

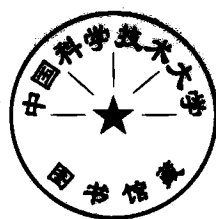
核装置辐射屏蔽建筑材料

上海科学技术出版社

核装置輻射屏蔽建筑材料

〔苏联〕A. H. 科馬罗夫斯基 著

刘俊卿 译 胡丕显 校



上海科学技术出版社

內 容 提 要

本书根据世界各国有关文献資料,系統地闡述了核裝置(反应堆与加速器)的輻射屏蔽建筑材料,包括原子能技术中采用的各种輻射屏蔽混凝土的屏蔽性能、机械性能、成分和特种重混凝土的攪拌、澆灌及搗固方法,以及各种屏蔽层混凝土的經濟比較。此外,也敘述了磚和陶瓷、聚乙烯、鉛、鉄等材料和含硼材料的屏蔽性能、机械性能以及它們的施工和安装方法。

本书可供核裝置設計人員、施工人員、屏蔽材料研究人員以及有关专业的师生参考。

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ИЗЛУЧЕНИЙ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И УСКОРИТЕЛЕЙ

А. Н. Комаровский

Госэнергоиздат, 1961

核裝置輻射屏蔽建筑材料

刘俊卿 譯 胡丕显 校

上海科学技术出版社出版 (上海瑞金二路 450 号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海洪兴印刷厂印刷 新华书店上海发行所发行

开本 850×1156 1/32 印張 6 6/32 排版字数 156,000

1965 年 9 月第 1 版 1965 年 9 月第 1 次印刷

印数 1—1,000

統一書号 15119·1820 定价(科六) 0.90 元

出版者說明

本书最初于 1958 年由苏联原子能出版社出版，书名为“核反应堆与加速器辐射屏蔽建筑材料”(Строительные Материалы Для Защиты От Излучений Ядерных Реакторов и Ускорителей)。以后原作者又作了一些增删，并与过去已出版的他所編写的另两本书“核反应堆建筑結構”(Строительные Конструкции Ядерных Реакторов)、“核反应堆防护外壳”(Защитные Оболочки Ядерных Реакторов) 合并为一册，重新定名为“核装置建造”(Строительство Ядерных Установок)，于 1961 年由苏联动力出版社出版。

本书为“核装置建造”的第一部分全部和第四部分第一章及第四部分的附录 1 和 2 的譯文。

目 录

第一章 一般問題	1
1.1 核裝置輻射的特點	1
1.2 放射性輻射的測量單位和材料的屏蔽性能	3
1.3 物質的物理性能與屏蔽性能之間的關係	5
1.4 放射性輻射的生物作用	9
1.5 對輻射屏蔽層材料的一般要求	12
第二章 生物屏蔽層用混凝土的性能	16
2.1 普通混凝土	16
2.2 褐鐵礦石和水化針鐵礦石特種水化物混凝土(含水量高的)	23
2.3 磁鐵礦石和赤鐵礦石特種重混凝土	33
2.4 重晶石礦石特種重混凝土	45
2.5 鐵集料與混合鐵礦石集料特種重混凝土	51
2.6 含硼摻合料的特種混凝土	69
2.7 含水量高的混凝土材料	73
2.8 含水量對混凝土屏蔽性能的影響	80
2.9 加熱對混凝土和砂漿中結晶水含量的影響	86
2.10 高溫對生物屏蔽層混凝土強度的影響	92
2.11 輻射對屏蔽材料的影響	106
第三章 輻射屏蔽層用混凝土成分的設計	109
3.1 總則	109
3.2 集料粒度級配	110
3.3 特種混凝土拌合料的可塑性和拌和用水量	113
3.4 集料的重量與體積	120
3.5 對已選定混凝土的大致強度驗算	126

第四章 采用特种重混凝土和水化物混凝土作为核装置辐射屏蔽层的 经济合理性的评价	129
第五章 固定式核装置生物屏蔽层用的其他材料	139
5.1 砖和陶瓷材料、粘土、石膏	139
5.2 干夯矿石	141
5.3 聚乙烯	141
5.4 铅	142
5.5 铁	144
第六章 建造特种重混凝土屏蔽层的施工特点	145
6.1 混凝土拌合料的拌制	145
6.2 混凝土拌合料的运输	148
6.3 混凝土拌合料的浇灌	149
6.4 混凝土屏蔽层中的收缩缝和温度缝	157
6.5 混凝土屏蔽层的模板	158
6.6 屏蔽层混凝土的养护	161
6.7 在冬季条件下混凝土的搅拌和浇灌	162
6.8 采用预应力钢筋混凝土建造的反应堆外壳和屏蔽层的施工 特点	162
6.9 对混凝土规定密度的均匀度的检查	163
附 录	166
参考文献	184

