



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

第1讲 放射性废物的来源、分类与管理

内容提要

- 1.1 放射性废物的来源
- 1.2 放射性废物的分类
- 1.3 放射性废物的管理



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 放射性废物（radioactive waste）定义：放射性废物是含有放射性核素或为放射性核素所污染，其放射性核素的浓度或活度大于审管机构确定的清洁解控水平，并且预期不再使用的物质。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

• 放射性废物的主要特点

(1) 放射性废物成份复杂：放射性废物中的核素一般有裂变产物、锕系核素、活化产物等多种。化学组成多为强酸、高盐、混合有机物等成份，给贮存、输送、处理工艺带来困难。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(2) 具有长期危害：放射性废物中含有的放射性物质，其辐射强度只能随时间的推移按指数规律逐渐衰减，除了尚在研究之中的分离—嬗变技术之外，任何物理、化学、生物的方法或环境过程都不能予以消除。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(3) 处理难度大：乏燃料后处理产生的高、中放射性废物，不但会对人体产生内外照射危害，核素的衰变还会释放出大量的热量，所以处理放射性废物必须采取复杂的屏蔽和封闭措施，具备通风或冷却条件，作业方式采取远距离操作及维修。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(4) 处理技术复杂：放射性废物形态复杂（各种浓缩物、沉渣、污泥、废有机材料等），一般情况下放射性核素的质量浓度远低于非放射性污染物的浓度，但其净化要求极高。因此要采取复杂的手段进行多次处理才能达到要求。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1 放射性废物的来源

- 1.1.1 核燃料循环前段废物
- 1.1.2 反应堆运行废物
- 1.1.3 核燃料循环后段废物
- 1.1.4 核设施退役废物
- 1.1.5 核技术利用废物
- 1.1.6 伴生放射性矿废物



