

室内氡子体照射产生的肺癌危险

国际放射防护委员会第50号出版物

原子能出版社

国际放射防护委员会第 50 号出版物

室内氡子体照射产生的 肺癌危险

国际放射防护委员会工作组报告
(委员会 1986 年 9 月通过)

原子能出版社

内 容 简 介

本报告专门阐述公众吸入氡子体可能产生的肺癌危险。简述了室内氡的来源及水平,给出了暴露量与肺组织剂量之间的剂量转换系数,全面回顾了辐射诱发肺癌的综合研究结果。报告中详细介绍了采用相对危险预测模式及绝对危险预测模式来估计辐射诱发肺癌危险度的方法,给出了氡子体长期照射在公众中诱发肺癌的相对危险系数和绝对危险系数的参考数值,并对吸入室内氡子体诱发肺癌所致预期寿命的损失进行了估计。附录中还给出了某些专用量的定义,所采用的单位及其换算关系。

本书可供从事辐射防护、环境保护、卫生保健、放射医学等工作的专业人员以及大专院校有关专业的师生参考。

ICRP Publication 50

Lung Cancer Risk from Indoor

Exposures to Radon Daughters

ICRP, Pergamon Press, 1987

国际放射防护委员会第 50 号出版物

室内氡子体照射产生的肺癌危险

李素云 译

周永增 校

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/32·印张 3.25·字数 70 千字

1992 年 9 月北京第一版·1992 年 9 月北京第一次印刷

印数 1—800

ISBN7-5022-0534-9

TL·295 定价:2.50 元

2476/32

前 言

1981 年委员会成立了一个工作组,来分析与自然辐射照射有关的公众吸入氡子体可能产生的肺癌危险。

工作组的这份报告专门阐述与室内照射有关的危险,特别是由于吸入 ^{222}Rn 子体产生的危险。这种照射是居住在世界气候温和地区公众所受天然辐射剂量的最大组成部分。这种室内照射的大部分与社会因素及个体居住习惯紧密相关,对这种可控的天然辐射照射部分,应遵守委员会推荐的(IC84)有关限制公众遭受天然辐射源照射的原则。关于这一点,本报告中给出的研究结果可能为国家主管当局制定有关现有房屋的行动水平及设计未来房屋的最优化程序提供一个导则。

工作组成员对 F. Schindel(GSF)在相对危险模式数学评价方面所做的大量工作表示衷心感谢,并感谢 Irmgard Gerisch、Ingrid Goddeng 及 Ellen Reinhard 在原稿准备中给予的技术协助,工作组成员同时感谢对暴露量和危险分析提出宝贵建议的所有同事们。

工作组成员:

W. Jacobi(主席)

J. Lafuma

C. E. Land

H. G. Paretzke

目 录

前言

1. 引言.....	(1)
1.1 物理学基础知识	(1)
1.2 生物学基础知识	(2)
1.3 辐射防护原则	(3)
1.4 本报告的目的和结构	(5)
2. 来源与水平.....	(6)
2.1 室内氡的来源	(6)
2.1.1 来源于建材	(7)
2.1.2 来源于土壤	(8)
2.1.3 室外空气的贡献	(9)
2.2 预计的室内空气中氡的平衡	(10)
2.3 氡子体的累积 平衡因子	(12)
2.4 室内调查的综合结果	(13)
3. 暴露量与肺组织剂量	(17)
3.1 年暴露量的估算	(17)
3.2 肺剂量学	(22)
3.3 参考剂量系数	(24)
4. 辐射诱发肺癌:综合研究结果.....	(26)
4.1 流行病学调查	(27)

4.1.1	暴露于氡的井下矿工	(27)
4.1.2	原爆幸存者	(29)
4.1.3	强直性脊柱炎患者	(29)
4.1.4	暴露于高水平天然辐射人群组的相关调查	(29)
4.2	组织学研究结果	(31)
4.3	暴露量—危险关系	(32)
4.4	暴露于氡的矿工的肺癌危险系数	(34)
4.5	吸烟的影响	(37)
4.6	潜伏期,年龄及性别相关性	(40)
4.6.1	相对危险与时间的关系	(40)
4.6.2	年龄相关性	(41)
4.6.3	肺癌危险的性别相关性	(44)
4.7	主要结论	(45)
5.	评价公众肺癌危险的概念与模式	(45)
5.1	相对危险预测模式	(46)
5.1.1	基本关系	(46)
5.1.2	积分危险量的计算	(48)
5.2	公众危险系数的评价	(50)
5.2.1	矿工数据的可转用性	(50)
5.2.2	修正因子的估计	(51)
5.2.3	特定年龄肺癌发生率的危险系数	(54)
5.3	绝对危险预测模式	(55)
5.3.1	基于矿工数据的途径	(55)
5.3.2	剂量学途径	(57)
5.3.3	不同的绝对危险途径的比较	(57)

