

国际放射防护委员会第24号出版物

铀 矿 山 及 其 它 矿 山 的 辐 射 防 护

原子能出版社

992

73

国际放射防护委员会第24号出版物

铀 矿 山 及 其 它 矿 山 的 辐 射 防 护

陈 兴 安 译
魏 履 新 校
周 正

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书系统介绍了铀矿中存在的各种放射性危害因素及其特点,以及各种防护措施。附录中还介绍了当前国际上已经采用的和正在研究中的各种测量氡和氡子体浓度的方法。

本书可供从事辐射防护、放射卫生研究工作的同志,以及铀矿山和其它有色金属矿山的安全防护人员及剂量监测人员参考。

Radiation protection in uranium and other mines
(Adopted by the Commission on 1976) ICRP, 1977, Pergamon Press

铀矿山及其它矿山的辐射防护

陈兴安译 魏履新 周正校

原子能出版社出版

(北京 2108 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850×1168¹/₃₂·印张1¹/₄·字数35千字

1981年 2月第一版·1981年 2月第一次印刷

印数001—1500·统一书号: 15175·290

定价: 0.20元

目 录

1. 引言	(1)
1.1 铀矿井的环境	(3)
2. 作业照射的限制值	(5)
2.1 外照射	(6)
2.2 内照射	(6)
2.2.1 氦子体	(6)
2.2.2 氡	(7)
2.2.3 铀矿尘	(8)
3. 监测	(8)
3.1 外照射的监测	(9)
3.2 对氡和氦子体的监测	(10)
3.3 铀矿尘的监测	(11)
4. 控制措施和防护设备	(11)
4.1 机械通风	(12)
4.2 隔绝氡气源	(16)
4.3 空气净化	(18)
4.4 个人防护设备	(19)
4.5 轮换工作	(20)
4.6 空气监测	(21)
5. 需要确定特殊作业的氦子体水平	(22)
6. 医学监督	(23)
附录	
A.1 矿井中氡与氦子体的特性及物理数据	(24)
A.1.1 氡	(24)
A.1.2 氦子体	(24)
A.1.3 矿井空气的物理学特征	(25)
A.2 建议的测量方法	(26)

A.2.1	氦浓度	(26)
A.2.2	氦子体的现行测量方法	(28)
A.2.3	水中的氦和镭	(35)
A.3	高效率口罩	(37)

参考文献

1. 引言

本报告目的在于阐述地下矿井中控制辐射危害的各种方法的原理及其应用。其内容虽然是针对铀矿开采工业的，但所提供的资料在不同程度上也适用于其它矿山。

矿工受到空气中放射性氡及其短寿命衰变产物（氡子体）的照射，是井下作业职业性危害的因素之一。氡是铀衰变链中的一个子体，地壳中的含铀量约百万分之三，几乎任何地方都有痕量的铀。因此，氡并非只存在于铀矿，而是到处都有。氡的浓度在室外很低，在室内则稍高。然而，在天然条件下，只是在地下洞穴中才有高浓度的氡。在铀矿井中，如不采取适当的控制措施，这些放射性物质的浓度可以很高。在某些非铀矿井中，也发现了浓度相当高的氡。

已经发现，在几种矿中一些矿工患肺癌的原因与他们受到高浓度的氡和氡子体的照射有关。追溯至十六世纪，有些矿工的死因可能就是吸入了氡与氡子体。当时，在德国的现名为施内贝格(Schneeberg)和捷克斯洛伐克的现名为乔希姆斯坦尔(Joachimsthal)地区开采各种金属矿物的矿工，所患致死性疾病的症状与肺癌的相同，不过当时未能确诊。在上述地区从事开采作业的矿工的肺癌，直到十九世纪末叶才得到确切的诊断。那时，沥青铀矿是一种重要的矿产。十九世纪二十年代，曾有人提出氡是引起施内贝格矿工肺癌的原因。这种看法提出后，经过相当激烈的争论，才被人们所接受。这是因为矿井中的其它毒物，特别是砷和二氧化硅，曾被认为可能是引起肺癌的主要因素。近二十年内，人们已发现在通常的矿井条件下，氡的子体——钋、铋和铅的同位素的危害比氡本身的危害大得多，而且目前认为，它们是诱发