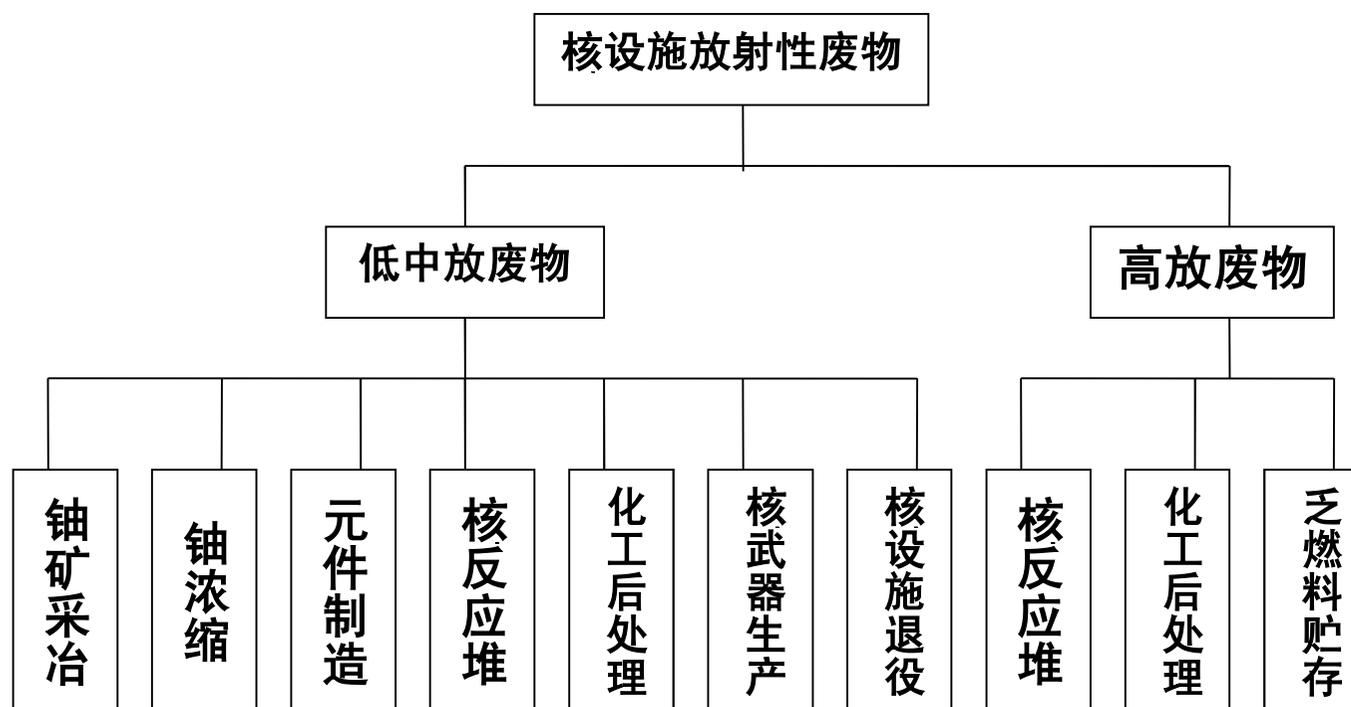
核燃料循环产生的放射性废物

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



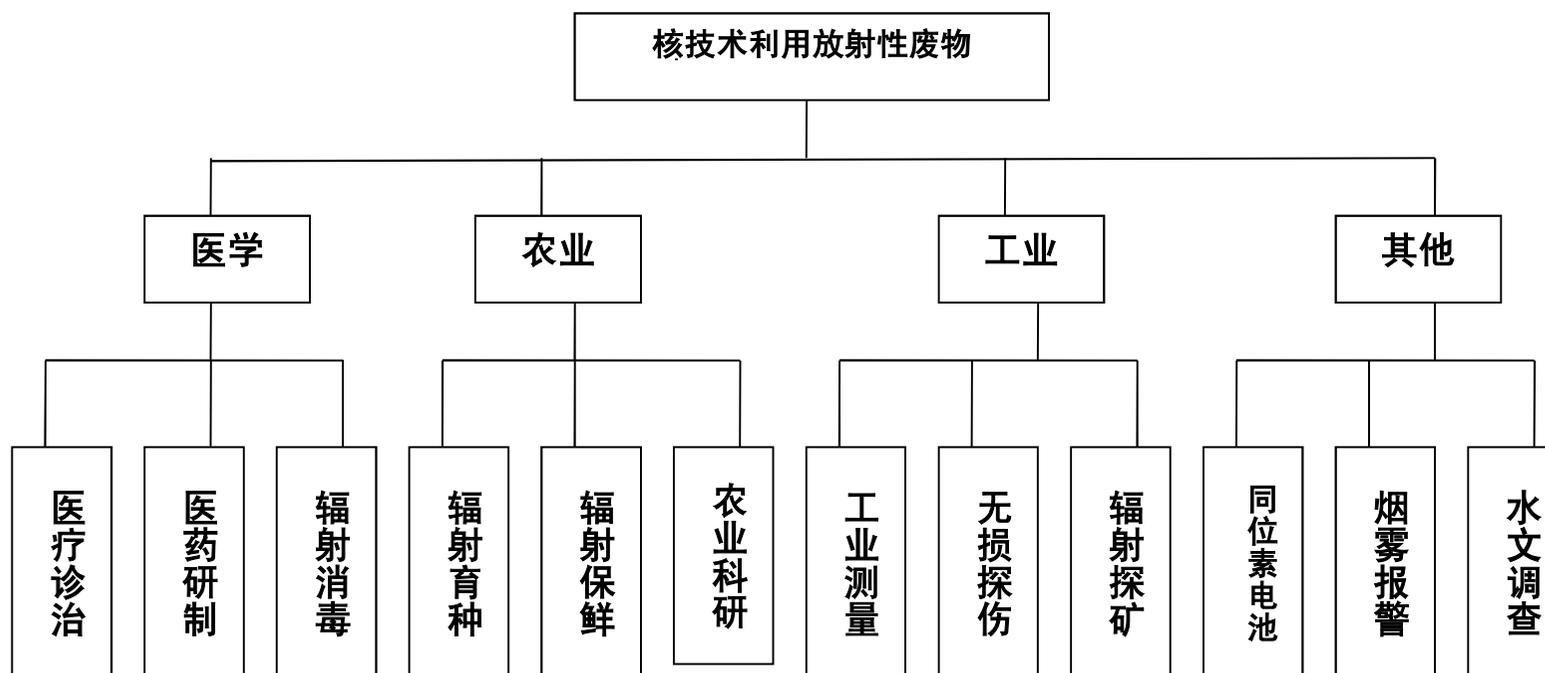
核技术利用产生的放射性废物

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



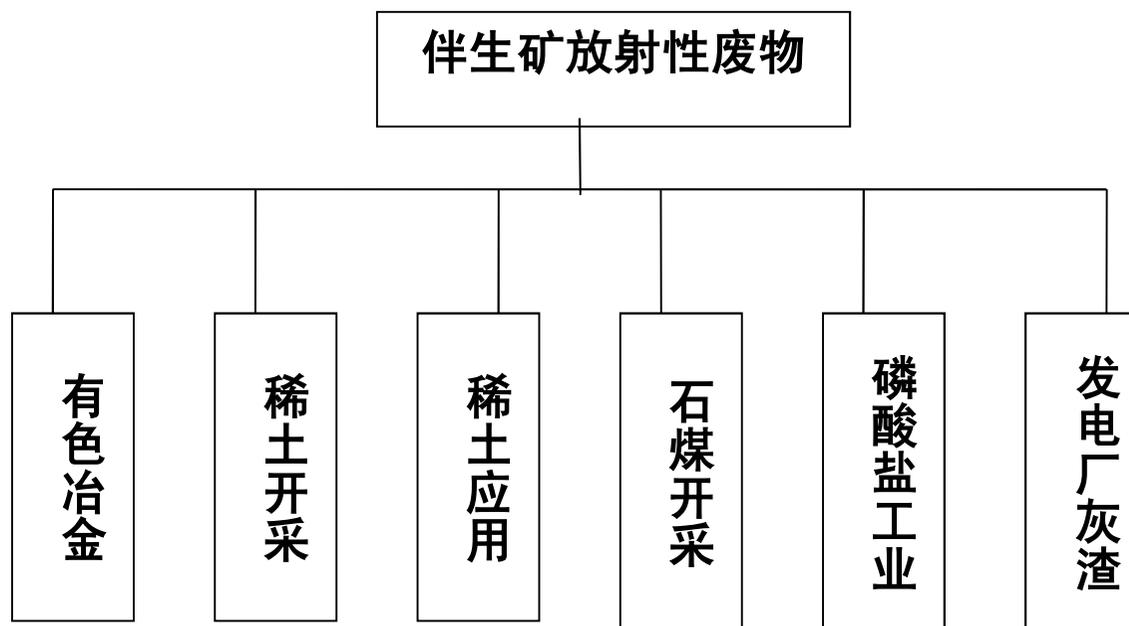
伴生矿产生的放射性废物

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.1核燃料循环前段废物

- “前处理”：铀矿开采、铀水冶、铀精制、铀转换、铀富集和燃料元件制造。
- 铀矿开采
- 废石
- 废气
- 废水



蕴藏巨大能量的铀矿石

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





核燃料循环前段流程图

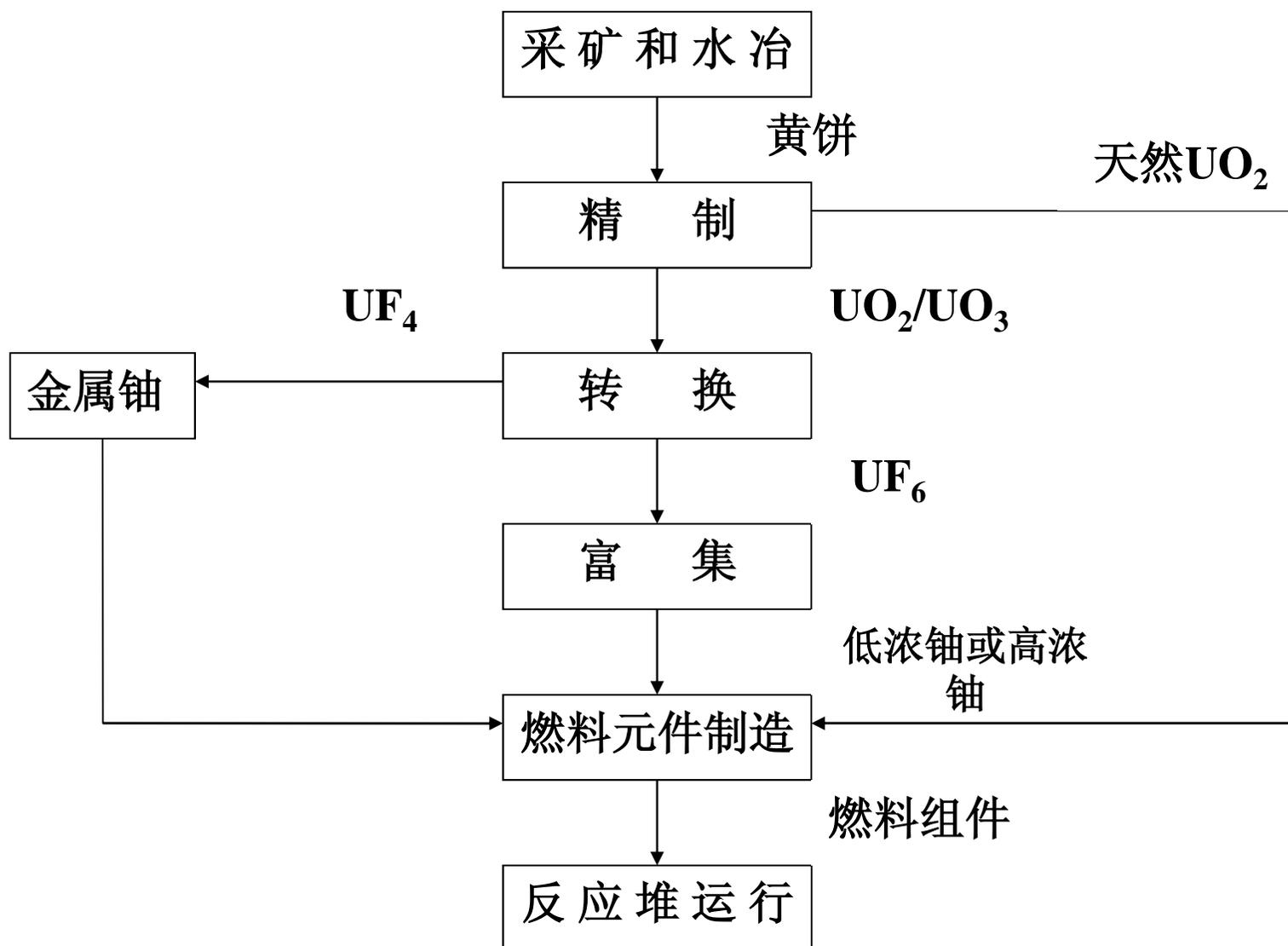
放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废石

- **采矿产生的废石**：露天开采1t铀矿石产生4~6t，地下采掘产生0.5~1.2t；
- **选矿产生的废石**：放选法废石率为15%~30%
- 废石中含铀量为 $(1\sim3) \times 10^{-4} \text{g/g}$ ，比正常土壤天然本底高4~10倍；表面 γ 辐照剂量率为 $(77\sim200) \times 10^{-8} \text{Gy/h}$ ，高3~15倍；废石表面氡析出率为 $(7\sim200) \times 10^{-2} \text{Bq}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，高5~70倍。



