

矿山工作人员的辐射防护

国际放射防护委员会第47号出版物

原子能出版社

国际放射防护委员会第47号出版物

矿山工作人员的辐射防护

国际放射防护委员会第4专门委员会报告
(委员会1985年7月通过)

袁良本 译

原子能出版社

国际放射防护委员会第47号出版物

矿山工作人员的辐射防护

袁良本 译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京振华印刷厂印刷

(北京顺义张镇)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ ·印张 $1^{1/4}$ ·字数27千字

1986年12月北京第一版·1986年12月北京第一次印刷

印数1—2000 ·统一书号: 15175·827

定价: 0.32元

内容简介

本报告系统介绍了矿山中存在的各种放射性危害因素及各种防护措施，重点讨论了氧及其衰变产物的形成、特性、限值、监测和控制方法，是根据国际放射防护委员会（ICRP）第26号出版物关于辐射防护的新概念和第32号出版物关于矿工肺癌流行病学调查与氧衰变产物组织剂量估算的新资料对第24号出版物进行修改而编写成的。本报告虽然主要是针对铀矿开采工业的，但是报告中提供的资料可以不同程度地应用于所有矿山。

本书可供各级环境保护机构和有关工业部门的辐射防护人员、铀矿山和其它矿山的技术管理和安全防护人员以及大专院校有关专业师生参考。

前 言

国际放射防护委员会 (ICRP) 于1977年出版了它的第24号出版物《铀矿山及其它矿山的辐射防护》。1982年, ICRP第4专门委员会为了实施委员会的建议, 委托它的成员R.Coulon编写一份该报告的修改本, 以考虑ICRP第32号出版物《工作人员吸入氡子体的限值》中所载的重要新资料, 修改过的报告还按照ICRP第26号出版物中委员会的基本建议进行了修改。

在编写本报告的过程中得到了许多同事的帮助, 特别是A.Bouville, D.Cool, R.E.Cunningham和P.Zettwoog。委员会对所有这些个人的贡献表示感谢。

报告通过时第4专门委员会的成员有:

H.Jammet (主席)	D.W.Moeller
R.M.Alexakhin	R.V.Osborne
R.Coulon	J.O.Snihs
R.E.Cunningham	S.D.Soman
A.J.Gonzalez	G.A.M.Webb
O.Ilari	L.X.Wei
E.Kunz	B.C.Winkler
J.Mehl	Y.Yoshizawa

目 录

前言

1.引言	1
2.矿区环境的描述	2
3.限制照射的一般原则	5
4.个人照射量限值	7
4.1 外照射	7
4.2 内照射	8
^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的衰变产物	8
^{221}Rn 和 ^{220}Rn	10
矿尘	11
4.3 导出限值和参考水平	14
4.4 限值的组合	15
4.5 特殊作业决定的水平	16
5.辐射照射的控制	17
5.1 防护设计	17
采矿方法的选择	17
源的隔离	18
机械通风	20
空气净化	23
5.2 作业过程的防护	24
改进	24
个人防护设备	25
工作组织	26
6.监测	26
6.1 空气监测	27
氡和氡衰变产物的监测	27

矿尘监测.....	28
6.2 外照射监测.....	28
6.3 防护措施系统质量的监测.....	29
7. 医学监督.....	29
附录——专用的量和单位.....	30
参考文献.....	34

1. 引 言

1. 本报告的目的是, 阐述在矿山可以用来控制辐射危害的各种方法的原理和应用。虽然主要是针对铀矿开采工业的, 但是本报告提供的资料可以不同程度地应用于所有矿山。

2. 矿工们受到气载氡、氡和它们的短寿命衰变产物以及矿石粉尘的照射, 在某些矿山(特别是铀矿和钍矿)还受到 γ 和 β 辐射的外照射。一般说来, 主要的辐射危险来自短寿命的氡衰变产物。氡是铀衰变链中的一个子体, 地壳中的含铀量约为百万分之三。因此, 氡并非只存在于矿山, 而是到处都有。在室外, 氡的浓度一般都低, 而在室内, 浓度则较高。在地下矿井中, 如不采取适当的措施, 这些放射性污物的浓度可以达到相当高的水平。

