

信号核素 铯的放射毒理

朱寿彭 著

原子能出版社

前 言

在放射医学领域中,铯是有现实意义的重要的研究课题之一。由于在核燃料铀-235 裂变时,铯的裂变产额很高,且其化学性质与钾相似,极易被机体吸收,能直接参与人体代谢,从而引起人们的重视。铯是核电站事故对生态环境污染的重要信号核素,这在前苏联切尔诺贝利核电站第四号堆发生的核电史上对环境影响最大的一次堆芯破坏事故中得到了证实。在那次事件中,大量放射性物质(约 3.0EBq)释放到外界环境,就地的放射性沉降量达到相当于堆芯储存量的 0.3%~0.5%。随着烟云的飘移,对全球环境引起污染,而放射性铯是在空气及沉降物中浓度最高者之一。经接受人体内放射性监测人员的数据表明,在食入照射中铯-134 以及铯-137 要占 88%以上。在另一方面,在核工厂中核燃料的生产和回收,以及排放放射性废物等的操作环境中释放出来的放射性铯,可通过不同途径的污染而转移到人体中,从而引起内照射危害的实际情况,使得放射性铯对生态环境的影响和对人体内污染的防治研究,成为一个有现实意义的极为重要的课题,尤其是放射性铯对机体引起危害的放射毒理问题,更加引起人们的关注,有必要加以深入研究阐明,以期揭示放射性铯对机体的损伤特点和机理,提供能有效的防治信号核素铯内污染机体时的最佳阻吸收和加速排除等的医学处理措施。

考虑到在生产和操作环境中,信号核素放射性铯有可能通过各种不同途径污染而被机体吸收的实际情况,本专著在

研究内容中包括了:内污染铯的体内滞留过程及吸收剂量估算;铯经完整和损伤皮肤的吸收规律研究;铯的脏器和细胞水平放射自显影示踪研究;铯内污染诱发体细胞放射遗传毒理效应研究;诱发生殖细胞放射遗传毒理效应研究;铯内污染诱发遗传危害的比较放射毒理研究;铯内污染诱发中枢和外周免疫细胞的放射免疫毒理效应研究;以及铯内污染的医学处理,包括对铯的最佳阻吸收措施和显著加速排除效果研究等。从而阐明了铯对机体的损伤特点和机理,提供了对铯内污染机体时的防治措施。

本专著在研究过程中得到国家自然科学基金和江苏省自然科学基金的资助。

著 者

1996. 12. 8

目 录

前言

第一章 铯内污染的体内滞留过程及吸收剂量估算	(1)
第一节 铯内污染的全身水平转运和滞留	(1)
一、整体测量装置测定铯的全身滞留水平	(2)
二、铯的全身滞留方程及半滞留期	(5)
第二节 不同放射性活度铯摄入体内的吸收剂量估算	(6)
一、估算吸收剂量公式	(6)
二、不同放射性活度铯的吸收剂量	(6)
第三节 铯内污染在骨骼中转运和滞留及吸收剂量估算	(7)
一、铯内污染在骨骼中转运和滞留	(7)
二、铯在骨骼中的吸收剂量估算	(8)
第四节 铯内污染在睾丸中转运和滞留及吸收剂量估算	(9)
一、铯内污染在睾丸中转运和滞留	(9)
二、铯在睾丸中的吸收剂量估算	(10)
第二章 铯经完整和损伤皮肤的吸收	(12)
第一节 铯经完整皮肤的吸收	(12)
一、铯沾染完整皮肤的滞留动态	(13)
二、铯经完整皮肤的吸收过程	(14)
第二节 铯经损伤皮肤的吸收	(14)
一、损伤皮肤的制备	(14)
二、铯经损伤皮肤的吸收过程	(15)
第三节 铯经皮肤吸收入器官的滞留量	(16)

