

中子辐射的防护

内容简介

本书是美国国家辐射防护与测量审议会1971年出版的报告。内容包括：中子防护原理，中子源安装和操作时的辐射防护，中子辐射防护规则以及几个有关的附录。本书可供从事中子辐射防护方面的研究和设计工作者以及实际应用中子辐射源的工作人员和防护人员参考。

NCRP Report No.38

Protection Against Neutron Radiation

National Council on Radiation Protection and Measurements

4201 Connecticut Avenue, N.W./Washington, D.C. 20008

中子辐射的防护

(NCRP 38号报告)

冷瑞平 谢建伦 译

李树德 陈常茂 校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国路58号)

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 $5^{1/4}$ ·字数110千字

1981年12月第一版·1981年12月第一次印刷

印数：1—1,700·统一书号：15175·310

定价：0.67元

前 言

美国国家辐射防护与测量审议会 (NCRP) 在1957年发表了一篇名为《30兆电子伏以下中子辐射的防护》的报告, 即 NCRP20 号报告, 美国国家标准局 (NBS) 把它作为第 36号手册出版了。在制定那些建议之后, 近几年来又有一些发展, 从而需要发表一篇新的报告。本报告中所作改动, 多数是由于国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 制定了若干有关的量和单位, 并且 NCRP 和国际放射防护委员会 (ICRP) 所建议的最大容许剂量当量也已经有了修改。

这份报告是本委员会所属关于重粒子 (中子、质子和重粒子) 专业的第四科学分委员会编写的。在编写本报告期间, 参加分委员会工作的有:

主席 H. H. Rossi

委 员

顾 问

R. S. CASWELL

R. G. ALSMILLER, Jr.

L. D. MARINELLI

L. L. ANDERSON

F. P. COWAN

F. H. CLARK

W. S. SNYDER

W. W. HAVENS

C. A. TOBIAS

F. C. MAIENSCHEIN

本委员会对该分委员会的委员和顾问们花费时间, 致力此报告的准备表示感谢。

美国国家辐射防护与
测 量 审 议 会

主席 L. S. TAYLOR

目 录

前言

I. 绪论	(1)
1. 范围	(1)
2. 中子防护的一般原则	(2)
II. 中子防护要旨	(4)
3. 中子的分类及其与物质相互作用的主要形式	(4)
4. 辐射量	(6)
5. 辐射的线质	(7)
6. 中子与组织的相互作用	(8)
7. 最大容许剂量当量	(13)
8. 操作中子源时引起的 γ 和X射线危害	(19)
9. 中子辐射的测量	(20)
III. 安装和操作中子源时的辐射防护	(26)
10. 中子源的类型	(26)
11. 屏蔽	(29)
12. 标志和警戒设施	(30)
13. 显著超量照射情况的处置	(31)
IV. 中子辐射防护规则	(35)
14. 规则的范围	(35)
15. 有关最大容许剂量当量的规则	(35)
16. 辐射防护工作人员	(36)
17. 放射性源	(37)
18. 加速器	(38)
19. 反应堆	(39)
20. 加速器和反应堆上的监测	(40)

21. 保健.....	(40)
22. 超量照射.....	(41)
附录A 定义.....	(42)
附录B 深部剂量.....	(47)
附录C 产生中子所用的反应.....	(106)
附录D 中子俘获而产生的 γ 射线.....	(109)
附录E 屏蔽数据.....	(111)
附录F 事故剂量测量.....	(138)
参考文献.....	(148)

I. 绪 论

1. 范围

美国国家辐射防护与测量审议会 (NCRP) 的前身, 美国国家辐射防护与测量委员会于1957年发表了 NCRP 20 号报告, 名为《30兆电子伏以下中子辐射的防护》(NCRP, 1957b)。在草拟那篇报告之后, 近几年来又有了一些发展, 从而有必要发表一份新的报告。在这期间, 业已计算了能量在400兆电子伏以下中子深部剂量的分布, 而且获得了新的屏蔽计算资料。在1961年发表 NCRP 25 号报告《中子和中子与 γ 射线混合场吸收剂量的测量》以后, 在中子和混合辐射剂量学方面没有很大发展, 但出现了一些有实用意义的改进, 特别是在直接给出剂量当量估算值的仪器方面。

