

辐射安全手册精编

潘自强 主编



科学出版社

辐射安全手册精编

潘自强 主编

TL7-62
03

科学出版社

内 容 简 介

本书是在《辐射安全手册》的基础上精选、整合和增补而成,内容涉及辐射安全的各个方面,共包括14章和3个附录,第1~3章为有关辐射安全的基础知识,其他章节为实用的辐射安全技术和要求,附录为基本物理常数、常用参数等。

本书采用表格和条目式的编写方式,内容精练实用,使用方便,可供在核电站及核燃料循环、核与辐射技术应用等工业、科研活动中从事辐射安全工作的技术人员和研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

辐射安全手册精编 / 潘自强主编. —北京:科学出版社, 2014.6

ISBN 978-7-03-040585-2

I. 辐… II. 潘… III. 辐射防护—手册 IV. TL7-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 094460 号

责任编辑:沈红芬 / 责任校对:张凤琴

责任印制:肖 兴 / 封面设计:范璧合

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用



科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

安泰印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年6月第一版 开本:787×960 1/32

2014年6月第一次印刷 印张:11 7/8 插页:1

字数:310 000

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《辐射安全手册精编》编写人员

主 编	潘自强
副 主 编	刘新华 白 光
编 委	(按姓氏笔画排序)
	白 光 刘新华
	刘福东 孙全富
	杨茂春 杨俊武
	张庆利 张建岗
	赵兰才 侯长松
	夏益华 徐勇军
	康玉峰 廖运璇
	潘自强

前 言

2011年《辐射安全手册》出版以来,受到了读者的欢迎。同时,许多读者建议,希望有一本袖珍版的《辐射安全手册》,便于携带和查阅。编者接受了读者建议,编写了《辐射安全手册精编》。

《辐射安全手册精编》不是《辐射安全手册》的缩印本,而是在其基础上精选、整合和调整而成的,如章节的设计更便于按主题查找;考虑到辐射与物质相互作用偏基础,删除了有关内容。《辐射安全手册精编》也增加和更新了部分内容,如增加了辐射安全原则,增加了常用放射性核素辐射安全参数表,更新了日本福岛核事故的有关资料,并编写了索引。

《辐射安全手册精编》的出版得到了中国核工业集团公司、中国广东核电集团公司、环境保护部核与辐射安全中心、中国原子能科学研究院、中国辐射防护研究院和中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所的支持,在此表示衷心的感谢。

《辐射安全手册精编》内容涉及辐射安全的各个方面,由于编者的知识有限,书中不免存在一些问题和不足,敬请读者指正。

潘自强

2014年3月

目 录

1	物理量、辐射防护量和运行实用量	(1)
1.1	物理量	(1)
1.2	防护量	(2)
1.3	运行实用量	(8)
1.4	换算关系	(11)
2	辐射安全原则和基础	(12)
2.1	基本安全原则	(12)
2.2	辐射安全相关的国际组织	(13)
2.3	辐射安全和辐射安全体系	(17)
2.4	辐射安全法规和标准	(19)
2.5	辐射安全体系的变迁	(21)
2.6	辐射生物效应	(26)
3	辐射安全常用数据	(35)
3.1	常用核素比活度和衰变子体	(35)
3.2	中子和中子活化	(44)
3.3	辐射与物质相互作用和屏蔽	(53)
3.4	外照射相关转换因子	(67)
3.5	内照射相关转换因子	(73)
4	实用公式及数据	(102)
4.1	α 粒子和质子	(102)
4.2	β 粒子和电子束	(102)
4.3	韧致辐射	(104)
4.4	γ 剂量率	(105)
4.5	γ 源在空气中比释动能率	(106)
4.6	放射性衰变公式	(110)
4.7	观测数据的平均值及误差	(112)
4.8	泊松分布及其标准差	(114)
4.9	判断限和探测限	(115)
5	天然环境辐射水平及人为活动引起的天然照射 增加	(117)
5.1	天然环境辐射水平	(117)