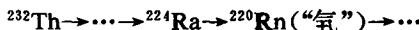
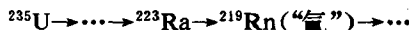
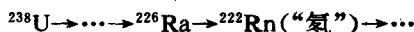
6. 氡子体长期照射诱发肺癌危险的预计	(59)
6.1 假定的暴露条件及参考人群	(60)
6.2 终生危险与暴露量的关系:正比危害模式的结果	(63)
6.2.1 相对危险系数	(63)
6.2.2 绝对危险系数	(66)
6.3 吸烟者与非吸烟者的归因辐射危险	(69)
6.4 公众平均归因危险	(70)
6.5 预期寿命损失的估计值	(72)
6.6 摘要和结论	(74)
6.6.1 不同危险途径的比较及可靠性	(74)
6.6.2 参考危险系数的评价	(76)
7. 结束语	(78)
参考文献	(79)
附录:专用量及单位	(93)

1. 引言

本章对那些不熟悉室内氡问题及其生物学意义的读者提供某些基础知识。

1.1 物理学基础知识

在三个天然衰变系中所形成的放射性核素主要是重金属(如 U、Th、Ra、Po、Bi 及 Pb)的放射性同位素。然而,这些衰变链的每一个都有一环是惰性气体氡(Rn)的放射性同位素:



另外,由于这些衰变链的母体原子可存在于所有天然物质里,所以,氡就从岩石、土壤及建筑物表面释放到空气中。其中放射性半衰期为 3.8d 的 ^{222}Rn (氡, Rn)及放射性半衰期为 55s 的 ^{220}Rn (钍, Tn)的释放最为重要。与氡、钍相比, ^{219}Rn (釷, An)的贡献可以忽略,因为其半衰期很短,只有 3.9s,并且在天然铀中 $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ 的原子比值很低,只为 0.00725。正因为如此,关于釷及其衰变产物的吸入在本报告中不予讨论。

从地表放出的氡进入大气中,很快弥散并被垂直对流和湍流所稀释。如果氡释放到封闭的空间中,如地下矿井和房屋中,则可产生相当高的氡水平,在这种地区,氡水平随通风率的下降而增高。不同国家的调查结果表明,室内空气中 ^{222}Rn 时间平均浓度在各房屋之间区别很大,波动范围为几至几千 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

氡衰变成一系列短寿命放射性核素,即所谓氡子体,如图 1 所示。因此,氡往空气中的释放也导致这些短寿命子体在空

气中的累积,因为这些核素是 Po、Bi 和 Pb 的放射性同位素, 所以其大部分附着在灰尘粒子上,特别是亚微米大小的粒子上,形成放射性气溶胶。由于表面沉积和通风,在诸如矿井或房屋这样限定的空间中氡与其子体之间达不到放射性平衡。

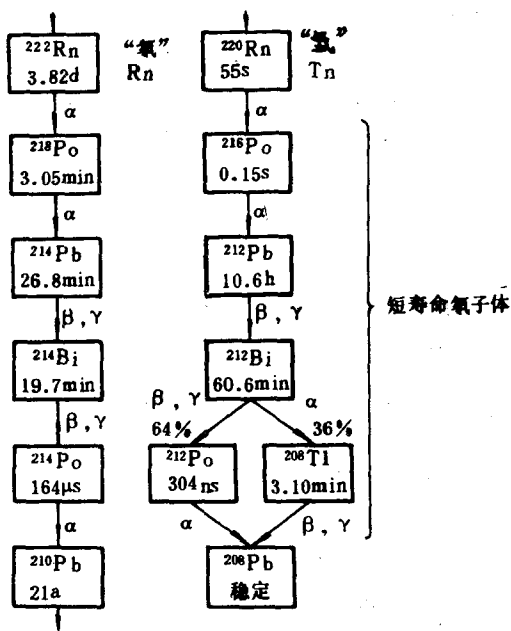


图 1 ^{222}Rn 及 ^{220}Rn 的衰变链

1.2 生物学基础知识

由于氡不活泼,所以吸入的氡在体组织内不发生化学结合,加之,氡在体组织内的溶解度颇低,因此,吸入氡的放射性毒性与非气态的放射性核素(如氡子体)相比相对较小(IC81)。