本报告与 NCRP 20号报告的不同之处, 除了不再明确规定能量上限以外, 还有以下几点: (1) 本报告根据有限圆柱模型而不是无限大平板模型中的吸收剂量分布, 列出了能量直至14兆电子伏的中子的注量容许值; (2) 给出了能量从0.5—400兆电子伏范围内平板模型的相应数据; (3) 给出了更具体的屏蔽数据。本报告删去了中子生物效应的讨论, 因为现在能在其它文献中获得有关这个问题的基础资料。此外根据各种来源的新资料, 还作了相当数量的较小的改动。

本报告与早期报告(NCRP 20号报告)一样, 主要是对常规操作的各种中子源所作的考虑。虽然本报告中有关常规和

事故剂量的讨论对反应堆和其它临界装置也能适用，但未涉及它们的设计和操作系统。

2. 中子防护的一般原则

2.1 在防护上不仅要考虑辐射的量，而且要考虑其性质的各种辐射之中，中子是最重要的一种。对于通常应用的能量范围内的 X射线和 γ 射线，相同的剂量基本上产生相同的生物效应。然而，中子的生物效应不仅一般都比较高，并与中子能量的关系很密切。

2.2 可以假定辐射生物效应的差别与给出吸收剂量的带电粒子的传能线密度 (LET) 的差别有关。所以，人员的辐射照射限量用剂量当量 (DE) 来描述。剂量当量的定义是吸收剂量 (D) 与线质因数 (QF) 的乘积^①。后一因数 QF 是 LET 的函数 (NCRP, 1954; ICRP/ICRU, 1963)。X射线和 γ 射线的线质因数等于 1。在所有比电离密度较大的致电离粒子的实际情况下，剂量是在全部 LET (L) 值的范围内给出的，此时剂量当量由下式给出：

$$DE = \int_{L_{min}}^{L_{max}} D(L) QF(L) dL \quad (1)$$

①以 QF 代替 RBE，剂量当量代替 RBE 剂量。之所以建议作这些改变，是因为在放射生学中所应用的 RBE 表示一个可量度的比值，它仅在十分确定的一组条件中使用；而现在所称的 QF 是一个因数，应用于辐射防护中吸收剂量小于 10 拉德数量级的情况。这些名词以及本报告使用的其它名词的定义在附录 A 中叙述。

式中， $D(L)$ 是吸收剂量按 $LET(L)$ 的分布， $QF(L)$ 是对应于 L 的线质因数。

2.3 原则上讲，在未知辐射场中进行防护测量，需要确定 $D(L)$ （Rossi 等，1962）。实验上可以测定这个函数，但由于它的复杂性，故不经常采用。通常的做法是：区别不同辐射所给出的剂量，并针对每种剂量保守地选用一个线质因数值。

2.4 实际上，在所有防护监测中将会发现，中子总是伴有 γ 辐射的。对于中子能量至少低于15兆电子伏的混合场来说，可以分别确定由 γ 射线造成的吸收剂量和由中子造成的吸收剂量，然后前者乘以1，后者乘以10，最后把这些乘积相加，就得到一个保守的剂量当量估算值。

2.5 一个更简单的方法是确定总吸收剂量，并把线质因数取为10，这样做的结果是保守地估计了剂量当量，而忽略了中子剂量与 γ 剂量的比值。

II. 中子防护要旨

3. 中子的分类及其与物质相互作用的主要形式

3.1 由核反应堆和加速器之类的各种装置产生的中子，其能量范围（每个粒子）约在 10^{-4} — 10^{10} 电子伏；而在宇宙辐射中所发现的中子的能量则更高。中子与物质相互作用的类型明显地随中子能量而变化。根据以某种相互作用为主的不同能量范围对中子进行大致的分类是方便的。能区的过渡不是截然分明的，因而在划定界限时留有相当大的自由选择的余地。

