



# 放射性废物处置概论

王志雄 周宏春 编著

科学出版社

# 放射性废物处置概论

王志雄 周宏春 编著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

### 内 容 简 介

本书主要叙述放射性废物的来源和种类;放射性废物处置;放射性废物处置的意义和研究现状;低、中放射性废物地质处置;高放废物地质处置;放射性废物地质处置场址选择;回填材料的研究;放射性废物处置地球化学;放射性废物处置的天然地质模式;放射性废物处置体系的环境影响和安全评价。

本书可供我国核科学技术、环境保护及有关领域的科研、教学、生产、管理人员和有关部门的领导参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

放射性废物处置概论/王志雄,周宏春编著.--北京:  
科学出版社,1996  
ISBN 7-03-005409-1

I. 放… II. ①王… ②周… III. 放射性废物处置-概论-  
N. TL942

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 07472 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

北京洛神公司排版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1996 年 7 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
1996 年 7 月第一次印刷 印张: 11 1/4  
印数: 1—700 字数: 255 000

定价: 25.00 元

## 前 言

随着核能事业的发展和人类对环境问题的重视,放射性废物的处置或处理已成为世界各有关国家共同关注的问题。从铀矿勘探、开采、水冶、同位素分离、元件制造、反应堆运行到乏燃料后处理等整个核循环的过程,都或多或少地产生放射性废物。放射性废物处置的目的,就是将放射性废物与生物环境永久地隔离,避免对人类和生物产生放射性危害,以使放射性废物中所含的放射性核素在衰变到无害水平以前,不给当代和后代人类造成不可接受的环境影响。

放射性废物处置方法有宇宙处置、海洋处置、地质处置等方法。从安全的角度考虑,目前国际上较为占优势的观点还是地质处置的方法。放射性废物地质处置又分埋藏处置、废矿山处置、洞穴处置、废地下工程处置、岩石熔化处置、岛屿处置等。这些方法的选择,取决于各国的政治、经济、社会、地质和地理等条件,一般说来较为普遍采用的和合适的方法是埋藏处置。通常,对于低、中水平放射性废物(其放射性寿命约三百年左右),采用陆地浅层埋藏处置的方法;对于高水平放射性废物(其放射性寿命达万年左右),采用陆地深层处置的方法。

为了防止放射性废物中的放射性核素迁移至地表,确保环境的绝对安全,要求放射性废物处置工程具有防水和滞留放射性核素的作用,为达到这两个要求,科学家们采用多重屏蔽系统的设计原理处置放射性废物,这个系统一般包括四重安全屏蔽系统,从内至外为:放射性废物固化体(有玻璃固化体、水泥固化体、塑料固化体、沥青固化体等),包装容器(合金制造),回填材料(无机吸附剂,如粘土矿物等)和围岩或土层。

放射性废物处置是一项涉及核科学、地质科学、环境科学以及工程技术等多学科的复杂的系统工程,也是一项技术难度较大、研究周期较长的综合性工作。

同样,在地质领域中,放射性废物地质处置也是一项复杂的涉及多学科的新型的地质工作。它需要利用遥感地质学、区域地质学、地球化学、岩石学、矿物学、构造地质学、水文地质学、工程地质学、地球物理学、钻探、室内分析测试和计算技术等手段,进行经济条件、地理条件(人口、交通、气候等)、地形地貌条件、地质体及岩石、矿物性质、地质构造及地震、水文地质条件、工程地质条件等综合性地质研究,为放射性废物的最终处置提供必要的基础资料和数据。

目前,科学家们已经掌握了放射性废物安全处置的技术,并且一些国家已经对低、中水平放射性废物进行了浅层埋藏处置。对于高水平放射性废物,一些国家也进入了地下实验室的模拟实验阶段。我国自浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站投入建设以来,对放射性废物处置工作也给予了极大的重视。1985年以来,核工业部和地质矿产部相继开展了放射性废物地质处置的可行性研究工作。在华东、西北、西南、中南等地区进行处置场的预选,回填屏蔽材料的研究和核素迁移的模拟试验。上述研究工作的进行,为我国的放射性废物处置工作打下了技术基础。

本书是根据国内外放射性废物处置的状况及作者在担任原核工业部放射性废物地质处置研究组负责人和联合国国际原子能机构废物处置回填材料研究科研专题首席科学家工作经验的基础上编写的。供从事放射性废物处置的管理人员、研究人员及高等学校有关专业师生参考。

