

原子核辐射屏蔽

B·T·普莱斯等著
益群译



中国工业出版社



原子核辐射屏蔽

B.T.普萊斯 C.C.霍尔登 K.T.斯平尼 著

益 群 译

中国工业出版社

“原子核辐射屏蔽”一书主要讲述有关反应堆和加速器的屏蔽问题，重点是在反应堆的屏蔽方面。主要内容是讲述屏蔽的物理原理及其对工程设计的影响。本书对于在实际工作中可能遇到的主要工程问题也有所叙述。

关于原子核辐射与物质的相互作用，作者是从屏蔽的角度出发而编写的，目的明确。对于快中子的分出理论本书做了较详细的讨论。

本书对屏蔽方面的物理工作者和工程师、对原子能有关专业的学生是一本有益的参考书。

RADIATION SHIELDING

by

B. T. PRICE, M. A.

C. C. HORTON, B. Sc.

and

K. T. SPINNEY, B. Sc.

ATOMIC ENERGY RESEARCH ESTABLISHMENT

HARWELL

PERGAMON PRESS

LONDON • NEW YORK • PARIS

1957

* * *

原子核辐射屏蔽

益群译

*

中国科学院原子核科学委员会编辑委员会编辑

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本787×1092 1/16·印张18¹/₂·字数437,000

1961年9月北京第一版·1963年2月北京第二次印刷

印数645—1544·定价（10-5）2.10元

*

统一书号：K15165·319（核-5）

作者序

在第一个反应堆建成后的十年間，屏蔽問題在核子技术中受到了不应有的忽視。这一方面是因为屏蔽的物理过程尙未完全了解；另一方面是因为注意力主要集中于堆芯之故。但最重要的原因是已有了設計屏蔽层的簡單經驗方法，且这样設計的屏蔽层至少可以进行工作并且是安全可靠的，虽然这种屏蔽层可能是不必要的笨重和浪費。然而，在最近几年出現了两个新因素。在海上第一个移动式反应堆已經運轉，同时在陆上核动力已經达到了大規模应用的阶段。屏蔽层的重量是多少？其成本如何？已成為相当重要的問題。这些新发展提供了以前所沒有的刺激条件，因而今天屏蔽問題已開始突破了純經驗的状况，理論基础建立起来了。

由于这一問題仍非处于完善状态，也由于我們的自然意向，作为物理工作者的我們与其編一本計算手冊，而不如写一本教科书。我們旨在給讀者对这一問題的初步了解。根据这种想法，我們就注重于物理原理和这些原理如何影响屏蔽的工程設計；我們注重于降低成本的重要性；我們給讀者介紹一些在工作过程中迟早会遇到的一些問題；我們試圖挑选一批参考文献，以便引导讀者有效地利用已发表的繁多的报告。为了保持本书的适当篇幅，討論仅限于反应堆、电子迴旋加速器、同步加速器和直綫加速器。有关高能加速器屏蔽的各种問題略去了。

本书的編写是与英国原子能管理局許多同事們的大力协助分不开的。我們特意感謝对原稿作了仔細閱讀和指正的H. J. 邓斯特，W. S. 伊斯特伍德，R. H. Mck. 赫德，J. S. 史道銳和J. B. 賽克斯，以及所有在出版过程中給予我們帮助的美国和英国的朋友們。

B. T. 普萊斯

C. C. 霍尔登

K. T. 斯平尼

于哈威尔

1957年3月

俄文譯本編者序

近年来在苏联和国外，展开了原子电站的建設。因此，对反应堆发出的危害健康的輻射的屏蔽作用，大大增长了。設計反应堆屏蔽层并不困难。但是，建造同时滿足几方面要求——如重量輕，尺寸小，成本低——的屏蔽层，是很复杂的問題。

設計利用反应堆做为能源的固定装置时，主要注意的是經濟問題，做屏蔽层用的是便宜的材料，例如混凝土、水、砂等。但是，不能从此得出結論，屏蔽层的尺寸和重量可以任意选择。例如，增大屏蔽层的尺寸，会导致支架結構、建筑物等造价增大。对移动式装置，为了減輕重量和减小尺寸，可以选用貴的稀有材料。

屏蔽計算是复杂繁重的任务。其困难首先是各种輻射源很多，而其中每种都有不同的强度和复杂的能譜。其次，輻射与大量物质相互作用时发生的現象很复杂，这些現象包括多次散射过程，在介质分界处的反射，当一种介质置于另一种介质內时所带来的畸变，等等。第三，实际建造輻射屏蔽层时发生的极广泛的工程問題。甚至在理想条件下（无限大的介质，单能輻射源等）数学解这类問題，也要利用快速电子计算机对微分积分迁移方程进行数值解，并且要求花費大量時間。因此，在許多情况下，研究屏蔽問題是用实验方法，而屏蔽层的最后試驗，或者用实物的模型，或者用实际的装置进行。