3.2 热中子是与介质达到近似热平衡的中子。虽然表示热中子速度分布的特征温度通常可能高于介质的温度，但热中子的速度分布仍有近似的麦克斯韦分布。可通过专门设备在核反应堆中得到“冷”中子，其麦克斯韦分布的特征温度可以低于室温，然而某些反应堆所产生的热中子的特征温度明显地高于室温。在摄氏20.44度时，热中子分布的最可几速度为2200米/秒，与此速度相应的能量为0.0253电子伏。在许多情况下，把热中子视为具有能量为0.0253电子伏的单能中子是足够精确的。一般说来，热中子的能量大约在1电子伏以下，这个界限是由所考虑的温度决定的。可以选取这样的能量，即大约为0.5电子伏的“镅截止能”

（因为在热中子测量中经常用“镅差法”），在这能量以上，处于麦克斯韦分布中的中子相对数目变得很小。在定量测量热中子时，必须弄清所测量的量的定义。为此，请读者

参阅第9节。对辐射防护来说，热中子与物质的最主要的相互作用是辐射俘获。在这个过程中，原子核俘获中子，放射 γ 射线。在受热中子辐照的组织中，弹性散射比俘获出现次数更多，但其重要性比较小，因为就其平均来说，无论是中子还是被穿过的介质都不会得到或损失能量。偶尔还可能发生一些诸如 (n, p) 或 (n, α) 或裂变反应。在组织中， ^{14}N (n, p) ^{14}C 反应是重要的。

3.3 在中能中子的能量范围内，中子作用截面出现尖峰（即共振）。典型的是由几电子伏能区延至几十千电子伏。中能中子通量从快中子弹性碰撞所致的慢化来获得。这种慢化过程是中能中子与物质之间最主要的相互作用形式，其特征是导致中子通量密度与能量成反比——“ dE/E 谱”。在此过程中，也会发生俘获和核反应。在这个能量范围内，中子截面的共振，虽对很多物质来说是很重要的，但对组织相对地来说并不重要。

3.4 快中子是能量比中能中子高的中子。能量在约为10兆电子伏数量级以下时，与物质发生的最重要的相互作用是弹性散射。能量的数量级为1兆电子伏时，非弹性散射就值得重视了。中子能量为几兆电子伏时，核反应变得重要了。中子能量超过10兆电子伏时，在组织中的非弹性散射和核反应（经常发射几个粒子）与弹性散射发生的几率可以相比。

3.5 中子与物质之间的任何一种形式的相互作用的几率都定量的用截面来描述。假设中子的直径为 0 ，则截面 σ 可以看作原子核的有效靶面积。对单位体积内包含 n 个中子，并以速度 v 向 N 个原子核运动的一束中子而言，单位时间内

的相互作用数目就等于 $nvN\sigma$ 。量 nv 是中子通量密度。截面通常以靶恩为单位(10^{-24} 厘米²)。

3.6 每种可能的核相互作用都可用截面表征。另外, 散射过程的截面, 可进一步分为微分截面, 它表示在特定方向或进入特定能量范围的散射几率。中子相互作用的数量, 由所有可能发生的过程, 即中子总截面 σ_t 确定。

4. 辐射量

4.1 授予组织的能量, 是在辐照与生物效应之间建立定量关系的一个基本的物理学依据。致电离辐射授予单位质量物质的能量是吸收剂量。它的专用单位是拉德。任一器官的剂量当量等于该器官接受的吸收剂量与所采用的 $\overline{QF}$ 的乘积。