本书的图件由地质矿产部环境地质研究所胡树娥工程师清绘,对她所付出的劳动深表谢意。

由于水平有限,不妥之处难免,敬希指正。

作者

1995年2月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 放射性废物的来源及种类</b> .....	(1)
<b>第一节 核燃料循环和放射性废物来源</b> .....	(1)
一、核燃料循环 .....	(1)
二、放射性废物的来源 .....	(3)
<b>第二节 放射性废物的分类和分级</b> .....	(6)
一、分类和分级 .....	(6)
二、一些常用分级 .....	(8)
三、放射性废物类型 .....	(11)
<b>第二章 放射性废物处置</b> .....	(13)
<b>第一节 放射性废物处置概述</b> .....	(13)
一、暂存 .....	(14)
二、去污 .....	(15)
三、净化 .....	(15)
四、减容 .....	(15)
五、固化 .....	(17)
六、贮运 .....	(20)
七、地下贮槽中贮存 .....	(21)
<b>第二节 压水堆核电站放射性废气和废液处置</b> .....	(22)
一、压水堆核电站放射性废气处置 .....	(22)
二、压水堆核电站放射性废液处置系统 .....	(23)
<b>第三章 放射性废物处置的意义及研究现状</b> .....	(25)
<b>第一节 放射性废物处置的意义</b> .....	(25)
一、世界核能发展的需要 .....	(25)
二、暂存的放射性废物亟需处置 .....	(28)
三、环境保护的需要 .....	(31)
<b>第二节 国内外放射性废物处置现状</b> .....	(31)
一、各国放射性废物地质处置的政策 .....	(32)
二、有关放射性废物管理的国际组织及其活动 .....	(40)
三、我国高水平放射性废物地质处置的研究进展 .....	(43)
<b>第四章 低、中水平放射性废物的地质处置</b> .....	(47)
<b>第一节 低、中水平放射性废液的地质处置</b> .....	(47)
一、低、中水平放射性废液的地质处置方法 .....	(47)

二、低、中水平放射性废液地质处置实例 .....	(48)
第二节 低、中水平放射性固体废物的地质处置 .....	(51)
一、低、中水平放射性固体废物的处置方法 .....	(51)
二、处置实例及其评价 .....	(53)
第三节 我国低、中水平放射性废物处置现状及对策 .....	(58)
一、低、中水平放射性固体废物的管理现状 .....	(58)
二、低、中水平放射性废物处置对策 .....	(59)
第四节 低、中水平放射性固体废物浅层处置的要求 .....	(60)
一、场址要求 .....	(61)
二、处置场设计、运行和关闭的要求 .....	(62)
<b>第五章 高水平放射性废物的地质处置 .....</b>	<b>(65)</b>
第一节 处置高水平放射性废物的主要岩石类型及其特性 .....	(65)
一、岩盐 .....	(65)
二、花岗岩 .....	(66)
三、凝灰岩 .....	(67)
四、玄武岩 .....	(68)
五、粘土岩 .....	(69)
第二节 高水平放射性固体废物的地质处置 .....	(70)
第三节 地下实验室 .....	(74)
一、建立地下实验室的目的和意义 .....	(75)
二、地下实验室类型及其所选岩石种类 .....	(77)
三、国外地下实验室及主要研究内容 .....	(78)
<b>第六章 放射性废物地质处置的场址选择 .....</b>	<b>(87)</b>
第一节 选址的条件及工作步骤 .....	(87)
一、选址标准 .....	(87)
二、选址工作阶段 .....	(90)
第二节 国外场地选择的典型实例 .....	(92)
一、美国的低水平放射性废物处置场 .....	(92)
二、瑞典的高水平放射性废物处置场 .....	(96)
三、加拿大处置场地特性的鉴定 .....	(98)
第三节 我国放射性废物处置库场址预选区的远景评价 .....	(100)
一、场址预选区和主要岩石概述 .....	(101)
二、甘肃西北预选区 .....	(102)
三、华东预选区 .....	(104)
四、西南预选区 .....	(107)
五、广东预选区 .....	(109)
六、内蒙古预选区 .....	(110)
七、新疆预选区 .....	(111)
<b>第七章 回填材料的研究 .....</b>	<b>(113)</b>

第一节	回填材料的功能	(113)
第二节	回填材料——粘土矿物的性质及研究方法	(114)
一、	粘土矿物的结构	(114)
二、	粘土矿物中的水	(115)
三、	粘土矿物的物理-水理及物理化学性质	(116)
四、	粘土矿物的研究方法	(120)
第三节	典型回填材料——膨润土的工程性质研究	(123)
一、	膨润土的压密性	(124)
二、	膨润土的渗透性	(126)
三、	钠膨润土的抗压强度及其变形特征	(129)
第四节	吸附机制	(133)
一、	放射性核素在膨润土中的吸附	(133)
二、	离子交换	(137)
<b>第八章</b>	<b>放射性废物处置地球化学</b>	(139)
第一节	放射性废物中主要核素种类及含量	(139)
一、	放射性核素种类	(139)
二、	废物量	(140)
三、	放射性废物中的核素含量	(144)
第二节	主要放射性核素的 $Eh$ - $pH$ 稳定场	(147)
一、	铀的地球化学和水文地球化学	(148)
二、	主要放射性核素的地球化学	(152)
三、	主要放射性核素的 $Eh$ - $pH$ 图解	(157)
第三节	放射性核素迁移机制	(160)
一、	放射性核素的水迁移	(160)
二、	放射性核素的迁移特征	(160)
三、	放射性核素迁移的评价	(163)
	<b>主要参考文献</b>	(169)
	<b>英文摘要</b>	(170)



# 第一章 放射性废物的来源及种类

现代科学技术的发展使核能得以广泛的应用,其应用范围涉及工业、国防、农业、医学和科研等方面,尤其是核电的发展为当今国际社会能源危机注入了新的活力。据统计,截止1992年,在世界已经投入运转以及正在建设中的用于发电的核反应堆已达496座,其中已投入发电的425座,总装机容量为 $330\ 651 \times 10^3 \text{kW}$ 。世界上拥有核电的国家和地区共有29个,其中核发电量占发电总量的50%以上的国家有:法国(72.9%)、立陶宛(60%)和比利时(59.9%);接近50%的国家有4个:斯洛伐克、匈牙利、韩国和瑞典。秦山核电站并网发电后,我国广东大亚湾核电站一号机组,继1993年7月20日反应堆达到临界状态后,8月31日并网发电成功,并网功率为 $45\ 000 \text{kW}$ ,并已投入商业运行,年发电量可达 $(100-126) \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

