

铀矿中的氦气问题

邓坎 A·霍拉第等著
智 惠 译

中国工业出版社

252-51

448

鈾矿中的氦气問題

邓坎 A·霍拉第；大衛 E·魯兴；
利查 D·考尔門；保羅 F·烏尔利契；合著
霍德华 L·庫斯涅茨；威廉 F·貝尔
智 惠 譯

中国工业出版社

本书詳細地闡明了吸入氡及其衰变的短寿命子体产物对机体的生物作用問題；对这些元素的物理和化学性能做了簡要的敘述。着重研究了矿山的大气被放射性污染的原因及污染源。本书探討了空气中氡及其子体产物含量的主要測定方法，并提出旨在保証鈾矿山放射性安全的通風計算方面的有益建議。

本书适用于从事鈾矿設計、生产和放射性安全防护工作的广大专业人員；本书就許多問題所提供的資料对研究吸入放射性产物对机体的生物作用的人員以及从事制造測定空气中氡及其子体产物含量的仪器的科学研究人員也有所裨益。

鈾矿中的氡气問題

智 惠譯

*

中国科学院原子核科学委员会編委会編輯

中国工业出版社出版 (北京佟麟閣路丙 10 号)

(北京市書刊出版事業許可証出字第 110 号)

北京市印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 787 × 1092 1/32 · 印张 3 · 字数 60,000

1962 年 8 月北京第一版 · 1962 年 8 月北京第一次印刷

印数 0001—1,105 · 定价 (10—6) 0.41 元

*

統一書号：15165 · 1742(核-23)

Д. А. ХОЛЭЙДИ, Д. Е. РАШИНГ,
Р. Д. КОУЛМЭН, П. Ф. ВУЛРИЧ,
Х. Л. КУЗНЕЦ, У. Ф. БЭЙЛ

**ПРОБЛЕМА РАДОНА
В УРАНОВЫХ РУДНИКАХ**

Перевод с английского

В. Г. Баламутова, Н. В. Рябова и К. Н. Стася

Под редакцией

К. П. МАРКОВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ
В ОБЛАСТИ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

Москва—1961

**CONTROL OF RADON
AND
DAUGHTERS
IN URANUM MINES
AND
CALCULATIONS
ON BIOLOGIC EFFECTS**

HOLADAY DUNCAN A., RUSHING DAVID E.,
COLEMAN RICHARD D., WOOLRICH PAUL F.,
KUSNETZ HOWARD L., BALE WILLIAM F.

序 言

科罗拉多高原鈾矿調查結果表明，那里有65%的矿工受着氡及其子体产物的危害，其浓度与很早以前就已开采的欧洲許多矿的浓度相等。自从地下工作开始以来，所經過的时间不多，因此要肯定美国矿工的健康未因氡及其子体产物作用而受到損害，为时尚早。至于談到中欧的某些矿区，那么可以断定，这些地区支气管癌发病数量的增加則是由于这些元素的作用結果。因此，必須采取特殊措施，以降低科罗拉多高原鈾矿井空气中的氡及其子体产物的浓度，使之达到建議采用的某种工作水平。

吸入含氡空气时，其輻射剂量主要取决于伴随着氡而存于空气中的子体产物。大部分子体产物停滯于肺，并且有两种 α 放射性同位素（鐳A和鐳C'）于肺組織內构成輻射剂量的直接放射源，与此同时而沉积于肺、且衰变为鐳C'的另两种短寿命的氡子体产物（鐳B与鐳C）可称为 α 輻射的間接放射源。鐳B与鐳C的 β 及 γ 輻射对所造成的輻射剂量，其作用是微不足道的。遺憾的是，目前尚缺乏有关各种氡子体产物毒性試驗的充足資料，而只有掌握了这方面的丰富資料才可能对矿山生产条件进行氡的允許极限浓度的計算。目前仅有根据对动物和人进行实验所得来的有关呼吸器官受氡子体产物阻滯的資料。另外，为了查清子体产物在呼吸系統中分布的情况，曾对动物进行了实验。当掌握了这些資料并了解了氡的物理性能时，就可以估計出受氡及其子体产物作用的人在呼吸系統中的輻射剂量。但是，由于許多情况尚未