第一章

一般問題

1.1 核裝置輻射的特點

放射性輻射按其特點和性能來說，是多種多樣的。它對各種物質的貫穿本領不同，因此對各種輻射的屏蔽方法也有所差異。

倫琴射線和 γ 射線為高能和高頻電磁波，具有高度的貫穿本領。但是這些射線在通過某種物質時可以被減弱，而且當物質具有一定厚度時，能夠被完全吸收。

中子（不帶有電荷的粒子）具有高度的貫穿本領，而且只有通過與原子核發生碰撞時才能慢化。中子在慢化時，由於被物質的原子核所俘獲而產生新的不穩定性同位素，這些新同位素的衰變引起了所謂俘獲（或次級）的 α 、 β 和 γ 輻射。其中一些同位素的壽命比較長，因此在基本輻射作用停止之後，還必須有長時間的放射性屏蔽。具有較高能量的次級 γ 輻射對設計屏蔽層具有特別重要的意義。例如水放出能量為 2.2 兆電子伏^①的次級 γ 輻射，石墨為 5 兆電子伏，鐵為 7.6 兆電子伏^[1]。這種次級 γ 輻射通常在很大程度上決定着屏蔽層所需的總厚度^[2]。

① 兆電子伏 (MeV) 標為百萬電子伏。一電子伏 (eV) 即帶有電荷等於電子電荷的粒子在電位差為 1 伏時所獲得的能量。

根据能量(或运动速度)的大小,中子可以分为快中子、中能中子和慢中子(或热中子)。

实际上設計中子的屏蔽层时,通常不考虑中能中子。但是在确定因屏蔽层材料俘获中子而产生的次级 γ 辐射强度时,却必須加以考虑。

质子以及 α 和 β 粒子是带电荷的,电荷与屏蔽物质的原子周围的电场发生相互作用,因而使粒子的能量有所降低。质子、 α 和 β 粒子以及裂变碎片甚至在屏蔽物质的厚度不大时也能完全被阻止。因此反应堆的辐射屏蔽层只需按中子辐射和 γ 辐射进行考虑。

核反应堆的放射性辐射和加速器所产生的粒子束的强度非常大。热功率为250兆瓦的核反应堆,其辐射相当于大约1,000吨镭的辐射^[3]。而大部分反应堆的辐射能量为1~5兆电子伏^[4]。要精确地从理論上确定反应堆的辐射能量值是很困难的,因为它决定于反应堆活性区的大小和结构以及核燃料、减速剂和反射层的类型。此外,由反应堆的外壳中取出个别元件(更换损坏部分,以及当反应堆外壳或反射层个别部分的完整性遭到破坏)和发生其他事故时,其辐射就不能为反应堆的外壳、反射层和减速剂的物质所吸收,这时反应堆区域内的辐射强度可能比正常运转状态时大许多倍。因此,当設計辐射屏蔽层时,辐射的强度应由物理学家根据理論計算和实验数据来确定。

加速器中所产生的粒子束的类型和能量比核反应堆的辐射更为确定,并且与加速器的用途(类型)、大小和功率有关。各种不同类型加速器中所产生的粒子束的类型和能量的主要数据载于表1.1内。

在大多数加速器的射线束中,除了主要的基本粒子(质子、中子、电子)以外,还有 γ 射线;而在粒子能量为300兆电子伏的加速器内,当具有高能和高速的质子与物质的原子核(加速器的靶)发生碰撞时,除了上述粒子以外,还产生了特殊的粒子(介子和

表 1.1 各种不同类型加速器的粒子束的性质和能量^[a]