有关輻射屏蔽的計算和实验研究的問題，文献中主要是在期刊上有所論述。但是，近来出版了一些书籍^①，其中收集有关于这方面問題的理論和实验資料。

在这本介紹給苏联讀者的普萊斯、霍尔登和斯平尼的“原子核輻射屏蔽”一书中，作者力求循序并紧凑地叙述了內容极丰富的材料。在本书內很注重中子、 γ -輻射及 β -粒子与物质相互作用的基本过程。虽然，每种相互作用过程，在其他許多书籍^②中有比較詳細的闡述；但是由于材料組織得适当，目的性明确，使得这些章节也很可貴。叙述中子慢化和扩散^③的几节，同样可以說是很可貴的。

在本书中以最新的实验和理論工作介紹了中子和 γ -輻射通过屏蔽层的專門問題。多数数据是借用于英美实验室的一些报告的。叙述特別好的几节是“寬束 γ -輻射的减弱，积累因子”和“快中子的减弱”。在后一节中，詳細叙述了用分出截面計算快中子减弱的方法。这个半經驗的方法，是为計算含氫屏蔽层而特別提出的。

对于反应堆屏蔽設計和建造的工程問題，作者也很注意。以湯瑞、文茨凱耳、DIDO等反应堆屏蔽层的具体实例，說明屏蔽层的一些結構特点。作者最詳細地討論了两类屏蔽层——混凝土的和金屬-氫的。对于第一种，列举了关于化学成分，物理机械性能，热工性能，对中子和 γ -輻射的屏蔽特性的数据，并給出了寻求造价低的最佳方案的方法。根据作者的意見，金屬-氫屏蔽层对原子核反应堆运输装置是有发展前途的。

① 例如 反应堆屏蔽設計手册，洛克韦耳編，益羣譯，中国工业出版社，1962。

② 中子，H. A. 符拉索夫著，周沛平譯，高等教育出版社，1959；Гайтлер В., Квантовая теория излучения, Серге Э., Экспериментальная ядерная физика.

③ 例如 原子核反应堆理論綱要，С. 格拉斯登、M. 爱德倫著，和平譯，科学出版社，1958。

必需指出，在本书中成功地阐述了由于吸收 γ -辐射和中子而在屏蔽层内引起的发热的计算。在这一节中列举了为热屏蔽层特制的一些新材料——如硼钢，硼铝，含硼石墨——的特性。

所以，“原子核辐射屏蔽”一书，在计算和设计辐射屏蔽层时对物理工作者和工程师，会是有益的。由于本书叙述的内容层次清楚，故对核子工程专业方面的学生也很合适。

С. Г. 茨平

目 录

作者序

俄文譯本編者序

第一章 原子核輻射对生物的危害.....1

1.1 引言1

1.2 生物伤害的游离测量2

1.3 相对生物效率4

1.4 中子引起伤害的机制5

1.5 全身外部照射的最大允许水平5

1.6 飲水和空气放射性污染的最大允许水平8

附录 已廢除单位的定义.....10

参考文献.....11

第二章 γ -射线和高能电子的减弱.....12

2.1 引言.....12

2.2 截面及有关的量.....13

γ -射线与物质的相互作用(基本过程)

2.3 光电效应.....14

2.4 电子对的产生.....15

2.5 γ -辐射的散射16

γ -射线与大块物质的相互作用

2.6 窄束 γ -射线的减弱23

2.7 寬束辐射的减弱; 积累因子.....25

2.8 γ -辐射的反散射和空气散射42

2.9 原子核反应堆中产生的 γ -辐射45

2.10 裂变产物发出的 γ -射线45

2.11 能量小于几个兆电子伏的电子的屏蔽.....53

2.12 阻止高能电子时产生的 γ -辐射(韧致辐射)59

2.13 高能 γ -射线强度的测量66

参考文献.....70

第三章 中子屏蔽——中子物理73

3.1 一般原理.....73

3.2 中子.....76

3.3 原子核.....79

中子与原子核之间的反应型式

3.4	散射	85
3.5	辐射俘获	96
3.6	放出带电粒子的反应	101
3.7	(n, 2n) 反应	104
3.8	由中子反应产生的人工放射性	105

中 子 源

3.9	裂变中子	108
3.10	(α , n) 源	110
3.11	(γ , n) 源	111

参考文献	115
------	-----

第四章 中子在厚屏蔽层中的减弱

4.1	引言	117
4.2	扩散理论	118
4.3	在平面几何条件下扩散方程的解	120
4.4	在球面几何条件下扩散方程的解	123
4.5	扩散长度的物理意义	124
4.6	中子的慢化	125
4.7	年龄理论	127
4.8	快成分的减弱	131
4.9	低能中子的积累	138
4.10	矩方法	142

其 他 问 题

4.11	中子从表面的逸出	143
4.12	在屏蔽层中的管道和空洞的影响	148

参考文献	158
------	-----

第五章 常用的数学公式

5.1	指数积分和正割积分函数	159
5.2	平面源和薄板源在标准情况下的解	163
5.3	线源和可考虑为线源迭加的情况	169
5.4	柱状源	170
5.5	球状源	171

参考文献	172
------	-----

第六章 反应堆和放射性物质的屏蔽

6.1	引言	173
-----	----	-----

屏蔽层的发热

6.2	堆芯和反射层发出的 γ -射线引起屏蔽层的发热	177
-----	--------------------------------	-----

6.3	中子引起的发热	184
6.4	屏蔽层内温度分布的确定	186
6.5	热屏蔽层	189

屏 蔽 层

6.6	混凝土屏蔽层	193
6.7	最经济的屏蔽层	207
6.8	金属-氩屏蔽层	212

其 他 问 题

6.9	中子流照射引起的放射性	221
6.10	冷却回路中的放射性	231
6.11	射线束捕集器	235
6.12	屏蔽窗	237
6.13	用普通的公共运输工具运输放射性物质时对屏蔽的要求	242