清楚，还不能从这种計算中进一步确定鈾矿井和选矿厂大气中氡及其子体产物的允許极限浓度。因此，在取得确定允許极限浓度所必要的生物資料以前，建議利用某些允許工作水平的假設概念。可利用測量取自矿山的空气样品 α 放射性的方法来測定矿山大气中氡的含量，而子体产物的浓度則以測定薄膜过滤器上的 α 或 γ 放射性强度（通过該过滤器抽取一定已知数量的空气）的方法确定之。

此外，钍在尿中的含量尚可說明氡及其子体产物的全部作用。

根据本书所提供的資料可以得出以下結論：

1. 合理地引用 1 升空气中所含氡子体产物 α 衰变的“潜能”概念。所謂“潜能”，即 1 升空气中所含之鐳 A、鐳 B 及鐳 C 的某种混合物当全部 α 衰变到鐳 D 时所释放出之能量。建議以 1.3×10^5 兆电子伏/升的“潜能”值作为允許工作水平，此能量以下称作“允許能量”。“允許能量”之数值相当于总浓度 3×10^{-10} 居里/升的 RaA、RaB、RaC 平衡混合物在全部 α 衰变时所释放的能量。第五章叙述的野外測定法可以測量 α 衰变的“潜能”值。

2. 为了保証輻射安全，必須全年采用人工通风。

3. 具有机械通风的鈾矿，在多数情况下也未被充分利用（有时开动或爆破后开动），而新鮮空气則很少送到接近工作面的地方。

4. 降低浓度到規定数值所需之风量，可根据換风速度和氡或其子体产物的大气浓度而求得（第六章）。

5. 适宜的通风制度能将鈾矿井大气中的子体产物含量降低到允許水平。第六章将提供利用通风方面的專門建議。

6. 虽然不能指望自然通风会在任何溫度条件下均能保

証將大气浓度降低到允許水平，但是必須最大限度地利用自然通风。

应当指出，上述建議仅适用于地下工作强度較小的鈾矿。如果开采鈾的工作按其規模与一般非鈾矿所进行的工作相近，則須做进一步研究，以便查清除一般通风外，尚需采取补充安全措施的必要性。

目 录

序 言

第一章 概論	1
第二章 氡及其子体产物在鈾矿井中的存在	2
第三章 氡及其子体产物的物理与化学性能	5
第四章 空气中氡及其子体产物允許含量水平的計算	8
(一) 有关氡及其子体产物对人体作用后果的一些資料	9
(二) 調查氡毒性的动物实验結果	10
(三) 組織剂量的估計	11
1. 吸入氡的剂量	12
2. 吸入氡子体产物的剂量	16
第五章 氡及其子体产物在大气中濃度的測定方法	22
(一) 氡的精密測量法	23
1. 取样	25
2. 測定空气中氡含量用的仪器	25
3. 氡含量測定仪器的校正	32
4. 氡含量精密測定法的精度	34
(二) 空气中氡含量的野外測定法	36
(三) 氡子体产物的大气含量測定法	36
1. 基本原理	37
2. 最初的野外測定法	43
3. 推荐的野外測定法	44
(四) 个体检查方法	47
第六章 鈾矿中放射性矿尘和气体含量的檢查	50
(一) 設備	50
(二) 检查方法	51
(三) 結果	53

1. 人工通风	53
2. 从进风管道末端到开采工作面的距离	64
3. 自然通风	65
4. 綜合表	72
(四) 对結果的討論	72
1. 共同意見	72
2. 鉍矿井与普通矿井之比較	78
3. 必要通风量的确定	80
(五) 結論	83
参考文献	86

第一章 概 論

鈾生产不断增长之速度，迫使对开采这种战略金属的人们身体健康的危害性要加以严肃对待。其主要危害是来自吸入含氡的空气；氡是一种重气体，它与放射性衰变产物一起从矿石中析出来。

目前关于子体产物对人体作用后果方面的资料和对动物实验的结果用来确定这些元素的最大允许浓度仍然不足，因此，必须选用空气中子体产物含量的某种允许工作水平，一方面是为了保证辐射安全，而另一方面则是不致使工业工作量过于受限。本书给出了此种水平的测定，并对其实际运用也提出了建议。

允许水平的数值系根据对氡子体产物的生物作用进行详细研究并对其他放射性辐射的已知作用进行比较而选定的。所推荐的水平必须以足够的安全程度为前提，其目的是不使健康良好的矿工在肺部受到某些明显的伤害。氡及其子体产物带来的危害在矿山工业中是常见的，并不仅限于铀矿山。目前卫生部门和其他有关单位正在对大批多年在矿山上工作的矿工进行调查，而在他们工作的矿井中氡子体产物含量大致与本书所建议的允许含量相同。