相反,吸入的氡子体则沉积在呼吸道内,由于它们的放射性半衰期很短,所以,除了 ^{220}Rn 的寿命最长的子体 ^{212}Pb 以外,大部分沉积的子体原子在呼吸道内衰变,并主要对支气管上皮产生辐射剂量。因为这些子体原子中的某些原子是 α 辐射体,所以还应考虑 α 辐射相对高的生物效应。委员会推荐, α 粒子的品质因数为20,而这些子体核素的 β 及 γ 辐射的平均品质因数为1(IC77a,81)。

由于室内空气中氡子体水平高,所以气候温和地区全体居民吸入室内氡子体所致支气管上皮平均剂量当量估算值比天然源所致其他各体组织总辐射剂量当量平均值约高10倍(UN82)。考虑到室内空气中氡子体水平变化很大,居住在氡水平高的房屋内的某些个体的支气管剂量可达到相当高的数值。

迄今为止,为定量评价与吸入氡子体产生的天然辐射照射有关的肺癌危险,特别是支气管癌危险,有关这些人群组的直接流行病学调查数据是不足的。相反,在几组于地下工作期间暴露于氡气的地下矿工中,已观察到支气管癌症发生率有增加。特别是暴露于氡的铀矿工的流行病学调查表明,在氡子体暴露量与超额肺癌发生率之间存在明显的相关性,这一点不可能用其他影响因素来解释,此结果已被暴露于氡的动物实验研究所证实。暴露于氡的矿工的流行病学调查结果,经适当修正后,可用来评价可能存在的与室内氡子体照射有关的公众肺癌危险。

1.3 辐射防护原则

应当强调指出,人类同任何生物体一样,始终受到来自天然辐射源的电离辐射照射。然而,必须认识到,这种天然辐射不是不变的,其中某些组成部分可能受人类活动和居住习惯

的严重影响,这一点对于室内氡及其子体的照射来说更是如此,这种照射与房屋的位置、结构、建材类型及室内通风紧密相关。有限的通风导致室内空气中氡水平增高,这样,室内氡子体的照射在很大程度上是可控的。这一结论无论是对现有房屋还是对未来的房屋均是正确的,只是在这两种情况下控制的程度及控制措施类型不同而已。

委员会最近阐述了限制公众遭受天然辐射源照射的基本原则(IC84;Bo85),明确指出,对于人工源所致公众成员长期照射所建议的有效剂量当量为 1mSv 的年剂量限值不适用于天然源,如室内氡,但这种天然辐射照射的可控部分,在考虑到经济和社会因素以后,应当保持在可以合理做到的尽可能低的水平。

对氡水平高的现有房屋,委员会提出一套补救措施,在决定是否采取行动时,它强调“在任何补救措施中包含的危害或社会代价与将获得的危险降低相比必须是正当的”。另外,室内氡行动水平的确定受住户自愿程度的影响。委员会得出结论,“由于所有这些原因,推荐一个普遍使用的室内氡行动水平值可能是无意义的”。但指出,“如补救措施简单易行,可以考虑 $200\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右的室内平衡等效 ^{222}Rn 浓度作为行动水平。对严厉的和破坏性的补救措施,比上述数值大几倍的数值可能更合适”(IC84)。本报告附录中给出“平衡等效浓度(EEC)”这个量的定义。

关于未来房屋的设计,委员会建议的限制体系与对人工源的相似。在这种情况下,应采用室内可接受的氡水平的上限来限制照射,这一上限应比现有房屋的行动水平还要低。委员会相信,“平衡等效 ^{222}Rn 浓度的合理上限约为 $100\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$, 这就是说,在许多国家中这一大小的数值能防止氡成为住宅

内危险的主要来源”(IC84)。还应认识到,确立这一上限可能会影响未来房屋在选址、结构及通风方面的建筑标准。

1.4 本报告的目的和结构

上述考虑指出,对室内氡问题的理解和评价以及作出合理管理或行动的决定与对这种天然辐射照射可能引起的肺癌危险的评价紧密相关。分析研究这种危险是本报告的主要目的,而该分析主要是针对诱发的支气管癌。同国际疾病分类的归类一样,本报告中“肺癌”一词与“支气管癌”同义(ICD(8)—162)。

第2及第3章中汇总了有关室内空气中氡及其子体来源和水平的近期研究结果,并估算了对肺内靶组织产生的剂量。第4章概述了辐射诱发肺癌的流行病学调查及实验研究的主要结果,重点分析暴露于氡的铀矿工流行病学调查结果。根据这些研究结果,第5章叙述了可用来评价吸入 ^{222}Rn 及 ^{220}Rn 子体所致个体肺癌危险及与公众有关的肺癌发生率的不同概念和模式。除通常采用的绝对危险预测模式以外,工作组还选择考虑相对危险预测模式,后一种模式可更简单地将矿工的数据用于公众的不同照射条件,这里需考虑长期暴露量率,肺癌发生率的年龄相关性及可能存在的吸烟的协同作用。在第6章中,给出并比较了随室内空气中氡及其子体浓度或相应的年暴露量而变化的不同危险模式的结果,着重给出可以相对危险预测模式中得到的结论。