矿工肺癌的主要因素。

氡子体的危害，表现在接受其照射多的人群中发生肺癌的例数增加，这一点已由动物实验所证实。十九世纪二十年代施内贝格和乔希姆斯坦尔两个矿区的死亡率调查表明，大约有50%的矿工死亡时患有肺癌。最近，对一大批美国铀矿工人的调查表明，在18年期间，死者中的16%是肺癌。但并非只有铀矿工人才会受到这种危害。加拿大萤石矿矿工的肺癌发病率也高，矿井空气中氡和氡子体浓度的变动范围与没有采取有效通风措施的铀矿井空气中氡和氡子体的浓度相当。在氡浓度较低的其它非铀矿中，也曾见到肺癌发病率增加的情况。

随着人们对于氡与氡子体对诱发铀矿工肺癌的作用认识的深化，照射限制法规的问题就提出来了。1940年，Goodman和Evans首次提出了这项标准。他们根据乔希姆斯坦尔矿区所受氡照射水平估算出的代表值，乘以安全系数100，便得出所建议的氡浓度的限制标准，即每升空气中10微微居里氡。在此后十年中，各有关当局所提出的限制值也都是以氡浓度表示的。在第二个十年的初期，已经肯定了氡子体的重要性。人们便对照射限制值加以修正，使之能反映出氡子体的影响。但是由于用了两种不同的修正方法，结果产生了两个标准。国际放射防护委员会是以氡气浓度和有关氡子体的某些规定两者一起来表示照射限制值的。在1959年出版的第2专门委员会报告书^[13]中，对于空气中氡及其子体所规定的最大容许浓度〔(MPC)〕值为 $(3 \times 10^{-6}) \times (1 + 1000f)^{-1}$ ①微居里·厘米⁻³，其中 f 是代表在平衡量的RaA离子中，不附着于气溶胶粒子上的RaA离子份额。与此同时，美国公共卫生署采用了一个叫做“工作水平”(WL)的单位，它是与氡子体所能释放出的 α 能量相关的，从而建立了以“工作水平”

① 原文为 $3 \times 10^{-6} l^{-1} + 1000f$ ，根据国际放射防护委员会第2号出版物《内照射容许剂量》改正为 $(3 \times 10^{-6}) \times (1 + 1000f)^{-1}$ 。——译注

为单位表示的限制值。这个分歧一直保持在目前都在使用的两个照射限制值的演变过程中，一个是由国际放射防护委员会1959年给出的最大容许浓度值，以氡浓度表示，并规定可根据氡子体的物理状态进行修正；另一个是以“工作水平月”为单位表示的年累积照射限制值，载于美国联邦政府的有关法规中（见2.2.1和2.2.2节）。

要使井下铀矿工人所受到的照射能保持在所建议的限制值内，主要靠机械通风并结合其它防护措施。为维持符合要求的控制条件所需的费用，将由于开采方法、地质构造、矿体分布和品位以及气候等具体条件的不同而有很大差别，但不管怎样，它是采矿成本中的重要组成部分。

1.1 铀矿井的环境

本报告不涉及机械性危害和毒物危害问题，因为这些都是所有采矿作业所共有的。然而，为了控制辐射照射所采取的防护措施也会对其它危害因素的情况发生影响。例如，为了控制氡子体浓度所必须的很高通风率，它对于稀释有毒的空气污染物是完全足够的，然而，在一个正常湿度的矿井中，这种很高的通风率能使各种表面干燥，从而加剧了灰尘的扩散，在这些灰尘中却可能含有石英和其它有害物质。

铀矿中的辐射环境是复杂和多变的。矿工们既受到 γ 辐射和某些 β 辐射的外照射，同时又受到空气中的氡、氡子体和矿尘内照射的影响。在制订控制措施时，所有这些影响都应予以考虑，但一般说来氡子体是主要的危险。除某些特殊情况外，由其它辐射源引起的照射一般都低于相应的职业性限制值，往往不需要采取专门的控制措施。从当前的实践看，对于外照射和矿尘的监测，从非经常性的抽样测量到经常性监测都有，而对氡子体照射则普遍采用常规监测。

