

中子的生物效应和化学防护

[苏] A. Γ. 斯维尔德洛夫 著

原子能出版社

中子的生物效应和化学防护

〔苏〕 A.Γ. 斯维尔德洛夫 著

王 珏 王 天 恩

王 宝 勤 查 冠 林

译

原子能出版社

目 录

序言	(1)
第一章 放射生物学研究中的中子源和中子吸收	
剂量的分布	(3)
一、吸收剂量的分布	(10)
二、辐射效应和 LET	(22)
第二章 中子的相对生物效应	(31)
一、中子对细胞作用的 RBE	(32)
二、中子对各种动物作用的 RBE	(40)
三、影响中子 RBE 值的一些因素	(56)
第三章 中子对各种动物作用的特点	(76)
第四章 改变中子生物效应的方法	(142)
一、改变剂量率	(143)
二、照后恢复	(151)
三、氧效应	(170)
第五章 中子照射时的化学防护	(183)
一、产生缺氧作用的物质	(184)
二、含硫化合物	(189)
三、吖唑炔胺类	(206)
四、生物制剂、甘油、重水	(222)
五、化学防护及其对造血的作用	(230)
参考文献	(242)

序 言

对中子生物效应的研究已经 35 年多了,可是对这个十分重要的问题的许多方面,至今仍然研究得很不够。中子照射时的化学防护就是研究得很不够的一个问题。造成这种情况的原因之一是实验技术上的复杂性,使得中子对机体作用这方面的工作面相对较窄。然而,中子具有生物效应较高的特点,因而人们普遍认为中子的化学防护问题的研究是没有前途的。这也许是更重要的因素。此外,诸如预后不良以及实验室研究的困难等因素,都较长时间地阻碍了相应研究的发展。

最近几年,核能在国民经济和科学研究上的广泛应用,以及较高能的中子在医学方面利用的前景,引起了人们对中子生物效应和中子化学防护研究的兴趣。

近来,剂量学研究所提供的材料,重新强调了中子辐射对不同种动物作用时剂量分布特点的重要性。特别是受照动物越大,其关键器官的吸收剂量中高电离密度粒子剂量的比重越小,这一事实特别引人注意。根据这种情况进行合理的推测,中等致死剂量或最低绝对致死剂量中子照射的效应,对各种动物不是一成不变的,是能够由一定的作用来改变的。因此,需要研究中子效应和决定中子效应的因素;研究机体关键系统的状态及其恢复能力,并对改变中子辐射损伤的方法进行实验评价。

本书试图按上述问题综合材料。由于主要问题的性质,故引用了主要是裂变中子或不同能量的快中子照射动物的研

究结果。主要注意力放在对化学防护有特别重要意义的中子生物效应的那些方面。而中子和生物体相互作用的物理学基础，中子剂量测量和放射生物学实验技术仅仅为了分析主要问题的需要被提到一些，因为这些问题在 М. И. Шальнов (1960)，Б. М. Исаев 和 Ю. И. Брегадзе (1967)，М. Ф. Юдин 和 В. И. Фоминный (1964) 等的专著中进行了详细的研究。中子照射的遗传学效应没有提及，因为这是 Н. А. Троицкий, Н. В. Турбин 和 М. А. Арсеньева (1971) 的书中研究的课题。

〔王宝勤译 陈家佩校〕

第一章 放射生物学研究中的中子源 和中子吸收剂量的分布

中子 (n) 是原子质量为 1.009 的不带电的粒子。由于它不带电荷, 它把能量传递给物质的主要方式是和元素的原子核的相互作用。与核作用的某种方式的几率 (弹性散射, 辐射俘获等) 取决于中子的能量。根据中子的能量 (E) 可以把中子分为热中子、中能中子、快中子和超快中子。但是, 这些能区界限的划分也是各式各样的。

能量 0.2 — 0.5 电子伏 (eV) 以下的中子属热中子。有些作者把 100 eV 以下的中子也包括在热中子之内。这组中子和物质相互作用几率最大的反应是辐射俘获 (n, γ)。所发射的 γ 光子的能量为几兆电子伏 (MeV)。

