOBI-EISFELD模型	$18+170f_p$	$0.076+0.72f_p$
JAMES-BIRCHALL模型	$14+560f_p$	$0.060+2.4f_p$
ICRP肺模型●	$15+100f_p$	$0.064+0.42f_p$
肺区		
JACOBI-EISFELD模型●	$5.2(1-f_p)$	$0.022(1-f_p)$
JAMES-BIRCHALL模型●	约 2	约 0.01
ICRP肺模型	$8(1-f_p)$	$0.033(1-f_p)$
全肺 ($m=1\text{kg}$)		
JACOBI-EISFELD模型	$7+3f_p$	$0.030+0.013f_p$
JAMES-BIRCHALL模型	未估算	
ICRP肺模型	$10+4f_p$	$0.042+0.016f_p$

●适用于平均呼吸率 $1.2\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 和附着子体的载体气溶胶 $\text{AMAD}=0.2-0.3\mu\text{m}$ 。

●Jacobi-Eisfeld研究的数值适用于 Weibel(A) 肺组织模型，而 James-Birchall研究的数值适用于 Yeh-Shum 肺模型。

●整个TB区的平均剂量，假定该区的质量为 $0.04-0.05\text{kg}$ [IC^{15}]。

照射下吸入每焦耳短寿命²²²Rn子体 α 潜在支气管基底细胞层产生的平均剂量当量，其值在 $15-40\text{Sv}$ 范围之内，这相当于大约 $0.064-0.17\text{Sv/WLM}$ 。当矿井下粉尘浓度较高时，剂量因数将处于该范围的下部，而对通风较好粉尘较少的地方，把剂量因数定在该范围的上部可能更为合适。支气管基底细胞层的平均剂量大约为肺区平均剂量的 $4-10$ 倍。当把剂量平均到整个肺脏时，所得转换因数在 $7-10\text{Sv/J}$ 或 $0.03-0.04\text{Sv/WLM}$ 范围内。

表2 ^{222}Rn 子体职业性照射的平均剂量估算转换因数〔假定
子体混合物总 α 潜能中的未附着份额 $f_p=0-0.05$
($\text{AMAD}=0.2-0.3\mu\text{m}$)〕

靶组织及 剂量学模型	平均剂量当量(Sv)	
	吸入 $1\text{J}\alpha$ 潜能	$1\text{WLM}\alpha$ 潜能照射量
支气管基底细胞层		
JACOBI-EISFELD模型	18—27	0.076—0.11
JAMES-BIRCHALL模型	14—42	0.060—0.18
ICRP肺模型	15—20	0.064—0.085
肺区		
JACOBI-EISFELD模型	5.2—4.9	0.022—0.021
JAMES-BIRCHALL模型	约2	约0.01
ICRP肺模型	8.0—7.0	0.033—0.031
全肺($m=1\text{ kg}$)		
JACOBI-EISFELD模型	7.1	0.030
JAMES-BIRCHALL模型	未估算	
ICRP肺模型	10	0.042

(17)委员会在其基本建议书中主张把整个肺脏(NP+TB+P+L区)看成是一个综合器官。这意味着所建议的肺的危险度权重因子 $w_T=0.12$ 适用于全肺的平均剂量。当肺区剂量占主要地位时,这种“平均肺剂量(MLD)”概念是合理的。但在吸入短寿命氡子体这种特殊情况下,支气管上皮剂量远高于肺区或全肺的平均剂量。假如把支气管上皮和肺组织关键细胞的辐射敏感性看成是一样的,那么像对胃肠道所建议的那样,把全肺权重因子 $w_T=0.12$ 分成两半可能更合适。作为MLD概念的变通,对气管-支气管基底细胞层和肺区的平均剂量采用独立的权重因子($w_T=0.06$)以导出

吸入氡子体的有效剂量当量。这种变通方案称为“分区肺剂量 (RLD)”概念。

(18)由两种权重概念获得的 ^{222}Rn 子体的有效剂量当量与吸入空气中 ^{222}Rn 子体总 α 潜能未附着份额的函数关系示于图 2。该曲线得自表 1 所列的剂量因数。来自肺以外的其它组织的权重剂量, 对 ^{222}Rn 子体来说是很小的, 可以忽略。矿山的经验表明, 矿下空气中氡子体混合物 α 潜能未附着份额 f_p 的时间平均值低于百分之几 ($f_p \leq 0.05$)。图 2 表示, 在这种状态下, 为辐射防护目的用总的 α 潜能摄入量或照射量来表征任何 ^{222}Rn 子体混合物产生的有效剂量当量都是合适的。

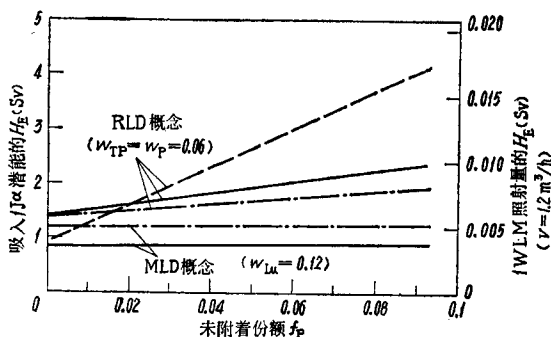


图 2 吸入 ^{222}Rn 子体的有效剂量当量与子体混合物 α 潜能未附着份额之间的函数关系
图示不同剂量模型和权重概念之间的比较。

- — · — ICRP 模型 (D类);
- JACOBI-EISFELD 模型;
- JAMES-BIRCHALL 模型。

(19)对于 ^{222}Rn 子体职业性照射,当 $f_p \leq 0.05$ 时,用不同的权重概念得到单位 α 潜能摄入量(I_p)或照射量(E_p)的有效剂量当量范围如下(见图2):

平均肺剂量概念 ($w_{Lv}=0.12$)

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

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

分区肺剂量概念 ($w_{TB}=w_p=0.06$)

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

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

由方程(6b)可导出当吸入相当于平衡当量 ^{222}Rn 放射性为 1 Bqhm^{-3} 的 ^{222}Rn 子体混合物气体时, ^{222}Rn 子体产生的有效剂量当量大约为 $(0.7-1.7) \times 10^{-8} \text{ Sv}$ 。该数值约为单独暴露于 ^{222}Rn 时每 Bqhm^{-3} 的有效剂量当量的40—100倍(^{222}Rn 的 $H_E \approx 1.8 \times 10^{-10} \text{ Sv/Bqhm}^{-3}$,见附录C)。因此,只有当空气中子体混合物的平衡因数低于 $F=0.1$ 时, ^{222}Rn 对有效剂量的贡献才值得重视。

(20)吸入的 ^{220}Rn 子体在肺内靶组织产生的剂量采用与 ^{222}Rn 子体相同的模型进行估算^[HA73,JAC80,JAM80]。由于 ^{212}Pb

(ThB)的放射性半衰期与其在肺内的生物半减期相仿,因此其支气管剂量与肺剂量的比值比 ^{222}Rn 子体的低,而很大一部分沉积的 ^{212}Pb 放射性被转移入血或其它组织。来自这些组织的剂量贡献可以根据ICRP第30号出版物^[IC79]及其补编中的代谢与剂量模型进行估算。

(21)吸入 ^{220}Rn 子体单位放射性和单位 α 潜能的工作人员接受的有效剂量当量的平均估算值列于表3。为对比起见,表中列出了吸入 ^{220}Rn 气体(见附录C)的数值。 $^{212}\text{Pb}(\text{ThB})$