3. 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及其衰变产物的照射有关。早在十六世纪, 就已记录到有些矿工的死因多半就是吸入了氡及其衰变产物。

4. 氡及其衰变产物对诱发铀矿工人肺癌作用的认识导致照射限制导则的建立。对氡及其衰变产物的吸入制定限值在最近三十年遇到了相当多的问题。在最近一些年, 委员会利用增加的知识已推导出建议的限值。就矿山的辐射防护来说, 委员会在1977年出版的ICRP第24号出版物中^[1]已对其短寿命衰变产物处于平衡的 ^{222}Rn 的年平均浓度提出了建议的限值。

5. 1977年, 委员会在ICRP第26号出版物中^[2]引入了新的剂量限制体系。更近一些, 在ICRP第30号出版物

中^[3]，委员会根据最新的新陈代谢和剂量学资料，拟定了用年摄入量限值表示的次级限值。对于受到 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 和它们的衰变产物职业性照射的特殊情况，委员会在ICRP第32号出版物中^[4]推荐了工作人员吸入氡衰变产物的新限值。

6. 主要用机械通风并结合其它防护措施来保持地下矿井中的人员受到的照射在建议的限值内。为维持符合要求的控制条件所需进行的工作有很大的不同，这取决于采矿方法、地质建造、岩石和矿物中的铀和钍浓度以及气候条件。

7. 工作人员辐射防护监测的一般原则，委员会已在ICRP第35号出版物中提出^[5]。这些原则为制定可以有效地和经济地达到委员会建议的目标的监测计划提供了基础。分析了监测的主要任务和各种不同形式，并特别强调了监测计划的制定以及外辐照、表面、空气、皮肤和内部污染结果的分析。对矿山环境和个人的监测要求应与这些一般原则相一致。

8. 本报告不涉及机械性危害和毒物危害等其它危害，因为这些是所有采矿作业所共有的。然而，为了控制辐射照射而采取的防护措施可能影响其它危害的情况。控制氡衰变产物浓度通常需要的高通风率，对于空气中有毒污物的稀释来说可能是绰绰有余的，但也使通常是湿的矿井表面趋向干燥。这样，除非采取适当的措施，否则将增加可能含有放射性核素、二氧化硅或其它有害物的灰尘的扩散。

2. 矿区环境的描述

9. 矿中的辐射环境是复杂和多变的。矿工们受到气载

的氡、钍、铀和镭的短寿命衰变产物、矿尘中的长寿命放射性核素以及外部 γ 和 β 辐射的照射。在制定控制措施时，必须保证考虑所有这些照射类型。

10. 在矿体中，由 ^{226}Ra 衰变产生的惰性气体 ^{222}Rn 可以通过岩石扩散，并不断从矿内各种表面逸散至所有空间。射气逸出后便被通风气流所携带，同时产生固态的衰变产物 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 、 ^{214}Bi 和 ^{214}Po （ RaA 、 RaB 、 RaC 和 RaC' ）。由于有关核素的物理性质不同，使得氡及其衰变产物在空气中的浓度组成特别复杂。因为氡是一种惰性气体，所以在空气被排至地面以前，它本身一直保留在矿井的空气中。与在矿中的停留时间相比较，氡具有相当长的半衰期（3.82d），所以氡的浓度随它的析出率和它通过不同巷道行进的时间而正比例地增加。相反， ^{218}Po 的半衰期只3.05min，因而随时间迅速积累起来的 ^{218}Po 很快衰变为它的衰变产物，所有这些衰变产物的半衰期都相当短（ ^{214}Pb 为26.8min， ^{214}Bi 为19.9min， ^{214}Po 为 $2.74 \times 10^{-6}\text{min}$ ）。 ^{218}Po 生成后，在附着于气溶胶粒子或固体表面以前，它短时间地以原子形式存在。处于气溶胶状态的氡衰变产物趋向于保持悬浮状态，但是它们会受到静电、惯性和扩散等的作用，而从矿井空气中除去。在任何情况下，这些氡衰变产物的放射性浓度都是随空气在矿井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并进入矿井空间的速率的变化，通风率的改变和采矿作业的改变等。因而，只有通过测量才能确定任一给定点氡衰变产物混合物的浓度和相对组成。即使在一个已经采取了适当的控制措施的矿山中，矿内各处氡衰变产物的浓度也可能有相