一、铯经完整或损伤皮肤吸收入器官滞留量比较	(16)
二、完整皮肤的防护作用	(16)
第三章 铯的脏器和细胞水平放射自显影示踪研究	(18)
第一节 铯的放射自显影示踪原理	(19)
一、放射自显影示踪潜影形成过程	(19)
二、潜影的显影过程	(22)
三、显影条件的选择	(25)
四、潜影的定影过程	(27)
五、定影条件的选择	(28)
第二节 铯的脏器水平宏观放射自显影示踪	(30)
一、冰冻脏器水平放射自显影示踪操作	(31)
二、使用同一乳胶层的不同组织脏器水平放射自显影示踪	(31)
第三节 铯的细胞水平微观放射自显影示踪	(33)
一、血涂片微观放射自显影示踪	(34)
二、骨髓涂片微观放射自显影示踪	(37)
三、组织冰冻微观放射自显影示踪	(38)
第四节 铯的细胞水平微观放射自显影荧光增敏示踪	(42)
一、增敏途径探讨	(43)
二、增敏效果评价	(44)
第四章 铯内污染诱发体细胞的放射遗传毒理效应研究	(49)
第一节 铯内污染诱发骨髓细胞染色体畸变及其持续作用	(49)
一、铯内污染诱发骨髓细胞染色体畸变	(50)
二、铯内污染诱发骨髓细胞染色体畸变的持续作用	(53)
第二节 铯内污染诱发骨髓 PCE 微核率增生及其持续作用	(56)
一、铯内污染诱发骨髓 PCE 微核率的增生	(56)

二、铯内污染诱发骨髓 PCE 微核率增生的持续作用	(58)
第五章 铯内污染诱发生殖细胞的放射遗传毒理效应研究	(61)
第一节 铯内污染诱发精原细胞染色体畸变及其持续作用 ...	(62)
一、铯内污染诱发精原细胞染色体畸变	(62)
二、铯内污染诱发精原细胞染色体畸变的持续作用	(66)
第二节 铯内污染诱发初级精母细胞染色体畸变	(69)
第三节 铯内污染诱发精子畸形及其持续作用	(73)
一、铯内污染诱发精子畸形	(73)
二、铯内污染诱发精子畸形的持续作用	(77)
第六章 铯内污染诱发遗传危害的比较放射毒理学研究	(80)
第一节 铯内污染诱发体细胞和生殖细胞畸变效应比较研究	(81)
一、铯内污染不同活度诱发同体骨髓细胞与精原细胞的畸变产额比较	(82)
二、铯内污染不同阶段诱发同体骨髓细胞与精原细胞的畸变产额比较	(83)
第二节 铯与 α 、 β 辐射体核素诱发生殖毒性比较研究	(85)
一、不同辐射体核素在睾丸滞留分数及累积吸收剂量比较	(86)
二、不同辐射体核素诱发精子畸形效应比较	(91)
三、不同辐射体核素诱发精原细胞染色体畸变效应比较 ...	(99)
第七章 铯内污染诱发免疫细胞的放射免疫毒理效应研究	(107)
第一节 铯内污染诱发中枢免疫细胞的放射免疫毒理效应	(109)
一、骨髓细胞的制备和培养	(110)

二、胸腺细胞的制备和培养	(111)
三、标本制备和液闪测量	(111)
四、铯对骨髓和胸腺免疫细胞增殖能力的影响	(111)
第二节 铯内污染诱发外周免疫细胞的放射免疫毒理效应·····	(113)
一、脾脏 T、B 淋巴细胞的制备和培养	(114)
二、外周血淋巴细胞的制备和培养	(114)
三、测量标本制备和液闪测量	(115)
四、铯对外周血 T、B 淋巴细胞转化能力的影响	(115)
五、铯对脾脏 T、B 淋巴细胞转化能力的影响	(117)
第三节 低剂量铯诱发免疫细胞的兴奋效应·····	(120)
第八章 铯内污染的医学处理研究	(123)
第一节 铯内污染的处理原则和措施·····	(125)
第二节 阻吸收铯的处理措施·····	(126)
一、胃肠道阻吸收措施	(127)
二、呼吸道阻吸收措施	(130)
三、皮肤和伤口阻吸收措施	(131)
第三节 加速排除内污染铯的处理措施·····	(132)
一、理想的络合剂条件	(133)
二、络合剂的使用原则	(135)
三、喹胺酸对内污染铯的促排效果	(137)
参考文献	(140)