4.2 虽然比释功能(Kerma)通常近似等于吸收剂量, 但它是截然不同的另一个概念。两者的区别可通过垂直入射于一个均匀的组织平板的中子束来说明。组织比释动能是中子辐射把动能传递给次级带电粒子(如质子, 反冲碳核)的能力的量度, 一般说来, 由于初始中子辐射随进入板的深度的增大而减弱, 比释动能也随之而减小。另一方面, 吸收剂量是各种反冲核授予物质的能量的量度, 由于中子产生的反冲核总数的累积, 吸收剂量先随深度的增大而增加, 通过一个最大值以后, 便随着初始中子辐射的减弱而减小。在平板的深度超过过渡区(即超过吸收剂量最大值)的那些区域内, 因为反冲核的射程比初始辐射发生显著减弱的距离要小, 所以组织比释动能与吸收剂量在数值上几乎一样。

4.3 如果利用其它的量(如通量密度)来表述辐射量, 就必须提供一些辅助资料, 才能推算吸收剂量。可是,

几乎总是要进行一些推导，因为测量一个人的某一器官或人体模型中相应部位所接受的剂量通常是不切实际的。一般采用其它方法来代替，即在“自由空间”内进行测量。可利用壁厚恰好满足建立辐射平衡条件的组织等效电离室或正比计数器等仪器来进行这种测量。在这些条件下估算的量与自由空间内组织比释动能相近，或与探测器敏感部分的组织等效物质的吸收剂量相近。另一类不同的测定方法，是以测量自由空间中的中子注量为基础。无论在哪种情况下，估算人体深部所研究的那个位置上接受的剂量时，需要考虑中子能量分布、吸收、散射以及质能转移系数等因素。在本报告适当的章节中将给出有关这些因素的资料。但是，包含有许多物理系数的方法，经常引起剂量当量的相当大的不确定性。因此，采用尽可能少的换算系数进行估算可能更精确些。

5. 辐射的线质

5.1 公式(1) (见2.2节) 中给出的剂量当量的定义，可以作为按下式进一步定义平均线质因数 $\overline{QF}$ 的基础。

$$\overline{QF} = \frac{DE}{D} = \frac{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} D(L) QF(L) dL}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} D(L) dL} \quad (2)$$

$\overline{QF}$ 是一个总括的系数，吸收剂量与它的乘积即是剂量当量。表2 (第7.4节) 给出了不同能量中子的 $\overline{QF}$ 值。可以看出，在表中所给出的全部能量范围内，除在1.0兆电子伏附近有小的偏离外（这是可以忽略的）， $\overline{QF}$ 均不超过10。这样，我们就有理由采取一个保守的方法来计算剂量当量，即将中子吸收剂量乘以10。

5.2 后面(附录B.I)将提到，中子能量在14兆电子伏

以下， $\overline{QF}$ 也是中子在组织中贯穿深度的函数。但是，较深处的数值实际上绝不会超过表面的数值。

5.3 可以根据估定的吸收剂量值（如4.3节所述），并选择一个合适的 $\overline{QF}$ 值来计算剂量当量（DE）。 $\overline{QF}$ 可根据第2.3节，2.4节和2.5节中列举的任何一种方法选定。

另一种方法是采用一些装置，当以标准方式照射典型尺寸的人体模型时，装置的响应正比于模型中某位置的DE计算值。通常，感兴趣的位置，是当一宽束中子垂直照射30厘米厚的组织等效板时出现最大剂量当量的那一点，但是，下面所列举的某些计算是以圆柱模型为基础的（Anderson和Braun, 1964；Dennis和Loosemore, 1960；Hankins, 1963；Leake, 1967）。假如仪器读数和剂量当量之间的正比关系基本上与所测范围内的中子能量无关，尽管几何尺寸和别的因素限制了它们的精确性，这些仪器还是有用的。由于仪器的方向性将增加误差，所以通常把上述仪器设计成各向同性响应的。这样一来，不管是均匀照射还是单侧照射，仪器的读数均相同。然而，处在探测器位置上的人员在两种情况下受到的剂量当量可能完全不同。因此，仪器的读数充其量是所期望的最大剂量当量的上限。