能量 0.5 eV — 500 千电子伏 (keV) 的中子叫中能中子 (Фельд, 1955; Шальнов, 1960; Троицкий 等, 1971)。另外, 目前也有人建议, 中能中子的最大能量范围不应是 500 keV , 而应是 20 keV 。其根据是, 在这个能区反冲质子与核碰撞的能量损失开始增加, 而用于电离的能量损失降低了 (Исаев, Брегадзе, 1967)。

能量大于 500 keV (或大于 20 keV) 的中子叫快中子。快中子和中能中子一样, 弹性散射反应和非弹性散射反应是其主要的反应。能量超过 10 MeV , 可能发生 (n, p), (n, α) 等放出粒子的核反应。能量大于 10 — 12 MeV 的中子属超快中子。

对中子生物效应进行实验研究，要选择合适的中子源。直线加速器、回旋加速器、核反应堆和带有放射性核素的装置，可用来作中子源。这些物理设备的详细特点在 М.И. Шальнов (1960)，М.Ф. Юдин 和 В.И. Фоминый (1964)，Б.М. Исаев 和 Ю.И. Брегадзе (1967)，Л.Н. Постников (1972) 等人的综述中论述了。这里仅根据所研究的问题，比较一下这些中子源的优缺点，并评价利用这些源的某些新的可能性。

如果一个中子源能够稳定释放所需能谱的中子，而产生的粒子通量的强度比较低，就只能局限在小动物实验中应用，或者局限在需要低剂量率的慢性实验中应用。带电粒子加速器可以产生单能中子，而且其中混有相对较少的 γ 射线 (20% 以下)，使用这种加速器的可能性较大 (Bewley, 1963；Исаев, Брегадзе, 1967)。同时，加速器不能保证释放的中子有足够的稳定性，它所产生的中子场的特点是，随离开靶（即中子源）的距离而梯度变化很大，并且对放射生物学实验中常用的一些反应，其中子能量分布是各向异性的 (Hollister, 1964；Lenihan, 1965)。这就给大动物的研究或多组小动物的研究造成困难，并且不能进行慢性照射的实验。不能不考虑到，由于价值很高和操纵复杂，加速器不能同时用于物理实验和生物实验，但要解决这个问题是困难的。

利用核反应堆进行放射生物学研究有很大的优越性。反应堆产生的中子通量密度很大 (在活性区内可达到 $10^{13}—10^{14}$ 中子/厘米²·秒)，并可以在很大范围内改变中子通量的强度。反应堆产生的中子很稳定，形成的 γ -中子场在很大范围的空间内是均匀的。照射空间的 γ -中子的比例可以在很宽的范围内改变。所有这些都可以允许用各种动物的急

性或慢性照射的实验来进行多方面的中子生物效应的研究。

反应堆的放射生物学实验利用水平孔道进行，或利用带有转换靶（用 ^{235}U ， ^{239}Pu 做成）的热柱进行。利用热柱可以为实验创造非常合适的条件，在它产生的均匀中子场中可以照射任何大小的生物体。此外，在用转换靶（利用转换靶在热中子作用下可以产生裂变中子）进行研究时，可以保证射线能谱的标准化，从而可以使在类似的装置上得到的各种研究结果进行比较。更重要的是，在利用热柱和转换靶时，可以得到每小时数百乃至数千拉德的中子组织剂量。

然而，由于研究反应堆本身的物理问题所造成的困难，利用热柱进行生物学研究并非总是可能的。反应堆的水平孔道常常用来进行放射生物学实验。水平孔道的直径一般较小，不超过 100 毫米，这只能进行小动物的研究，不能照射大动物和小动物组。另外，水平孔道里的辐射不仅有中子流，还混有很多 γ 光子。利用铍、碳化硼滤板或铅、碳化硼滤板能够降低孔道出口的 γ 成分。然而就是在这种情况下， γ 的含量也不低于混合照射总剂量的 10 — 13%（Брегадзе 等，1962；Киричинский 等，1965；Zaránd 等，1971）。可见，用所谓“纯”中子流进行生物效应的研究实际上是有困难的。