随着核能利用的发展和人类对生存环境的重视,放射性废物处置或处理已成为世界各国共同关注的问题。自1980年以来,放射性废物处置已成为核能利用领域中科学研究的热点课题,如1985年美国地质学会第89届年会上全面介绍了美国在各类岩石中和各个地区的放射性废物处置情况;1986年美国第27届岩石力学专题讨论会上专门讨论了放射性废物地质处置的岩石力学、热力学试验等问题;1986年国际原子能机构在原西德汉诺威召开了放射性废物地下处置库的选址、设计和建造的国际讨论会。1987年我国发布《中华人民共和国核材料管理条例》,其中规定:“对生产、使用、贮存和处置材料的场所,建立严格的安全保卫制度,采取可靠的安全防范措施,防止事故的发生”。近年来,我国围绕核能和平利用问题进行了广泛的国际学术交流,并在放射性废物处置的有关研究方面,取得了可喜的成果。

## 第一节 核燃料循环和放射性废物来源

### 一、核燃料循环

放射性废物又称核废料,按照国际原子能委员会的定义,放射性废物是指放射性浓度或活度大于国家主管部门所规定的“豁免量(exempted quantity)”,并预计将来不再被利用的含放射性核素或被放射性核素污染的任何物质。由此可见,放射性废物可以产生于任何应用放射性核素的单位,但主要产生于核燃料循环的各个环节。

#### 1. 广义核燃料循环

广义核燃料循环由许多环节组成,概括地说,它包括铀矿的普查勘探,矿石的开采,铀化学浓缩物的提纯, $^{235}\text{U}$ 的浓集,燃料元件的制造(以上为核燃料制造阶段),堆内运行

(使用阶段), 卸出元件的运输, 化工后处理以及放射性废物的处置等。放射性废物的最终处置是核燃料循环中的最后一个环节(核燃料循环的主要环节及其放射性废物见图 1-1)。

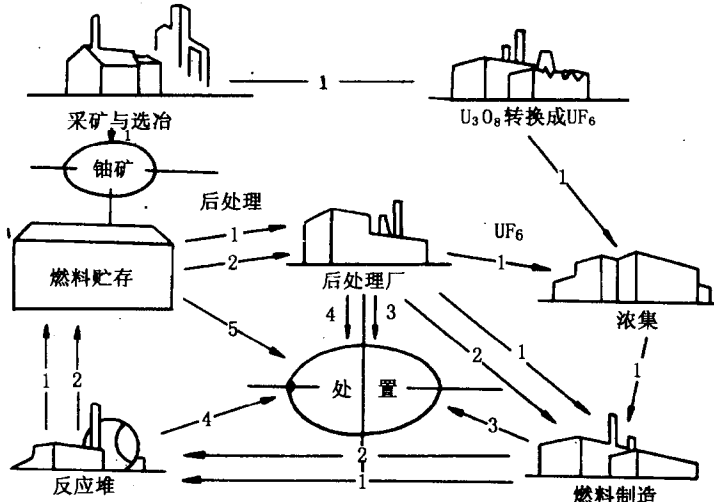


图 1-1 核燃料循环的主要环节及其放射性废物  
1. U 循环; 2. Pu 循环; 3.  $\alpha$  废物; 4.  $\beta$ - $\gamma$  废物; 5. 弃用

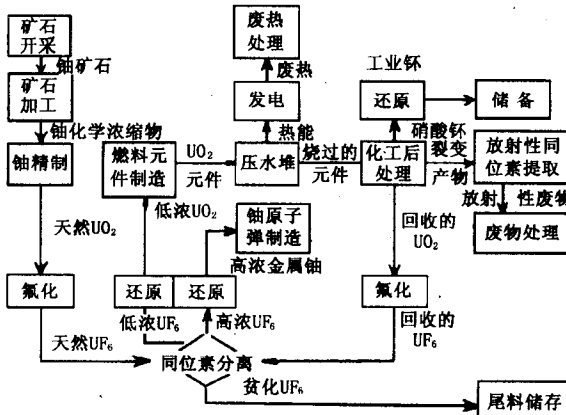


图 1-2 浓缩铀反应堆和铀原子弹的核燃料生产流程

不同类型的反应堆, 其核燃料循环的细节可以有所差别, 但基本环节却是相同的, 即无论何种类型的反应堆, 都要经过核燃料工作的前期制备阶段、核反应阶段和放射性废物处置这三个阶段, 浓缩铀反应堆和铀原子弹的核燃料产生流程可概化为图 1-2 的形式。

## 2. 狭义核燃料循环

最初提出的核燃料循环概念可追溯到控制原子核裂变用以发电的初期, 因此, 狭义的核燃料循环是指用于核反应堆中燃料取出经后处理, 或从乏燃料

中分离出铀、钚的循环利用。

根据核电站燃料的是否循环和发电的堆型, 可分出三种类型的核燃料循环:

(1) 燃料单一循环(又称直流冷却堆) 乏燃料不进行后处理, 而直接贮存直至最终处理。

(2) 热水堆循环 乏燃料进行后处理, 从裂变产物中分离出铀和钚, 以铀、钚或两者同时生产成新燃料元件参与燃料的再循环。

(3) 快堆循环 乏燃料经后处理, 将铀和钚制成新的燃料元件, 使它们在快堆中循环使用, 即形成一个铀-钚的中心, 通过合适的操作, 可获得比消耗掉的铀略多的铀(这

三种燃料循环详见图 1-3)。

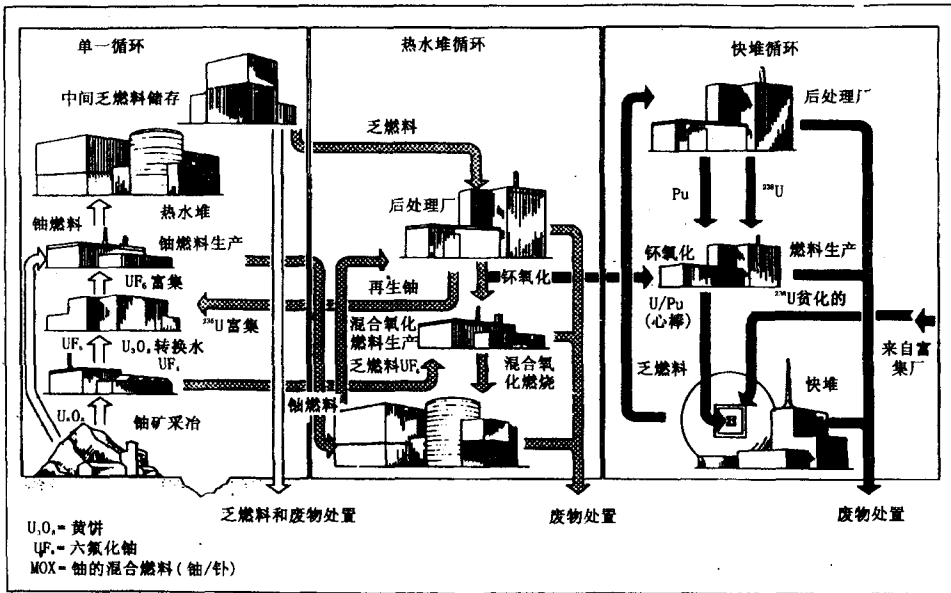


图 1-3 核燃料循环的三种循环类型

### 3. 核燃料的双层循环

最近,日本正进行分离技术的研究,研究的内容包括锕系元素燃料堆,用质子加速器驱动核子嬗变以及超铀元素的基础研究。在此基础上提出了双层核燃料循环的概念,其中,第一层燃料循环是所谓的传统循环,第二层循环是 P-T 循环(循环的每个环节详见图 1-4)。

## 二、放射性废物的来源

与核燃料循环的各个环节相对应产生的放射性废料,是放射性废物的主要来源。低、中水平放射性废物还可来自工业、农业、医药及研究部门;而高水平放射性废物,则主要来自化工后处理厂和反应堆的乏燃料。具体地说,放射性废物主要来自以下五个方面。

### 1. 核燃料的制造、使用及后处理等阶段

在放射性矿石开采和选冶阶段,可产生含铀、镭及其子体的天然放射性元素的废物,如数量极大的废矿石,表外矿石和尾矿砂,数量较多的废坑木,从矿坑水和选矿水中沉淀出来的矿泥以及废工作服、口罩、胶鞋等劳保用品。