参考文献	245
------------	-----

附 录

I. 屏蔽计算常用的数据	247
II. 热中子散射截面和吸收截面	249
III. 热中子活化截面	253

人名索引	254
------------	-----

名词索引	258
------------	-----

第一章

原子核輻射对生物的危害

1.1 引言

游离輻射对生物伤害的历史几乎和 X-射綫的历史一样长。第一次伤害事故記載于 1896 年 7 月，即倫琴发现 X-射綫的几个月之内，也就是居里夫妇把鐳提純的两年前。虽然由于很多早期工作的条件不能控制，从少数伤害事故得出結論有許多困难，但当时就企图针对新发现的輻射建立安全操作規程。可能是罗倫斯⁽¹⁾做了第一次嘗試，他提出“若在七分钟內照象底片不变模糊，則輻射就沒有达到有害的程度。”这一建議（它正好說明了当时測量 X-射綫强度的困难）現在看来是极不精确的，可能有一百倍的誤差。輻射造成的伤害繼續发生，大約到本世紀的最初十年，日益积累的事实开始說明这种伤害不仅限于皮肤，而且影响到位于深处的組織，例如骨髓。同时在輻射工作者中間頻繁地发生恶性肿瘤，說明輻射是强烈的致癌的因素。

在 1914—1918 年战争期間，由于表盘上用鐳涂料的工业发展，引起了人身伤害的急剧增加。这启示了若斯⁽²⁾建立一个防护組織机构。不幸，很少有人把他的建議付諸实现，結果在战后的几年里立刻发生了大量的不适性貧血症。在美国涂表盘的工人中鐳毒的数字是如此之大，以致公众輿論极其混乱。多数事件是因为用嘴唇涂刷子而发生的——这种方法結果使鐳嚥入人体并停留在人体里，以后就成为持久的体内核輻射隱患。

英国 X-射綫及鐳防护委员会于 1921 年成立，其目的是对所有受輻射照射的人員制訂适当的防护标准。在同年七月該委员会公布了第一个建議的标准。1920 年由美国倫琴射綫学会組成了一个美国委员会，在 1922 年該委员会发表了一套相似的建議标准。从此以后对防护問題不再漠不关心了^(3g)。第一次国际輻射学会議于 1925 年在倫敦举行，而且成立了两个委员会，探討有关单位和防护問題。根据这两个委员会的建議，第二次会議（1928 年，斯德哥尔摩）选用了第一个国际公认的剂量单位——倫琴。在第二次世界大战爆发前的七年中，积累了关于允許照射的大量事实⁽³⁻⁸⁾。后来 X-射綫和 γ -輻射实验对 1939 年的标准修改不大。

1942 年鏈式反应堆的建造，以及在許多国家中原子能工业的迅速发展，使受核輻射照射的人数大大增加。值得注意的是使用放射性物质的数量的增加。1939 年全世界的总資源相当于大約 1000 克被分离的鐳。而一个动力原子反应堆所生产的放射性物质完全超过这个数量。一个反应堆每运轉 1 兆瓦-日生产大約 1 克放射性裂变产物；此外，由于这些裂变产物半衰期比較短，故按同样重量計，这些裂变产物比上述鐳的放射性强得多。如果象英国这么大小的一个国家完全依賴核动力发电（1953 年总計为 6×10^{10} 千瓦小时），則每年約需处理 10 吨裂变产物，以使之对人无害。

幸而，这个巨大任务引起了对有效地进行防护測量的必要的重視。除一些由于違反正

常安全規定的个别事故之外，过去原子能事业的全部发展并未伤害工作人員。这一良好的安全記錄在很大程度上是由于出现了“保健物理学者”（这一名詞是在1942年由洛斯-阿拉莫斯實驗室开始用的）这样一种新职业。按派克的說法：“保健物理学是圍繞工业医学、放射生物学、工业安全、公共卫生、物理学、化学和工程……的邊緣科学。一般說来，这門科学是与物理学及研究輻射与人体相互作用的生物物理学有关的。特別重要的，这門科学是与保护輻射工作者使之不受其职业可能带来的危害有关的。”

使用放射性物质的工作人員所必須防止的危險有两种：外部照射和由于食入污染食物或呼吸污染空气所引起的更隱伏的危險。外部照射的防护（本书主要討論的內容）是物理学者和設計工程师的首要任务，他們要共同負責研究，为反应堆和加速器建造起合理的屏蔽层。然而，甚至当屏蔽层的效率在实际中被証实可靠了，仍然必須考虑下列几个問題：穿过屏蔽层的洞有可打开的塞子，如果把塞子打开則强的射綫束会泄漏出来；有些屏蔽层要造成部分可拆卸的；有时人們必須对强放射性设备进行維修。虽然如此，总的說来使工作人員免受过量的外照射并不困难，特別是如果在屏蔽設計中作某些显然偏于安全的修正时。