加速器的类型	束中的基本粒子	粒子的能量(兆电子伏)	
		现在加速器达到的	最大可能的
回旋加速器	质子, α 粒子	22	22
稳相加速器(或同步回旋加速器)	质子, 中子, π 介子	62	62
		680	1,000
同步稳相加速器	同上	10,000	—
电子感应加速器	电子	50	300~400
同步加速器	电子	1,000	5,000~10,000
直线加速器	电子	600	—

π 介子)。

当加速器工作时,所有这些辐射通常不仅出现在主束内,而且也出现在靠近加速器的电磁铁和真空室的区域内,所以不仅在引出束的区域内需要装置辐射屏蔽层(这里需要加强屏蔽),而且在加速器的周围也需要装置辐射屏蔽层。一般的屏蔽层除了起生物防护的作用以外,还可以使得所谓“本底”(在靠近加速器的房间内的辐射)减到最小,或者完全消除;否则,由于房间的本底很高,将使一些必要的物理实验难以(或者无法)进行。

1.2 放射性辐射的测量单位和材料的屏蔽性能^①

放射性辐射的能量单位采用电子伏(eV)(1电子伏 = 1.6×10^{-12} 尔格,1千兆电子伏用 GeV 表示)。

γ 辐射的剂量单位采用在标准大气压下温度为 0°C 的一立方厘米干燥空气中形成 2.083×10^9 离子对,并放出能量为 0.11 尔格/厘米³ 或 83 尔格/克的辐射量。这样的 γ 辐射剂量称为伦琴(R)。

中子、质子以及 α 和 β 辐射与 γ 辐射相比,对物质的作用具

^① 本节中列举的某些测量单位,在本书的后面并不提及,但是这些单位在论述有关建造核反应堆和加速器的许多问题的文献中都会遇到,所以作者认为对这些单位加以简单的说明还是有所裨益的。

有另外的特点。这些辐射的单位采用：

(1) 估价物理作用时,采用物理倫琴当量(ϕ_{op}),即放出能量为 83 尔格/克的一定的辐射量;

(2) 估价生物作用时,采用生物倫琴当量(B_{op}),即被組織所吸收,并对人体的生物作用,与 1 物理倫琴当量的 γ 辐射或 β 粒子流的生物作用效应相同的某一类型的辐射量。各种不同类型辐射的生物倫琴当量值均不相同。

最大允許剂量为 100 毫生物倫琴当量/周,取决于不同类型辐射的相对生物效应($OB\Phi$),后者相应于如表 1.2 所示的一定的照射剂量率(以毫拉特/周为单位)。

表 1.2 最大允許剂量率和不同类型电离辐射的相对生物效应

辐 射 类 型	相 对 生 物 效 应	剂量率(毫拉特/周)
γ 和倫琴射线	1	100
β 粒子和电子	1	100
质子和 α 粒子	10	10
多电荷离子和反冲核	20	5
热能中子	3	33
快中子	10	10

中子、质子以及 α 和 β 辐射通常是按辐射的通量强度,即按在 1 秒内通过面积为 1 平方厘米截面的粒子数来测量。

为了表示 γ 辐射的强度,利用鐳克当量的概念(相当于 1 克鐳辐射的 γ 辐射强度)。

当能量大于 3 兆电子伏时, γ 辐射强度的测量单位为尔格·克/秒。

α 和 β 辐射源的放射性强度值,往往采用居里为单位(产生 3.7×10^{10} 衰变/秒的放射性物质的数量)来确定。

在計算放射性辐射屏蔽层的必要厚度时,为了估价各种材料的性能起見,应采用下列概念:

(1) 辐射的半减弱层厚度(为了将辐射强度减弱一半所必需的

屏蔽材料层的厚度)等于

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\mu},$$

式中, μ 为与辐射的种类、性质和能量以及屏蔽材料有关的辐射的总减弱系数;

(2) 辐射的十倍减弱层厚度 (为了将辐射减弱到原强度的 1/10 所必需的屏蔽材料层的厚度。在实际计算中利用此概念比较方便):

$$T_{1/10} = \frac{2.303}{\mu}, \quad \text{即} \quad T_{1/10} = 3.322 T_{1/2} \text{ ①};$$