读者应注意本报告的附录,它给出了用于表征氡及其子体浓度以及这些放射性核素暴露量的专用量和单位的定义。

2. 来源与水平

本章简要概述室内、外空气中 ^{222}Rn (Rn)、 ^{220}Rn (Tn)及其短寿命子体的来源与水平,着重讨论室内的放射性平衡。为获得更详细的资料,读者可参考几个评论性报告(UN82;NC84a,b)及最近出版的有关该题目的会议录和杂志(HP83;RP84;SE85)。

空气中氡浓度的单位为 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,氡子体混合物的浓度用 ^{222}Rn 或 ^{220}Rn 的平衡等效浓度(EEC)来表示,视情况而定。通常用来表征氡子体浓度的专用量和单位在本报告附录中给出。

2.1 室内氡的来源

室内氡的来源:

- 从建材中析出的氡;
- 从底层土壤中析出的氡;
- 由于通风从户外空气中进入室内的氡;
- 从供水及用于取暖和厨房设备的天然气中释放出的氡。

通常,在上述来源中只有前三个来源重要,由水及天然气中进入室内的氡,只有在其含量非常高时才予以考虑。

氡由某给定源进入室内的速率用向给定室内空间氡活度的补充速率,即单位时间内单位室内空气体积中所补充的氡活度来表示。表1汇总了典型房屋内 ^{222}Rn 从不同源进入室内的速率的估计范围。

表 1 室内空气中不同来源的 ^{222}Rn

的比体积进入速率及其浓度

预计平均值和正常变化范围(不包括极值)

源	比进入速率 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)		室内浓度 ^a ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$)	
	估计 平均值	变化 范围	估计 平均值	变化 范围
建筑材料				
砖或混凝土房屋	2—20	1—50	3—30	0.7—100
木造房屋	<1	0.05—1	≤ 1	0.03—2
土壤	1—40	0.5—200	2—60	0.5—500
室外空气	2—5	0.3—15	3—7	1—10
其他源 (水, 天然气)	≤ 0.1	0.01—(10)	≤ 0.1	0.01—(10)
所有源	6—60	2—200	10—1000*	2—500

a. 指平均通风率 0.7h^{-1} (正常范围为 $0.3—1.5\text{h}^{-1}$)。

2.1.1 来源于建材

建筑结构里 ^{226}Ra 衰变产生的 ^{222}Rn 总活度中只有一小部分扩散到墙壁表面并释放到室内空气中,这一部分与建材的析出能力和多孔性以及氡在建材内的体积扩散系数紧密相关。由于这些参数的影响, ^{222}Rn 从建材中进入室内的速率不可能只根据其中 ^{226}Ra 的含量进行准确预计。

然而,可通过测量不同建材的氡析出率来估算该进入速率。这些研究结果指出,对于用普通建材建筑的房屋来说, ^{222}Rn 的比进入速率为 $0.05—50\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (UN77, 82; CI83; IN83; NE84, 85a);对于木造房屋,其值位于上述范围的

* 此处似应为10—100。——译者注

低部,典型值小于 $1\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

在 ^{226}Ra 含量极高的明矾页岩上利用混凝土建筑的房屋内进入速率往往很高,如在瑞典,曾观察到进入速率高达 $500-1000\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (Sw84; UN82),在采用凝灰岩、磷酸盐矿渣或磷石膏建造的房屋内,氡从建筑结构中进入室内的速率可高达几百 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

根据美国 (Ne84, 85b)、英国 (Cl83) 及德意志联邦共和国 (BI86) 的测量结果可粗略估计 ^{222}Rn 从建筑结构中进入室内速率的频度分布,根据这些结果可以预测,对于混凝土和砖造房屋或木造房屋平均进入速率分别为 $2-20$ 或小于 $1\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (In83, Na84; UN82)。