γ 辐射是由矿石发射出的, 平均能量约为 1 兆电子伏, 这里未考虑散射射线。在井下不同地点, 照射量率各不相同, 这取决于周围岩石中的镭含量。在铀矿, 穿过贫矿体巷井中的 γ 照射量率都很低, 通常小于 0.1 毫伦/小时。而采矿作业面上的 γ 照射量率则较高, 当矿石中 U_3O_8 含量为 0.2% 时, γ 照射量率通常在 0.5—1.5 毫伦/小时的范围内。如果矿石品位较高, 这些数值也就相应地较高。曾经观察到, U_3O_8 含量约 20—30% 的透镜状矿体的照射量率可达 100 毫伦/小时的数量级。 β 辐射则是较次要的。矿石表面附近 β 射线造成的吸收剂量指数率可达 1.3 毫拉德/小时左右。含有铀系各种衰变子体的矿尘, 可由采矿作业点直接散发出来, 急速的气流和机械震动也可以使各种表面上的矿尘重新飘扬起来, 其浓度随时间、地点和矿石湿度的不同而有很大的变化, 即可从稳定状态下的零值直到刚爆破后的极高值。在通常的采矿作业条件下, 空气中的平均 α 放射性浓度基本保持在 10 微微居里/米³ 以下。

氡是由矿体中的 ^{226}Ra 衰变成的惰性气体, 可以通过岩石而扩散, 并连续不断地从矿井内的各种表面逸散至所有的空间。射气逸出后便被风流所携带, 同时产生固态的衰变产物 RaA , RaB , RaC 和 RaC' (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi 和 ^{214}Po)。由于上述各个核素的物理性质不同, 使得氡及其子体在空气中的浓度组成特别复杂。因为氡是一种惰性气体, 所以直到含氡空气被排至地面前, 它一直滞留在矿井的空气中。就氡在矿井空气中的停留时间而言, 氡的半衰期相对来说是长 (3.82 天) 的。因此, 它浓度的增长与射气析出率和通过巷道的的时间成比例。相反, RaA 的半衰期只有 3.05 分, 因而它迅速积累, 由此产生的衰变产物 (都是短半衰期的, 如 RaB 为 26.8 分, RaC 为 19.7 分, RaC' 为 2.73×10^{-6} 分) 也立即增加。 RaA 生成后处于原子态的时间很短, 它很快地附着于气溶胶粒子和各种固体的表面。处于气溶胶状态的氡子体易于保持悬浮状态, 但是它会由于静电、惯性和扩散等作用, 而

从矿井空气中排除。在任何情况下，这些氡子体的放射性浓度都是随着它们在矿井空气中的滞留时间而迅速增长的。能使这些放射性核素的浓度进一步变化的因素还有：由自然因素和机械因素引起空气压力改变时所造成的氡的析出率的变化、通风率的改变和采矿作业的变动等。因而，只有通过测量才能确定某一点空气中氡子体混合物的浓度及其相对组成。即使在一个已经采取了充分的控制措施的矿井中，各处氡子体的浓度也是有变动的，其范围可从新鲜风入风口处的低水平直到废风出风口处的高水平。在进行监测和采取控制措施时，必须考虑氡子体的这种复杂情况。对监测而言，这种复杂性带来的后果是必须对矿井的所有地区经常进行测定。为了控制氡子体，必须连续和迅速地进行通风，以防止氡子体浓度上升到不可容许的程度。

在非铀矿井内，除了各种辐射水平比铀矿低以外，辐射环境的特点是和上述相似的。

2. 作业照射的限制值

根据国际放射防护委员会第9号^[4]和第22号^[6]出版物的建议，所有剂量都应降低到能合理达到的低水平；在任何一年内都不应该超过年最大容许剂量，在一年中的一个季度内，剂量不应超过年限制值的一半。

委员会所建议的最大容许剂量，是指外照射和内照射剂量的总和。然而，正如在国际放射防护委员会第12号出版物^[4]中经详尽讨论后指出的，通过常规监测所取得的外照射剂量和内照射剂量的估算值，实际上并不需要相加在一起。特别是在铀矿的情况下，就肺的内照射剂量而言，外照射的贡献仅仅是很小的附加份额。

2.1 外照射

全身均匀受照时,外照射的最大容许剂量当量是一年5雷姆,一季度3雷姆。铀矿中,由于辐射源分布广泛, γ 射线的能量又比较高,因而,全身所受到的外照射基本上是均匀的。