5.2	人为活动引起的天然照射增加	(127)
6	人工辐射环境水平	(134)
6.1	核试验	(134)
6.2	核事故	(140)
6.3	环境介质中人工放射性核素含量	(145)
7	辐射防护监测仪器	(152)
7.1	辐射防护监测的目的	(152)
7.2	常用辐射监测仪器的特性	(153)
7.3	辐射防护仪器校准	(178)
8	职业辐射防护	(181)
8.1	职业照射个人剂量限制	(181)
8.2	表面污染控制水平	(183)
8.3	氦、氡及其子体的控制限值	(184)
8.4	常见放射性核素毒性分组、非密封源工作场所的 分级和控制	(186)
8.5	辐射分区	(189)
8.6	核临界安全	(191)
8.7	辐射防护最优化	(195)
8.8	职业照射水平	(197)
9	医学应用中的辐射防护	(201)
9.1	医学应用概述	(201)
9.2	医疗照射的正当性判断	(202)
9.3	医用辐射防护的最优化	(203)
9.4	放射诊断指导水平	(218)
9.5	抚育者、照顾者与生物医学研究中志愿者的剂量 约束	(226)
9.6	接受放射性核素治疗的患者出院	(226)
10	辐射环境保护	(230)
10.1	公众照射剂量限值和剂量约束值	(230)
10.2	气态和液态流出物排放控制	(232)
10.3	流出物监测和环境监测	(236)
10.4	饮用水水质放射性标准	(237)
10.5	食品中放射性核素浓度限值标准	(247)
11	放射性废物管理	(251)
11.1	放射性废物管理的基本原则	(251)
11.2	豁免、排除和解控	(252)

11.3	放射性废物分类	(260)
11.4	废物最小化的概念及应用	(264)
11.5	退役和环境整治	(268)
12	放射性物质运输安全	(276)
12.1	运输中常用放射性物质的类别和定义	(276)
12.2	放射性物质的豁免值和放射性物质运输中的 A_1 和 A_2 值	(278)
12.3	货包的分类和要求	(283)
12.4	货包和外包装的运输指数、临界安全指数、 辐射水平和污染水平控制	(285)
12.5	标记、标识和标牌	(288)
12.6	对放射性物质、包装和货包的实验要求	(288)
12.7	放射性物品运输分类	(289)
13	放射源应用和分类	(297)
13.1	放射源的分类	(297)
13.2	常用放射源的应用领域、活度范围和分类	(300)
14	核与辐射应急	(308)
14.1	核与辐射事件分级	(308)
14.2	应急照射情况下的干预	(308)
14.3	核与辐射应急准备	(315)
14.4	应急响应	(318)
14.5	核与辐射恐怖袭击事件应急	(321)
14.6	核与辐射应急的医学处理	(322)
14.7	核设施的实物保护	(328)
14.8	重大核与辐射事故简介	(330)
14.9	放射性物质的危险量	(334)
附录	(339)
附录 1	基本物理常数	(339)
附录 2	用于构成十进倍数和分数单位的词头	(340)
附录 3	常用放射性核素辐射安全参数	(341)
索引	(363)

物理量、辐射防护量和运行实用量

1.1 物理量

· 半衰期 (half-life, $T_{1/2}$)

半衰期为放射性原子核数目衰减到原来数目的一半所需的时间,用 $T_{1/2}$ 表示。与它关系密切的量是衰变常数 λ , 它表示放射性原子核在单位时间内发生衰变的概率,其倒数就是放射性原子核的平均寿命。半衰期和衰变常数的关系是

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

· 活度 (activity, A)

在给定时刻处于某给定能态的一定量的某种放射性核素的活度 A 定义为

$$A = \frac{dN}{dt}$$

式中: dN 为在时间间隔 dt 内该核素从该能态发生自发核跃迁数目的期望值。活度的 SI 单位是秒的倒数 ($1/s$), 称为贝可 [勒尔] (Bq)。

· 比释动能 (Kerma, K)

比释动能 K 定义为

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

式中: dE_{tr} 为不带电电离粒子在质量为 dm 的某一物质内释出的全部带电粒子的初始动能的总和。比释动能的 SI 单位是焦耳每千克 (J/kg), 称为戈 [瑞] (Gy)。

· 注量 (fluence, φ)

注量 φ 定义为在给定时间间隔内进入以空间某点为中心的适当小球体的粒子数 dN 除以该球体的最大截面积 da 得到的商, 即

$$\varphi = \frac{dN}{da}$$

· 吸收剂量 (absorbed dose, D)