当大的变化，其范围从新鲜空气入口处的低水平到废气出口处的高水平。在进行监测和采取控制措施时，必须考虑这种情况。

11. 已知从岩石中发射出的 ^{220}Rn 也是一个辐射照射源。 ^{220}Rn （又称钍）是 ^{232}Th 的一个衰变产物。 ^{220}Rn 及其衰变产物的物理性质以及它们在矿中的行为几乎与 ^{222}Rn 及其衰变产物完全相似。然而，当矿石单位质量的铀和钍质量相同时， ^{220}Rn 的相对重要性可望低于 ^{222}Rn ，因为前者的半衰期仅约1分钟，同时，也因为矿体中的 ^{232}Th 比活度低于 ^{238}U 比活度。然而，在某些矿中，存在高浓度的钍。在这样的环境中， ^{220}Rn 及其衰变产物的照射可能占主要地位。

12. 含有铀系和钍系的各种衰变产物的矿尘可从采矿作业直接散发出来，快速的气流和机械震动的作用也可以使各种表面上的矿尘再悬浮。其浓度随时间、地点和矿石湿度的不同而有很大的变化，范围从稳定状态下的接近于零到刚爆破后的极高值。

13. γ 辐射是由矿石中的放射性核素发射出的，它对矿山中的工作人员产生外照射。 γ 剂量率的最重要贡献者是保留在岩石中的 ^{222}Rn 的两个短寿命衰变产物，即 ^{214}Bi 和 ^{214}Pb 。在矿山的不同地点，剂量率是不相同的，这取决于周围岩石中的镭含量和它在矿物中的存量。在铀矿，穿过贫矿体的井巷中的 γ 吸收剂量率都很低，一般小于 $1\mu\text{Gy h}^{-1}$ 。在采矿作业面上， γ 剂量率较高，对于 U_3O_8 含量为0.2%或质量相当的矿石，取决于几何形状，典型值为 $5\sim 15\mu\text{Gy h}^{-1}$ 。在富矿，剂量率相应升高。曾经观察到， U_3O_8 含量约为20~30%或相当品位的罕见透镜状矿体的剂量率达

$1\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ 的数量级。根据经验 $\dot{D}=50C$ ，式中 $\dot{D}$ 为空气中的吸收剂量率，以 $\mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ 表示， C 为矿石品位，以 $\% \text{U}_3\text{O}_8$ 或相当单位表示。 β 辐射的重要性差一些。 β 和 γ 辐射在空气中产生的吸收剂量率之比的典型值，在含铀材料表面附近为0.5，距离1m为0.2。

14. 在比较铀或钍矿与非铀矿（如煤矿或金属矿）时，并未发现有本质上的不同，只是在非铀矿中，由外辐射和吸入含铀和钍衰变系中的放射性核素的矿尘所产生的照射量一般要小些。主要问题是 ^{222}Rn 及其衰变产物的吸入，以及在程度上低一些的 ^{220}Rn 及其衰变产物的吸入。在铀矿， ^{222}Rn 主要是通过水或空气循环，从周围岩石转移到巷道。每个转移过程的重要性取决于采矿作业时地层的地质学的和构造上的断裂情况以及含水层水文学行为在地质学和构造上受到的破坏。在几个国家，已作过一些测量，并已在一些出版物中作了报道^[6~8]。

15. 在非铀矿，个人剂量可能与铀矿或钍矿中的相似。但是，由于非铀矿中的工作人员较铀矿的为多，所以采矿作业期间的集体剂量多半要大些。应给予非铀矿的辐射防护较它过去已得到的更大的关注。

3. 限制照射的一般原则

16. 国际放射防护委员会建议的剂量限制体系已在ICRP第26号出版物^[2]中给出，这个体系基于三项原则：

- 若引进的某种实践不能带来扣除代价的净利益，就不应当采取这种实践；
- 在考虑到经济和社会因素之后，一切照射应当保持

在可以合理做到的尽可能低的水平；和
——一个人所受的剂量当量不得超过委员会对相应的情况
所建议的限值。

17. 这三个组成部分常用下列简略化的语言表述：“实践的正当化”，“辐射防护的最优化”和“实施剂量限值”。

18. 产生辐射照射的某项实践的正当化必须考虑确定扣除代价的净利益所必需的各个方面的影响，包括社会的、经济的和放射学的影响。正当化要求单独对矿石的开采是不适用的，因为此活动仅是应从整体上加以判断的某项实践的一部分（例如能源生产的煤或铀循环）。