废气

- **氡及氡子体**、放射性气溶胶、铀尘
- 措施：**除尘降氡**，建立良好通风系统，采取**湿式作业**
- 氡的照射是人受天然辐射照射最重要的来源。氡及其短寿命子体对人体产生内照剂量的主要途径是**吸入并沉积在呼吸道内**，由它发射的 α 粒子对气管支气管上皮基底细胞产生很大的照射剂量。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废水

- 露天开采废水、地下采矿废水、铀矿石堆废水及冲洗车辆水、废石场废水
- 开采1t铀矿石产生0.5~5t废水，铀浓度0.2~5mg/L，比正常本底高4~100倍。
- 处理方法：①石灰石中和沉淀法除铀；②离子交换法除铀；③软锰矿吸附法除镭；④重晶石吸附法除镭等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

铀矿开采



露天铀矿场





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **地浸、堆浸和原地爆破浸出法**
- 地浸向地下注入大量化学试剂，可能会污染地下水和周围环境。
- 严格设计，及时封闭和地下环境恢复。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

堆浸提铀现场





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

铀水冶

- **尾矿砂**：铀浸出率约为95%，5%的铀残留在尾砂中，处理1t铀矿石产生1.1~1.2t尾砂，不属于放射性废物，但释放氡气，作为一类特殊废物应建坝存放。
- **水冶废水**：处理1t铀矿石产生5~8t废水，石灰乳中和法外，离子交换树脂除铀，吸附剂除镭。
- **水冶废气**：铀尘、氡、气溶胶



