

铀毒理学

刘树铮 孙世荃 等著



原子能出版社

铀 毒 理 学

著 者 刘树铮 孙世荃

(以下按姓氏笔划为序)

朱寿彭 苏士杰 陈如松 陈绍嘉
周永增 金玉珂 赵经涌 傅铁城

原 子 能 出 版 社

(京)新登字 077 号

图书在版编目(CIP)数据

铀毒理学/刘树铮 孙世荃等著. —北京:原子能出版社,1995.6

ISBN 7-5022-1328-7

I. 铀… II. 刘… III. 铀-中毒-放射毒理学 IV. ①R818.73②R818.03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 02489 号

内 容 简 介

本书以我国学者自己的研究成果为主,重点介绍铀中毒的实验病理学研究、铀的生物化学效应、铀的血液学和细胞遗传学效应、铀的免疫学效应、浓缩铀生物效应的实验研究等,并对铀职业性暴露的健康危害进行了评价。为了便于更多的读者阅读,书中还增加了一部分与铀有关的基础理论。本书既是中国铀毒理学的第一部专著,也是中国铀毒理学研究的史书。

本书可供从事放射医学、辐射防护、毒理学、劳动卫生学和核能开发的科技人员以及有关院校师生阅读。



原子能出版社出版发行

责任编辑:李 镁

封面设计:冯永路 插图:刘元敏

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本 850×1168mm 1/32 印张 10.44 字数 280 千字

1995 年 6 月北京第 1 版 1995 年 6 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000

定价:13.50 元

调查研究，总结经验，为核
工业发展提供医疗保障
依据。

陈敏章

一九五五年六月

前 言

铀是核工业最基本的原料,从铀的勘探、开采、选矿、加工、精炼直到天然铀金属元件的制造,工作人员在生产过程中均可能接触小剂量的天然铀。长期接触小剂量天然铀对职工健康的影响,是党和政府以及学术界十分关注的问题。我国在50年代中期建立和发展核工业以来,一直重视这方面的研究,从动物实验、临床观察和流行病学调查等方面进行了大量的工作,积累了有价值的科学资料,提出了有创见的观点,取得了一批有较高水平的成果。这些为核工业生产的卫生防护和医学监督奠定了重要的科学基础。“八五”期间秦山和大亚湾核电厂相继建成,并网发电,标志着我国能源生产已步入一个新阶段。随着我国社会主义经济建设的迅猛发展,能源需求急速上升,“九五”期间和21世纪初期核能的加速发展势在必行。这必将促进核原料和燃料生产的发展,卫生防护和医学监督必须紧紧跟上经济建设发展的要求,在当前形势下,组织国内有关专家编撰《铀毒理学》一书,认真总结我们自己的经验,并为今后的研究指引方向,有着十分重要的意义。

核工业职业危害因素较多,职工接触的有毒有害因素中以放射性物质最为重要。铀生产过程中不同环节的主要致害因素各异,如铀矿开采中坑道氡及其子体,铀加工生产中气载铀尘,均有可能通过呼吸道进入体内造成危害。核工业安防卫生部门对此非常重视。根据党中央制定的“自力更生为主,争取外援为辅”的方针,动员了全国各有关研究机构协作攻关,邀请著名专家如中国医学科学院放射医学研究所徐秀凤教授、白求恩医科大学刘树铮教授、中国辐射防护研究院孙世荃和陈如松研究员以及苏州医学院朱寿彭教授等,就铀毒理学的有关内容,特别是核工业科研和生产中提出的实际问题进行了较系统的研究,有的课题延续十年之久。这些研究涉及铀的损害器

官,慢性铀中毒的可能性,铀对肝脏、神经系统、免疫系统、生殖系统和造血功能的影响,可溶性与难溶性铀化合物、天然铀与浓缩铀的致害特点,铀的致癌和遗传危险等,我国学者仔细分析了国外有关铀毒理学研究的有关资料,在自己实践的基础上对许多问题提出了创见。例如,系统的实验证明,肾脏是铀中毒的主要损害器官,肾损害的发生在时间上早于肝脏,在程度上重于肝脏;根据实验研究和临床观察基本否定了职业暴露条件下发生慢性铀中毒的可能性,工作人员中见到的肝脏变化主要与传染因素有关;在人体检查和动物实验中发现,难溶性天然铀尘吸入量较大、暴露时间较长时可出现细胞免疫功能下降,脱离或少接触后免疫功能的变化可以恢复;细胞遗传学研究证明,长期接触难溶性天然铀的职工染色体畸变无明显变化,而姊妹单体交换率则显著上升等等。这些研究结果都具有重要的理论和实践价值,加深了人们对职业性铀暴露的认识,澄清了以往的一些模糊观念。