第一章 铯内污染的体内滞留过程 及吸收剂量估算

考虑到铯是重核裂变产物的重要组分,是核电站事故释放的信号核素,它在核燃料的核裂变产物中所占的份额很高,因而其对人类和生态环境的污染,已引起人们极大的关注。我们通过实验观察到放射性铯极易通过各种途径被机体吸收,且吸收的份额极高,极易导致机体的内照射损伤效应,从而使得放射性铯对生态环境的影响和对人体内污染的危害,成为一个有现实意义的重要课题。因此,有必要揭示放射性铯内污染机体时在整体和一些主要器官组织中的滞留过程及其内照射剂量估算,以及损伤效应的发生和预后,只有了解这些过程,才能正确处理机体在受铯内污染时的防、诊、治问题。内照射核素对机体的作用,是与其在体内的滞留过程密切关联的,决定于其在体内作用的表现和延续。为此,了解铯内污染机体时的行径规律,揭示其在体内的蓄积部位所在及其累积吸收剂量估算,对于阐明放射性铯对机体的作用,具有决定性的意义。

第一节 铯内污染的全身水平转运和滞留

作为信号核素的放射性铯,研究其内污染机体时的整体水平转运和滞留,目的在于阐明放射性铯由不同途径吸收入

机体后在体内的转运过程,滞留定位,以及排除动态等。这些动态观察,关系到确定放射性铯在整体水平的剂量分布,和各种有关组织器官的损伤效应和预后。只有了解这些过程,才能在机体受到裂片核素放射性铯内污染时能恰当的进行医学处理措施。其对机体的作用和持续时间,取决于其在器官组织或体液中的滞留定位和生物转运过程。因此,了解体内污染裂片核素铯的转运滞留规律及其吸收剂量水平,是阐明其对机体作用的基础。

一、整体测量装置测定铯的全身滞留水平

实验观察选用 Wistar 纯品系雄性大白鼠。使用的铯-134 为放射纯和化学纯的 $^{134}\text{Cs}_2\text{CO}_3$,其放射性比活度为 703MBq/ml。观察内污染放射性铯的全身滞留动态是经尾静脉注入放射性活度为 9.25 kBq/g(体重)的铯-134 进行的,用注射用水稀释至所需工作液的放射性活度,使注射体积为 0.5 ml/100 g(体重)。然后用我们设计的大白鼠整体测量装置分别在 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 17, 20, 23, 28 和 33 天的不同时刻,进行全身滞留的铯放射性活度测定。

整体测量装置探测仪器结构见图 1-1 所示。

为了提高仪器的探测效率,本装置选用了大直径的光电倍增管和 $\phi 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的 NaI(Tl)闪烁体。图 1-2(1)为正在进行放射性测定的大白鼠整体测量装置全貌,并将大白鼠测量室设计在紧靠光电倍增管的光阴极部分,见图 1-2(2),此时已将大白鼠放置于固定器中,正向被铅室屏蔽的测量室运送。图 1-2(3)所示为装有大白鼠的固定器已放置到测量室中。随后即可关闭铅室屏蔽门,开始对大白鼠全身水平的

放射性铯的转运和滞留动态进行测定,如图 1-2(4)所示。在打开铅室门后,大白鼠测量室连同实验动物可一并取出,这样可便于在测试中更换。大白鼠测量室的底部是密封的,可以防止动物的排泄物污染铅室。