食入或吸入放射性物质的危害未必有任何征象。这种危害是持續的，这就要求化学工厂、反应堆燃料元件、同位素容器和热室有很好的原始設計，需要小心和正确地操作仪器，在放射性实验室內严禁吸烟和飲食，定期檢查設備，在某些情况下要进行个人卫生监督⁽⁹⁾。討論防止第二类危害所必要的工艺技术是超出本书范围之外的。但是，因为每一个从事輻射工作的人員都应该了解食入、飲入、吸入放射性物质的危害，在本章的末节列出了污染允許水平的表。

为了計算对外輻射源合理防护所必須的屏蔽层厚度，需要知道三个因素：源发出的輻射类型和强度，屏蔽材料对輻射的减弱率（包括几何效应或在减弱过程中产生的附加的次級輻射），以及在屏蔽层外表面允許的强度。这三个因素的前两个是属于物理方面的，以后将在本书內討論。第三个因素是与“每周允許輻射剂量”密切相关的，将在下面先討論。

1.2 生物伤害的游离測量

当核輻射（如 γ -射綫、快速电子及 β 粒子、质子、 α -粒子和中子）通过物质时，产生游离。游离或者是直接发生，例如在 β 粒子被阻止时；或者是通过形成反冲电子和重离子而間接发生。其中某些过程在1.4节、第二章和第三章中将詳加討論。然而現在，我們只需要讲一下，反冲电子或重离子在有机材料中会引起化学变化，如果照射足够强和久，这种化学变化可以完全改变材料的性质。例如，将聚甲基丙烯（有机玻璃）放在 10^{12} 中子/厘米²·秒的反应堆中子流內照射一天后，将显出淡黄色。若照射繼續下去，在材料中开始产生气泡。最后，約一年以后，材料将分解成粉末。使有生組織致伤的輻射量比在无生物物质中产生可以探測到的变化所需的量是小得多的。与上述同样的中子流在不到百分之几秒內就可以使小的哺乳类动物受到致死的伤害。

X-射綫和 γ -輻射的单位——倫琴

如所預料的，我們发现輻射引起生物伤害的程度取决于輻射在組織內以游离的形式而損失的能量。某些类型的伤害随着游离的量基本是綫性增加的，可比喻为該过程是“打靶”

类型或“命中与未中”类型的，即每次引起的伤害是累积而不消逝的。对其它类型的伤害效应，人体有一种恢复机能，在剂量率未达到一定的阈值以前，该恢复机能可以在相当程度内防止出现任何症候。对有机体的伤害效应，就总体而言随游离的增加而大致地线性增加。因此，X-射线或γ-辐射的量通常用下述单位进行度量：在标准物质——空气中形成的标准游离量。因为相同质量的空气和組織以大約相同的效率吸收X-射线或γ-辐射（图2.6.6），故用此法所度量的一定辐射量，就大約相当于一定的伤害量，而与辐射的量子能量无关。因此这一个单位可以具有双重用途，可同时度量剂量和辐射量。

伦琴——单位——被定义为“X-辐射或γ-辐射这样的量：每0.001293克空气的关联微粒发射，在空气中产生的离子所带的每种符号的电量为1个静电单位”（International Recommendations on Radiological Units, 1953⁽¹⁰⁾）。上述质量即1立方厘米标准空气的质量。“关联微粒发射”包括入射辐射与测量物质(空气)相互作用而产生的快速光电子和康普顿电子，以及在这些快速粒子被空气慢化的过程中游离出的次级电子(或δ-射线)。因为在空气中产生一对离子快速电子损失的能量大約是32.5电子伏^(11, 12)，又因为1 e.s.u. 电荷相当于 2.083×10^9 个单电荷的离子，所以1伦琴相当于每克空气被游离出 5.24×10^8 电子伏或83.8尔格的能量。产生一对离子所需要的能量几乎与致游离的光电子或康普顿电子的能量无关，所以这个数量关系在X-量子和γ-量子能量很大的范围内都保持不变。

屏蔽計算的結果通常用每平方厘米每秒的光子数表示，而不用每秒每克空气的尔格数表示。所以，知道相当于单位时间内1伦琴剂量的光子通量^②是适用的。

令φ为光子通量(光子/厘米²·秒)，E(兆电子伏)为辐射的量子能量，ΔE为每秒在1克空气中放出的能量，λ_a为质量能量吸收系数(厘米²/克空气)，列于表2.5.3内。那么ΔE = φEλ_a兆电子伏/克·秒。因1兆电子伏等于 1.602×10^{-6} 尔格，故剂量率D由下式得出：

$$D = \phi E \lambda_a \left[\frac{1.6 \times 10^{-6}}{83.8} \right] \text{伦琴/秒} \quad (1.2.1)$$

图1.5.1即由此方程利用怀特的数据^(14, 15)(表2.5.3)得出的。图1.5.1说明光子通量与辐射能量的函数关系，该光子通量相当于在职业性照射情况下的最大允许周剂量，即在40小时工作周内为0.3伦琴。