本书以我国学者自己的研究资料为主,重点介绍铀中毒的实验病理与研究、铀的生物化学效应、铀的血液学和细胞遗传学效应、铀的免疫学效应、浓缩铀生物效应的实验研究等,并对铀职业性暴露对健康的危害进行了评价。本书既是中国铀毒理学的第一部专著,也是中国铀毒理学研究的史书。为了使本书适用于更多的读者,编者增加了一部分与铀有关的基础理论,便于参考。

刘树铮教授、孙世荃研究员负责本书的统稿、定稿工作。本书由于内容取自多单位、多课题的研究成果,且由多作者执笔撰写,尽管两位专家付出了艰辛的劳动,反复推敲修改,难免仍有不尽如人意之处,尚希读者批评指正。

吴 企

1994 年 12 月

目 录

第一章 铀的辐射和化学特性	(1)
一、概 述	(1)
二、铀的辐射特性	(4)
三、铀的化学特性	(10)
参考文献	(15)
第二章 铀的生产工艺	(17)
一、概 述	(17)
二、铀生产工艺简介	(18)
三、生产工艺中有害因素及其暴露水平	(25)
参考文献	(33)
第三章 铀在体内生物转运规律	(34)
一、概 述	(34)
二、铀的吸收规律	(36)
三、铀在体内分布规律	(50)
四、体内铀的排除规律	(63)
参考文献	(69)
第四章 铀作业人员的内照射剂量估算	(72)
一、内照射个人监测	(72)
二、铀内照射剂量估算方法	(76)
三、铀作业人员内照射剂量评价	(98)
参考文献	(105)
第五章 铀中毒的病理学研究	(106)
一、概 述	(106)
二、急性铀中毒时肾脏的损害与修复	(107)
三、慢性铀中毒时肾脏损害的特点	(115)

四、铀中毒时络合剂治疗的肾脏损害研究	(118)
五、铀中毒时其它器官的病理学损害	(124)
参考文献	(131)
第六章 铀的生物化学效应研究	(140)
一、概 述	(140)
二、铀致肾脏损伤的生物化学基础	(140)
三、肾脏损伤的生物化学变化	(148)
四、其它生物化学指标的变化	(158)
参考文献	(164)
第七章 铀血液学和细胞遗传学研究	(169)
一、铀血液学	(169)
二、铀细胞遗传学	(190)
参考文献	(200)
第八章 铀的免疫学效应	(206)
一、概 述	(206)
二、铀作业人员免疫学变化	(213)
三、铀免疫效应的实验研究	(226)
四、铀免疫效应研究的意义	(234)
参考文献	(236)
第九章 浓缩铀生物效应的实验研究	(241)
一、概 述	(241)
二、浓缩铀诱发遗传毒理效应	(241)
三、浓缩铀诱发免疫毒理效应	(258)
参考文献	(262)
第十章 铀作业事故的医学观察及处理	(266)
一、概 述	(266)
二、铀作业事故的情况	(266)
三、国内外事故案例报告	(270)
四、铀作业事故的医学应急处理	(278)

参考文献	(284)
第十一章 铀的剂量限值和卫生防护	(287)
一、铀的剂量限值	(287)
二、天然铀生产的卫生防护	(297)
参考文献	(310)
第十二章 铀职业性暴露的健康危害评价	(312)
一、面向我国核工业的铀毒理学研究	(312)
二、铀职业性暴露的肾脏损害	(315)
三、铀中毒性肝炎问题	(317)
四、铀作业人员的血液学变化	(319)
五、铀的辐射致癌危险	(320)
六、铀的全身性作用	(323)
参考文献	(324)