由于水平孔道直径不大，要照射小动物（小鼠、大鼠）或只有几只动物的小动物组，或者单只照射像家兔这样的动物，就应该在孔道的出口安装机械装置，使其能移动受照对象，以保证窄束 γ — 中子辐射作用的均匀性（Брегадзе 等，1964）。然而，这势必对小动物产生不连续（断续的）的照射，或对较大动物（豚鼠、家兔）身体局部的不均匀照射。采用反应堆内水泥防护的小室和井以及大直径的垂直孔道，就可以充分利用核反应堆的优点，并同时克服与水平孔道直

径小有关的局限性 (Neary 等, 1957; Batchelor, Edmondson, 1964; Davids, Oude, 1964; Каминкер 等, 1967; Постников, 1969. 1972)。在小室和井的底部装有铀转换靶(图 1)。

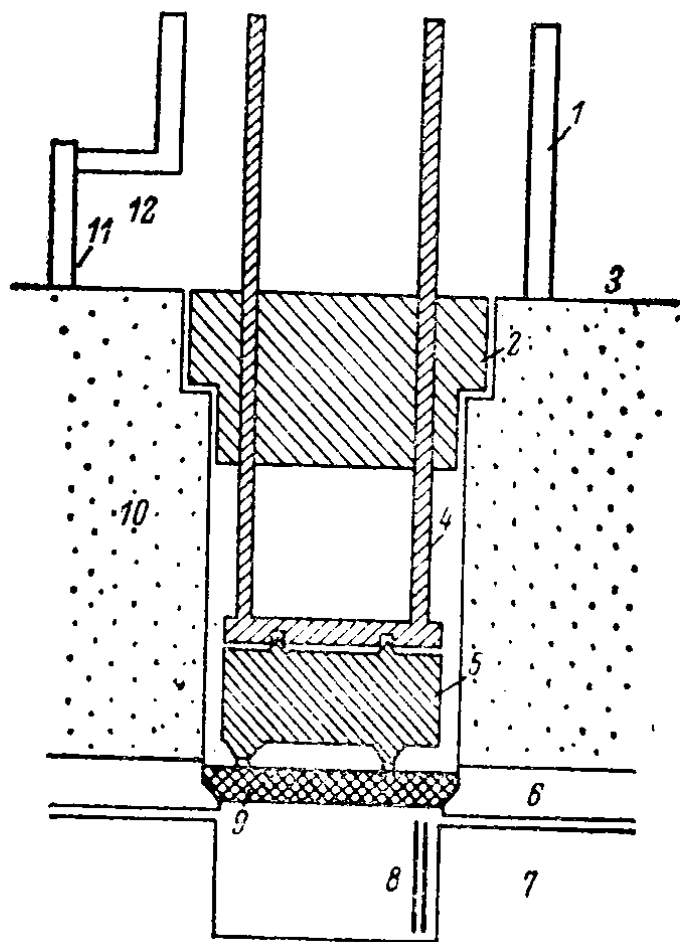


图 1 照射动物用的核反应堆的水泥防护井 (引自 Batchelor, Edmondson, 1964)

1 — 主防护层;
 2 — 防护塞;
 3 — 反应堆盖;
 4 — 提升装置;
 5 — 动物容器;
 6 — 热防护层;
 7 — 石墨反射层;
 8 — 热中子闸门;
 9 — 转换靶;
 10 — 生物防护层;
 11, 12 — 反应堆上的空间。

利用这种装置进行实验很有前途。尤其是利用设备比较简单的大直径垂直孔道进行生物学实验的可能性更大。苏联科学院列宁格勒 Б.П.康斯坦丁诺夫核物理研究所 (Ленинградский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова АН СССР) 的 ВВР-М 反应堆就设有类似的孔道。这个孔道开在距离活性区中心约 1.5 米的反应堆