在核燃料的精制加工阶段,可产生各种含铀固体的废物,数量较大的为氯化钙渣,其它的废渣包括废石墨、废钢铁、含铀污泥以及含铀可燃物质等。

在放射性废料使用和后处理阶段,将产生放射性活度差别较大,含有裂变产物、中子活化产物和超铀元素的各种固体废物。如后处理主工艺料液过滤器心、I 区排风过滤器心

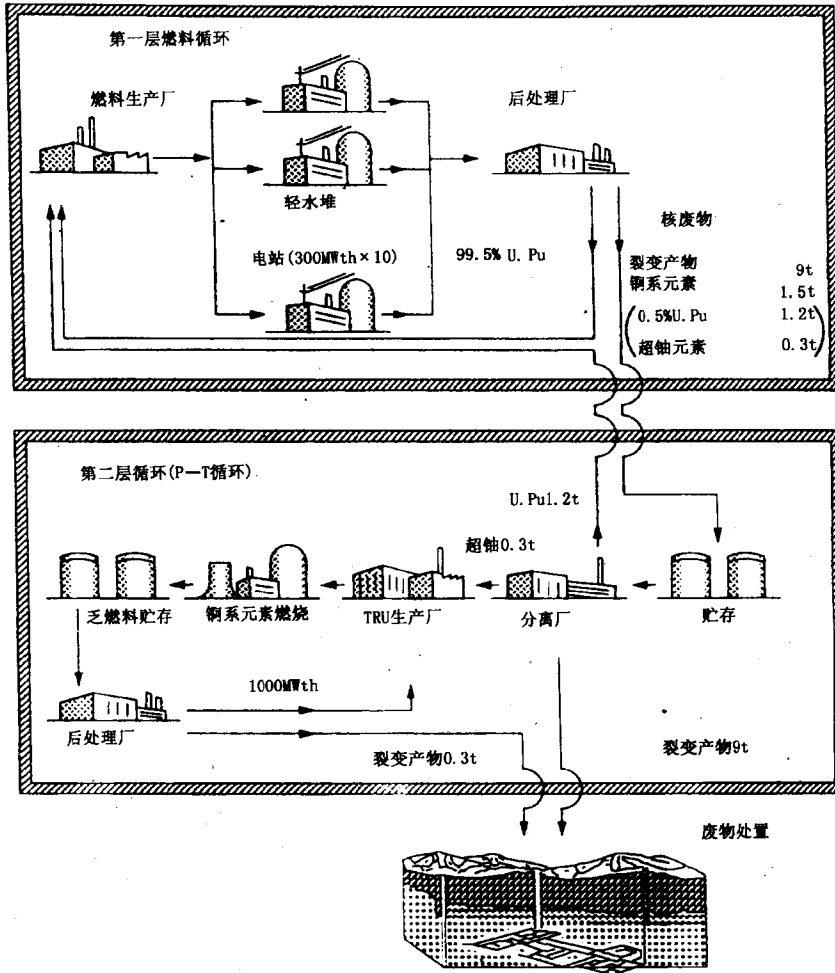


图 1-4 双层核燃料循环模式

和部分检修拆卸下来的阀门心、计量泵和一次仪表等，其中含大量裂变产物，钚含量不定，属于高水平放射性废物。部分与主工艺料液有关的去污检修品和报废的设备管道，放射性水平不高，但可能含钚。从反应堆拆卸下的废工艺管、石墨套管和非工作块，以及堆工用过的树脂，刚卸出时其放射性水平很高，但随着活化产物的衰变，辐射水平迅速降低。反应堆和后处理厂非超铀的低、中水平放射性废物主要来自检修用品，污染的塑料布和塑料地板，卸下的排风过滤器，报废的设备仪表和管道阀门，以及化工泥浆等。劳保用品和包装材料通常为极低水平的放射性废物。

## 2. 核设施退役

自 1990 年以来，世界上已有数十座实验反应堆或原型堆进入退役期，到公元 2000 年，大约有 64 座核电站和 256 座核研究反应堆使用期超过 30 年。法国平均每年将有 4 座核电站进入退役阶段。

退役主要包括以下环节：①移去或除去可回收的放射性物质，如卸出反应堆中辐射元件并运走，泵出回路中的冷却剂，除去堆存的放射性废物，撤出热室中的放射源，封闭放射性工艺系统等；②进行详细的辐射水平调查，包括设施和管道沾污程度的测定等；③对设备和厂房去污；④将设备切割解体；⑤处置退役废物。由于核设施的退役形成大量的放射性废物，如拆除一座1 000kW 水压式核能电厂，将产生数千立方米的短寿命、低、中水平放射性废物，以及数百立方米的 $\alpha$ 废物和分裂产物。

国际原子能机构将退役分为三个阶段：①监督封存，即不进行任何拆除工作，使放射性仍保留在设施内部，并对设施定期监测和防护，以防泄漏；②有条件地拆除局部设施，即拆除放射性水平较低的结构，同时加强封闭主要辐射源（如反应堆心或乏燃料）；③完全拆除。

### 3. 研究实验室

从事放射性核素研究的各类实验室都可能产生放射性废物，但多数为中、低水平放射性废物。

### 4. 有关工业部门

如食品工业用钴-60( $^{60}\text{Co}$ )、铯-137( $^{137}\text{Cs}$ )或加速器产生 $\gamma$ 射线辐照食品，以达到消毒和保鲜的目的。用锶-90( $^{90}\text{Sr}$ )、 $^{137}\text{Cs}$ 、钷-147( $^{147}\text{Pm}$ )、钋-210( $^{210}\text{Po}$ )、钚-238( $^{238}\text{Pu}$ )、镅-241( $^{241}\text{Am}$ )、镅-242( $^{242}\text{Am}$ )及镅-244( $^{244}\text{Am}$ )等生产核电池。

### 5. 医疗部门

医疗部门所用的放射性源也较多，如用 $^{60}\text{Co}$ 治疗恶性肿瘤，用碘-131( $^{131}\text{I}$ )治疗甲亢，用磷-32( $^{32}\text{P}$ )治疗皮肤病和真菌性红细胞增多病，用 $^{238}\text{Pu}$ 作心脏起搏器的特殊能源等。

医院、实验室及工业机构所产生的放射性废物，包括无法再用的放射性源，被污染的仪器设施，塑料安全装备，注射器和棉花球，以及破旧工作服和手套等，这些废物主要是中、低水平放射性废物，其数量约占待处理放射性废物的10%左右。

在放射性同位素应用中使用的核素还有：镭-226( $^{226}\text{Ra}$ )、碘-125( $^{125}\text{I}$ )、锡-113( $^{113}\text{Sn}$ )、铟-113( $^{113}\text{In}$ )、氚( $^3\text{H}$ )、碳-14( $^{14}\text{C}$ )、硫-35( $^{35}\text{S}$ )、钌-97( $^{97}\text{Ru}$ )、金-198( $^{198}\text{Au}$ )、铊-204( $^{204}\text{Tl}$ )、镍-63( $^{63}\text{Ni}$ )、钙-45( $^{45}\text{Ca}$ )、汞-203( $^{203}\text{Hg}$ )、铯-141( $^{141}\text{Ce}$ )、铋-207( $^{207}\text{Bi}$ )、氪-85( $^{85}\text{Kr}$ )、钴-57( $^{57}\text{Co}$ )、铱-192( $^{192}\text{Ir}$ )、锌-65( $^{65}\text{Zn}$ )、硒-75( $^{75}\text{Se}$ )、锝-99( $^{99}\text{Tc}$ )、钍-232( $^{232}\text{Th}$ )、铀-235( $^{235}\text{U}$ )、铀-238( $^{238}\text{U}$ )、铍-7( $^7\text{Be}$ )、铬-51( $^{51}\text{Cr}$ )。中子源：镅-铍( $\text{Am-Be}$ )中子源，镆-铍( $\text{Pa-Be}$ )中子源等。