第一章 铀的辐射和化学特性

一、概 述

(一)铀在自然界的存在

铀是重要的天然放射性元素,是核工业的最基本原料。铀的地球化学性质非常活泼,易于迁移分散。因此,它在自然界的分布很广。地壳中铀的平均含量为 $4 \times 10^{-6}(m/m)$, 比金、银、汞和铂都高。在海水中的含量为 $3.3 \times 10^{-9}(m/m)$, 总量达 45 亿吨。在温泉、湖水、河水和有机体中也都有少量铀,甚至宇宙空间也有微量铀存在^[1]。

铀在自然界的存在状态,大体可分为三种类型:其一,呈矿物状态——在地壳中由于天然的物理化学和生物作用而形成的;其二,呈类质同象状态——在物质的晶体结构中的某离子,被铀的离子所取代,而该物质的晶体结构不变。如独居石和磷灰石中的铀,即属这一类型;其三,呈细分散状态——铀呈极细小的质点或呈离子状态被某些矿物吸附而形成。其吸附形式有分子状态吸附和离子状态吸附两种。这类存在状态的铀比较常见。

自然界中尚未见有元素状态的铀存在。铀总是以四价或六价离子与其它元素化合而呈矿物状态。现已查明的含铀矿物和铀矿物已多达 200 余种,但可作为工业资源的铀矿物仅十余种。按其成因分类,可分为原生矿物和次生矿物两大类^[2]:①原生铀矿物,是在地下深处由岩浆活动和地下水活动而形成的铀矿物。原生铀矿物中的铀以四价为主,常见的主要有晶质铀矿物和沥青铀矿,都是铀的氧化物。这类矿物外观呈黑色或黑灰色,具有沥青光泽,是铀工业的重要资源。②次生铀矿物,是在地表及近地表的条件下生成的铀矿物,是

原生铀矿物由于暴露在地表或受地下水作用,遭到风化、分解、蚀变后重新聚集而成的矿物。其特征是矿物外观为鲜艳的绿、黄、橙、红、褐色,多呈片状,透明或半透明,相对密度小,如钙铀云母、钾钒铀矿等,以六价铀为主。

在地壳中,铀的总含量虽高,但由于铀具有易于迁移分散的性质,难于集中形成富矿床。因此,铀被看作“稀有”元素。铀矿床的含铀量一般为百分之几到万分之几。而在大多数铀矿床中,铀的平均品位小于 0.2%。

铀可作为反应堆的核燃料和核武器的主要原料。在工业、化学、医学和生物学方面,铀的化合物被用作原料、触媒剂及试剂^[3,4],具有广泛的使用价值。

(二)铀在核能应用中的地位

人类一直在为扩大能源,提高支配自然的能力而斗争。经过长期的努力,终于首先从重核 ^{235}U 的裂变中大规模地获取了核能。当一个 ^{235}U 原子核吸收一个中子后,即裂变成两块质量相近的“碎片”,同时释放出巨大的能量和两三个中子;这两三个新生成的中子,在一定条件下又可引起新的铀核裂变,如此连续下去,裂变的链式反应就可以自持进行下去。这种核裂变反应的发现,使人为地促进原子核内部结构发生变化成为可能,人们得以利用一种新的巨大能源——核能。一般说来,1kg ^{235}U 全部裂变反应后所释放出的能量和 2500 吨无烟煤完全燃烧所释放的能量相当。所以 ^{235}U 在核能应用中具有显要的地位。

核能可用于和平目的,也可用于军事目的。目前,核能的利用大致可以包括四个方面的内容:

1. 核动力

(1)发电 从造福人类的长远目标来看,核能应用的方向应该是从核反应堆可控的链式裂变反应中持久地获得能量。而核电站的建成,为核能的和平利用展示了广阔的前景。铀作为核燃料可获得的能