水泥防护层里，截面为 400×600 毫米大小的椭圆形，孔道深 8 米。孔道的最大范围不仅可以照射小动物，而且也可以照射大动物：照射一只狗或者同时照射两只家兔，还可以照射一大批小动物（小鼠、大鼠、豚鼠）。孔道设备（图 2）

保证了动物生命活动的正常条件和照射动物的均匀性，并且可以在很大范围内改变中子- γ 成分的比例。

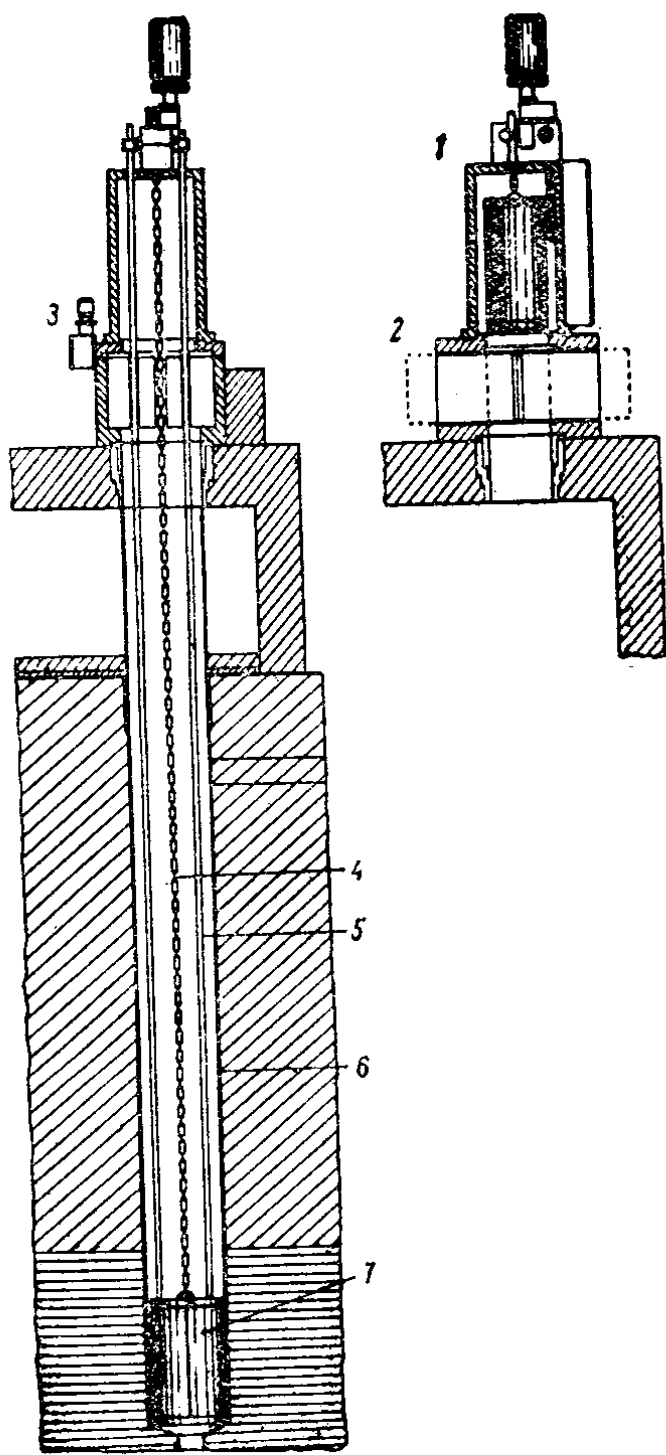


图 2 BBP-M 反应堆
垂直孔道及其设备
1—提升动物容器的
装置；
2—闸板；
3—闸板控制机构；
4—提升链；
5—送气管；
6—电缆；
7—动物容器。

生物学实验用的小室（图 3）是设备的主要部分。在小室内的旋转台上有带格的筐，受照动物放在格子里。

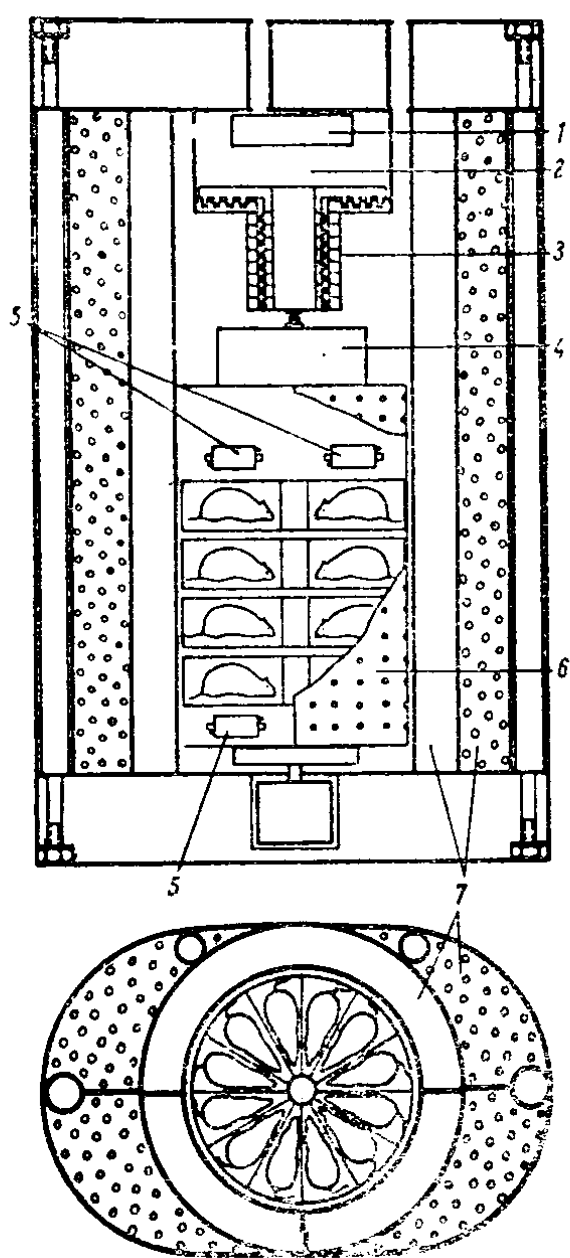


图 3 BBP-M 反应堆垂直孔道中供生物学实验用的小室

1—接线板；
2—气体调节器；
3—集电器；
4—换向部分；
5—电离室；
6—转动筐；
7—铅防护层。

为了消除 γ - 中子场因高度发生的变化，使用了铅、有机玻璃或其他物质作成的矫正滤板，这种滤板放在小室的一些所谓的“窝”内。铅防护层结构可以改变 γ - 中子的比例（可由 3 : 100 变为 4 : 1）。为了减少热中子通量，小室内设置了 1 毫米厚的镉滤板。

小室由用螺钉互相联结的单独结构组成，这便于修理和操纵小室上部和下部的电和机械系统。为了使小室内的温度维持在 $20 - 22^{\circ}\text{C}$ ，并保持正常的气体环境，可沿硬铝管不断地向小室内送进空气。温度调节自动进行。借助气体管道系统可以改变环境的气体成分，通过给冷空气可以降低小室内的温度。所有这些都大大扩大了放射生物学实验的可能性。

小室和它的管道在孔道中的移动是机械化的，并且是遥控进行的，在很大程度上是按给定的程序自动进行的。事先规定了装卸小室的工作人员或进行修理、调试等其他操作的工作人员的辐射安全条件。