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

铀精制

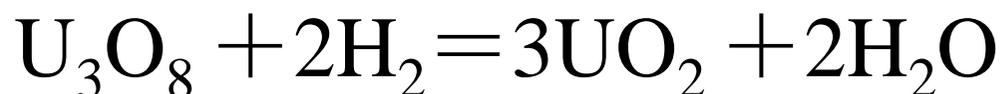
- **工艺方法：**将铀化学浓缩物提纯和铀氧化物制备的工艺阶段称为铀的精制。纯化的方法有溶剂萃取法、离子交换法和分步结晶法等。磷酸三丁酯（TBP）萃取法是典型的精制工艺。
- **精制产品：**硝酸铀酰 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 、重铀酸铵 $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ 、三碳酸铀酰铵 $(\text{NH}_4)_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$ 、八氧化三铀 U_3O_8 等。
- **铀精制**产生少量含天然铀低放废物。



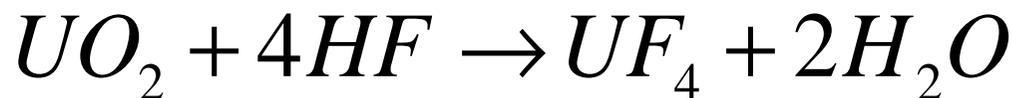
铀转化：六氟化铀的生产和转化

- 从铀水冶厂来的 U_3O_8 原料，从后处理厂来的硝酸铀酰溶液或三碳酸铀酰铵原料。

- 第一步：用氢气还原六价铀



- 第二步：把 UO_2 氢氟化为四氟化铀 UF_4



注： U_3O_8 是由 UO_2 和 UO_3 复合而成的同素异价氧化物。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

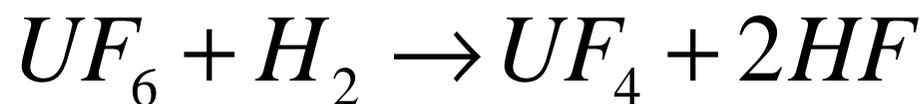
第3讲 放射性废物
的处置

退出

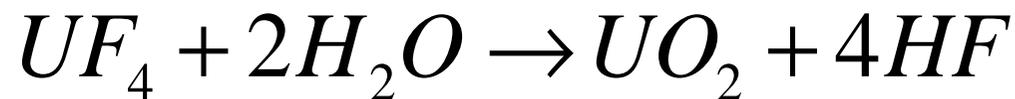
- 第三步：用氟气把 UF_4 氟化为六氟化铀 UF_6



- 六氟化铀氢气还原为四氟化铀：



- 四氟化铀水解为二氧化铀：





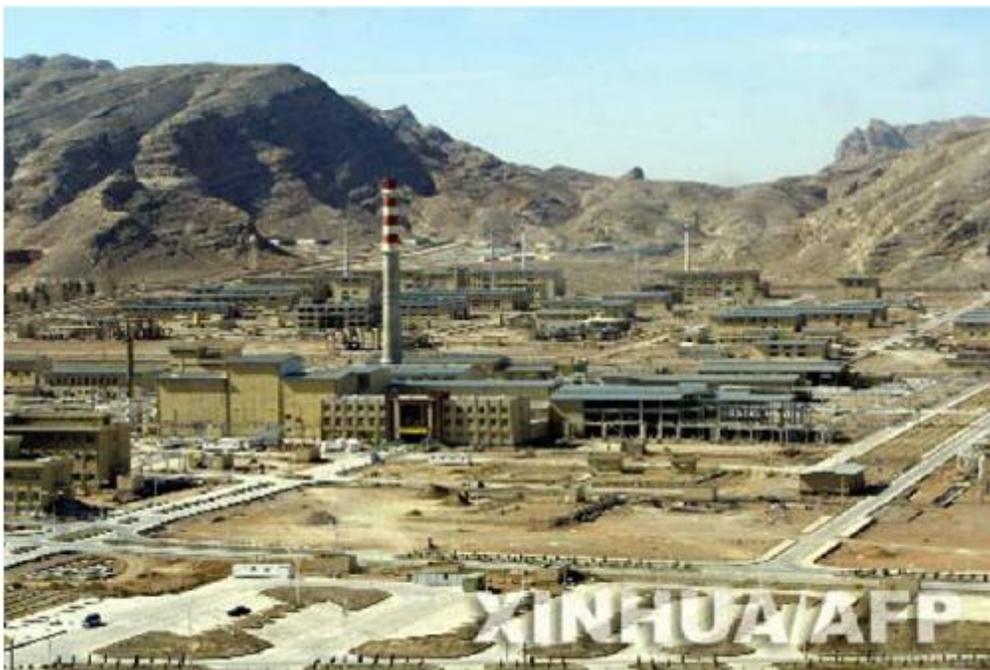
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出