根据在2.3节中所提出的原因，企图用伦琴度量量子能量大于約3兆电子伏的γ-辐射量，发生很多实际上的困难。对較高的能量，最好采用以光子/厘米²·秒表示的实际通量，或者用瓦/厘米²做单位表示γ-射线强度。同时有必要引出一个新的生物剂量单位；这样一个单位在任何情况下也将是必要的，因为伦琴最初定义在发现中子以前，它只限于X-射线和γ-辐射。

被吸收的剂量单位：拉特

被吸收的剂量国际单位是拉特，等于每克100尔格。这一单位首先为1953年哥本哈根第七次国际辐射学会議所采纳⁽¹⁰⁾。任何致游离辐射的被吸收的剂量定义为：在受照射物质有关部位的单位质量内由致游离粒子给出的能量。被吸收的积分剂量，即在一定的整个

① 虽然这个数字通常引用，而且在剂量計算中也习用，但是更新的测量得到的数值是 35.0 ± 0.6 电子伏。
 ② 通量：見2.2节中的定义。

有关区域内被吸收能量的积分值，用克-拉特（1克-拉特=100尔格）表示。要指出的是，在1953年会议上伦琴作为X-射线和γ-辐射的单位而特别被保留下来，并且在组织中每伦琴的被吸收的剂量极近似地等于1拉特（实际上是0.93拉特）。

在采用拉特之前，有些其它的单位曾通用过。因为当研究某些原著时，这些单位难免引起混乱，所以在本章的附录中给出这些单位的定义。

1.3 相对生物效率

辐射伤害的大小，除取决于游离的量以外，还取决于游离密度的影响。有些粒子，如慢质子和天然放射的α-粒子，具有很高的比电离（以单位径迹长度上的离子对数度量），比之较轻的致游离的电子和γ-射线更易引起病变，此病变是由于在一块小的体积内同时游离产生许多离子。例如，眼障病，由质子产生的密的柱状游离比由β或γ-照射造成的等量但较稀疏的游离引起的要快得多。较重的游离辐射被视为对这种伤害具有较高的相对生物效率（r.b.e.）。对整个机体伤害效应也是随着游离密度的增加而增加。

在产生一定效应的情况下，某种辐射的相对生物效率被定义为如下的比值：

$$r.b.e. = \frac{\text{在}\gamma\text{-射线照射下产生一定效应所需的被吸收的剂量（尔格/克）}}{\text{在所研究的粒子照射下产生同样效应所需的被吸收的剂量（尔格/克）}}$$

最可靠的防护知识是基于对辐射工作者受能量在250千电子伏以内的普通X-射线的职业性照射的了解。所以习惯上以这种X-辐射的效应做为相对生物效率的基准，而此种X-辐射在水中每微米厚度内游离产生约100对离子。然而，在实际上X-射线或γ-射线给予组织的剂量的相对生物效率在任何限度下都与量子能量无关，故对一切能量的正电子和负电子也应该用相同的数值。其它致游离粒子的质量大得多，其轨迹近乎于直线，不同于易于散射的电子，这些重粒子产生密的柱状游离。离子柱具有一定的平均线性游离密度，该密度与电荷数的平方成正比，且随速度v的增加而迅速下降（大致按 $1/v^2$ 规律）。直至 $v=0.96$ 倍的光速时，对所有电荷相同的粒子，才达到近似相等的常数。（表1.3.1说明重粒子的相对生物效率与其比电离的关系。在实用上，对低于10兆电子伏的质子其相对生物效率可以用10（根据在下一节中说明的理由），对低于10兆电子伏的快中子也可以用10。同样的数值也可以用于天然放射的α-粒子的内部照射。对于由快中子碰撞而产生的重反冲核的照射取用20。）

表 1.3.1 比电离对重的致游离粒子的相对生物效率的影响⁽¹⁶⁾

平均比电离 (每微米水中的离子对数)	在水中的平均线性能量转移 (千电子伏/微米)	相对生物效率 (r.b.e.)
<100	<3.5	1
100—200	3.5—7.0	1—2
200—650	7.0—23	2—5
650—1500	23—53	5—10
1500—6000	53—175	10—20

为了計及相对生物效率，常采用所謂人体倫琴当量 (rem) 的剂量单位。如經常所用的，人体倫琴当量是指以拉特表示的剂量与相对生物效率的乘积。因为精确测量相对生物效率是极困难的，故这种表示剂量的方法最多也只是半定量的，而且也未被国际輻射学单位會議所正式承认。然而，当由混合輻射的各种成分产生的剂量迭加时，上述表示方法仍有其方便之处。

1.4 中子引起伤害的机制

在下节中引用的允許中子通量，是根据中子与构成人体組織的原子核相互作用而推算出来的数值。因为中子本身不带电，故不能直接引起游离，而首先必須在核反应中产生带电粒子。当热中子射入組織时所产生的游离，主要是由 $H(n, \gamma)D$ 和 $N^{14}(n, p)C^{14}$ 两种反应引起的。在同氫反应中放出2.2兆电子伏的 γ -射线， γ -射线反过来又引起康普頓反冲电子，而同位素 N^{14} 放出能量为0.6兆电子伏的质子，在組織內的射程約为0.01毫米，这两种过程的相对贡献，可根据已知的氫核和氮核的截面及湿組織的百分組成計算出来。百分組成如下⁽⁷⁾：按重量計氧73%，碳12%，氫10%，氮4%，其余1%主要是鈉、鎂、磷、硫、氯、鉀、鈣。在計算允許通量时，还需要知道在人体内的热中子密度分布。假定該分布与用石蜡和水的實驗中所求到的相近似⁽¹⁷⁾。因为可以认为氮放出的质子和反冲核的相对生物效率分别为10和20，故根据組織所吸收的能量可以計算出允許照射水平。这样的計算已由密切尔和史奈德⁽¹⁹⁾所完成。