这些研究工作的最终结果，对确定铀矿井大气中的子体产物最大允许浓度将具有很大的意义。但是，在这些研究尚未结束以前，建议采取一切措施把矿山大气中的浓度降到所建议的工作水平或低于该水平。

本书研究了用于制定工作水平的三个基本因素：

- 1) 被吸入的氡子体产物对人体的作用结果;
- 2) 动物实验的结果;
- 3) 肺组织剂量值, 该值系根据氡的已知物理常数并据人及被实验动物的呼吸系统阻滞氡及其子体产物的实验研究计算出来的。

第二章 氡及其子体产物在 铀矿井中的存在

铀矿石中,除铀外,尚含有以铀为母体物质的放射系中的所有其他元素。对矿工健康具有最大潜伏危害性的是本族中的下列元素: 氡、钍²¹⁸(RaA)、铅²¹⁴(RaB)、铋²¹⁴(RaC)和钍²¹⁴(RaC')。

氡借助于扩散作用从矿石或流经矿山的地下水而进入矿山大气。虽然氡在水中的溶解度不大,但大量的氡在地下能被地下水流冲得很远,当外部压力减小时,它就从地下水中析出。氡在矿山大气中的含量取决于射气的速度、通风速度和氡的半衰期。氡的直接产物的半衰期短。因此,即使氡进入矿井时没有子体产物,而后者也能很快地在大气中聚积。但是,若在它们之间达成放射性平衡,约须三个小时,因此这些元素在大气中的浓度强烈地受通风的影响。由于通风的作用,在矿井中很少能发现氡及其子体产物的平衡数量。

当研究科罗拉多高原的铀矿时,曾企图测定氡、钍A及钍C'在大气中的含量。1952年夏季对分布在科罗拉多州、犹他州、阿里佐纳州和新墨西哥州的157个矿进行了调查。由于调查过程中对氡及其子体产物的含量未作系统地检查,而

且再加上許多小型矿井非正規化的进行开采，因而不能得到科罗拉多高原各矿山情况的全面概念。但是，所調查的矿山工人数在从事铀开采的全部矿工中占有很大比重，所以，得到的放射性气体和矿尘的浓度对整个铀工业来讲可认为是具有代表性的。

表 1 不同矿区的铀矿井大气中氡子体产物的浓度

矿 区	矿井数	RaA + RaC' $\times 10^{12}$ 的浓度, 居里/升		
		平 均	最 大	最 小
布耳·坎昂	11	4500	32000	36
卡拉米提高原	10	1800	17000	66
科湯武德·沃西	7	520	26000	<2
杜朗科	5	18	120	<3
东保留地	9	160	3200	11
东斜坡	1	8	8	8
格依特維	8	1000	6000	6
格兰茨	3	2800	7000	38
季普塞姆山谷	4	9000	18000	500
长园	25	4600	37000	15
馬利茲佛耳	4	2500	59000	180
謀阿布	10	380	3400	2
芒提切洛	2	950	1900	15
紀念谷	3	1200	11000	9
奥特劳高原	3	3000	3800	18
矛盾谷	4	800	6500	37
南北极高原	7	2400	7700	38
滑岩山	25	1100	30000	<2
庙宇山	9	300	2800	<2
尤腊万	7	820	12000	160

注：本表之依据是 1952 年取自矿山的 400 个样品的研究数据。

取样和样品分析系采用了本书第五章所詳細描述的方法。空气中鐳 A 和鐳 C' 总含量是用同一章所介紹的第一个方法測定的。这种方法只有在取样时氡的子体产物間存在着长期平衡的条件下才是十分精确的。

这些研究結果列于表 1 和表 2 中。表內給出不同矿区的平均、最大和最小的浓度。从表內数据可以看出，氡及其子体产物的大气浓度变动范围很大，因此列在这些表內的值是对每一矿区更具代表性的平均值。

表 2 各矿区矿井大气中氡的浓度

矿 区	矿井数	氡浓度 $\times 10^{12}$, 居里/升		
		平 均	最 大	最 小
布耳·坎昂	11	4100	59000	1085
卡拉米提高原	6	570	23000	70
科湯武德·沃西	4	4500	9900	3100
东保留地	6	170	2200	100
格依特維	4	1100	3200	160
格兰茨	3	940	2000	870
季普塞姆山谷	3	14700	18000	1200
长园	17	8300	48700	1300
馬利茲佛耳	2	2360	25900	840
紀念谷	3	5900	6100	170
矛盾谷	2	—	3800	580
南北极高原	3	6800	7300	3000
滑岩山	11	3900	22000	130
尤腊万	4	4900	7100	1085