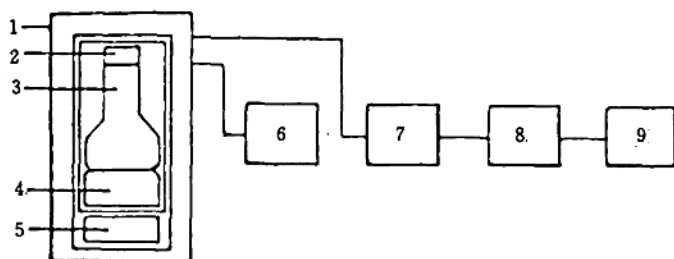


图 1-1 整体测量装置探测仪器结构图

1. 铅室; 2. 射极跟随器; 3. 光电倍增管 GDB-100;
4. $\phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ NaI(Tl)晶体; 5 大白鼠测量室;
6. FH-1034A 高压电源; 7. FH-1002A 放大器;
8. FH-1006A 单道脉冲幅度分析器; 9. FH-1011A 定标器

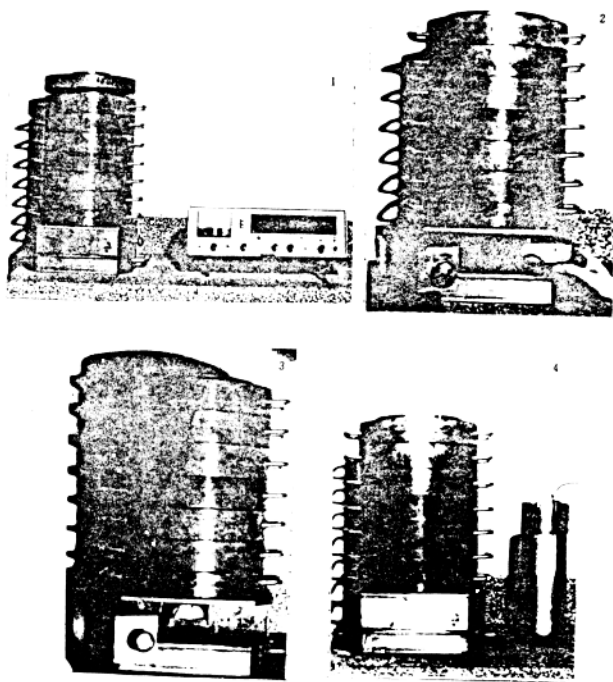


图 1-2 大白鼠整体测量装置图

- (1) 正在进行放射性测量的大白鼠整体测量装置全貌；
- (2) 大白鼠放置于固定器中，正向被铅室屏蔽的测量室运送；
- (3) 装有大白鼠的固定器已放置到测量室中；
- (4) 已关闭铅室屏蔽门，开始进行放射性测量；

二、铯的全身滞留方程及半滞留期

在机体摄入放射性铯后 33 天内的所有观察点用整体测量装置所测得的数据,绘于图 1-3 中。从图中可见,在自然排除情况下,早期体内的铯-134 滞留量下降很快,而随着时间的延长,则放射性铯从体内的排除渐趋缓慢。将不同时刻的滞留百分数在半对数坐标纸上作出散点图形,可见滞留百分数与时间之间存在着指数依赖关系,用最小二乘法配线拟合的滞留方程为:

$$\begin{aligned} R(t) &= 18.04e^{-\frac{0.693}{0.07}t} + 45.13e^{-\frac{0.693}{18.14}t} \\ &= 18.04e^{-9.3175t} + 45.13e^{-0.0423t} \end{aligned}$$

其相关系数 $r = 0.99$

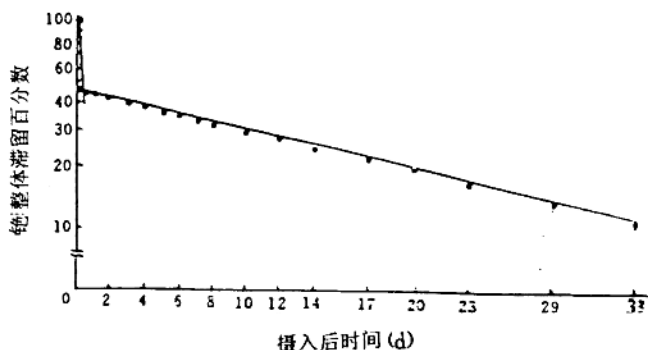


图 1-3 ^{134}Cs 静脉摄入体内后的滞留过程

由此得出铯-134 在大白鼠体内的滞留过程可分为快慢不同的两个组分,即快组分的半滞留期为 $T_1 = 0.07\text{d}$,而慢组分的半滞留期 $T_2 = 16.14\text{d}$ 。