当快中子碰撞氫核时，在一次碰撞中平均失去大約2/3的能量；氫所得到的能量足以使之很容易地从化学鍵上脱离，而作为一个重的致游离质子反冲。中子在組織內由1兆电子伏慢化到热能($\sim 1/40$ 电子伏)的过程中，平均遇到約20次这样的碰撞，并从起点約經過5厘米的距离。中子也跟組織的其它成分发生許多次碰撞，但是，在該过程中損失的能量比較少：对能量在0.5与5兆电子伏之間的中子，中子所給出的能量的 $\sim 90\%$ 是損失在与氫核碰撞过程中。在中子慢化为热能以后，被氫核或氮核俘获以前，将扩散几厘米。快中子允許通量的計算由台特⁽²⁰⁾、史奈德、密切尔和比萊姆已作出。

因为設計适于监察快中子通量的輕便仪器是比較困难的，所以快中子比 γ -射线对輻射工作者可能有更大的危險。应当特別記住的是快中子易于引起眼瞼病。有一些年青的美国迴旋加速器工作人員受到了200拉特的剂量，当危險能被发现以前，已不幸受伤了（見 The report of the U.S. Radiation Cataract Survey, 1949）^(24, 25)。

1.5 全身外部照射的最大允許水平^①

由外部受到的允許輻射量的准确估計，可以根据对宇宙綫和天然放射性的綜合效应的分析而做出（表1.5.1）。标准的另一极限，在短時間內受到的且使50%的人致死的輻射量也足够精确地知道了，大約是500倫琴。关于安全上限是位于上述两个极限之間的什么数值的问题，是不容易回答的，因为（除了很大的剂量以外）过量照射的效应可能有极长的潜伏期。这样自然很难把因果准确的联系起来。现在的国际允許标准是基于最近五十年使用X-射线和 γ -輻射所积累的經驗，也基于一些生物實驗的証实。虽然这些标准为国际輻射防护委员会所經常审定，但对1939年採納的最大允許水平，还没有理由作任何重大的

① 飲水和空气的允許污染水平列于1.6节。

修改。

下面列出的职业性照射每周的最大允许剂量，是取自国际辐射防护委员会所推荐的标准。国际辐射防护委员会认为，这些标准的伤害危险比起其它对生命的伤害是小的，然而，除了这些可能受到的辐射剂量率的限制以外，还必须进一步规定一个工作人员在许多年工作期间所受到的总剂量的限制。一个限制是根据在个体的遗传机制中引起有害变化的辐射效应而规定。对这一极限做出合适的定量的估计，是很困难的。但是，英国政府在1956年所建立的一个委员会的报告⁽²⁵⁾，建议一个人在30岁以前受到的总剂量不得超过50伦琴（此外，如果有多于百分之二的人口受到照射，这一数字需加以修改）。第二个极限是，在任何工作人员的一生过程中“全身”总剂量不得超过200伦琴。因为已经知道，要是超过这一数字，通常少见的一种致死的疾病——白血球增多症——将显著增加。这两个极限控制了长期平均的照射水平，同时下面所给出的水平控制了极短时间内的最大照射率。除了这些个人照射水平以外，英国委员会还极力推荐，人为辐射的剂量，对全部人口平均而言，不得超过天然放射性的“本底”水平的两倍。这一点指明任何不必要的辐射照射都应该避免。因此，应该记住在日常生活中所遇到的游离辐射是日益增加的，象在试鞋时荧光透视检查所受到的剂量也不能完全忽略，如表1.5.1所示。

表 1.5.1 人身难免受到的辐射剂量

天然辐射与宇宙线的外照射 ⁽²⁶⁾	0.0002人体伦琴当量/天
天然镭和K ⁴⁰ 的内照射 ⁽²⁶⁾	0.0004—0.0014人体伦琴当量/天
单独K ⁴⁰ 的内照射 ⁽²⁷⁾	0.0001人体伦琴当量/天
民用电视——阴极射线管表面的剂量最大值 ⁽¹⁶⁾	0.002伦琴/小时
X-射线透视肺部(最好) ⁽²⁸⁾	0.006伦琴
(平均) ⁽²⁹⁾	0.2伦琴
(萤光屏检查) ⁽²³⁾	~10伦琴
试鞋时萤光透视检查	3—8伦琴/分
治疗肿瘤时的局部剂量 ⁽²⁶⁾	3000—7000伦琴
使人皮肤变红(硬的 γ -射线) ^(3e)	~1000伦琴
经常职业性照射国际最大允许水平	0.3拉特/周
人的平均致死剂量(全身照射)	~500伦琴