量是惊人的,如在快中子增殖堆中,1吨天然铀约等于100万吨煤燃烧释放的能量,可生产 $30 \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电。因此,利用核能发电,是核能和平利用的最重要方面,也是解决某些国家当前能源短缺的现实途径。核电站与常规的火力发电站相比,其主要优点是:①燃料的能量密度高。因而利用核能可大大节省燃料的运输量和贮存量。②发电成本低。目前有不少国家的核电成本已低于常规的火力发电。今后随着单堆功率的增大和技术的改进,核电成本还会进一步降低。③污染环境较轻。在火力发电站中煤或其它有机燃料的燃烧,要向大气排放大量的 CO 、 CO_2 和 SO_2 等有害气体。而核电站的三废排放量较少,并且处于严密的监督之下,是较清洁的能源。④在一些根本无法建立常规电站的地方,如交通极其不便的高山、海岛和沙漠等,采用核电站具有更加突出的优越性。目前,世界上已有30多个国家和地区建成了核电站,法国核发电量已占其本国总发电量的74.5%。

(2) 推进动力 目前,核潜艇在使用核动力推进技术方面已取得的成功。由于核动力推进不需要消耗氧气,因而核潜艇能长期潜在水下航行。其它应用核动力推进的实例有核动力航空母舰、核动力破冰船等。

(3) 工业用热 利用核反应堆直接给工业提供热能已经实现。但是,由于反应堆供热的温度受到冷却剂温度的限制,目前核能的这种应用方式主要限于低温供热的场合。

(4) 核炸药 铀作为核炸药要比化学炸药便宜,可用在开凿运河、山口等巨大的土石方工程;破碎地下含油、气岩层以提高油、气产量;开发地热等。

2. 核武器

(1) 原子弹 铀在核能事业中的应用,是从研制核武器开始的,原子弹正是由于 ^{235}U 等重核裂变能瞬时释放出巨大的能量而具有强大的杀伤力。

(2) 氢弹 是利用原子弹爆炸时产生的高温来引发氘、氚聚变反应的另一类核武器。

3. 辐射能源

对放射性核素辐射能量的应用,是核能利用的一个重要方面。这种能量要求虽然不大,但像长寿命核素 ^{235}U 等的放射性能经久运用,用它就可以制成小巧而可靠、耐用的能源。这类能源目前已广泛应用于宇宙飞船、人造卫星、无人管理的灯塔和极地气象站等许多方面。

4. 同位素应用

铀核裂变时,能产生 200 多种放射性核素。这些放射性核素及其射线在各方面的应用^[3],为和平利用核能开辟了另一个新的领域^[4]。

二、铀的辐射特性

铀是核工业的主要核燃料,它有质量数从 226~240 的 15 种放射性同位素,其中 ^{234}U 、 ^{235}U 和 ^{238}U 是天然放射性同位素。天然铀是这三种天然放射性同位素的混合物,有关天然铀的主要辐射特性列于表 1.1 中,可见如按放射性活度计,则 ^{238}U 和 ^{234}U 各占 48.9%, ^{235}U 仅占 2.2%。而如按质量计,天然铀中的 99.28%是 ^{238}U ,而 ^{235}U 的丰度占 0.714%, ^{234}U 只占 0.0055%。它们间的丰度比值是: $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}=17325\pm 555$; $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.80\pm 0.15$ ^[5]。

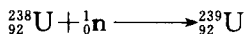
表 1.1 天然铀中三种同位素的主要辐射特性

同位素	丰度, %	物理半衰期, a	α 粒子能量, MeV	比活度, Bq/g	占每克天然铀的比活度, Bq/g	占每克天然铀活度的百分比, %
^{234}U	0.0055	2.48×10^5	4.76(74%); 4.72(26%)	2.28×10^8	1.23×10^4	48.9
^{235}U	0.7140	7.13×10^8	4.40(83%); 4.58(10%); 4.20(4%); 4.47(3%)	7.92×10^4	5.70×10^2	2.2
^{238}U	99.28	4.49×10^9	4.18(100%)	1.24×10^4	1.23×10^4	48.9

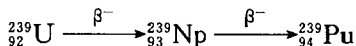
(一) 铀的衰变系

从 1896 年 Becquerel 在一个偶然的场合中发现了铀的放射性之后,人们又发现沥青铀矿、铜铀云母等矿物的放射性比相应的纯铀盐的放射性要高,这说明铀矿中还存在有其它放射性元素,其量虽然比铀少,而放射性却比铀强。通过研究,1898 年发现了钋(Po)和镭(Ra),1900 年又发现了氡(Rn)和铀 $X_1(^{234}\text{Th})$ 。天然放射性元素的不断发现,丰富了人们对放射性衰变系的认识,逐渐总结出铀-镭系、钍系和锕-铀系天然放射系。