根据所述孔道的分布特点(图 4)，相对于活性区和其他水平孔道来说，垂直孔道中的 γ -中子辐射，主要是从活性区发出，经邻近孔道壁(特别是 3 号孔道)散射而来的。在垂直生物孔道内，这种散射辐射源形成的中子通量和 γ 射线，比活性区来的直接辐射强得多。同时，来自活性区的 γ 辐射向生物孔道方向在水平孔道壁上的主要散射区域，比中子散射区域更要远离生物孔道，这实际上改变了生物孔道中 γ -中子的比例，和水平孔道的直接束相比，中子的比例提高了。安装合适的滤板，可以将总剂量中的 γ 成分降至 3%。

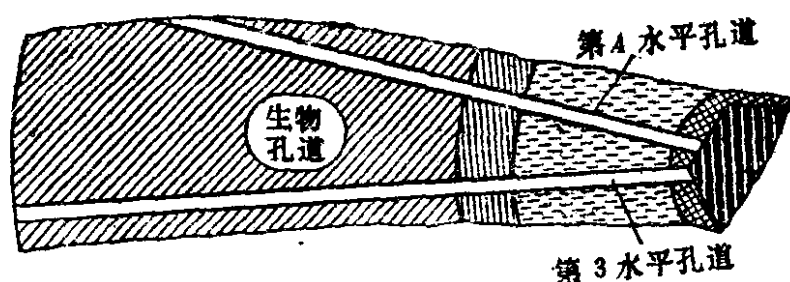


图 4 BBP-M 反应堆垂直生物孔道位置图

开辟这样一个用于多种目的的生物学研究孔道是很合适的。分析 BBP-M 反应堆垂直生物孔道的结构特点,可以提出这类孔道设置的一般方案。Л. Н. Постников (1972) 认为,垂直孔道与作为 γ -中子射线源的水平孔道相切的位置是最佳的。当然,随着这个孔道接近活性区, γ -中子的辐射强度增加。

为了建立一个均匀的中子场,垂直孔道应位于两个水平孔道之间。为此目的,有时可以设置一些堵死的水平孔道,这些孔道与活性区成一定角度,其一端接到垂直孔道上。这个垂直孔道给活性区带来的扰动是不大的,对反应堆工作状态没有什么影响。

水平孔道也可以装备可移动的散射体,这样可以使垂直孔道中的中子能谱发生变化。

一、吸收剂量的分布

在决定中子与各种生物体作用特点的参数中, γ -中子吸收剂量的分布是最重要的。在分析 X 射线和 γ 光子的生物效应时,某一体积内剂量分布的特点同样具有重要的意义。然而,中子的特点是在照射物内比 X 射线和 γ 射线的剂量分布梯度要大得多。因而,在中子照射大动物时,没有关于中子能量空间分布的确切资料,就不能对结果作任何分析。

超热中子向生物组织转移能量的基本形式是粒子与氢、碳、氮、氧核的弹性作用。在组成生物组织的元素中,氢核与中子弹性作用的反应截面最大。所以超热中子转移给氢核的总能量,比转移给氧、碳、氮核的总能量高得多,例如 0.1MeV 的中子,其能量向氢核的转移是向碳或氮核能量转移的 10 倍。不同能量的中子,都存在这种差别(表 1)。生物组织中氢

的含量比碳、氧、氮多得多（表2）。所以，快中子能量的

表 1 快中子向氢、氧、碳、氮核的能量转移

中子能量 (MeV)	能 量 转 移 (相对单位)			
	H	O	C	N
0.10	6.3	0.39	0.66	0.60
0.15	5.4	0.39	0.63	0.51
0.20	4.8	0.40	0.60	0.46
0.30	3.95	0.44	0.56	0.40
0.40	3.45	0.67	0.52	0.36
0.5	3.1	0.65	0.49	0.30
0.6	2.8	0.36	0.46	0.20
0.8	2.4	0.33	0.41	0.23
1.0	2.12	0.89	0.34	0.25
1.5	1.7	0.25	0.30	0.23
2.0	1.4	1.18	0.24	0.20
3.0	1.14	0.13	0.17	0.21
4.0	0.95	0.21	0.27	0.23
5.0	0.83	0.13	0.19	0.18
6.0	0.72	0.16	0.14	0.18
8.0	0.59	0.13	0.21	0.18
10.0	0.47	0.13	0.16	0.16