每周允许剂量（职业性照射）

（A）对灵敏器官基本的每周允许剂量（全身受任何一种或几种游离辐射的照射）：

（i）全身剂量：对造血器官、生殖器和眼睛为每周0.3人体伦琴当量。

（ii）表面剂量：对表皮基层（它的深度是：位于皮肤角质层之下约7毫克/厘米²）为每周0.6人体伦琴当量。

除了要做修正的情况以外，这些数字做为对职业性照射的每周最大允许剂量。几种不同辐射所造成的剂量是相加的。所谓全身照射是指躯干被照射，并非必须四肢被照射。

应该注意：（a）对在核子工程中遇到的贯穿辐射第（i）条是限制；（b）对量子能量大于几个兆电子伏的 γ -辐射，最大剂量产生在人体表面以下相当深的距离（见2.13节，图2.13.4）。

（B）对能量小于3兆电子伏的X-射线，伦琴特作其剂量单位，此时人体伦琴当量与伦琴之间的差别小到足以忽略（1伦琴=93尔格/克组织；同时对X-射线和 γ -射线的r.b.e

= 1, 1 人体伦琴当量 = 100 尔格/克)。产生 1 个允许辐射水平的光子通量表示在图 1.5.1 上。

(C) 中子: 在下列中子通量下照射 40 小时即达到一个周剂量。

(D) β 和 α -粒子: 在人体表面产生剂量为每 40 小时 0.6 人体伦琴当量的入射的 β 粒子/厘米²·秒, 表示在图 1.5.2 上。对高能 β -粒子, 允许通量是 β -射线能量的变化不大的函数。因此, 当我们处

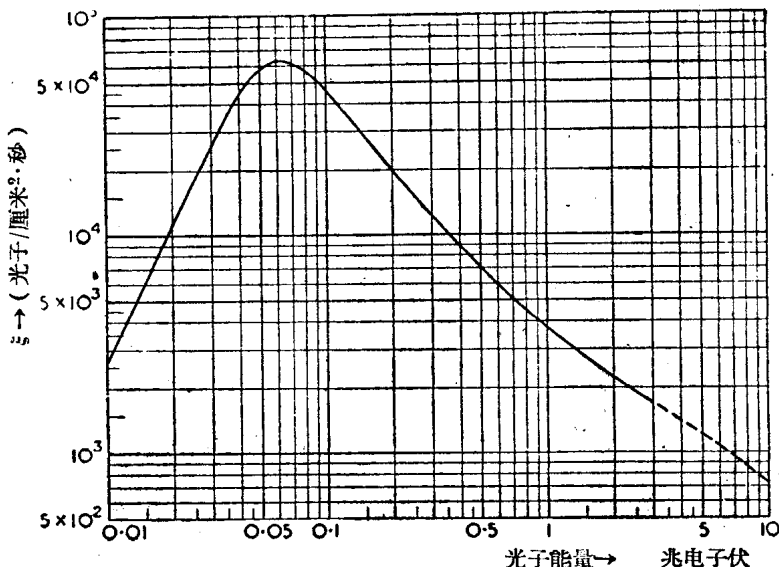


图 1.5.1 造成职业性照射每周 40 小时内允许剂量 (0.3 伦琴) 的光子通量。曲线的虚线部分表示, 伦琴的使用只限于低于 3 兆电子伏能量范围

理由放射性物质发射的连续能谱时, 取平均能量或取极限能量是关系不大的。同理, 在厚

源中能量的衰减, 对每个入射电子在人体表面产生的生物剂量的影响也是比较小的。受 β -粒子外照射的灵敏组织是皮肤的基层。能量小于 0.07 兆电子伏的软 β -射线或任何天然发射的 α -粒子, 都射不到灵敏的表皮基层 (图 1.5.3)。因此, 这些辐射对人体 (除眼球之外) 将无影响, 除非是当它们强到足以引起灼伤时; 或者由于食入、吸入或吸入放射性污染物而产生内部照射时; 或者有时, 当 β 和 α -放射物被吸收到皮肤内时。

表 1.5.2 每周 40 小时照射的允许中子通量

中子能量	在空气中测量的中子通量 (中子/厘米 ² ·秒)
0.025 电子伏 (热中子)	2000
10 电子伏	2000
10 千电子伏	1000
0.1 兆电子伏	200
0.5 兆电子伏	80
1 兆电子伏	60
2 兆电子伏	40
3-10 兆电子伏	30

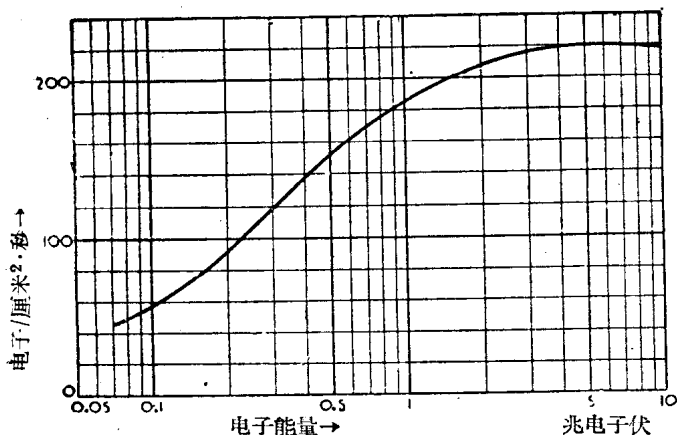


图 1.5.2 每 40 小时产生 0.6 人体伦琴当量剂量的准直单能电子通量。0.07 兆电子伏以下的 β -粒子仅在内部照射下才有危险 (26, 31)