6. 中子与组织的相互作用

6.1 中子与组织中存在的元素之间的相互作用可能有多种。不同类型组织的主要成分列于表1（Tipton等，1969）。“骨骼”包括骨头、骨髓和其它在新解剖的骨骼中存在的有机成分。“骨头”一词系指矿化骨。

下面概述中子与组织元素之间的相互作用的基本物理特性。在附录B中给出了详细的资料。

表1 人体组织的原子组分

	整个人体		脂肪组织		肌		骨 ^①		骨 ^②	
	重量%	原子数/克	重量%	原子数/克	重量%	原子数/克	重量%	原子数/克	重量%	原子数/克
O	61	2.29×10^{22}	23	8.66×10^{21}	75	2.82×10^{22}	43	1.62×10^{22}	49	1.84×10^{22}
C	23	1.15×10^{22}	64	3.21×10^{22}	11	5.52×10^{21}	16	8.02×10^{21}	23	1.15×10^{22}
H	10	6.02×10^{22}	12	7.23×10^{22}	10	6.02×10^{22}	4.1	2.47×10^{22}	7.1	4.27×10^{22}
N	2.6	1.12×10^{21}	0.80	3.44×10^{20}	2.6	1.12×10^{21}	4.3	1.85×10^{21}	3.9	1.68×10^{21}
Ca	1.4	2.11×10^{20}	0.0022	3.31×10^{17}	0.0031	4.66×10^{17}	21	3.16×10^{21}	10	1.50×10^{21}
P	1.0	1.94×10^{20}	0.016	3.10×10^{18}	0.18	3.50×10^{19}	10	1.94×10^{21}	7.0	1.63×10^{21}
S	0.20	3.76×10^{19}	0.073	1.37×10^{19}	0.23	4.32×10^{19}	0.31	5.82×10^{19}	0.17	3.19×10^{19}
K	0.20	3.08×10^{19}	0.032	4.87×10^{18}	0.30	4.62×10^{19}			0.15	2.29×10^{19}
Na	0.14	3.67×10^{19}	0.050	1.31×10^{19}	0.075	1.96×10^{19}	0.62	1.60×10^{20}	0.32	8.38×10^{19}
Cl	0.12	2.04×10^{19}	0.12	2.04×10^{19}	0.078	1.33×10^{18}			0.14	2.37×10^{19}
Mg	0.027	6.69×10^{18}	0.0020	4.95×10^{17}	0.019	4.68×10^{18}	0.22	5.45×10^{19}	0.12	2.97×10^{19}
总计	99.687		99.92		99.48		99.55		100.9	

① 矿化骨。
② 包括骨头、骨髓和其它在新解剖的完整骨骼中存在的有机成分。

6.1.1 弹性碰撞 它是这样一种相互作用，即可以认为中子和原子核本身均保持不变并且是动能守恒的相互作用。如果用 θ 表示质心坐标系中的中子散射角，中子能量损失便由下式给出：

$$\Delta E_n = 2MmE_0(1 - \cos\theta)/(M + m)^2$$

式中， E_0 是碰撞前中子的能量， M 和 m 分别为被碰原子核和中子的质量。假如在实验室坐标系中，反冲核运动的方向与中子入射速度向量之间的夹角为 $\psi = (\pi - \theta)/2$ ，那么上式可改写为：

$$\Delta E_n = \frac{4MmE_0}{(M + m)^2} \cos^2\psi$$

对构成组织的大多数元素来说，中子与它们的弹性散射截面是已知的。当能量低于10兆电子伏时，在质心坐标系中，中子与氢的弹性散射接近各向同性。但是，中子与其它元素在大部分能区的弹性散射却是各向异性的。尽管如此，在中子能量不超过14兆电子伏时，就人体模型中的剂量而言，根据弹性散射是各向同性的假定而作的计算，与那些用各向异性的假定计算的结果并没有明显的差别。这并不使人感到意外，因为人体组织中氢原子所占的份额很大，因而能量低于14兆电子伏时，90%以上的剂量是中子与氢的弹性散射或俘获过程引起的，后一种过程仍可假定是各向同性的。