^{238}U 位于铀-镭系之首。 ^{238}U 虽然不能直接用于核燃料,它在慢中子作用下,不发生裂变,但可发生如下核反应:

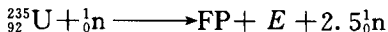


所产生的 $^{239}_{92}\text{U}$ 很不稳定,经两次 β^- 衰变而生成 $^{239}_{94}\text{Pu}$:



^{239}Pu 能为慢中子所裂变,是极为重要的核燃料。 ^{238}U 能自发裂变,其自发裂变的半衰期为 $(9.86 \pm 0.3) \times 10^{15}$ 年。

^{235}U 位于锕-铀系之首。 ^{235}U 的量虽小,但意义却很大,它吸收慢中子后即发生裂变,并放出大量的能量。 ^{235}U 完全裂变的“热能当量”为 $2.2022 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在放出能量的同时,还产生许多裂变产物。每个发生裂变的 ^{235}U 核平均放出 2.5 ± 0.1 个中子,其过程如下:



式中,FP 表示铀核的裂变产物, E 为裂变所释放出的能量。 ^{235}U 也能自发裂变,其自发裂变的半衰期为 $(1.8 \pm 1.0) \times 10^{17}$ 年。

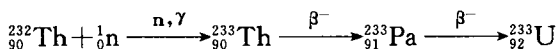
^{234}U 是 ^{238}U 经 α 衰变及 β 衰变而生成的子体,它的量极小。在天然铀中, ^{238}U 和 ^{234}U 的原子百分数之比为常数,即等于它们的半衰期之比。

铀-镭系母体 ^{238}U 和锕-铀系母体 ^{235}U 在衰变过程中产生一系列

的放射性子体，最后分别衰变成稳定性元素 ^{206}Pb 和 ^{207}Pb 。而对人体造成严重危害的，主要是铀-镭系放射性核素中的 U 、 Ra 、 ^{222}Rn 及其短寿命子体和 ^{210}Po 。

(二) 铀的同位素

铀的质量数从 226 到 240，除 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{234}U 三种天然同位素外，尚有 12 种人工同位素。表 1.2 中列出了一些重要铀同位素的核性质。其中尤其值得提出的是人工同位素 ^{233}U 。它是由次级核燃料 ^{232}Th 和中子进行反应后经 β^- 衰变所得，转变成具有裂变性能的 ^{233}U ，可作为核燃料加以使用：



^{233}U 的物理半衰期为 $1.62 \times 10^5 \text{a}$ ，其 α 比活度较高，为 $3.50 \times 10^8 \text{Bq/g}$ 。

(三) 天然铀与浓缩铀

目前，天然铀的来源主要是各种含铀矿物。而从铀矿石中提炼出的核纯级天然铀，则是 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{234}U 的混合物，其中易裂变核素 ^{235}U 仅占总量的 0.714%。因此，天然铀除可用作生产堆和少数动力堆的燃料外，在大多数动力堆及其它应用领域都还不能直接加以利用。如轻水堆需使用低浓缩铀作燃料，其 ^{235}U 的富集度一般为 2%~3%；而快堆用铀作燃料时，则需将 ^{235}U 富集度提高到 25%左右；至于高中子通量的材料试验堆则需使用 ^{235}U 富集度大于 90%的高浓缩铀作燃料。为了获得能满足于上述不同需要的浓缩铀，必须采用特殊的方法来分离铀的同位素。而这种由铀同位素混合物中提高所需同位素 ^{235}U 含量的工艺过程，称为铀的浓缩。

关于铀同位素的分离过程，即铀浓缩实质就是实现 ^{235}U 与 ^{238}U 间的分离。工业上浓缩铀所用的主要方法是采用气体扩散法（详见第二章第二节）。

表 1.2 铀同位素的核性质^[4]

