

原子能知识丛书



放射性废物

71.29.154



原子能知识丛书

放射性废物

[美]查尔斯·H·福克斯 著
柯 普 译

原子能出版社

放射性废物

〔美〕查尔斯·H·福克斯 著

柯 普 译

原子能出版社出版

（北京2108信箱）

张家口地区印刷厂印刷

（张家口市建国大街8号）

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本787×1092¹/₃₂·印张1³/₈·字数29千字

1981年5月第一版·1981年5月第一次印刷

印数001—3,000·统一书号：15175·287

定价：0.18元

出版说明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人来说还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书（Understanding the Atom Series）。这套丛书取材广泛、内容丰富，语言生动，深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

在科学技术急速发展的今天，书中引用的有些材料稍嫌过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

目 录

一、引言	(1)
二、放射性废物的性质	(3)
1. 放射性废物的来源	(3)
2. 废物的放射性强度	(10)
3. 辐射对人体的潜在影响	(10)
三、放射性废物的管理	(13)
1. 废液管理(低放和中放废液)	(14)
2. 废气管理	(19)
3. 废固管理	(20)
4. 高放废物的管理	(22)
四、研究与发展	(27)
1. 高放废物的处理	(27)
2. 低放废物的处理	(33)
3. 中放废物的处理	(35)
4. 有关环境的研究	(36)
附录1 采矿、矿石加工和燃料制造过程中的天然放射性同位素	(38)
附录2 放射性废物中的主要裂变产物	(39)
附录3 非核燃料材料经中子辐照后产生的主要活化产物	(40)

一、引 言

考古学家正小心地从古代火灰中清理几千年前人类遗留下来的粗糙制品，埋在古代火灰中的这些石器和陶器碎片可以告诉我们人类的历史，这些碎片也就是人类历史初期产生的废物。

如今，在麦田里每年都有许多脱过粒的麦秆有待处理，将来的考古学家决不会再看见这些麦秆，但是我们时代的其它一些废物，如堆积如山的钢铁厂废渣、埋入地下的城市垃圾，大量的废汽车等，将会使他们感到兴趣。

凡有人类活动，就必定会产生废物（例如猎人打出去的子弹头、工厂的黑烟、教室里的废纸、理发店地板上的头发等）。当然，核工业也不可避免地会产生废物。核企业的管理者要关心废物的管理和处理情况。放射性废物的处理方法虽然在某些方面和其它废物的处理方法相类似，但是在几个重要方面，两者是不同的。

核工业产生的废物与其它各种废物的主要差别在于核废物具有放射性，因而需要特殊的处理方法。放射性特别强的辐照燃料的处理问题就是个令人头疼的问题，既不能把它们堆积在广场上，也不能把它们排到江河和海洋中去。另一个问题是如何处置每年数百万加仑的含有少量放射性物质的废水。由此可见，管理放射性废物确实是一项复杂而有意义的工作。

自1942年人类进行了第一次自持链式反应以来，核工业

得到了迅速发展。美国现有 300 多个反应堆在运行中；此外，放射性物质在科学研究、医药和工业方面的应用也越来越广泛。随着核工业的发展，放射性废物无疑地也会越来越多，因此放射性废物的控制和处置方法不但要求安全、经济，而且要求有效和易于推广。

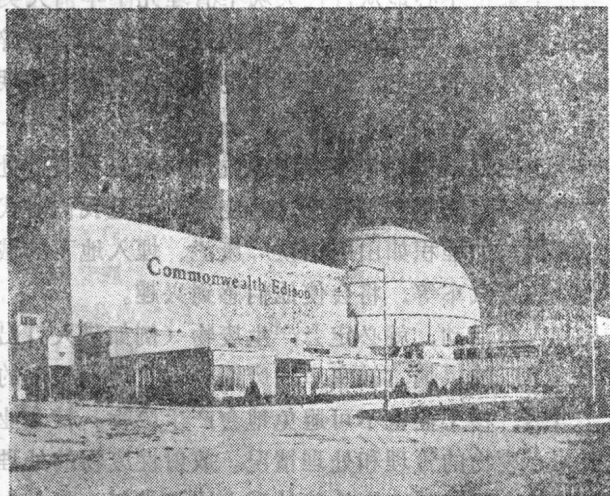


图 1 依利诺斯州的德累斯顿核电站

根据美国核规划，原子能委员会（AEC）负有使居民免受放射性物质危害的责任，因而它研究并制定了许多规定来确保有效地控制放射性，同时又不至于抑制核工业的发展。原子能委员会还直接研究放射性废物管理的新方法。当然，还有很多问题有待研究，但是根据已有的研究成果，我们可以预料放射性废物处理不会在经济上障碍核工业的发展。