其中，在辐射灭菌、消毒、育种、保鲜等应用中主要用 $^{60}\text{Co}$ 。

在医疗诊断中主要用 $^{131}\text{I}$ ， $^{198}\text{Au}$ ， $^{99}\text{Tc}$ 等。

在肿瘤治疗中，主要用 $^{60}\text{Co}$ ， $^{137}\text{Cs}$ ， $^{226}\text{Ra}$ 等。

在放射免疫学中使用 $^{125}\text{I}$ 。

在发光涂料中使用 $^{147}\text{Pm}$ ， $^3\text{H}$ 。

在农业研究中使用 $^3\text{H}$ ， $^{14}\text{C}$ ， $^{32}\text{P}$ 等。

在地质矿山钻探、测井中用 $^{137}\text{Cs}$ 和中子源。

在气相色谱中使用 $^{63}\text{Ni}$ ,  $^3\text{H}$ 等。

在烟雾报警器中使用 $^{147}\text{Pm}$ 。

在高炉炉壁中常使用 $^{60}\text{Co}$ ,以测定炉壁的使用寿命。

## 第二节 放射性废物的分类和分级

放射性废物的分类和分级问题,直接关系到放射性废物处置及其安全性评价问题。因此,此项工作也是放射性废物处置中的重要一环。

国际原子能机构曾多次提出进行放射性废物的分级的建议,各原子能利用国家也根据自己国家的具体情况制定了自己的分级方案,我国也提出了放射性废物的标准。但是,到目前为止,国际上还没有一个统一的分级原则。这里,主要介绍我国及国际上常用的分级标准。

### 一、分类和分级

放射性废物的分类标准在实际应用中是与分级标准一致的,但类型的划分标准要复杂得多。1971年国际原子能机构推荐了放射性废物的分级标准:先按放射性废物的物态分为气、液、固三类,然后按其活度再进行分级,如将气体分为三级,液体分为五级,固体分为四级等(表 1-1)。我国对放射性废物的分类大致与此相似,即首先按放射性废物的物理性状分为气载废物、液体废物和固体废物三类,然后再进行细分。

表 1-1 放射性废物的分级标准  
(IAEA,1971)

分类	分级	放射性比活度 (Ci/L)	说 明	备 注
液 体	1	$<10^{-9}$	一般可不处理	用通常的蒸发、离子交换或化学方法进行处理
	2	$10^{-9}-10^{-6}$	处理废液的设备不需屏蔽	
	3	$10^{-6}-10^{-4}$	部分设备需要屏蔽	
	4	$10^{-4}-10$	设备必须屏蔽	
	5	$>10$	必须冷却和屏蔽	
气 体	1	$<10^{-10}$	一般不可处理	
	2	$10^{-10}-10^{-6}$	一般用过滤法处理	
	3	$>10^{-6}$	一般用综合法处理	
固 体	1	表面照射率 ( $R/h$ ) $<0.2$	运输中不需特殊防护	主要为 $\beta$ 和 $\gamma$ 辐射体,所含 $\alpha$ 辐射体可忽略不计
	2	$0.2-2$	运输中要用薄层混凝土或铅屏防护	
	3	$>2$	运输中要求特殊防护	
	4	$\alpha$ 辐射体	要求不存在超临界问题	

### 1. 放射性气载废物

放射性浓度大于“公众导出空气浓度  $DAC_m$ ”的气载废物称为放射性气载废物,否则为非放射性气载废物。按放射性水平可将放射性气载废物分为三级: I 级  $\leq 10^4 DAC_m$ ; II 级,  $10^4 - 10^8 DAC_m$ ; III 级,  $> 10^8 DAC_m$ 。若气载废物中含有两种或两种以上的放射性核素时,其  $DAC_m$  可按式(1-1)计算:

$$\begin{aligned} DAC_m &= \left( \frac{P_1}{DAC_1} + \frac{P_2}{DAC_2} + \dots + \frac{P_k}{DAC_k} \right)^{-1} \\ &= \left( \sum_{i=1}^k \frac{P_i}{DAC_i} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中:  $DAC_m$ ——公众导出空气浓度;  $P_i$ ——第  $i$  种放射性核素所占的活度份数。