质量数	原子量	天然丰度, %(原子)	物理 半衰期	α 能量, MeV		
232	232.046		74a	5.318(68%)	5.260(31%)	5.134(0.3%)
233	233.048		1.62×10^5 a	4.832(83%)	4.718(15%)	4.73(2%)
234	234.050	0.0058	2.44×10^5 a	4.763(74%)	4.707(23%)	4.593(3%)
235	235.053	0.720	7.09×10^8 a	4.39(86%)	4.57(10%)	4.18(4%)
236	236.055		2.39×10^7 a	4.499		
237	237.058		6.75d			
238	238.060	99.274	4.51×10^9 a	4.180(77%)	其它(23%)	
239	239.063		23.5min			
240	240.066		14.1h			
γ 能量, MeV				β 能量, MeV		
0.058	0.13	0.27	0.33			
0.042	0.056	0.096				
0.018	0.053	0.09	0.12			
0.18	0.37					
0.050(27%)						
0.208	0.0596	0.264	0.165	0.248(95%)	其它(2%)	
0.045(99%e ⁻)						
0.0736				1.21		
				0.36		
比活度, Bq/g	热中子俘获截面, $\times 10^{-28} \text{m}^2$		热中子吸收截面, $\times 10^{-28} \text{m}^2$	自发裂变 半衰期, a		
7.69×10^{11}	80		300	$(8 \pm 5.5) \times 10^{13}$		
3.50×10^8	525		69	$(1.2 \pm 0.3) \times 10^{17}$		
2.31×10^8	0.65		72	2×10^{16}		
7.93×10^4	590		108	1.8×10^{17}		
2.34×10^6			9	2×10^{16}		
3.01×10^{15}						
1.23×10^4	10^{-3}		2.76	9.86×10^{15}		
1.24×10^{18}	15		22			
3.42×10^{16}						

核燃料浓缩铀通常以燃料元件形式装入反应堆内。所谓燃料元件是指反应堆内以核燃料浓缩铀为主要成分,用合适的金属或其它材料加以包覆密封、结构上独立的最小构件。如生产堆多用金属铀作燃料,用热中子吸收截面较小的铝、镁合金作包壳材料;而轻水堆则用低浓缩 UO_2 陶瓷燃料,以锆合金为包壳材料^[7]。核燃料浓缩铀的主要特点之一是能量密度高,从 1kg 的低浓缩 UO_2 中可得到相当于燃烧 100 吨优质煤的能量。为了充分利用核能,通常要求燃料元件在堆内停留很长时间,如在一般核电站中要求停留 3~4 年,而在核潜艇中的停留时间要达 10 年以上。

反应堆的主要用途有以下三个方面:① 获取核能,通过冷却剂和热交换装置系统,把堆内释放的大量裂变热输送出去,将水变成蒸汽用以推动汽轮机发电,或在核潜艇和其它运载工具中作推进动力,或直接提供工业和民用热能;② 生产新的易裂变核素,如以 ^{238}U 或 ^{232}Th 作原料,在反应堆中通过中子辐照,除可生产出 ^{239}Pu 与 ^{233}U 两种易裂变核素外,还可获得许多用途广泛的超铀核素,其中一些超铀核素也具有良好的裂变性能,如 ^{245}Cm 、 ^{249}Cf 、 ^{251}Cf 和 $^{242\text{m}}\text{Am}$ 等都可以用作宇宙飞船上小型反应堆的裂变燃料;③ 从事科学研究和放射性核素的生产,核反应堆中产生的中子数量比用其它方法可能获得的中子数量要大得多。这些中子除可直接用来进行许多研究工作外,还可通过有中子参加的核反应来生产各种放射性核素。

(四) 浓缩铀的辐射特征

浓缩铀一直受到人们的重视。尤其是近年来,由于核电站的相继建立而使低浓缩铀的利用更加迅猛发展。下面从其 α 比活度和 β 、 γ 表面剂量率对浓缩铀的辐射特征加以阐述。

1. 浓缩铀的 α 比活度

在铀的不同同位素中,由于物理半衰期各异,其 α 比活度也就各不一样。由于 ^{234}U 的物理半衰期相对说来要比 ^{235}U 和 ^{238}U 短几个数量级,因而以 ^{234}U 的 α 比活度为最高,为 $2.31 \times 10^8 \text{Bq/g}$, ^{235}U 为