19. 辐射防护的最优化包括选择这样一个防护水平，以致于为达到辐射危害的进一步减小所付出的代价大于得到的改进。这一原则的应用意味着，考虑到操作和其它限制以及变化的条件，由实施设想的各种不同防护措施（例如针对减少氡的吸入和从开采区排出它）付出的代价和导致的个人和集体剂量的减少的比较。

20. 委员会在ICRP第26号出版物中已建议用代价利益差分分析作为实施最优化原则的一种方法。该程序用得到提高的防护水平所需的边际代价与减小危害的边际代价进行比较来选择防护水平。这些概念在ICRP第37号出版物^[9]中已明确定义，该出版物包含许多应用实例，其中一个就是关于铀矿的。在该出版物中，还指出了除代价利益分析外，在辐射防护最优化工作中还可以使用诸如多标准方法等技术。这些允许引入除集体剂量以外的其它因素，例如个人剂量分布。

21. 剂量限值作为最优化程序中的一个限制，它保证每

个人得到足够的防护。委员会建议的剂量当量限值可应用于一年外照射产生的剂量当量与同年放射性核素的任何摄入引起的约定有效剂量当量之和。来自氡衰变产物的剂量实际上在摄入后几小时内即全部给出。

4. 个人照射量限值

22. 剂量限制体系要求职业性受照人员接受的年剂量不超过委员会对相应环境建议的限值。对于随机性效应,委员会建议,在任何一年内外照射的剂量当量与内照射的约定有效剂量当量之和限于 50mSv 。对于非随机性效应,除眼晶体以外的任何器官或组织的相应年限值为 500mSv ,就眼晶体来说,限值为 150mSv 。

23. 外辐照和内辐照贡献的相加在矿山常常是需要的,因为矿工们可能同时受到许多不同源的照射,包括 γ 外辐射、氡、氡和它们的衰变产物以及含铀、钍和它们的放射性衰变产物的矿尘。在本章后面的一些段落将分开讨论这些照射源的每一种及它们的有关限值,这样就可以清楚地定义在阐述每个源时使用的特定术语和单位。建议的个人限值是否得到全面的遵守由各个不同照射源的合计来确定,这将在第41至43段讨论。

4.1 外照射

24. 原则上,必须考虑铀矿和钍矿中个人接受的,由 β 和 γ 辐射产生的外照射。因为在这些矿中辐射源的分布很广,同时铀和钍衰变系的 γ 能量又很高,所以 γ 外照射可以看成基本上是全身均匀受照的结果。因为对皮肤的 β 剂量一

般大大低于 γ 辐射造成的全身剂量，同时有效剂量当量限值仅是皮肤的剂量当量限值的1/10，所以一般不需要考虑 β 辐射的皮肤剂量。

4.2 内照射

^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的衰变产物

表1 对 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的衰变产物建议的年摄入量限值（ALI）、年照射量限值（ALE）和导出空气浓度（DAC）①

限 值 类 别	量	单 位	衰 变 产 物	
			^{222}Rn ⑥	^{220}Rn ⑦
ALI _p	α 潜能	J	0.02	0.06
	平衡当量 Rn 活度③	Bq	3.6×10^4	8.0×10^4
ALE _p	时间积分的 α 潜能 浓度	Jhm^{-1}	0.017	0.050
	或	WLM④	4.8	14
	时间积分的平衡当 量Rn浓度	Bqhm^{-1}	3.0×10^4	6.6×10^4
DAC②	α 潜能浓度	Jm^{-3}	8.3×10^{-6}	2.5×10^{-6}
	或	WL⑤	0.4	1.2
	平衡当量Rn浓度	Bqm^{-3}	1500	330

①下边画线的是初级限值。为实用起见，导出的数值可取一位有效数字。

②基于每年2000h工作期间的平均呼吸率为 $1.2\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 。