伊朗伊斯法 罕的铀转化 工厂

伊朗纳坦兹 铀浓缩工厂





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

铀转化的废物

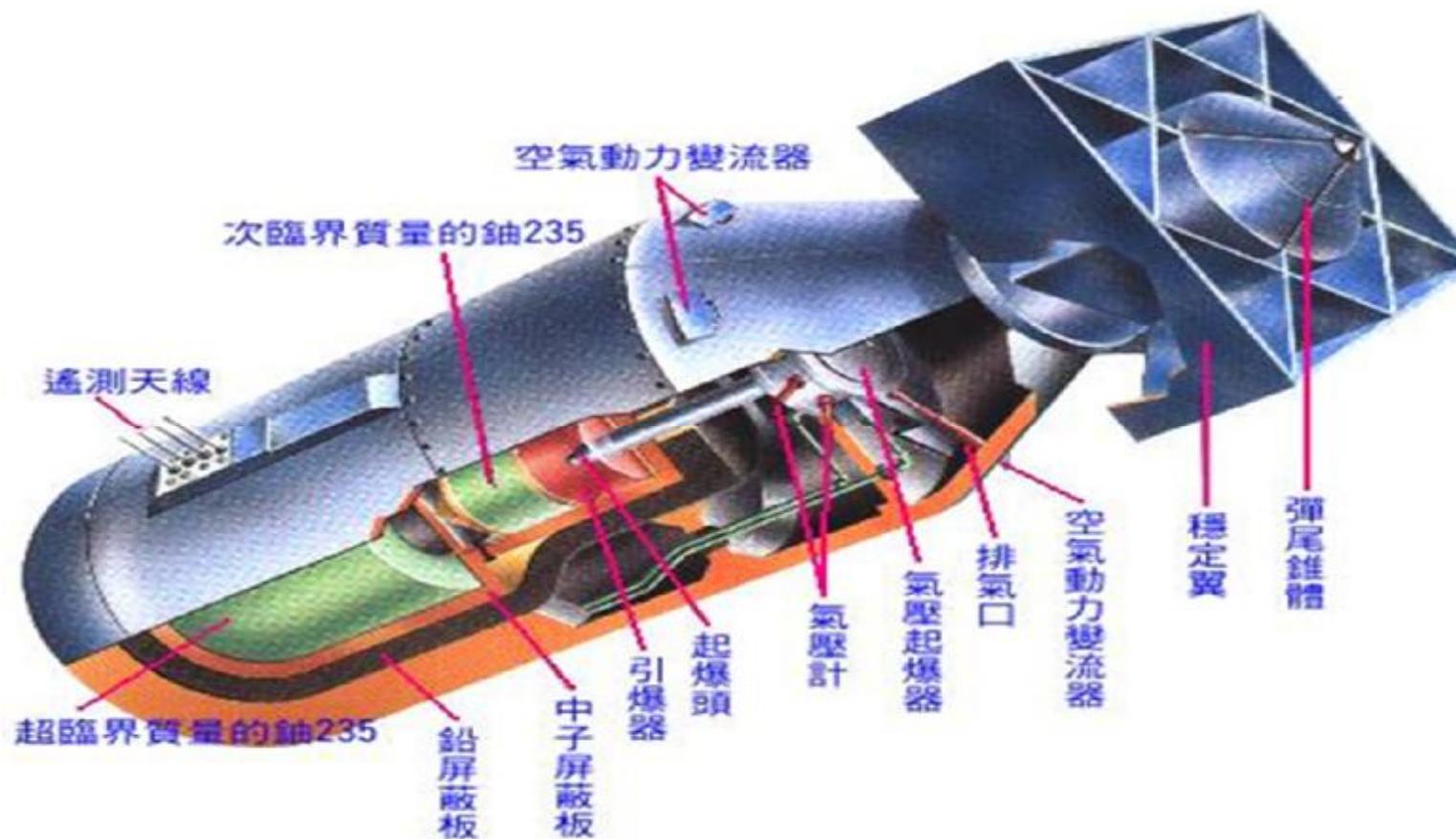
- 主要是固体 CaF_2 ，此外还有含 CaF_2 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和少量铀的泥浆废物， CaF_2 含铀量很低，但体积较大，经审管部门批准可作一般工业废物处理。



武器级铀-235制造的原子弹

放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置



退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

铀的富集

- 铀-235和铀-238，化学性质相同，仅在质量上有微小的差别，只能利用因质量不同而引起的效应，如速度效应、离心力效应和电磁效应来使同位素分离。
 - (1) 气体扩散法
 - (2) 离心机法
 - (3) 激光分离法
- 早期用过电磁分离法。