注：本表之依据是 1952 年取自矿山的 100 个样品的研究数据。

表 3 示出所調查的矿数按氡子体产物浓度分布的情况，并給出了关于在各該浓度下进行工作的矿工人数的資料。

該表的数据表明，在对空气中放射性元素含量不进行系

表 3 按氡子体产物浓度分类的矿山分布数目及
在該浓度条件下工作的矿工数

濃 度 $\times 10^{12}$, 居里/升	矿 山		矿 工		在等于或超过所示濃度 下工作的矿工数	
	个 数	%	人 数	%	人 数	%
合 計	157	100.0	733	100.0	—	—
0—99	35	22.3	116	15.8	733	100.0
100—499	27	17.2	117	16.0	617	84.2
500—999	8	5.1	31	4.2	500	68.2
1000—1999	17	10.8	140	19.1	469	64.0
2000—4999	36	22.9	153	20.9	329	44.9
5000—10000	18	11.5	60	8.2	176	24.0
10000以上	16	10.2	116	15.8	116	15.8

統检查的鈾矿中应当具备什么样的条件。如果以 2×10^{-10} 居里/升的鐳 A 和鐳 C' 值作为允許工作水平,那么,从表中可以看出,在絕大多数的矿井中必須采取保証放射性安全的措施。例如,氢的子体产物等于或高于 1×10^{-9} 居里/升的矿山占全部矿山的55.4%,而在这些矿山工作的矿工人数为矿工总人数的64%。

第三章 氦及其子体产物的 与化学性能物理

鈾放射系中的主要元素性能見表 4。該系的母体元素是在自然界中分布最广的鈾同位素 U^{238} , 它經過鐳与氡之衰变而蜕变成稳定性同位素鉛 Pb^{206} 。

除 U^{238} 以外,天然鈾中尚含有 U^{235} , 其数量占鈾总质量的 0.72%。这种同位素的半衰期比 U^{238} 稍短。在天然鈾中

每有 100 个 U^{238} 的 α 粒子就有 4.6 个 U^{235} 的 α 粒子。

U^{235} 是另一个放射系（錒系）的母体元素，它的衰变与 U^{238} 相似，经过錒和氢衰变为稳定性同位素铅（ Pb^{207} ）。值得注意的是该系元素——同位素氢—— Rn^{219} （錒射线），其