主要部分是通过和氢核相互作用形成反冲质子而转移给生物体的，借助和较重的核相互作用而转移的能量只是极少一部分。由此可见，生物体由于弹性作用而吸收中子能量，决定于这个生物体的元素组成。不同组织其组成成分是不一样的(表3)。所以，中子对任何器官和组织的损伤，首先由它们的元素组成、局部解剖特点以及它们和周围组织的关系来决定，中子流和伴随中子流的 γ 射线通过这些周围组织时被减弱。

表 2 “平均”生物组织的原子组成

成 分	含量(原子/厘米 ³)
H	6×10^{23}
O	2.45×10^{22}
C	0.9×10^{22}
N	0.13×10^{22}

表 3 哺乳动物某些组织的元素组成 (重量%)

元 素	水	哺 乳 动 物 组 织		
		肌 肉	骨	脂 肪
H	11.1	10.2	6.4	12.5
O	88.9	72.9	41.0	12.5
C		12.3	27.8	75.0
N		3.5	2.7	
S		0.5	0.2	
P			7.0	
Ca			14.7	

此外，中子能量向物质转移的过程不仅限于弹性作用(尽管它是主要的作用方式)，而某些能量是靠非弹性散射和吸收而转移的。图 5 表示了中子和不同元素相互作用的总截面。可以看出，生物组织主要成分的总截面是不一样的，特别是在 3 MeV 以下的中子照射时更是如此。当快中子照射物体时，如果这个物体的大小大大超过粒子的平均自由射程的长度，粒子能减速到热中子水平，并参加和氮、氢核相互作用的放热反应，反应式为 $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ 和 $\text{H}(n, \gamma)\text{D}$ 。和氮核作用的结果产生 0.62 MeV 的质子(在这个反应中形成的 ^{14}C ，其衰变时放出的能量少得可以忽略不计)，和氢核的反应产生 2.2 MeV 的 γ 光子。因为中子的慢化取决于物质的