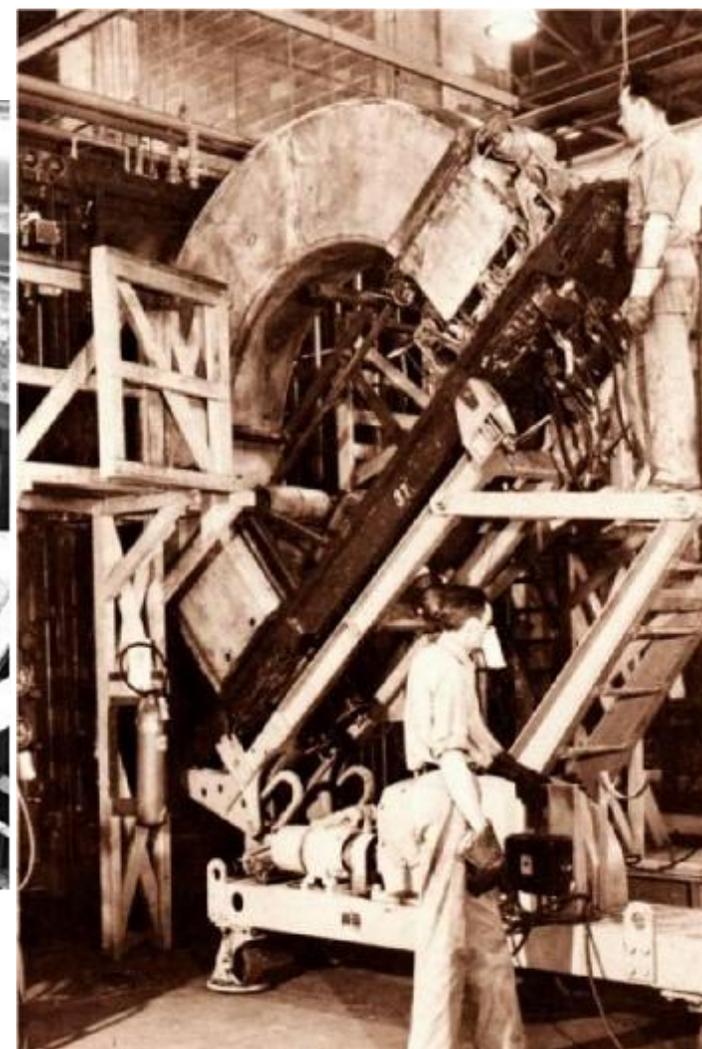
美国早期电磁分离装置

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出

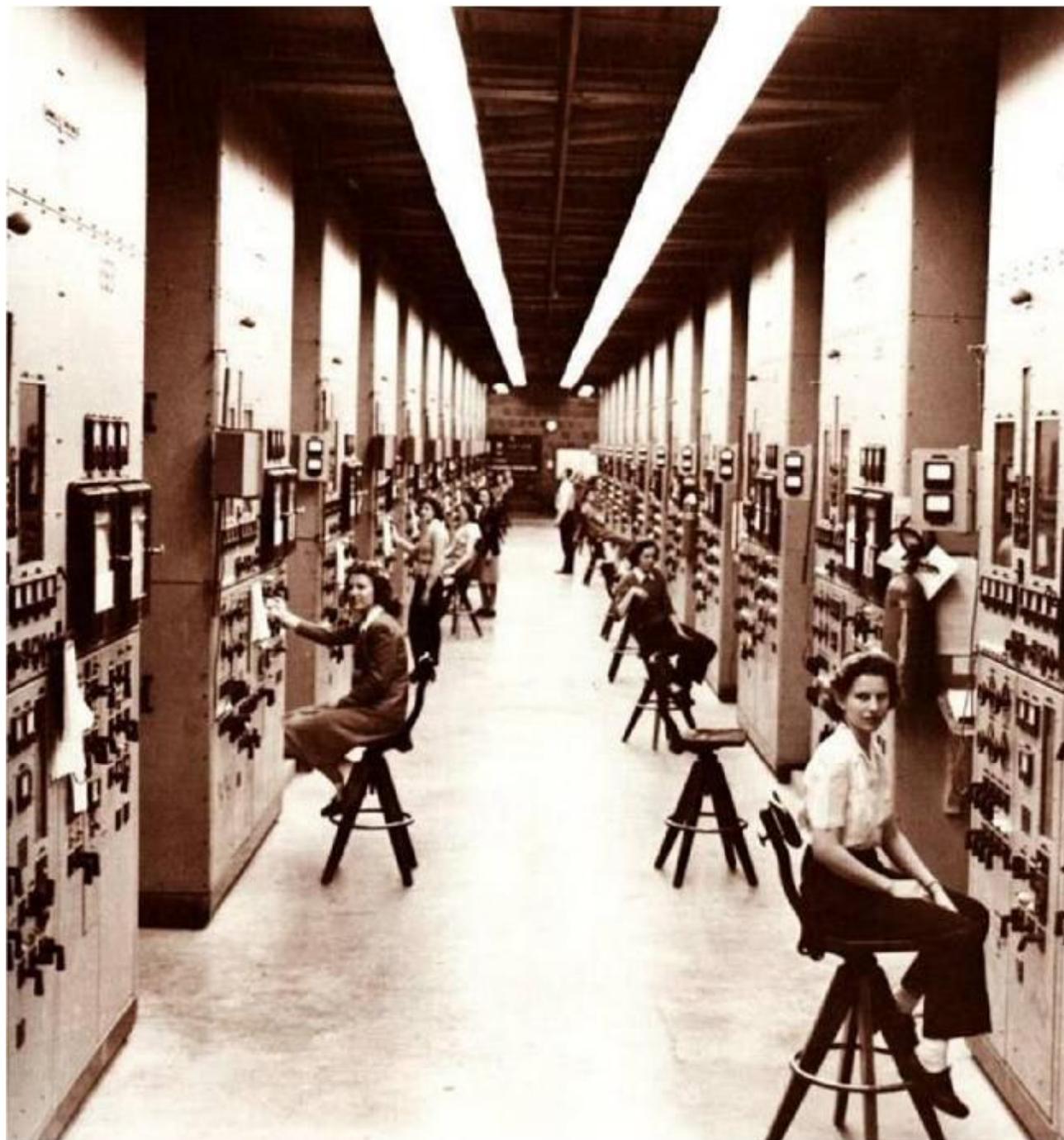


放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

Y12 电磁分离设施的女操作人员





换班的女操作员，谁会把她们与核武器联系起来呢？

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