第二节 不同放射性活度铯摄入体内的吸收剂量估算

一、估算吸收剂量公式

观察共分 5 个实验组,并进行铯-134 的体内吸收剂量估算。由尾静脉注入铯-134 的放射性活度分别为:0.37,1.85,9.25,46.25 和 231.25kBq/g(体重)。于是可根据放射性铯的全身滞留数据,拟合滞留方程,据此,可对体内滞留不同放射性活度的铯-134 的吸收剂量按如下公式进行计算:

$$D(t) = \frac{51.2E}{m} \int_0^t A(t) dt$$

式中, $D(t)$ 为 t 时刻的全身吸收剂量,以 cGy 计; E 为机体对每次铯-134 衰变的平均有效吸收能量(1.1 Mev);而 $A(t)$ 为实测放射性活度,以 kBq 计; f 为吸收分数; m 为全身的质量,以 g 计; 51.2 为换算系数,来自 $3.7 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-8} \times 60 \times 60 \times 24$,其中 3.7×10^4 为 37kBq 每秒的衰变数,再除以 37,即得 1kBq 每秒的衰变数,而 $24 \times 60 \times 60$ 为 1d 的秒数。所以实际换算系数为 1.38。

二、不同放射性活度铯的吸收剂量

根据上述吸收剂量的公式,计算出每克体重注入 0.37,1.85,9.25,46.25 和 231.25kBq 的放射性铯后 2 和 3d 的全

身吸收剂量列于表 1-1 中。

表 1-1 静脉注入机体不同放射性活度¹³⁴Cs 后
2 和 3d 的全身吸收剂量

组别	实验大白鼠数	注入放射性活度(kBq/g)	2 和 3d 后的全射吸收剂量(cGy)	
			2d	3d
1	6	0.37	0.64	0.91
2	6	1.85	3.20	4.56
3	6	9.25	16.02	22.81
4	6	46.25	80.10	114.02
5	6	231.25	400.52	570.12

第三节 铯内污染在骨骼中转运和 滞留及吸收剂量估算

追踪放射性铯在骨骼中的滞留过程和其相应的吸收剂量贡献,将提供信号核素放射性铯可能诱发体细胞相应的辐射损伤效应。因为放射性核素对机体的作用特性,与其在体内的选择性转运和滞留定位过程有着密切的关系,并与其作机理紧密关联。

一、铯内污染在骨骼中转运和滞留

实验选用 BALB/c 纯品系雄性小白鼠,随机分成 6 个组,分别由尾静脉注入铯-134,其放射性活度是 46.25 kBq/g(体重)。然后经 10h,2d,6d,15d,30d 和 47d 的不同时间间隔阶

段,由颈动脉放血处死动物,剥离取左侧股骨,称重后放入平杯型井型 闪烁计数杯中,在 EKCO 井型闪烁计数器中进行放射性活度测定。所用晶体为井式 NaI(Tl)晶体。实验观察到放射性铯在骨组织中滞留下降低较快,见表 1-2 中所示。我们拟合了铯-134 在骨骼中的滞留方程为:

$$R(t) = 0.0029e^{-0.121t}$$

式中, $R(t)$ 为 t 时刻在骨骼中存留的放射性核素相当于初始全身中含量的分数; t 为自放射性核素进入体内所经过的时间(d)。由上式可导出其半滞留期为 5.73d。