吸收剂量 D 是一个基本的剂量学量, 定义为

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}$$

式中: $d\bar{\varepsilon}$ 为电离辐射授予某一体积元中的物质的平均能量; dm 为在这个体积元中的物质的质量。

由于对辐射防护有意义的量应该指某一体积元吸收的平均能量, 因此可以对任何确定体积内的授予能量加以平均, 平均剂量等于授予该体积的总能量除以该体积的质量而得的商。吸收剂量的 SI 单位是焦耳每千克 (J/kg), 称为戈 [瑞] (Gy)。

1.2 防护量

当量剂量和有效剂量等防护量只适用于描述随机效应, 不应当用来定量描述较高的辐射剂量, 或者用于需要对有关组织反应 (确定效应) 进行任何治疗方面的决策。用于描述确定效应时, 应当用吸收剂量 (以戈瑞为单位, Gy) 来评估剂量, 而涉及高 LET 辐射 (即中子或 α 粒子) 时, 则应当采用适当的 RBE 加权的吸收剂量。

各个剂量学量的相互关系见图 1.1。

· 当量剂量 (equivalent dose, GB18871-2002)

当量剂量 $H_{T,R}$ 定义为

$$H_{T,R} = \omega_R \cdot D_{T,R}$$

式中: $D_{T,R}$ 为辐射 R 在器官或组织 T 内产生的平均吸收剂量; ω_R 为辐射 R 的辐射权重因数。

当辐射场是由具有不同 ω_R 值的不同类型的辐射所组成时, 当量剂量为

$$H_T = \sum_R \omega_R \cdot D_{T,R}$$

当量剂量的单位是 J/kg, 称为希 [沃特] (Sv)。

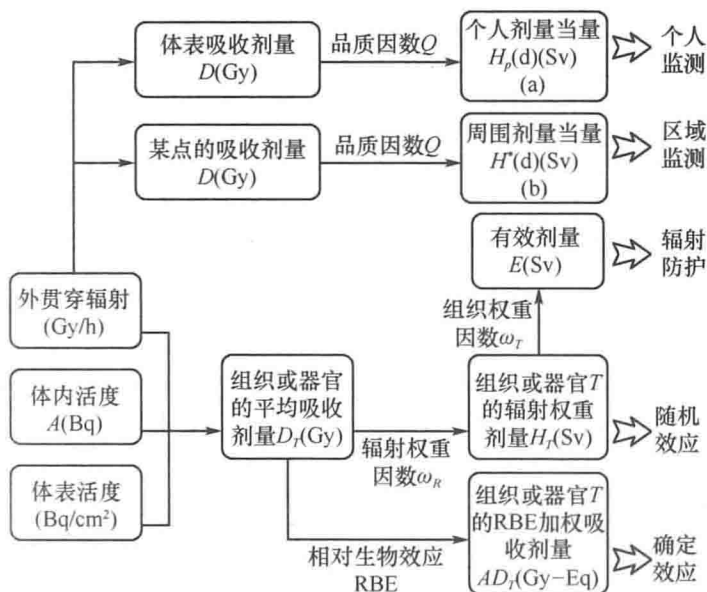


图 1.1 剂量学量和它们的应用示意图

(a) 在体表下某一点; (b) 在 ICRU 球模内某点

· 辐射权重因数 (radiation weighting factor, ω_R)

(1) 由国家标准 (GB18871-2002) 给出的辐射权重因数: 为辐射防护目的, 对吸收剂量乘以的因数 (如表 1.1 所示), 用以考虑不同类型辐射的相对危害效应 (包括对健康的危害效应)。

表 1.1 辐射权重因数

辐射的类型及能量范围	辐射权重因数 ω_R
光子, 所有能量	1
电子及介子, 所有能量 ^a	1
中子, 能量 < 10keV	5
10~100keV	10
100keV~2MeV	20
2~20MeV	10
>20MeV	5
质子 (不包括反冲质子), 能量 > 2MeV	5
α 粒子、裂变碎片、重核	20

a. 不包括由原子核向 DNA 发射的俄歇电子, 此种情况下需进行专门的微剂量测定考虑。

如果需要使用连续函数计算中子的辐射权重因数,则可使用下列近似公式:

$$\omega_R = 5 + 17 \exp \{ -[\ln(2E)]^2 / 6 \}$$

式中: E 为中子的能量(以 MeV 为单位)。

对于未包括在表 1.1 中的辐射类型和能量,可以取 ω_R 等于 ICRU 球中 10mm 深处的 \bar{Q} 值,并可由下式求得:

$$\bar{Q} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} Q(L) D_L dL$$

式中: D 为吸收剂量; D_L 为 D 随 L 的分布; $Q(L)$ 为 ICRP-60 号出版物中规定的水中非定限传能线密度为 L 时的辐射品质因数。

$Q-L$ 关系式如表 1.2 所示:

表 1.2 $Q-L$ 关系式

水中的非定限传能线密度 L	$Q(L)$
≤ 10	1
10~100	0.32L-2.2
≥ 100	300/ \sqrt{L}

注: L 的单位是 keV/ μm 。

(2) 由 ICRP 第 103 号报告书(ICRP 103, 2008) 给出的不同辐射类型的辐射权重因数 ω_R 如表 1.3 所示,中子的辐射权重因数 ω_R 与中子能量的关系见表 1.3 和图 1.2。

表 1.3 不同辐射类型的辐射权重因数

辐射类型	辐射权重因数
光子	1
电子和 μ 介子	1
质子和带电 π 介子	2
α 粒子, 裂变碎片, 重核	20

中子 公式:

$$\omega_R = \begin{cases} 2.5 + 18.2 \exp \{ -[\ln(E_n)]^2 / 6 \}, & E_n < 1 \text{ MeV} \\ 5.0 + 17.0 \exp \{ -[\ln(2E_n)]^2 / 6 \}, & 1 \text{ MeV} \leq E_n \leq 50 \text{ MeV} \\ 2.5 + 3.25 \exp \{ -[\ln(0.04E_n)]^2 / 6 \}, & E_n > 50 \text{ MeV} \end{cases}$$

或图 1.2

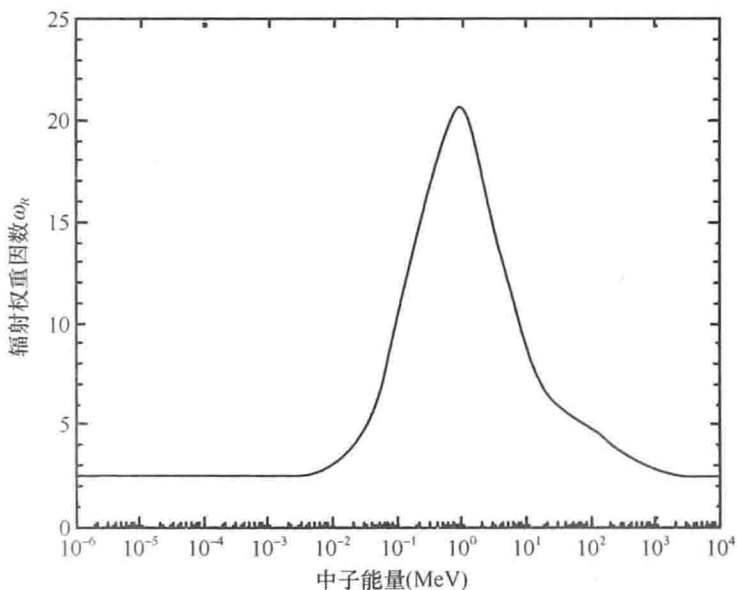


图 1.2 中子的辐射权重因数 ω_R 与中子能量的关系

· 有效剂量 (effective dose, GB18871-2002)

有效剂量 E 被定义为人体各组织或器官的当量剂量乘以相应的组织权重因数后的和, 即

$$E = \sum_T \omega_T \cdot H_T$$

式中: H_T 为组织或器官 T 所受当量剂量; ω_T 为组织或器官 T 的组织权重因数。

由当量剂量的定义, 可以得到

$$E = \sum_T \omega_T \cdot \sum_R \omega_R \cdot D_{T,R}$$

式中: ω_R 为辐射 R 的辐射权重因数; $D_{T,R}$ 为组织或器官 T 内的平均吸收剂量。有效剂量的单位是 J/kg, 称为希[沃特](Sv)。

有效剂量用作防护量, 主要用途是对辐射防护设计和运行管理中的预期剂量进行评价, 衡量是否满足剂量限值和优化的监管要求。有效剂量不推荐用于流行病学评价, 也不应用于辐射风险的回顾性调查。