(3) 弛豫长度: $T_p = \frac{1}{\mu}。$

将此值与辐射的半减弱层和十倍减弱层的厚度相比较时, 可以得出:

$$T_p = 1.443 T_{1/2} = 0.434 T_{1/10};$$

(4) 质量吸收系数 (厘米²/克), 即辐射的总减弱系数与物质密度之比。

为了表明材料密度与生物屏蔽层厚度的关系, 有时也采用吸收密度这一概念, 吸收密度即屏蔽层容重与其厚度的乘积 (克/厘米²)。

吸收密度的倒数, 称为材料的单位吸收率 (厘米²/克)。从单位吸收率和容重的乘积导出单位长度 (通常为 1 厘米) 的辐射减弱系数。

1.3 物质的物理性能与屏蔽性能之间的关系

根据物理计算和实验^[1, 6, 7 和 8]的结果确定, 对于中等原子量的元素来说 (混凝土即属于这一类), 其对 γ 辐射的吸收 (当吸收体的厚度相同时) 近似地与吸收材料的比重或容重成正比, 而与物质

① 在屏蔽加速器的高能粒子时, $T_{1/2}$ 和 $T_{1/10}$ 值可以用来表征材料的屏蔽性能和计算屏蔽层的必要厚度。

的种类无关。換句話說,即在比重和容重相等的情況下,所有的物質對 γ 輻射大約具有同樣的屏蔽性能。因此我們能够足以精確地確定核反應堆 γ 輻射的均勻屏蔽層的必需厚度。當 γ 輻射譜中主要是能量約為1~3兆電子伏的 γ 射綫時(已建成的和正在設計中的大多數反應堆,通常都具有這種射綫),所求出的屏蔽層的厚度最為精確。因此,在上述能量範圍內,質量吸收系數對於鋼以及任何容重的混凝土來說,其數值實際上都是相同的。當輻射譜中具有很大部分低能 γ 輻射時,即使採用較重的材料^[4],也可以減輕屏蔽層的總重。

但是,合理地增加屏蔽材料,特別是混凝土的密度(即比重或容重)是有限度的。其原因是,隨著容重的增大,混凝土能够更好地吸收 γ 輻射,但是阻止中子的效率卻降低了。在一定的容重下,超出 γ 輻射屏蔽範圍以外的中子流的劑量可能是主要的,而繼續增加材料的密度就不合理了。所以實際的極限容重值取決於反應堆的結構以及 γ 輻射和中子流對機體的生物作用。此時應該考慮到,中子對機體的生物作用要比 γ 輻射更為危險。在設計中採用重材料作為反應堆屏蔽層的情況下,可能出現這樣的情形:屏蔽層對減弱 γ 射綫是足夠的(例如,1米厚的鑄鐵層),但是對減弱中子流卻是不夠的。

測定材料屏蔽性能的許多實驗證明,當能量增大時(例如倫琴射綫),在採用不同原子量的材料制成的必要屏蔽層之間,重量和厚度上的差別會大大地縮小。

例如,當倫琴輻射能量為200千伏時,混凝土屏蔽層的重量為鉛屏蔽層重量的11倍,而當輻射能量為800千伏時,只約為1.8倍(圖1.1)。當倫琴輻射能量為1,200千伏和更高時,所需要的鉛或混凝土屏蔽層的重量實際上是相同的。這就證明,對高能輻射採用混凝土屏蔽層是合理的。

這一情況同樣地為測定普通混凝土和重混凝土對加速器高能粒子的屏蔽性能的實驗所証實。

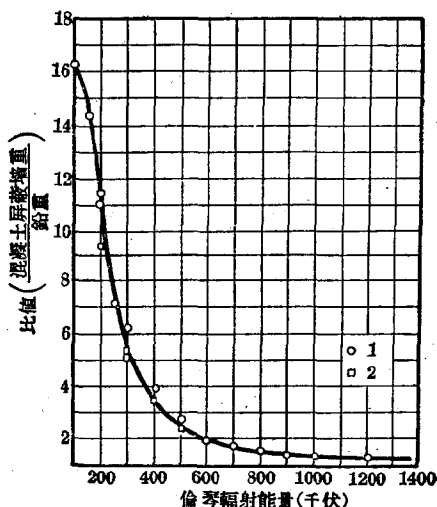


图 1.1 倫琴輻射能量与必要的屏蔽层重量之间的关系

1—混凝土； 2—鉛

中子屏蔽层的效率取决于适当地选择屏蔽材料。

屏蔽层的效率取决于所选用的屏蔽材料的成分。因为快中子流(能量达2兆电子伏)及中能中子流与轻元素的核(特别是氢核)发生弹性碰撞时,会有效地慢化,直至中子被慢化到热能为止,然后很快地被吸收。实际上在所采用的屏蔽材料中,在大多数情况下都有大量的氢包含在作为生物屏蔽层的混凝土的组成部分或者屏蔽层的单独部分的水内。