表 1-2 机体静脉注入 ^{134}Cs 46.25kBq/g 后不同
间隔阶段在骨骼中的滞留量

^{134}Cs 内污染时间	10h	2d	6d	15d	30d	47d
实验小白鼠数	5	5	5	5	5	5
骨骼中滞留活度(kBq)	4.71	2.34	1.17	0.34	0.04	0.02

二、铯在骨骼中的吸收剂量估算

关于在骨组织中铯-134 的吸收剂量估算,我们采用 MIRD 提出的方法作了适当的修正后为:

$$\bar{D}(\gamma_k) = \sum_k A_k S(\gamma_k \leftarrow \gamma_k)$$

式中, $\bar{D}(\gamma_k)$ 靶器官 γ_k 的吸收剂量,单位为 mGy; A_k 为源器官 γ_k 中的累积放射性活度,单位为 kBq · d; S 为 mGy/(kBq · d)

的换算值。

通过滞留方程,先求得铯-134 的累积放射性活度,然后根据上述公式,计算出机体由静脉摄入 46.25kBq/g 的铯-134 后不同间隔阶段在骨组织中的吸收剂量,列于表 1-3 中。可见随着放射性铯内污染时间的增长,其在骨骼中的滞留量可迅速下降,所以其吸收剂量增长较缓慢。

表 1-3 机体静脉注入 ^{134}Cs 46.25 kBq/g 后不同
间隔阶段在骨骼中的吸收剂量

^{134}Cs 内污染时间	10h	2d	6d	15d	30d	47d
实验小白鼠数	5	5	5	5	5	5
骨骼中吸收剂量(mGy)	3.98	15.00	40.50	85.90	130.49	156.00

第四节 铯内污染在睾丸中转运和 滞留及吸收剂量估算

关于放射性铯在睾丸中的滞留过程和其相应的吸收剂量贡献,将提供信号核素放射性铯可能诱发生殖细胞相应的辐射损伤效应。因此,有必要及时地进行内污染的监测,并且及时地估算放射性铯的内照射剂量,以便尽快地采取必要的措施。

一、铯内污染在睾丸中转运和滞留

实验中选用的 BALB/c 纯品系雄性小白鼠的随机分组及摄入铯-134 的放射性活度同第三节实验中所述。取受放射性铯内污染后经不同间隔阶段处死的各组动物,迅速解剖,立

即分离出睾丸组织,随后取左侧睾丸称重,分别放置到平杯型井型闪烁计数杯中,在 EKCO 井型闪烁计数器内进行放射性活度测定。然后按睾丸中所含的放射性活度,观察铯-134 在睾丸中的滞留动态,如表 1-4 中所示。我们拟合了铯-134 在睾丸中的滞留方程为

$$R(t) = 0.0048e^{-0.138t}$$

式中, $R(t)$ 为 t 时刻在睾丸内存留的放射性核素相当于初始全身含量的分数, t 为自放射性核素进入体内所经过的时间。可见其半滞留期为 5.21d, 表明铯-134 在睾丸中的滞留量下降是较快的。

表 1-4 机体静脉注入 ^{134}Cs 46.25 kBq/g 后不同
间隔阶段在睾丸中的滞留量

^{134}Cs 内污染时间	10h	2d	6d	15d	30d	47d
实验小白鼠数	5	5	5	5	5	5
睾丸中滞留活度(kBq)	3.96	3.82	2.63	0.48	0.05	0.01

二、铯在睾丸中的吸收剂量估算

对睾丸中铯-134 内照射的吸收剂量估算,我们仍采用 MIRD 提出的方法,作了适当的修正,通过滞留方程,求得放射性铯在睾丸中的累积放射性活度,再用下式进行计算:

$$\bar{D}(\gamma_i) = \sum_k A_k S(\gamma_k \leftarrow \gamma_i)$$

式中, $\bar{D}(\gamma_i)$ 为靶器官 γ_i 的吸收剂量,单位为 mGy; A_k 为源器官 γ_k 中的累积放射性活度,单位 kBq · d; S 为 mGy/(kBq ·