2.2 内照射

2.2.1 氡子体

近几年积累起来的具有重大价值的流行病学调查资料,为制定氡子体的照射限制值提供了十分坚实的基础。为此,国际放射防护委员会第2专门委员会责成一个工作组审核了这些资料。

在核对和仔细分析上述资料并据以提出照射限制值之前,国际放射防护委员会第2号出版物中的建议值, ^{222}Rn 的年平均浓度不得超过30微微居里/升,仍然在使用。从铀矿辐射防护的角度来理解,这个值所限制的虽然是指与其短寿命子体处于平衡状态的 ^{222}Rn ,但它也适用于氡及其子体的任何混合物,只要这些子体衰变至 ^{210}Pb 时所释放出的 α 能量与30微微居里/升氡相平衡时的氡子体所释放的能量相等(3.9×10^4 兆电子伏/升)。所以,氡子体的年照射限制值可以用 α 能量的时间积分浓度来表示: $2000\text{小时} \times 3.9 \times 10^4 \text{兆电子伏/升} = 7.8 \times 10^7 \text{兆电子伏} \cdot \text{小时/升}$ 。对季度的要求则作了附加规定,即每年内一个季度的照射不得超过 $3.9 \times 10^7 \text{兆电子伏} \cdot \text{小时/升}$ 。

在第一节中曾经指出,某些国家的有关当局采用工作水平(WL)单位。这是一个浓度单位,它的定义是:在1升空气中任何组成的短寿命氡子体,当其完全衰变至 ^{210}Pb 时所释放出的总 α 能量为 1.3×10^5 兆电子伏。这个数值等于与100微微居里 ^{222}Rn 相平衡的短寿命氡子体衰变时所释放出的 α 能量。此外,也

采用工作水平月 (WLM) 单位, 它是指在一个工作水平的条件下工作一个月所受的照射。

2.2.2 氡

某些国家的有关当局愿意用 ^{222}Rn 的量来控制铀矿中气载放射性的危害。当空气中任何浓度的 ^{222}Rn 与其短寿命子体处于平衡时, 以微微居里/升为单位表示的氡浓度, 在数值上恰好是以 WL 单位表示的氡子体 α 能量浓度的 100 倍。如果空气中氡浓度以微微居里/升为单位来表示, 写作 (Rn) , 而测得的氡子体浓度以工作水平为单位来表示, 写作 (WL) , 则可以计算出一个称之为“平衡因子”的量 F , $F = 100(WL)/(Rn)$ 。当空气中氡及其短寿命子体以任何给定浓度共存时, 数值 F 就是子体实际的 α 潜能值同当氡子体与氡处于平衡时的 α 潜能值之比。因此, $(Rn)F$ 就是空气中氡与其短寿命子体处于平衡时的氡浓度。在本报告中, $(Rn)F$ 称之为“平衡当量氡”浓度, 以 EER 表示。这时的子体潜能值同实际测量空气中 (Rn) 浓度时子体的 α 潜能值相等。以 EER 表示的浓度, 其年限制值为 60000 微微居里·小时/升, 平均 EER 浓度则相应为 30 微微居里/升。季度限制值则规定为 30000 微微居里·小时/升。应用这些限制值对氡的测量结果进行评价时, 就需要用到平衡因子 F 值。如果平衡因子的测量值尚未取得, 那么在某些情况下根据通风率的资料 (见 4.1 和 4.3 节) 也能估算出可以应用的 F 值。在铀矿, 如果既不知道, 又无法根据通风条件估算 F 值, 则可以取 F 值为 0.5, 不过这样做的结果, 对照射水平的估算会偏高。对于那些不需要有平衡因子实际测量数据的生产部门, 各国的有关当局应对他们管辖范围内各个生产部门应用的 F 值给以具体规定。

把 F 值考虑进去的 ^{222}Rn 的年限制值, 实际上是建立在对氡子体照射加以限制的基础上的。然而, 对于所用 F 值极小的场所, 引进一个单独的氡的年限制值上限的概念将更方便。这个限制值可以由两种途径确定: (a) 可以应用 1959 年第 2 专门委员会