· 组织权重因数 (tissue weighting factor)

(1) 由国家标准 (GB18871-2002) 给出的组织权重因数: 为

辐射防护的目的,组织或器官的当量剂量所乘以的因数(表 1.4),乘以该因数是为了考虑不同组织或器官对发生辐射随机性效应的不同敏感性。

(2) 由 ICRP 第 103 号报告书(ICRP103,2008)给出的组织权重因数见表 1.5。

表 1.4 组织或器官的组织权重因数 ω_T

组织或器官	组织权重因数 ω_T	组织或器官	组织权重因数 ω_T
性腺	0.20	肝	0.05
(红)骨髓	0.12	食道	0.05
结肠 ^a	0.12	甲状腺	0.05
肺	0.12	皮肤	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
膀胱	0.05	其余组织或器官 ^b	0.05
乳腺	0.05		

a. 结肠的权重因数适用于在大肠上部和下部肠壁中当量剂量的质量平均。

b. 进行计算时用,表中其余组织或器官包括肾上腺、脑、外胸区域、小肠、肾、肌肉、胰、脾、胸腺和子宫。在上述其余组织或器官中有一个组织或器官受到超过 12 个规定了权重因数的器官的最高当量剂量的例外情况下,该组织或器官应取权重因数 0.025,而余下的上列其余组织或器官所受的平均当量剂量亦应取权重因数 0.025。

表 1.5 ICRP103 给出的组织权重因数 ω_T

组织或器官	ω_T	$\Sigma \omega_T$
(红)骨髓、结肠、肺、胃、乳腺	0.12	0.72
其余组织 ^a		
性腺	0.08	0.08
膀胱、食管、肝、甲状腺	0.04	0.16
骨表面、脑、唾液腺、皮肤	0.01	0.04

a. 其余组织:肾上腺、外胸(ET)区、胆囊、心脏、肾、淋巴结、肌肉、口腔黏膜、胰腺、前列腺(δ)、小肠、脾、胸腺、子宫/子宫颈(η)。对其余组织的 ω_T (0.12)是应用于上述 14 个组织和器官的算术平均剂量。

· 集体剂量 (collective dose, GB18871-2002)

集体剂量是群体所受总辐射剂量的一种表示,定义为在某一时段内受某一辐射源照射的群体的成员数与他们所受的平均辐射剂量的乘积。集体剂量用人·希[沃特](人·Sv)表示。集体剂量包括与组织或器官剂量相关的集体当量剂量 S_T , 以及集体有效剂量 S 。

由处在 E_1 和 E_2 之间的个人有效剂量所相应的集体有效剂量定义如下:

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \frac{dN}{dE} dE$$

式中: $\frac{dN}{dE} dE$ 为所受有效剂量处在 E 和 $E+dE$ 之间的人员数目;

ΔT 为对其间的有效剂量求和的时间段。

集体剂量只能作为辐射防护优化、不同辐射防护方法之间进行比较的工具,不能用于流行病学危险评价中的危险评估,特别不能作为受到低剂量照射人群的癌症死亡率估计。

· 待积剂量 (committed dose, GB18871-2002)

待积剂量是待积吸收剂量、待积有效剂量和(或)待积当量剂量的简称。

· 待积吸收剂量 (committed absorbed dose, GB18871-2002)

待积吸收剂量 $D(\tau)$ 定义为

$$D(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{D}(t) dt$$

式中: t_0 为摄入放射性物质的时刻; $\dot{D}(t)$ 为 t 时刻的吸收剂量率; τ 为摄入放射性物质之后经过的时间。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入要算至 70 岁。

· 待积当量剂量 (committed equivalent dose, GB18871-2002)

待积当量剂量 $H_T(\tau)$ 定义为

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T(t) dt$$

式中: t_0 为摄入放射性物质的时刻; $\dot{H}_T(t)$ 为 t 时刻器官或组织 T 的当量剂量率; τ 为摄入放射性物质之后经过的时间。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入要算至 70 岁。

· 待积有效剂量(committed effective dose, GB18871-2002)