二、放射性废物的性质

核工业产生很多种放射性废物。原子能委员会批准营业的手续和规则涉及到100种元素的900多种放射性同位素。含有这些同位素的废物可以是气体、液体和固体，其中有些可溶于水，有些不溶于水，但它们都能放出不同能量和种类的射线。虽然有些同位素衰变得很快，然而另一些同位素衰变到安全的水平则需要几百年的时间。

放射性物质的危害性在于它们有如下的基本特性：辐射是感觉不到的（除非是一下子受到很大剂量）；辐射效应往往有累积性，但有时这种累积性可能不明显；辐射不但会伤害个体，甚至会伤害到他们的后代子孙（由于损害了生殖细胞）。但是放射性物质的辐射特性却提供了测定其确实存在的可能性，并使这种测定能有相当的精确度。

最后要指出的是，放射性同位素的衰变不受外界环境的影响，每一种同位素的衰变有其自身特有的速率，而与温度、压力、外加的化学试剂无关。无论你对它怎样处理，它都照样继续衰变下去。放射性同位素的自然衰变是消除其放射性的唯一实际的方法。因此，所有放射性同位素的处理、贮存和使用都必然被看作是最终衰变处置的中间步骤。

1. 放射性废物的来源

只要使用放射性物质，就会产生放射性废物。到目前为

止、放射性废物的主要来源是：开矿、矿石加工、制备反应堆燃料和核武器装料等过程产生的含有天然放射性同位素的废物；核燃料辐照后产生的裂变产物废物；反应堆内非核燃料物质经辐照后产生的活化产物废物。现分别说明如下。

(1) 天然放射性 这是指自然界存在的物质所具有的放射性，这些物质就是存在于铀矿和钍矿中的天然核燃料。因此，在开矿、矿石加工和制备反应堆燃料等过程中产生的

放射性废物的类型和处置方法

放射性废物类别	废物来源	废物状态	主要放射性同位素	辐射类型	处 置 方 法
天然放射性	铀矿开采	固 态	铀-238	α, γ	堆于露天
		液 态	钍-230	α, γ	渗入土地中
		气态和粉尘	钍-222	α	排入大气中
	核燃料制造	固 态	铀-238	α, γ	去 污
			铀-235		
		液态(酸性)	铀-238 铀-235	α, γ	中和，浓缩，埋入土中
粉 尘	铀-238 铀-235	α, γ	气体经过滤后排入大气		
裂 变 产 物	反应堆和后处理厂	固 态 或 液 态	锶-90	β	装在容器中长期贮存(约600年)
			铯-137	β, γ	
			钚-99	β	贮存数年后就地固化
			钐-103	β, γ	
			钐-144	β, γ	
		气 态	碘-131	β, γ	加试剂使变为固态(如碘化银)
			氙-85	β, γ	排入大气

续表

放射性的废物类别	废物来源	废物状态	主要放射性同位素	辐射类型	处 置 方 法
活 化 产 物	反应堆结构材料	固 态	钍-232	β, γ	包装后送去埋藏
			铀-235	β, γ	
		液 态 (溶于水)	钍-232	β, γ	蒸发或离子交换后, 残渣去埋藏
	同位素造	固 态	钍-232	β, γ	放置衰变后排入大气(半衰期很短)
			铀-235	β, γ	不再有用时送去埋藏(半衰期较长)
			钍-232	β	贮存衰变至安全水平(半衰期短)