③见第28段。

④工作水平月。

⑤工作水平。

⑥从 ^{214}Po （RaA）到 ^{214}Po （RaC'）。

⑦从 ^{214}Pb （ThB）到 ^{214}Po （ThC'）。

25. 最近几年已收集到具有重大价值的流行病学和剂量学资料,氡衰变产物的照射限值可以这些资料为基础。这些资料以及工作人员吸入氡衰变产物的建议限值在ICRP第32号出版物^[4]中已经给出。对于短寿命氡衰变产物的任何混合物的 α 潜能,年摄入量限值ALI,是委员会已提出建议的一个初级限值。如ICRP第32号出版物所指出,对于 ^{222}Rn 的衰变产物来说,ALI_v为0.02J。对于 ^{220}Rn 的衰变产物,相应的限值为0.06J。

26. 从ALI_v可以得到以采矿工业使用的实际单位表示的导出量,如 α 潜能年照射量限值(ALE_v)和导出空气浓度(DAC)。表1的数值是根据ICRP第32号出版物^[4]提出的资料汇总列出的。

表2 相当于与空气中氡和氡衰变产物水平有关的不同量单位值的约定有效剂量当量

量	剂量学转换系数	
	^{222}Rn 衰变产物	^{220}Rn 衰变产物
平衡当量Rn活度	$1.4 \times 10^{-4} \text{ Sv/Bq}$	$6.2 \times 10^{-4} \text{ Sv/Bq}$
时间积分的平衡当量Rn浓度	$1.7 \times 10^{-6} \text{ Sv}/(\text{Bqhm}^{-1})$ 或 $1.0 \times 10^{-4} \text{ Sv/WLM}$	$7.6 \times 10^{-6} \text{ Sv}/(\text{Bqhm}^{-1})$ 或 $3.5 \times 10^{-4} \text{ Sv/WLM}$
平衡当量Rn浓度	$3.5 \times 10^{-4} (\text{Sva}^{-1})$ $/(\text{Bqm}^{-3})$	$1.5 \times 10^{-4} (\text{Sva}^{-1})/(\text{Bqm}^{-3})$

27. 因为表1给出的限值都与约定有效剂量当量(CEDE)0.05Sv有关,所以将相应的剂量学转换系数列于表2。经济合作与发展组织核能机构(OECD/NEA)的一份报告^[10]已经评论了剂量学转换系数,其中包含对矿山不同的环境条件下 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 衰变产物气溶胶的物理特性的考

虑。

^{222}Rn 和 ^{220}Rn

28. 如前节所讨论的, 委员会建议, 在矿中, 初级控制量应是 α 潜能摄入量。不过, 一些国家的主管部门可能希望应用氧浓度的测量来进行氧衰变产物浓度的控制, 因为较容易测量的量是它而不是 α 潜能。表1给出的平衡当量氧浓度 $EC_{222\text{Rn}}$ 和空气中 ^{222}Rn 本身的放射性浓度之间的关系式为:

$$C_{\text{Rn}} = EC_{222\text{Rn}}/F$$

当空气中氧和短寿命衰变产物以任何给定浓度共存时, 数值 F 就是实际的衰变产物浓度的总 α 潜能与当氧衰变产物与氧处于平衡时的总 α 潜能的比率。表1给出的限值可以用 ^{222}Rn 的放射性浓度, 即相应值 (ALIE或DAC) 与平衡因子 F 的分数表示。

29. 应用 ^{222}Rn 放射性浓度限值对氧的测量结果进行评价时, 需要有平衡因子 F 值可供使用。如果平衡因子 F 的测量值尚未取得, 那么在某些情况下根据矿中的通风率和气溶胶条件也能确定可以应用的数值。在通风条件正常的矿井中, F 值常常取为0.5。不过, 对于那些不需要实际测量平衡因子的生产单位, 国家的主管部门应对使用的 F 值给以具体规定。更详细的讨论见ICRP第37号出版物附录C。

30. 在某些具体环境中, F 值可能非常小, 以致氧气的照射成为相当重要的: 例如, 在使用了除氧衰变产物的空气过滤或静电沉淀的地方, 或者使用了呼吸面罩, 情况就是这样。

31. 委员会对氧气照射量的有关建议, 已在ICRP第32号出版物中给出, 并扼要列于表3。 ^{222}Rn 衰变产物的DAC和