能量大于2兆电子伏的快中子,在与重元素和中等原子量元素的核,特别是铁、铅、硼(混凝土集料)发生非弹性碰撞时会有效地慢化,直至在氢上的散射值也变成为相当大的能量为止。

关于材料含水量对其屏蔽性能的影响的问题将在下面作详细的说明。

必须指出,穿透混凝土生物屏蔽层的热中子数与穿透的快中子数相比是少得微不足道的。已经确定,穿透屏蔽层的大部分中

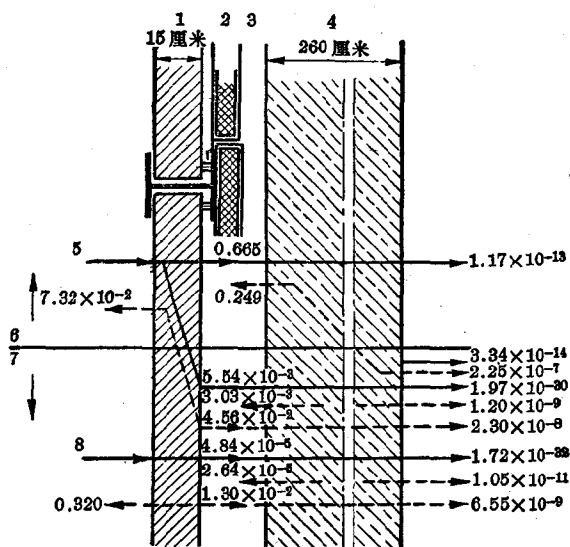


图 1.2 中子流和 γ 射线在温茨克尔反应堆屏蔽层中的分布^[19]

1—鋼；2—絕热层；3—冷却空气；4—混凝土；5—快中子；
6—快中子区；7—热中子区；8—热中子

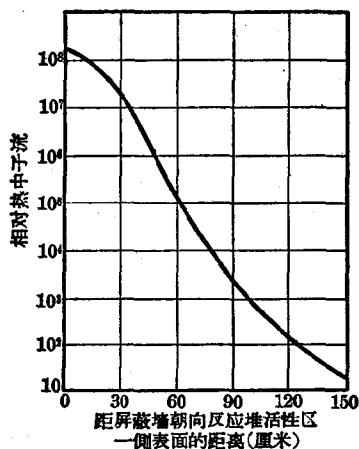


图 1.3 温茨克尔反应堆混凝土屏蔽层中的热中子流

子的能量都保持在 8 兆电子伏左右^[9]。

图 1.2^[10] 表示英国温茨克尔反应堆生物屏蔽层中的中子流和 γ 射线的分布。图 1.3^[11] 表示热中子流在该反应堆混凝土屏蔽层中的减弱曲线。

1.4 放射性辐射的生物作用

当辐射作用于人的机体组织时，其能量略为减少。在机体的细胞吸收能量时，引起了物质原子的电离作用。电离辐射对机体作用的机制到目前为止还没有完全被研究得出。大多数作者认为，当辐射作用于机体时，组织液体被电离而产生“游离基”(O, H, OH, O₂H 和其他)，此游离基在机体中引起了病理上的变化。

这些游离基是强氧化剂，它破坏机体内的新陈代谢过程。这种作用与辐射对组织的直接作用一起，首先导致神经系统功能性的变化，然后引起器质性的变化以及造血过程的破坏等。根据机体所受辐射剂量的大小，这些变化可能是暂时的(可逆的)或永久性的(不可逆的)。当一次照射的剂量约为 150 生物伦琴当量和更大时，就会发生急性放射病。而少量剂量的长时期作用，则会引起慢性放射病。

最近 11~12 年以来，由于核反应堆以及提取和精制人工放射性元素的化学工厂的建造日益发展，已经知道了许多由于对从事于这类装置的工作人员所采取的辐射屏蔽措施的不当而引起的足以致死的严重病症。