废物就含有天然放射性物质, 其中主要是铀、钍、钷和镭(参见附录1及下表)。

大多数矿床是干燥的, 但是有些矿则需要每分钟从矿井中抽出数百加仑的水, 以保持矿物干燥。这些水仅含有微量放射性物质, 对人体的健康没有明显的危害。平均每天处理1000吨铀矿石的矿石加工厂, 以每分钟300—500加仑的流速把废液排到池塘和湖泊中, 美国现有二十几个这样的工厂。废液中主要的放射性同位素镭掺杂在其它不溶性固体残渣(尾矿)中。

核燃料循环的下一步, 是将矿石加工过程提取出来的铀产品用化学方法提纯, 制成铀盐, 供气体扩散厂分离铀-235和铀-238, 也可用来制造金属铀或氧化铀的燃料元件。后者称为铀精制过程。在这一过程中, 每处理1吨铀大约产生1000加仑废液。

经过精制以后用来制造燃料元件的铀的放射性是很低的。这是因为铀本身的放射性很低, 而放射性较高的镭、钍和其它放射性衰变产物又都已除去了。因此, 燃料元件加工

厂仅产生少量放射性很低的废液，但是会产生放射性废屑。

(2) **裂变产物** 从放射性强度来说，核燃料在反应堆中受中子轰击而分裂产生的裂变产物（一个铀原子裂变时，主要分裂成两个较大的碎片，这种碎片叫作裂变产物）是放射性废物的主要来源。裂变产物要经过一次或数次衰变后，才能变成稳定而无害的原子核（见附录2）。在反应堆里用过的燃料中仍然有能够使用的燃料混杂在裂变产物里，回收这些燃料是很重要的。因此，用化学方法来处理辐照核燃料是核工业不可缺少的一部分。这一化学处理过程产生大量的高放废物，这些废物中不仅含有裂变产物，还含有反应堆结构材料、化学试剂和腐蚀产物的活化产物。这种化学处理工厂称为核燃料后处理工厂。

有几种溶剂萃取流程可把有用燃料与辐照燃料元件里的裂变产物分离开。每处理1公斤铀，会产生1—100加仑高放废液，其中处理1公斤天然铀或低浓缩铀原料产生1—10加仑废液，处理1公斤高浓缩铀燃料则产生10—100加仑废液。到目前为止，虽然后处理厂处理的主要是美国原子能委员会所属的生产堆（钷生产堆）用过的天然铀燃料，但将来一定会有越来越多的核电站用过的燃料需作这种处理。

对未来核电站辐照燃料后处理产生的高放废液量的预测并不一致，一般估计是，到本世纪末每年将产生600万加仑高放废液。放射性较弱的废液也将同时产生，在过去二十年里，就约产生和处置了40亿加仑。就其量而言，与其它工业（如造纸工业，化学工业、垃圾处理厂）相比，核工业产生的废液是微不足道的。

(3) **活化产物** 在反应堆内，核燃料附近的其它材料

受到辐照就会产生活化产物。结构材料、冷却剂和冷却剂中的杂质都可被中子活化（变为放射性的），例如微量的铁、镍和其它腐蚀产物就会同反应堆的冷却剂一起被带入反应堆中，当它们通过反应堆活性区时，就会受到辐照。附录3中列出了几种典型的活化产物（放射性同位素）。

最近评价了美国六个核电站的废物管理的经验，这六个核电站是依利诺斯州的德累斯顿-I 电站，密执安州的大岩角电站，加利福尼亚州的亨博尔特湾电站，明尼苏达州的埃克尔河电站，纽约州的印第安角-I 电站和马萨诸塞州的扬基电站。与其它工业比较，核电站产生的废液体积并不大，而且其总放射性也很低，核电站排出的放射性废液的浓度低于允许排放限值。