报告^[13]中的特殊肺模型 1 以单独吸入氡对支气管组织造成的容许剂量当量为基础进行计算后确定；或(b)可以根据在没有氡子体吸入情况下的 ^{222}Rn 浓度来确定，即当某一浓度值的氡释放至呼吸道的 α 能量同处于限制值的氡子体所释放出的 α 能量相等时，则可将这个浓度值定为氡的限制值上限。用上述两种途径得出的纯 ^{222}Rn 的限制值是相同的，即 6×10^6 微微居里·小时/升。这个限制值仅能应用于氡子体 α 潜能值只占其平衡时的数值很小份额的场合，例如用在使用了口罩以及对氡子体采取了空气过滤或静电沉降措施的场合。

2.2.3 铀矿尘

通常采用的作业限制值是以矿尘中存在的长寿命核素的总 α 放射性为根据的，并假定这些核素都是 ^{238}U 处于永久平衡状态的铀系子体(不包括氡与氡子体)。空气中平均浓度的限制值可按下列公式计算：

$$\frac{1}{L_m} = \sum_i \frac{P_i}{L_i}$$

式中， L_m 是矿尘混合物的限制值； P_i 是第 i 种核素所占的放射性份额； L_i 是第 i 种核素的限制值，它是国际放射防护委员会第 2 号出版物对不溶性物质所作的规定。这里还必须考虑在这些核素中只有九分之五的衰变是属于 α 性质的。由此得出的矿尘 α 放射性的年限制值是 70 微微居里·小时/升。每个季度的限制值为 35 居里·小时/升。

3. 监 测

国际放射防护委员会第 12 号出版物^[15]中提出的监测原则亦适用于铀矿作业。正如在该出版物中详细讨论的那样，外照射和

内照射的常规监测方法仅给出相应的剂量估算值，而且记录的剂量值经常高于器官剂量。因此，在实际工作中从常规监测得到的内、外剂量估算值，一般不必加在一起。

在监测计划中必须考虑铀矿的照射条件：外照射通常很低，剂量率基本上恒定，并且能根据矿石品位作出某种程度的推测。而另一方面，内照射通常比较重要，容易变化，至少在未作若干参考性的测量之前，是很难推测的。

3.1 外照射的监测

大多数铀矿的矿石品位在千分之一左右， γ 照射量率为每小时十分之几毫伦。

在这样的条件下，铀矿工人接受的年剂量不会超过最大容许剂量的十分之三，因而不需要个人监测。经验证明，凡是年工作时间(以小时计)同矿石品位(以铀含量的千分之几计)的乘积小于3500的场合，年剂量是不会超过十分之三的。在少数地质结构条件下，这个值会更小一些(1000—3500)。

对于需要进行个人监测的场合，个人剂量计可按季度使用。在有些情况下，作业条件不适于使用个人剂量监测器件。这时矿工所受的照射水平，可以根据矿井现场 γ 监测的结果进行估算，先确定以在矿井下各处停留时间为权的加权平均照射量率，然后再据此计算累积剂量。

常规的环境监测，对于以前测量过的平均照射量率低于0.5毫伦/小时的矿井，每年进行一次。照射量率高于此值的可考虑每季度一次。

对于新开拓的矿区，以及当开采矿体的品位和大小都有明显增加时，都需要进行专门的剂量监测。

在某些铀的品位特别高的矿井，剂量有可能超过最大容许值。在这类场合，就需要按月或更勤些更换个人剂量计。

3.2 对氡和氡子体的监测

根据国际放射防护委员会第12号出版物^[15]附录B中的定义, 矿井中的环境可以描述为“多变的, 但基本上是连续的, 由正常生产造成的工作地点的污染”。因此, 可根据该出版物中作出的下列规定来判断是否需要个人监测: 如果由初步空气监测结果的平均值所估算出的年预计照射水平低于限制值的1/10时, 那么很难超过限制值的3/10, 因而无需进行常规的个人监测。不过铀矿生产中这类地方很少, 它仅限于矿井入口或新鲜空气大量进口处附近的地方。在大多数地方, 氡和氡子体的浓度达到了需要对个人所受照射逐个进行评价的程度。目前, 个人评价是通过分析各工种的作业地点、作业时间和这些地点空气中氡子体的浓度等有关资料间接作出的。