β -粒子能够被屏蔽的这一使人安心的事实造成一个印象: β -粒子就是比 γ -辐射或中子的危险性小。结果未封的强 β -源常常拿在手中。所以, 值得记住, 1 毫居的源在 3 毫米远处产生每小时 3000 拉特的剂量。手套也有一定的防护作用, 虽然手套不便做得厚到足以阻止高能 β -粒子。标准的重型 PVC 手套的厚度是 125 毫克/厘米², 相当于 0.4 兆电子伏的 β -粒子的最大射程。衣服 (如裤子) 平均厚 50 毫克/厘米²。

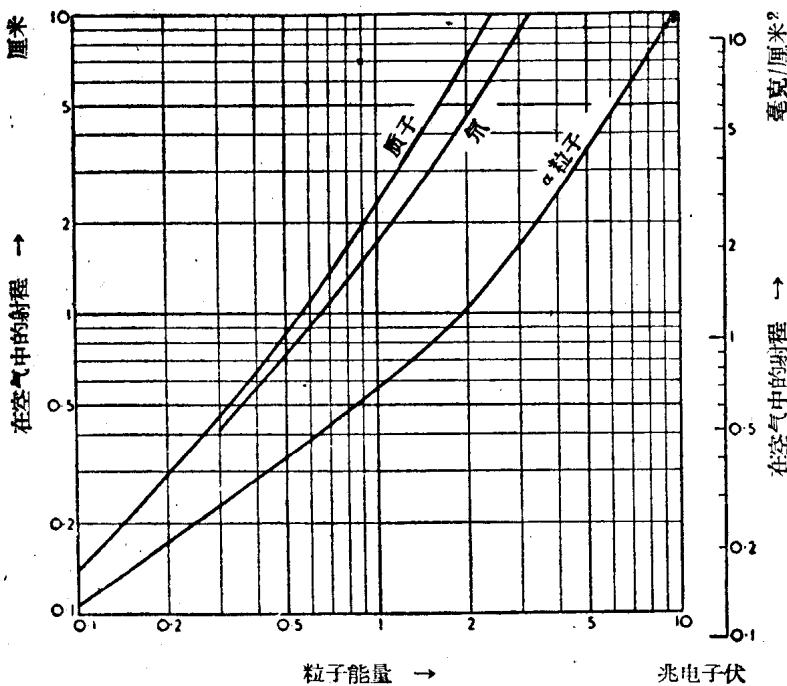


图 1.5.3 质子、氦核和 α -粒子在 15°C 及760毫米压力的空气中的射程。在組織中以毫克/厘米²表示的射程近似地等于在空气中以毫克/厘米²表示的射程⁽³²⁾。电子射程见图2.11.1

是1.5人体倫琴当量/周，在較深的組織中較小。

头部及頸部：在皮肤上是1.5人体倫琴当量/周，在較深的組織中較小。

在眼球中是0.3人体倫琴当量/周。

(F) 允許劑量率：虽然証据是不完全的，但是可以相信，人体所受的輻射伤害一般地几乎与劑量率无关。然而，因为难以保証适当地控制照射時間，故只有在特殊例外的情况下，才可以审慎地受每小时10拉特以上的劑量率的照射。

(G) 非常照射：在合理管理的實驗室里或工业設備上，安排得不致常常超过允許輻射水平是没有困难的^(3C)。虽然如此，突然事故总会偶然发生的，不可避免地受到相当大劑量的照射；最熟知的例子是在1953—1954年間重建已毀坏的加拿大NRX反应堆。在这种情况下，一个人一般允許連續工作時間是在13周内总照射不超过3倫琴。任何一个人，如果意外地受到較大的劑量，就必须要在輻射照射很少的情况下工作，在一个时期内使其所受的平均照射达到允許水平以下。不要认为这种平均的方法对处理偶然的大的輻射劑量是无济于事的。

1.6 飲水和空气放射性污染的最大允許水平

放射性物质可以由吞嚥、呼吸或通过皮肤吸收而进入人体。吞嚥可能通过飲用被污染的水，食入被污染的食物，或者在放射性實驗室中未保持手不沾放射性而抽烟。吸入粉碎的物质是操作細粉末时特別容易引起的一种危險，这种危險可以靠采用适当的通风、精心地設計“干箱”和其它設備而減到最小。通过皮肤吸收容易在割破手指时发生。当皮肤由

(E) 每周基本允許劑量的修正因子：在不会显著增加危險程度的情况下，实际上可以使用与基本允許劑量相差很大的最大允許劑量。国际輻射防护委员会建議对一些特殊情况可使用下列的数值：

(i) 貫穿本領很低的(半吸收层小于1毫米水)的輻射

全身照射：1.5人体倫琴当量/周。

眼球：0.3人体倫琴当量/周。

(ii) 人体局部照射
手和胳膊：在皮肤上是1.5人体倫琴当量/周，在較深的組織中較小。

脚和踝骨：在皮肤上