待积有效剂量 $E(\tau)$ 定义为

$$E(\tau) = \sum_T \omega_T \cdot H_T(\tau)$$

式中: $H_T(\tau)$ 为积分至 τ 时间时组织 T 的待积当量剂量; ω_T 为组织 T 的组织权重因数。

未对 τ 加以规定时,对成年人 τ 取 50 年;对儿童的摄入则要算至 70 岁。

· 器官剂量(organ dose, GB18871-2002)

人体某一特定组织或器官 T 内的平均剂量 D_T , 由下式给出:

$$D_T = (1/m_T) \int_{m_T} D dm$$

式中: m_T 为器官或组织 T 的质量; D 为质量元 dm 内的吸收剂量。

· 剂量当量(dose equivalent, GB18871-2002)

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)所使用的一个量,用以定义实用量:周围剂量当量、定向剂量当量和个人剂量当量。组织中某点处的剂量当量 H 是 D 、 Q 和 N 的乘积,即

$$H = DQN$$

式中: D 为该点处的吸收剂量; Q 为辐射的品质因数; N 为其他修正因数的乘积。

1.3 运行实用量

1.3.1 区域监测运行实用量(GB18871-2002)

· 周围剂量当量(ambient dose equivalent)

辐射场中某点处的周围剂量当量 $H(d)$ 定义为相应的扩展齐向场在 ICRU 球内逆齐向场的半径上深度 d 处所产生的剂量当量。对于强贯穿辐射,推荐 $d = 10\text{mm}$ 。

· 定向剂量当量(directional dose equivalent)

辐射场中某点处的定向剂量当量 $H'(d, \Omega)$ 是相应的扩展

场在 ICRU 球体内、沿指定方向 Ω 的半径上深度 d 处产生的剂量当量。对弱贯穿辐射,推荐 $d=0.07\text{mm}$ 。

1.3.2 个人监测运行实用量(ICRP74,1997)

· 个人剂量当量(personal dose equivalent)

人体某一指定点下面适当深度 d 处的软组织内的剂量当量 $H_p(d)$,这一剂量当量既适用于强贯穿辐射,也适用于弱贯穿辐射。对强贯穿辐射,推荐深度 $d=10\text{mm}$;对弱贯穿辐射,推荐深度 $d=0.07\text{mm}$ 。

1.3.3 有关氡或钍射气的量

· 氡或钍射气的照射量(GB18871-2002)

氡或钍射气的照射量(E_{Rn} 或 E_{Tn})定义为氡或钍射气的活度浓度与照射时间的乘积,即

$$E_{Rn}(\text{或 } E_{Tn}) = \bar{C}_{Rn}(\text{或 } \bar{C}_{Tn}) \cdot T$$

式中: E_{Rn} (或 E_{Tn})为氡(或钍射气)照射量,单位 $\text{Bq} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; \bar{C}_{Rn} (或 \bar{C}_{Tn})为受照期间空气中氡(或钍射气)的平均活度浓度,单位 Bq/m^3 ; T 为受照时间,单位 h ,按国家标准(GB18871-2002)的推荐,全年受照时间,对工作场所 $T=2000\text{h}$;居室 $T=7000\text{h}$ 。

· 氡或钍射气子体的 α 潜能浓度 C_p 及其照射量 E_p (潘自强,2007)

(1) α 潜能浓度:用于描述氡(或钍射气)的危害大小, α 潜能浓度 C_p 等于单位体积空气中存在的短寿命氡(或钍射气)子体的全部子体原子在衰变到 ^{210}Pb (RaD)(对钍射气是 ^{208}Pb)的过程中所发射出的总 α 粒子能量,即单位体积空气中短寿命氡(或钍射气)子体的 α 潜能总和,因此有

$$C_p = \sum_i C_i \cdot \varepsilon_{p_i} / \lambda_i$$

式中: C_i 为第 i 种原子在空气中的放射性活度浓度,单位 Bq/m^3 ; i 为 a, b, \dots ; $\varepsilon_{p_i} / \lambda_i$ 为第 i 种原子每贝可勒尔放射性的 α 潜能,单位 J 。

计算氡子体的 α 潜能浓度 C_p 时,由于 ^{214}Po 寿命太短,可忽略,只需考虑 ^{218}Po 、 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 三项即可,即