6.1.2 非弹性散射 非弹性散射一词在此处专指可认为是中子经历短暂的俘获和再发射这样一种相互作用。被碰核处于激发态，通常在几分之一秒之内发射一个或更多个（经常是高能量的）光子。如果中子能量不超过能保持能量守恒和动量守恒所需要的某个阈值，就不可能发生这类相互作用。

用。下式给出阈能 $E_{\text{阈}}$ ：

$$E_{\text{阈}} = E_{\gamma} \frac{M+m}{M}$$

式中， E_{γ} 是 γ 光子的能量。

6.1.3 俘获过程 此处把它定义为这样一些过程，在这些过程中，原子核吸收一个低能中子，并发射一个光子。在许多情况下，这类俘获过程的截面与 v 成反比（此处 v 为中子速度）。 $^1\text{H}(n, \gamma)^2\text{H}$ 反应是组织中最重要 的反应，它产生一个2.2兆电子伏的光子。对低能中子来说，这种相互作用在整个人体中贡献出很大部分的剂量，而在能量直到2.5兆电子伏的范围内，人体内深层组织的剂量主要来自这种相互作用，因为光子在同电子发生相互作用之前，能够穿过相当大的距离。

6.1.4 低能中子（<20兆电子伏）的核相互作用 此处所用的这一术语只限于那些放出质子或其它重粒子的反应。对热中子来说，组织中的 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 反应特别重要。此反应产生一个0.58兆电子伏的质子。在由较高能量的中子引起的相互作用中，反应产物可能有各种不同的能量，它由所涉及的能级和发射角决定。在很多情况下，在精确地确定反应产物的平均能量方面，我们还没有掌握足够准确的数据。

6.1.5 高能中子（>20兆电子伏）的核反应 高能中子核反应，从性质上来讲，与低能中子核反应没有什么不同。然而，定量说来，每次反应所放出的粒子数目随中子能量的增加而增加，因此在高能中子剂量学中，核反应是很重要的。有关高能反应放出的粒子的能量和角分布的实验数据

很有限，一般说来，为剂量计算所需的详细资料，必须从理论方面的考虑来获取。

对能量在50—100兆电子伏之间的中子来说，可以把它们的核反应看成是由三个阶段组成的。第一阶段，在原子核内产生级联过程。入射的高能中子与原子核中的单个核子相互作用，这种相互作用所产生的散射的和反冲的核子继续穿过原子核。每一个这种核子依次可以与原子核中的其它核子相互作用，这样就产生了级联过程。某些级联粒子有足够高的能量，它们可以从核中逃脱，而另一些粒子的能量低，并不能逃脱。在快速粒子逃脱之后，可以假设低速粒子的能量分布于核中的所有剩余核子之间并使剩余核处于激发态。核反应的第二阶段，便是这个剩余核蒸发出粒子。在这种蒸发过程中，发射重核，如 α 粒子（因为它的LET高，所以是重要的）和核子。最后，在核反应的第三阶段，粒子的发射在能量上不能再成为可能之后，剩余的激发能以 γ 射线的形式放出。

在能量低于50兆电子伏的范围内，对核反应的这种三个阶段描述是不合适的。作为一个代替的方式，有时假设仅后两个阶段起着作用，也就是在粒子开始发射之前，入射中子的能量在原子核中的所有核子之间分配，然后，全部发射出来的粒子起源于受激核的蒸发。对能量接近50兆电子伏的中子来说，两种描述都不完全合适，哪种更准确一些也不清楚（见附录B. II）

6.2 关于第6.1节所讨论的相互作用形式已经有充分的数据，可用来计算很宽能量范围的中子在自由空间中的组织比释动能以及在组织等效模型中吸收剂量和剂量当量的深度