### 2. 放射性液体废物

放射性浓度大于“公众导出食入浓度  $DIC_m$ ”的液体废物为放射性液体废物,反之为非放射性液体废物。按放射性浓度水平可将放射性液体废物分为四级: I 级,  $\leq 3.7 \times 10^2 \text{Bq/L}$ ; II 级,  $3.7 \times 10^2 - 3.7 \times 10^5 \text{Bq/L}$ ; III 级,  $3.7 \times 10^5 - 3.7 \times 10^9 \text{Bq/L}$ ; IV 级,  $> 3.7 \times 10^9 \text{Bq/L}$ 。若放射性液体废液中含有两种或两种以上的放射性核素时,其  $DIC_m$  值按式(1-2)计算:

$$\begin{aligned} DIC_m &= \left( \frac{P_1}{DIC_1} + \frac{P_2}{DIC_2} + \dots + \frac{P_k}{DIC_k} \right)^{-1} \\ &= \left( \sum_{i=1}^k \frac{P_i}{DIC_i} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中:  $DIC_m$ ——公众导出食入浓度;  $P_i$ ——第  $i$  种放射性核素所占的活度份数。

### 3. 放射性固体废物

放射性比活度大于  $7.4 \times 10^4 \text{Bq/kg}$ , 若仅含天然  $\alpha$  辐射体, 其比活度大于  $3.7 \times 10^5 \text{Bq/kg}$  的固体废物为放射性固体废物, 反之为非放射性固体废物。表面放射性污染水平超过《放射卫生防护基本标准》GB4792-84 中第六章“放射性物质污染表面的导出限值”规定值, 而比活度小于或等于  $7.4 \times 10^4 \text{Bq/kg}$  的固体废物称为放射性污染废物。

放射性固体废物按其所含寿命最长的放射性核素的半衰期 ( $T_{1/2}$ ) 长短分为四种, 每种中又按其放射性比活度水平分为三级, 详见表 1-2。

含有半衰期小于或等于 60d 的放射性核素的废物, 其放射性比活度水平分为三级:

第 I 级(低放废物), 比活度大于  $7.4 \times 10^4 - 3.7 \times 10^7 \text{Bq/kg}$ ; 第 II 级(中放废物), 比活度大于  $3.7 \times 10^7 - 3.7 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$ ; 第 III 级(高放废物), 比活度大于  $3.7 \times 10^{11} \text{Bq/kg}$ 。

含有半衰期 60d 至 5a(包括核素钴-60)的放射性核素的废物, 按其放射性比活度水平分为三级:

表 1-2 放射性废物的分类表

类别	级别	名称	放射性浓度 $A_v$ Bq/m <sup>3</sup>			
气载废物	I	低放	$DAC_m < A_v \leq 10^4 DAC_m$			
	II	中放	$10^4 DAC_m < A_v \leq 10^8 DAC_m$			
	III	高放	$10^8 DAC_m < A_v$			
			放射性浓度 $A_v$ Bq/L(Ci/L)			
液体废物	I	弱放	$DIC_m A_v \leq 3.7 \times 10^2 (1 \times 10^{-8})$			
	II	低放	$3.7 \times 10^2 (1 \times 10^{-8}) < A_v \leq 3.7 \times 10^5 (1 \times 10^{-5})$			
	III	中放	$3.7 \times 10^5 (1 \times 10^{-5}) < A_v \leq 3.7 \times 10^9 (0.1)$			
	IV	高放	$3.7 \times 10^9 (0.1) < A_v$			
			放射性比活度 $A_m$ Bq/kg(Ci/kg)			
固体废物	I	低放	$60d \leq T_{1/2}$	$60d < T_{1/2} \leq 5a$ <sup>①</sup>	$5a < T_{1/2} \leq 30a$ <sup>②</sup>	$T_{1/2} > 30a$
			$7.4 \times 10^4 (2 \times 10^{-6})$ <sup>③</sup> $< A_m \leq 3.7 \times 10^7 (1 \times 10^{-3})$	$7.4 \times 10^4 (2 \times 10^{-6})$ <sup>③</sup> $< A_m \leq 3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$	$7.4 \times 10^4 (2 \times 10^{-6})$ <sup>③</sup> $< A_m \leq 3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$	$7.4 \times 10^4 (2 \times 10^{-6})$ <sup>③</sup> $< A_m \leq 3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$
	II	中放	$3.7 \times 10^7 (1 \times 10^{-3})$ $< A_m \leq 3.7 \times 10^{11} (10)$	$3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$ $< A_m \leq 3.7 \times 10^{11} (10)$	$3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$ $< A_m \leq 3.7 \times 10^{10} (1)$	$3.7 \times 10^6 (1 \times 10^{-4})$ $< A_m \leq 3.7 \times 10^9 (0.1)$
			$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{10} (1) A_m$	$3.7 \times 10^9 (0.1) < A_m$
	III	高放	$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{10} (1) A_m$	$3.7 \times 10^9 (0.1) < A_m$
			$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{11} (10) < A_m$	$3.7 \times 10^{10} (1) A_m$	$3.7 \times 10^9 (0.1) < A_m$

① 包括放射性核素钴-60( $T_{1/2}=5.271a$ );②包括放射性核素铯-137( $T_{1/2}=30.17a$ );③对仅含天然 $\alpha$ 辐射体的固体废物,下限值为 $3.7 \times 10^5 Bq/kg (1 \times 10^5 Ci/kg)$ 。

第 I 级(低放废物),比活度大于  $7.4 \times 10^4 - 3.7 \times 10^6 Bq/kg$ ;第 II 级(中放废物),比活度大于  $3.7 \times 10^6 - 3.7 \times 10^{11} Bq/kg$ ;第 III 级(高放废物),比活度大于  $3.7 \times 10^{11} Bq/kg$ 。