元素组成和物质层的厚度，因此中子能量以什么形式向生物组织转移,对于不同的组织和处于各种深度的组织是不同的。

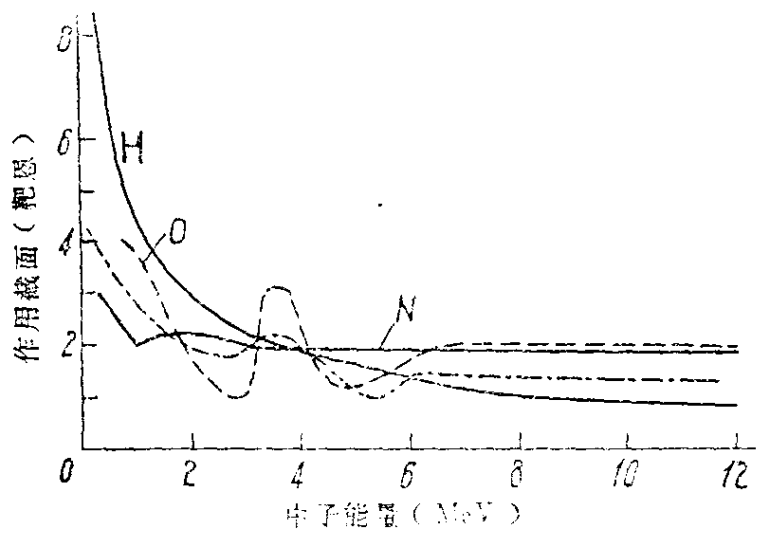


图 5 中子和某些元素的原子核相互作用的总截面和中子能量的关系

用含氢量不同的模型中中子和 γ 射线的剂量分布的数据,以及在组织等效材料制成的模型的不同深度的中子- γ 射线剂量分布的数据(Брегадзе 等 1963;Киричинский 等, 1965) 可以很好地说明上述因素的意义。中子剂量随模型的深度而明显地降低, 但 γ 射线剂量则不改变(图 6)。中子剂量的降低主要取决于材料中的氢含量: 在聚乙烯中, 中子慢化较甚, 在聚苯乙烯中次之, 石墨的慢化作用更差。聚乙烯的氢含量比聚苯乙烯多一倍, 而石墨则完全不含氢。图 7 表示的是在组织等效材料中, 中子剂量随模型深度而降低, 而 γ 射线剂量不发生变化。很自然, 随模型深度的变化, 中子- γ 剂量中 γ 射线的比例越来越大; 例如, 在模型的表面, γ 射线在混合辐射总剂量中低于 15% , 而深度为 5 厘米时, 增加到 35% (图 8)。

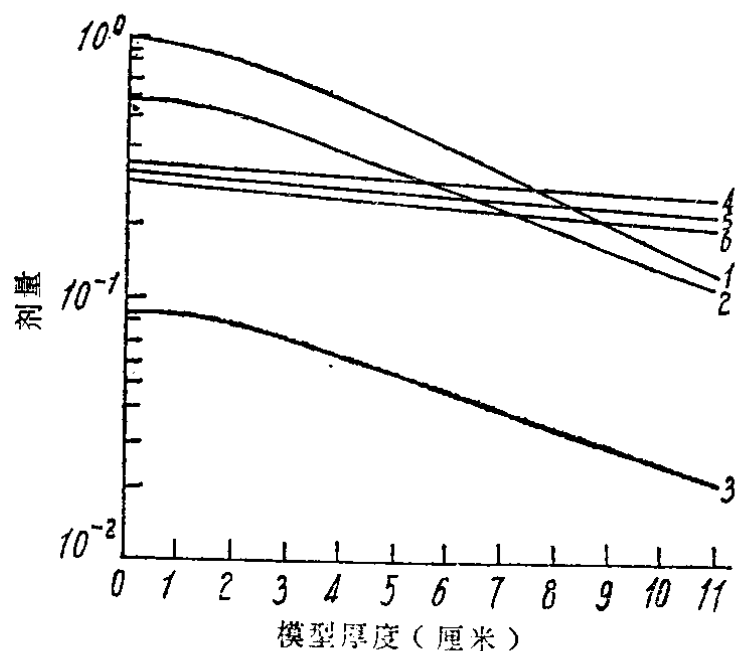


图 6 模型中中子和 γ 射线吸收剂量的分布和模型材料中氢含量的关系 (引自 Исаев, Брегадзе, 1967)

中子剂量: 1—聚乙烯; 2—聚苯乙烯; 3—石墨;

γ 射线剂量: 4—聚乙烯; 5—聚苯乙烯; 6—石墨。

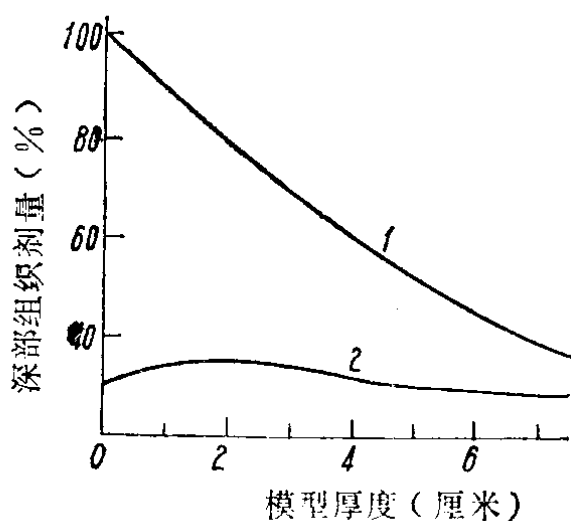


图 7 组织等效材料模型中 (1) 中子吸收剂量和 (2) γ 射线吸收剂量的分布 (引自 Исаев, Брегадзе, 1967)