为了使选定的采样规范能具有一定的代表意义, 井下的空气采样计划必须考虑到下列各种可能影响浓度的因素:

(a) 矿井内位置的影响 其主要因素是与新鲜空气或含氡和氡子体量较少的空气进入地点的距离。经验证明, 采场中的浓度比水平巷道中的浓度均匀, 因为采场内的有限的空气是充分混合的。因而, 在采场中只需要取较少的样品。在其它地方, 测量一个点可以代表几十米的距离。

(b) 作业类型的影响 当作业类型不同时, 氡和氡子体的水平也是不相同的, 不过, 这也与这些作业在矿井内所处的位置有关。只有爆破例外, 它总是使空气浓度明显增加。但是, 这种增加是短暂的, 多数情况下经过半小时至几小时, 浓度便恢复至正常水平。

(c) 随时间的变化 如果矿山有一个有效而又稳定的通风系统, 那么在一个工作日内的变化通常是很小的。如果换气主要靠自然通风, 则浓度变化就较为显著, 变化程度主要取决于矿井外

温度的变化。

在铀矿，为确定照射水平所需的测量频次，取决于矿井中氡和氡子体的浓度以及上列诸因素，一般平均不少于每两周一次。如果开采的矿体的体积或品位有明显增加时，就需进行专门的测定。在非铀矿井，测量频次可以稍低，具体次数取决于氡和氡子体的实际浓度。

3.3 铀矿尘的监测

铀矿中通常采用的防护措施足以把矿井空气中的矿尘浓度降低，矿工的年照射水平不大可能达到操作限制值的3/10，因而不需要个人监测。

按季度进行的场所测量已达到常规监测的目的。对新开拓区，以及当开采的矿体品位有明显升高时，需要进行专门的测量。

4. 控制措施和防护设备

铀矿中控制氡子体照射的主要技术措施是：机械通风，污染源流的隔绝和改向，风流净化，呼吸道防护和作业轮换。这些措施在某种程度上也适用于其它矿。上面头三项措施是控制作业环境的，后两项是用来限制作业环境对矿工的照射的。把这些环节结合起来，可以限制矿工吸入氡子体的量。空气监测是个附加的关键因素，因为它是空气质量检验和确定矿工照射水平的不可缺少的。实际上，对空气质量和通风系统的监督是安全操作中不可缺少的一部分。

机械通风是控制措施中最关键性的一环，因为没有通风，氡和氡子体的浓度就会迅速增长，甚至可以达到每升数万微微居

里。但是，有效的通风却往往是难以做到的，对于特别深或广的矿井尤其如此。而且，在有效通风方面的投资常占矿石回采成本的很大一部分。不过，如果通风系统的最初设计及随后的发展能同井巷的配置及开拓完满地结合，那么，有效通风还是完全能够做到的。

另一项重要措施是使氡气源与主风流相隔绝，或使氡气流改向，从而减小通风系统的负荷。控制氡气源的主要手段是封闭废旧巷道，因为这些地方的矿石虽然已经运走，氡气却仍源源不断地析出。控制氡气源的另一个较理想的方法，是利用矿岩表面密封层来减少氡气自井巷表面的析出，但是这种方法目前尚不能在大范围内使用。

用空气净化方法来降低氡子体浓度是一种辅助手段，这类方法大多还停留在试验阶段，仅少数场合应用，只有待技术改进后才能广泛使用。降低氡子体浓度还可用加强空气湍流从而增强壁效应的方法。

个人呼吸道防护用具适宜于在进入已封闭的非生产性区域时偶尔使用，在氡子体浓度不能有效控制的地方也鼓励人们作为常规使用，不过这种情况是少有的。

作业轮换是限制个别矿工受氡子体照射的另一种方法，它也是在出现很高照射量率的特殊情况下控制外照射的唯一有效方法。

4.1 机械通风

在进行铀矿通风设计时，必须考虑氡及其子体的物理特性。为控制氡子体而做的通风设计，通常也能满足控制其它空气污染物的要求，但是为谨慎起见，对于像一氧化碳、氮氧化物和二氧化硅等污染物的浓度还是要经常检验以确保安全。氡的来源是 ^{226}Ra ，它分布在周围岩石或富含氡的水中。氡是一种惰性气体，