另外,应考虑 ^{220}Rn (Tn) 从建材中的释放,普通建材(混凝土,砖)中 ^{232}Th 的含量为 $10-100\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$,按其活度与 ^{226}Ra 含量相差不大,但由于其半衰期很短,只有 55s,所以只有建筑物内侧表层里产生的 ^{220}Rn 原子才能扩散到室内空气中。过去只有少数有关 ^{220}Rn 从建材中释放的资料可利用 (UN82),最近的测量结果 (Fo84) 表明,对于普通混凝土和砖造房屋平均进入速率为 $100-500\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (变化范围为 $50-5000\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$)。这意味着,在这样的房屋中, ^{220}Rn 从建材向室内空气中的活度释放速率大约是 ^{222}Rn (Rn) 的 $10-100$ 倍,但是, ^{220}Rn 的这一释放速率受墙壁覆盖层(如墙粉,油漆)的严重影响。在木造房屋中, ^{220}Rn 的进入速率可能位于上述变化范围的低部。

2.1.2 来源于土壤

土壤空气中 ^{222}Rn 的平均浓度约比近地面上大气空气中 ^{222}Rn 浓度高 1000 倍,因此,如果氡从底层土壤往室内空气中大量转移,则室内氡浓度就会相当高。可能的转移机制为分

子扩散及对流流动,后一个过程最为重要,它是由土壤与室内空气之间的压力差引起的(Ea84;Ne83a,b,84,85a;Sw84),这些压力差起因于由室内、外温差造成的热排气效应及吹在建筑物上的风。

考虑到裂缝和缝隙,氡从土壤进入室内的速率与房屋的地基及底层土壤的透气性紧密相关,因此,该速率随房屋各异,可能有明显不同。目前尚没有关于氡从土壤向室内空气中的进入速率的直接测量结果,考虑到所涉及的参数的不定性,对给定房屋来说,该源项的理论预测较为困难,只能根据所观察到的总进入速率,扣除建材的预计贡献,来估计氡从土壤进入室内的可能贡献。

在几个国家进行的室内空气中 ^{222}Rn 浓度及通风率的同时测量给出了总进入速率的宽分布函数,几个国家平均值范围为 $6-60\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (Ne85a),瑞典可能例外,在那里观察到略高的数值。扣除其他源特别是建材的平均贡献的估计值(见表1), ^{222}Rn 从土壤进入室内速率的几个国家平均值约为 $1-40\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

通常,在地基坚固密封的房屋内,从土壤进入速率一般低于 $10\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$,而裂缝和缝隙可导致很高的数值,特别在那些土壤天然放射性活度高的地区,如在瑞典曾观察到进入速率高达 $1000\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右,这只能用 ^{222}Rn 从底层土壤的对流转移来解释。

考虑到 ^{220}Rn 的放射性半衰期很短,所以其从土壤进入速率可能比 ^{222}Rn 的低,然而,在土壤与室内空间之间没有有效阻挡层的房屋内,不能排除 ^{220}Rn 从土壤进入室内的速率可能与 ^{222}Rn 的相当(Sc85a)。

2.1.3 室外空气的贡献

大气中 ^{222}Rn 、 ^{220}Rn 及其短寿命子体的分布由氡、氡从土壤表面的析出和气象学分布过程确定,因此,近地表面的浓度随地点和时间变化很大。现有测量结果表明,在土壤中天然活度正常的地区,地平面以上1—10m的空气层内 ^{222}Rn 和 ^{220}Rn 的长期平均浓度分别为1—10和0.5—20 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ (UN82; Ge83; NC84a)。对于全球来说,可以预计,氡、氡平均浓度为3—7 Bqm^{-3} 。

通风引起的氡从户外空气向室内的比进入速率 i_0 由下式给出:

$$i_0 = \lambda_v a_0 \quad (1)$$

式中 a_0 为户外空气中氡浓度;

λ_v 为室内外空气间空气交换速率常数。

个人居住习惯(门窗的开放)对房屋通风率的影响很大,在自然通风的房屋内,通风率还与气象条件有关,并随风速及室内外空气间温度梯度而增高。看来,对于大多数房屋,时间平均通风速率常数 λ_v 的代表值为0.3—1.5 h^{-1} 。

假如户外空气中 ^{222}Rn 浓度为1—10 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$,则由(1)式得出,从户外空气中进入速率的典型变化范围约为0.3—15 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$,如果平均通风率为0.7 h^{-1} ,则所有房屋的平均进入速率为2—5 $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。对于 ^{220}Rn 来说,从室外空气的平均进入速率可能稍低一些,大约是 ^{222}Rn 的一半。

2.2 预计的室内空气中氡的平衡

正如根据前一节的考虑得出的,表1汇总了对不同来源 ^{222}Rn 的比进入速率所预计的正常变化范围及所估计的平均值。如上所述,在那些建筑在 ^{226}Ra 含量及孔隙率较高的地基上的地板结构透气性强的房屋内尤其可能出现的极值除外。