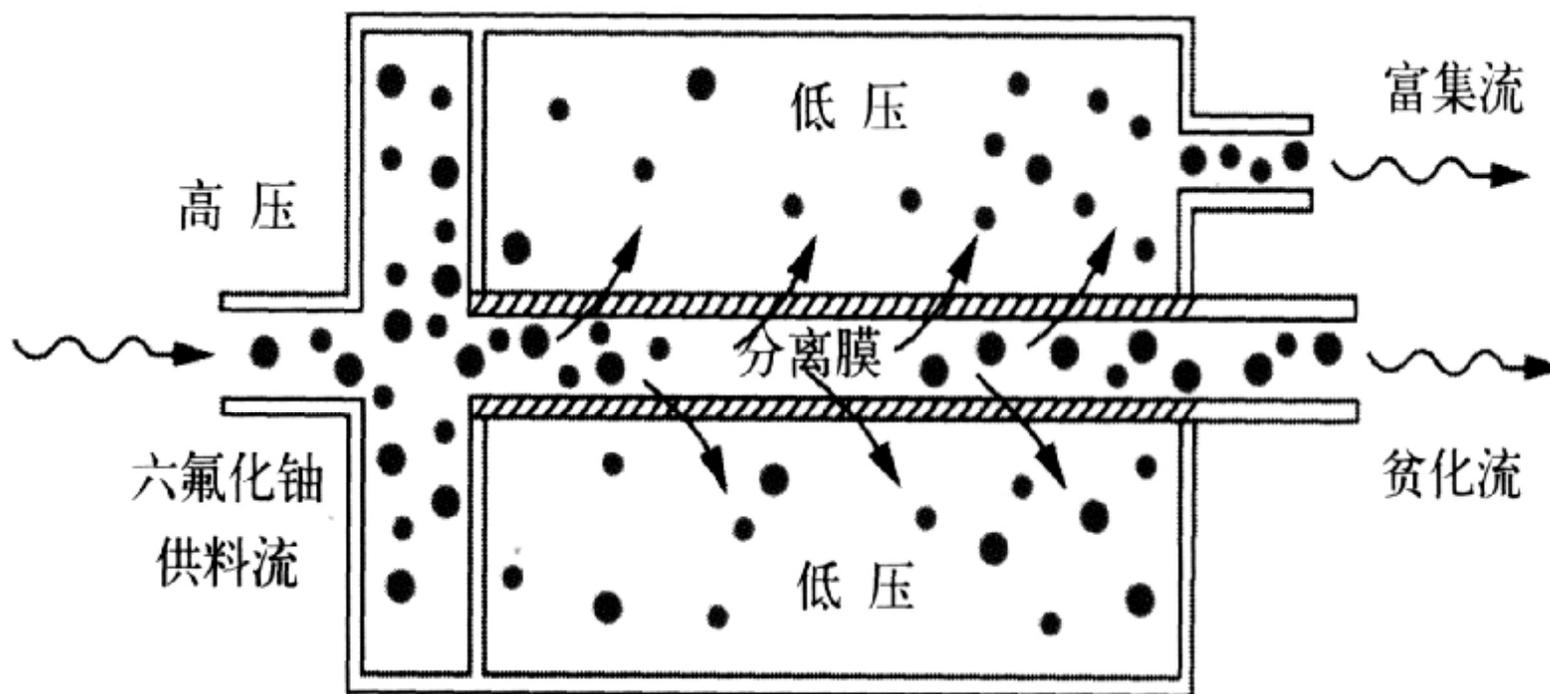
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

气体扩散分离法原理图



气体扩散同位素分离法的一个扩散级



中国60年代建成的气体扩散厂

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

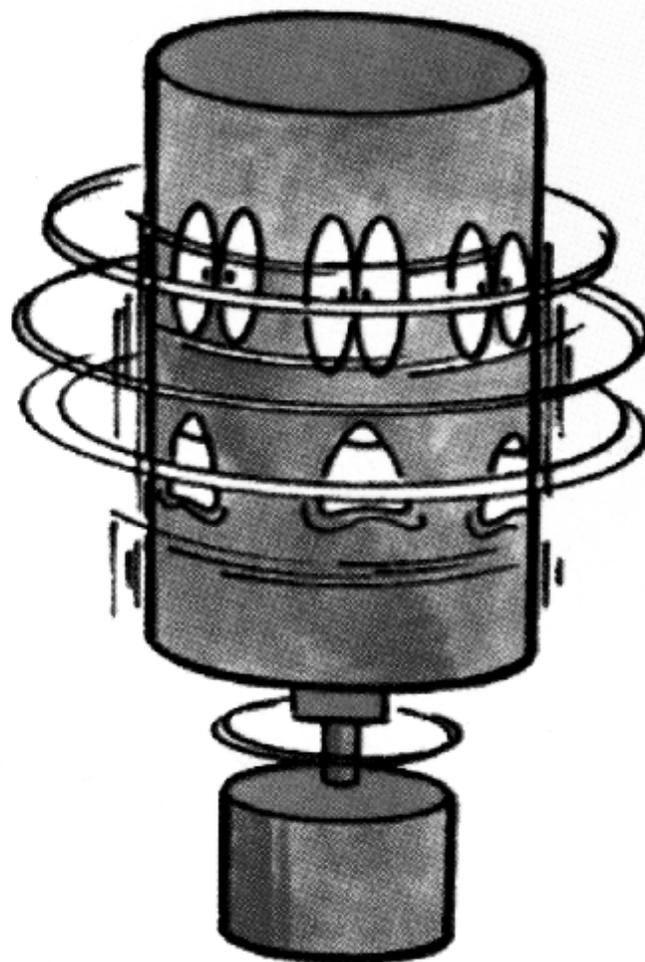
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