含有半衰期 5—30a(包括核素铯-137)的放射性核素的废物,按其放射性比活度水平分为三级:

第 I 级(低放废物),比活度大于  $7.4 \times 10^4 - 3.7 \times 10^6 Bq/kg$ ;第 II 级(中放废物),比活度  $3.7 \times 10^6 - 3.7 \times 10^{10} Bq/kg$ ;第 III 级(高放废物),比活度大于  $3.7 \times 10^{10} Bq/kg$ 。

含有半衰期大于 30a 的放射性核素的废物,按其放射性比活度水平分为三级:

第 I 级(低放废物),比活度大于  $7.4 \times 10^4 - 3.7 \times 10^6 Bq/kg$ ;第 II 级(中放废物),比活度大于  $3.7 \times 10^6 - 3.7 \times 10^9 Bq/kg$ ;第 III 级(高放废物),比活度大于  $3.7 \times 10^9 Bq/kg$ 。

1970 年,IAEA 收集了部分国家放射性废液的分级资料(图 1-5),通过对比发现,各国对废液的分级原则基本是相同的,即都是按放射性水平分级的。但是,划分的级数及不同等级之间的起始点数值却不同。大多数国家将放射性废液分为三个等级,但也有 4 个甚至是 5 个等级的。就低放废液的上限值而言,波兰、印度、捷克规定为  $10^{-4} \mu Ci/mL$ ;而法国、比利时和前苏联则定为  $10^{-1} \mu Ci/mL$ ,两者相差达三个数量级。波兰规定的高水平放射性废液下限值为  $10^{-2} \mu Ci/mL$ ,但这一数值却落在法国、比利时和前苏联等国的低水平放射性废液范围内。

## 二、一些常用分级

依据放射性水平来对放射性废物进行分类最为常见。废物的放射性水平通常用放射



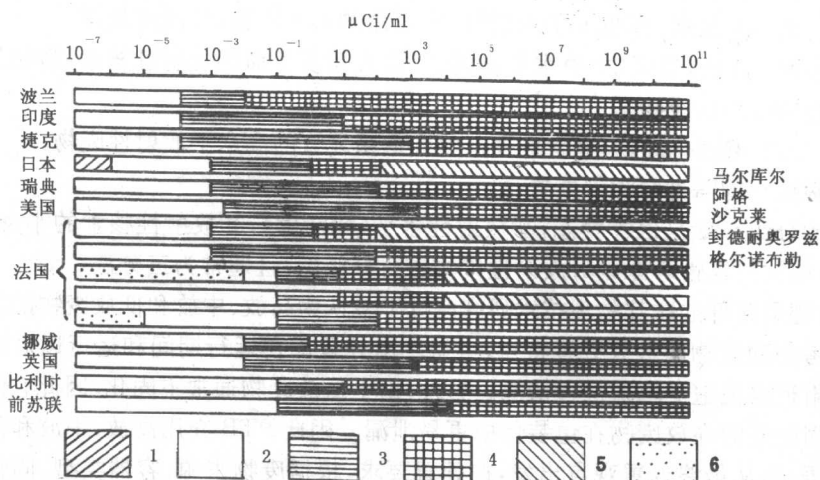


图 1-5 各国放射性废液分级标准

1. 极低放; 2. 低放; 3. 中放; 4. 高放; 5. 极高放; 6. 未测出

性比活度表示。按放射性比活度,放射性废物一般分为高水平放射性、中水平放射性和低水平放射性三级。

高水平放射性废物(high-level wastes),简称高放废物,主要指高水平放射性、长寿命放射性核素、放射毒性高的放射性废物,包括:①主要含裂变产物和某些锕系元素的高水平放射性废液,由辐照燃料后处理产生;②反应堆乏燃料;③放射性水平与上述两种相似的其它产物。该类放射性废物在处理和运输时均需要严格屏蔽。

中水平放射性废物(intermediate-level wastes),简称中放废物,其放射性核素含量介于低、高水平放射性废物之间,含大量的长寿命的放射性同位素,放射毒性中等,放射性比活度、发热量等均比高水平放射性废物低。该类废物处理和运输时需加以屏蔽。

低水平放射性废物(low-level wastes),简称低放废物,指放射性核素含量低、半衰期寿命短、放射毒性低的放射性废物。该类废物在正常处理和运输时不需屏蔽。

1981年,IAEA按放射性水平和放射性核素的半衰期长短将放射性废物分为5级,详见表1-3。

表1-3中,长寿命是指放射性核素的半衰期大于30a,反之则为短寿命。按IAEA(1981)提出的分级方案,法国按放射性水平、辐射体类型和放射性核素的半衰期,将核废物分为3级:

表 1-3 与处置有关的放射性废物分级的一般特征

废物分级	主要特征
I 高放,长寿命	$\beta, \gamma$ 放射性高, $\alpha$ 放射性高,放射毒性高,发热量大
II 中放,长寿命	$\beta, \gamma$ 放射性中等, $\alpha$ 放射性高,放射毒性中等,发热量小
III 中放,长寿命	$\beta, \gamma$ 放射性低, $\alpha$ 放射性高,放射毒性低中等,发热量小
IV 中放,短寿命	$\beta, \gamma$ 放射性中等, $\alpha$ 放射性低,放射毒性中等,发热量小
V 低放,短寿命	$\beta, \gamma$ 放射性低, $\alpha$ 放射性很低,放射毒性低,发热量很小