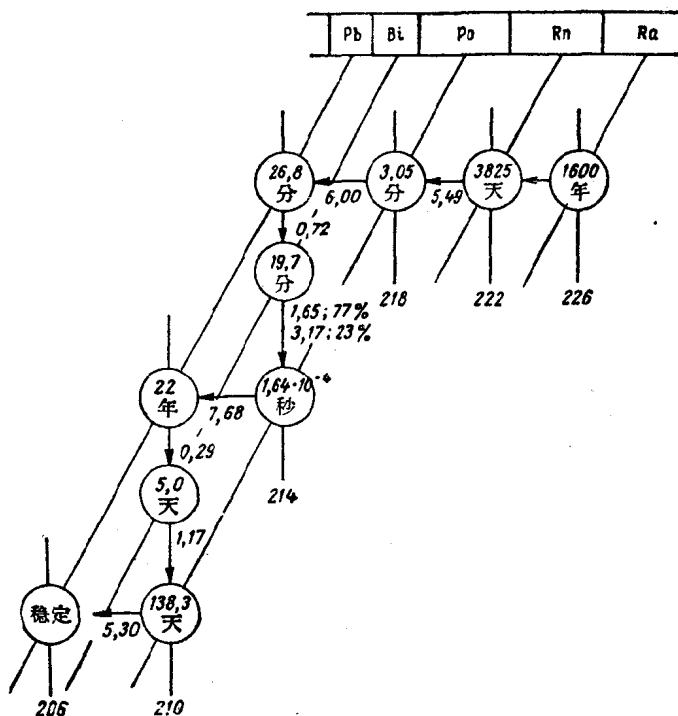


图 1 Ra^{226} 放射性衰变到稳定性同位素铅

Pb^{206} 的秀尔施(Хюрш)^[3]衰变系统图

图中：以横箭头表示 α 衰变；竖箭头表示 β 衰变；箭头附近的数字表示 α 粒子的能量和 β 能谱的最大能量；圆圈內为每种元素的半衰期

半衰期等于3.92秒。由此可见，这一同位素的大部份，于矿山大气中沉积以前就先已衰变。因此， Rn^{219} 本身并不是铀在开采和选矿过程中的危害根源。

图1所示为 U^{238} 系元素镭 226 衰变成稳定性同位素铅的

表 4 铀放射系的主要元素性能

元素名称	化学符号	射线种类	α 粒子能量 兆电子伏	β 能谱最大 能量, 兆电子伏	一次衰变的 γ 量子数	量子数的平均 能量, 兆电子伏	半衰期
铀 238	$^{92}_{92}U^{238}$	α	4.18	—	—	—	4.49×10^9 年
UX ₁	$^{90}_{90}Th^{234}$	β	—	0.205 80% 0.111 20%	—	—	24.1天
UX ₂	$^{91}_{91}Pa^{234}$	β	—	2.32 80% 1.5 13% 0.6 7%	—	—	1.17分
铀 234	$^{92}_{92}U^{234}$	α	4.76	—	—	—	2.48×10^5 年
钍	$^{90}_{90}Th^{230}$	α	4.68 75% 4.61 25%	—	—	—	8×10^4 年
镭	$^{88}_{88}Ra^{226}$	α	4.78 94.3% 4.69 5.7%	—	—	—	1622年
氡	$^{86}_{86}Rn^{222}$	α	5.486	—	—	—	3.825天
镭 A	$^{84}_{84}Po^{218}$	α	5.998	—	0.82	0.295	3.05分
镭 B	$^{82}_{82}Pb^{214}$	β, γ	—	0.65	—	—	26.8分
镭 C	$^{83}_{83}Bi^{214}$	β, γ	—	3.13 26% 1.67 77%	1.45	1.050	— 19.7分
镭 C'	$^{84}_{84}Po^{214}$	α	7.68	—	—	—	2.73×10^{-6} 分
镭 D	$^{82}_{82}Pb^{210}$	β, γ	—	0.018	1.0	0.047	22年
镭 E	$^{83}_{83}Bi^{210}$	β	—	1.17	—	—	5.02天
镭 F	$^{84}_{84}Po^{210}$	α	5.298	—	—	—	138.3天
镭 G	$^{82}_{82}Pb^{206}$	—	—	—	—	—	稳定

注：本表系根据郝林德 (Холлендер)、别尔勒曼 (Перлман) 和西保尔哥 (Сиборг) 之资料编制的，其中镭 B、镭 C 的 γ 射线资料除外，后者载于 P. Д. 爱万斯和 P. О. 爱万斯著作中^[2]，表内未列 Po^{218} 、 Bi^{214} 及 Br^{210} 的分支衰变产物，因其对健康的危害不大。

衰变系統图。

氡在水中的溶解度很小。但是，由于1居里氡約重6.5微克，而溶于水中的氡的放射性可能很大。溶解于水的氡的数量和与溶液相接触的空气中氡的数量之間的比例关系是根据实验求得的。

文献^[4]中是对不同温度以分配系数表示这种关系。在温度为20°C时，当溶液中氡和空气中的氡之間达成动态平衡之后，每1单位体积水中氡的含量为同一体积空气中氡含量的0.23。如果空气中氡的含量小于达成动态平衡所需之数量时，氡即开始从水中析出，而且在流动水或以某种形式造成攪拌水时，析出尤甚。

氡极易溶解于脂油，如温度为37°C时，1克橄欖油可溶解氡的数量比在同一数量水可溶解的高124倍。由于氡在脂油中有良好的溶解度，就使得受到它作用的人和动物的脂肪組織有效地吸收它。因为人体含脂肪极多，氡在人体中的“溶解度”比在水中为高。在动态平衡的条件下，1立方厘米人体中的含氡量为1立方厘米空气中氡含量的0.45。

第四章 空气中氡及其子体产物

允許含量水平的計算

由于缺乏足够的实验資料，暂时还不能确定氡及其子体产物最大的允許大气浓度数值。但是現有的关于鈾矿矿工健康情况的資料，研究氡对动物机体影响的实验以及吸入氡及其子体产物所引起的放射性剂量的計算，对制定这些元素在空气中含量的某种允許工作水平提供了可能性。这种水平的