在美国原子能委员会所属的铀生产工厂，特别是在华盛顿州里奇兰的汉福特工厂，由于冷却剂在反应堆中受到辐照而产生了大量的低放废液。汉福特工厂必须处理直接用来作

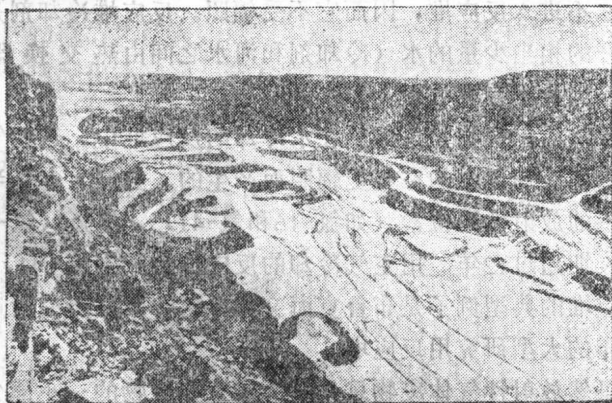


图2 美国新墨西哥州的露天铀矿

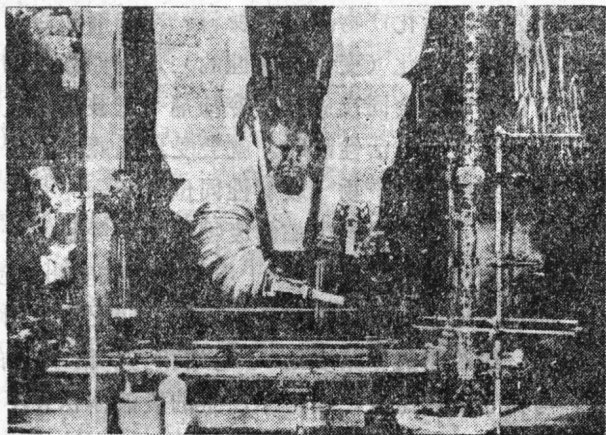


图3 “热室”操作人员用机械手
从废液中提取有用的裂变产物

为反应堆冷却剂的大量的哥伦比亚河水。美国原子能委员会所属的南卡罗利纳州艾肯的萨凡那河工厂也用河水冷却，不过河水不进入反应堆，因而它不受辐照。反应堆冷却剂是单独隔开的相当少量的水（冷却剂和河水之间由热交换器隔开），因此不存在处理大量水的问题。

有些活化产物是气体。在水冷却的反应堆中，这些气体是由水和冷却剂中的空气受辐照而产生的。它们大多是半衰期很短的放射性同位素（如氮-16和氩-41），但氚（氢-3）的半衰期超过12年。用空气冷却的反应堆会产生氩-41，这种反应堆的典型例子是布鲁克海文和橡树岭国立研究所运行了多年的大型研究用反应堆。

虽然放射性气体废物只是整个核工业废物的一小部分，但对它的控制和处置却是放射性废物管理中的一个重要方

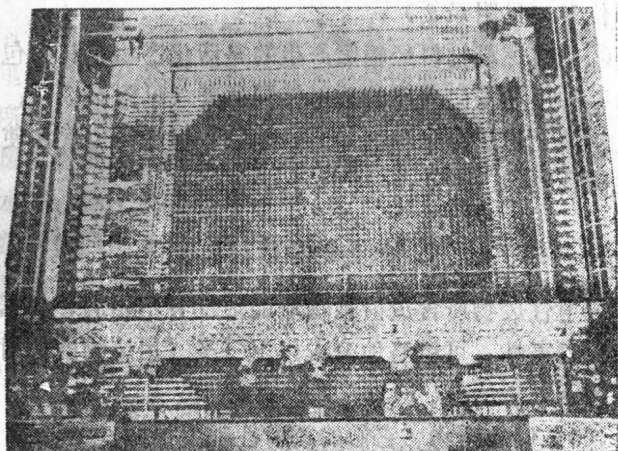


图4 汉福特生产堆

面。

(4) 放射性废物的其它来源 美国有4000多个单位制造和使用放射性产品，它们都产生多种放射性废物。这些数量极大品种繁多的放射性废物分别来自天然放射性同位素、裂变产物或活化产物。这些放射性废物可以多种形式存在，其中包括废化学试剂、蒸发器中的固体残渣、废树脂、污染的设备 and 材料以及医院、大学或私营企业的实验室产生的废液、污染的手套和工作服、破损的玻璃器皿等。即使我们使用封闭的放射性同位素，但当其放射性衰变得不能再用时，也还是需要处置。