当电离辐射作用于视觉器官时，可能会引起一种不可逆的晶状体浑浊——放射性内障病——的现象。在美国发现有許多在高能加速器上工作的人员患有内障病的情况^[12]。根据卡兰的数据^[1]，当全身受到 200 生物伦琴当量的剂量照射时，接受该剂量的人中有半数成为残废，而 700 生物伦琴当量的剂量则是足以使人致死的剂量。

各种辐射对生物的损害主要取决于两个因素：贯穿本领和比

表 1.3 外部电离辐射的最大允許水平*

辐射种类	辐射能量	每周照射剂量或数量	最大允許剂量率或辐射强度		
			測量单位	每周工作 $t=36$ 小时	每周工作 t 小时
γ 和倫琴射线	在 3 兆电子伏以下	100 毫倫	毫倫/小时	2.8	100/ t
γ 和倫琴射线	$3 \sim 10^4$ 兆电子伏	250×10^6 兆电子伏/厘米 ²	兆电子伏/厘米 ² ·秒	2,000	70,000/ t
β 射线	在 10 兆瓦以下	2.5×10^6 β 频率/厘米 ²	β 频率/厘米 ² ·秒	20	700/ t
热中子	0.025 电子伏	100×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	750	27,000/ t
慢中子	0.1 电子伏	72×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	550	20,000/ t
中能中子	5 千电子伏	82×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	640	23,000/ t
中能中子	20 千电子伏	40×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	310	11,000/ t
中能中子	0.1 兆电子伏	11×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	90	3,200/ t
中能中子	0.5 兆电子伏	4.3×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	33	1,200/ t
快中子	10 兆电子伏	26×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	20	720/ t
很快中子	200 兆电子伏	1.3×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	10	360/ t
超快中子	500 兆电子伏	0.8×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	6	220/ t
超快中子	2,000 兆电子伏	0.4×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	3	110/ t
超快中子	5,000 兆电子伏	0.13×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	1	36/ t
超快中子	10^4 兆电子伏	0.013×10^6 中子/厘米 ²	中子/厘米 ² ·秒	0.3	11/ t

* 見 1960 年苏联保健部批准的“使用放射性物质或电离辐射源的卫生規程”，設計原子能电站时采用。

电离(即在粒子射程的单位长度上形成的离子对的数目)。在大多数情况下,这两个因素互成反比关系。 γ 射线和伦琴射线具有最大的贯穿本领,但是它们的比电离却最小。辐射屏蔽层的计算,是根据贯穿性最强的辐射——中子流(特别是在能量很大时)和 γ 辐射进行的。

表1.3列出了相当于100毫生物伦琴当量/周(或5生物伦琴当量/年)的不同辐射的最大允许生物剂量值。

在附录1.1中载有原子能电站设计暂行卫生规程的摘录,并考虑了1960年6月25日苏联国家卫生监督局规定的照射剂量,同时也载有设计辐射屏蔽层时计算剂量率规程的摘录。

国际辐射防护委员会^[13]建议,当受固定照射和全身照射(与进一步的照射无关)时,保证安全劳动条件的最大允许剂量为每周(每周六天,40小时)100毫生物伦琴当量,这也就是苏联所采用的标准。实际上,在大多数核反应堆与加速器上,屏蔽层保证照射的剂量大大地低于上述允许生物剂量。例如设置在布鲁克海文国立实验室中的试验性反应堆(美国)的屏蔽层保证六小时工作的照射剂量为0.005伦琴,即为生物允许剂量的 $1/3.3$ ^[14]。

在非实验性反应堆上,例如,在美国的某些反应堆上,其允许照射剂量稍高。

美国在实际工作中,根据一定区域内是否经常有工作人员逗留来区分该区域的允许辐射水平。例如在设计希平港原子能发电站时规定,在工作区内辐射水平不应超过2毫伦/小时,在工作人员定期逗留的地区不应超过5毫伦/小时,而在工作人员很少逗留的房内则允许剂量提高到50毫伦/小时^[15]。

图1.4表示^[16]相当于原定每周工作40小时剂量为0.3生物伦琴当量的最大允许中子流与中子能量的关系。

美国原子能委员会于1960年底决定把原子能工业部门工作人员的最大允许照射剂量降低到原规定值的 $1/3$;同时也降低了可能遭受原子能企业放射性辐照的居民的最大照射剂量。