综上所述，放射性废物有以下四个基本来源：

①开矿、矿石加工、铀精制和核燃料制造过程中产生的放射性废物是天然放射性同位素（见附录1）；

②核燃料辐照和辐照燃料后处理过程中产生的是裂变产

物同位素（见附录 2）；

③非核燃料材料经辐照产生的是活化产物，其中包括一些为某种用途专门生产的放射性同位素（见附录 3）；

④由上述三种来源之一所产生的放射性同位素在使用中产生的废物。

2. 废物的放射性强度

放射性废物所含放射性物质的浓度各不相同，根据它们潜在的危害性，可粗略地分成以下三类（用废物的放射性强度来表示）：

（1）**低放废物** 它们的放射性强度很低，经过适当稀释或简单处理后允许排到环境中去，但其放射性物质的浓度不得超过那些物质能安全地直接排放的浓度的1000倍。低放废液通常指放射性强度低于1微居里*/加仑的废液。

（2）**中放废物** 其量相当大，并且放射性物质的浓度也相当高，简单稀释后仍不能排放，它们的放射性强度比低放废物高100—1000倍。中放废液每加仑可含1居里的放射性。

（3）**高放废物** 每加仑高放废液可含几百至几千居里放射性，它们是由后处理厂产生的。高放废物能对人体造成严重危害，在它们的管理上也存在着复杂的技术问题。

3. 辐照对人体的潜在影响

人类总是会受到生活环境中天然放射性物质的辐照，这

* 1微居里是居里的百万分之一，1居里是指每秒钟有 3.7×10^{10} 个原子发生衰变。

些放射性物质存在于土壤和饮用水中，甚至也存在于我们的身体里。这种天然本底的辐射水平是很低的，X光透视一次牙齿所接受的辐射量要比一年的天然本底辐射量大10—100倍。废物管理的基本原则就是使我们周围环境维持这种低的辐射水平，而不使它增加。

放射性同位素一排放到环境中，就会产生一系列相互关联的物理和生物学过程，这是因为它们会随着空气和地下水运动，并且会保留在土壤和生物体内。有些过程甚至会引起原来已经稀释后排出的放射性同位素重新浓集，例如鱼能浓集磷-32，牡蛎能浓集铯-137。



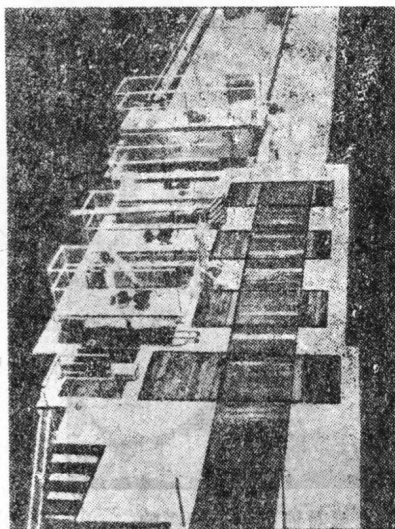
图5 研究受辐照的土壤对棉花生长的影响

随着核工业的发展，更需要研究排出的放射性同位素所经历的自然过程。不仅要了解放射性物质的浓度，而且也必

须注意到放射性物质的总量，一定不使它超过环境的允许限量。一些大的放射性工作单位正在加强研究，以保证严密控制排出的放射性废物不致对周围环境产生危害。

深入研究辐射对人体的长期影响也是很重要的，辐射能伤害人体组织细胞，从而直接影响到受辐照的人（躯体效应），或因伤害生殖细胞，而影响到他们的子孙（遗传效应）。受一定辐射量照射的人经过一个长时期以后，躯体效应的影响会逐渐减弱；虽然此项原则也有适用于遗传效应的可能，但还不是定论。

我们最关心的通常是那些半衰期最长的放射性同位素，



如铯-90和钡-137。我们还必须研究每种放射性同位素是怎样进入人体的，和它进入人体之后的转移规律。例如碘-131主要是通过食物链来传递的，即从空气到牧草，然后到奶牛，经由牛奶进入人体，在人体里它又聚集在甲状腺中。因此，虽然碘-131的半衰期相当短（仅八天），但仍然需要对它加以严格的控制。

图6 橡树岭国立研究所废物处理厂的废液贮池