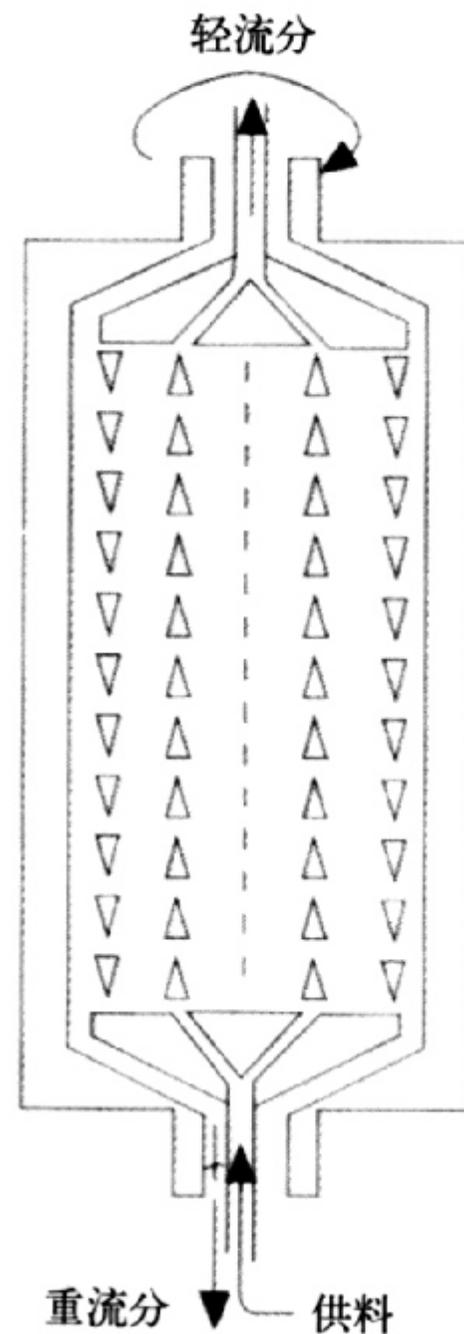
第3讲 放射性废物
的处置

退出

离心机原理示意图



离心机





美国俄亥俄州波特茅斯地下基地

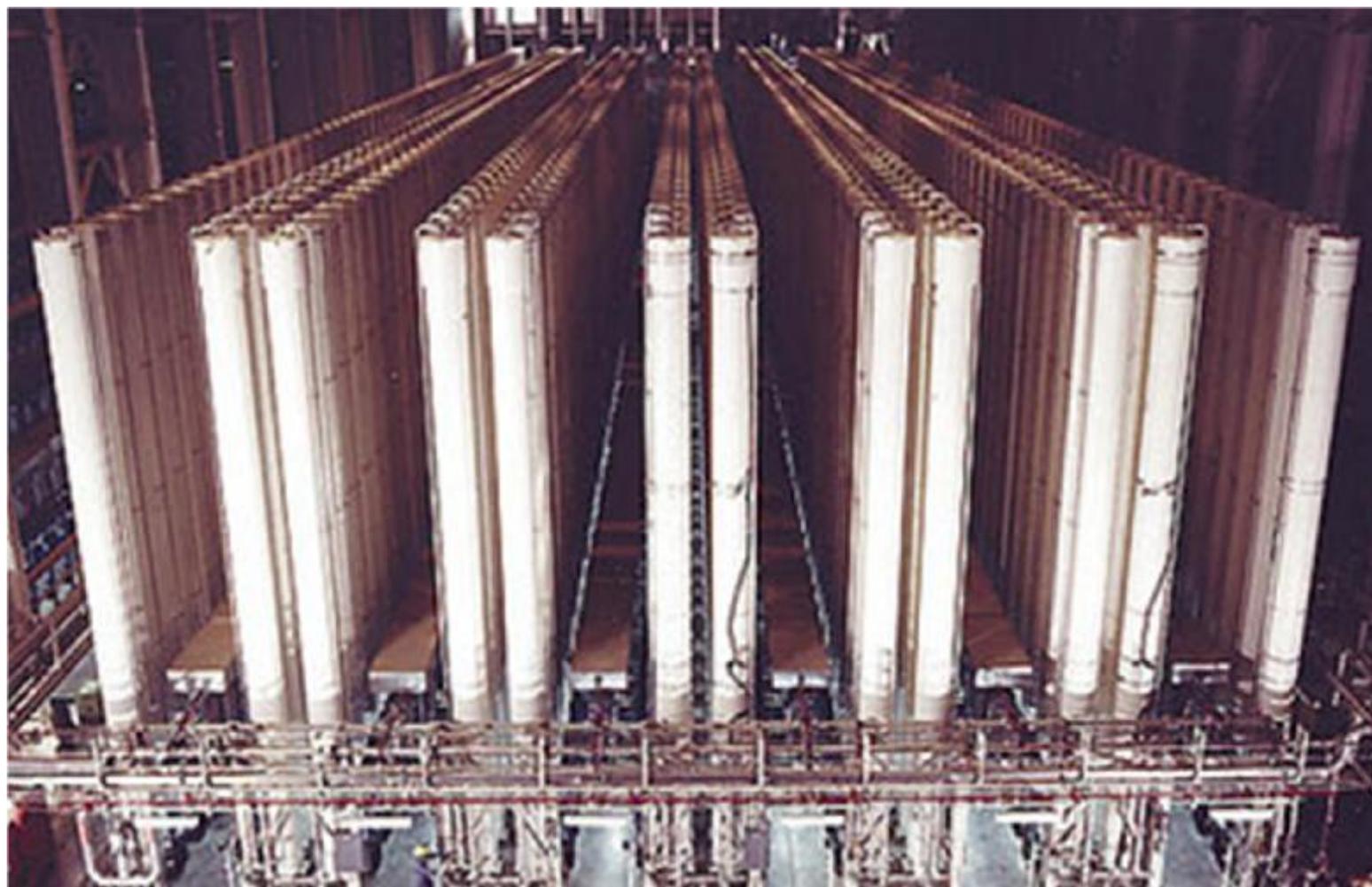
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





正在生产的离心分离厂

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

激光分离法

- 利用 ^{235}U 与 ^{238}U 质量差所引起的**激发能**差别。
- **原子激光法**是将金属铀蒸发，然后用一定波长的激光束将铀-235原子激发到一个特定的激发态或电离态，但不能激发或电离铀-238原子。再施加电场收集通向收集板的铀-235原子。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **分子激光法**首先用红外线激光照射六氟化铀气体分子。铀-235原子吸收这种光谱，从而导致原子能态的提高。再利用紫外线激光器分解这些分子，分离出铀-235。
- **铀浓缩生产的废物**
- 产生少量废物：废排风过滤器和清洗检修过程产生的废物。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

燃料元件制造

- 包含核燃料的最小独立结构单元称作燃料元件。
- **研究设计**：涉及核物理、裂变物理、固体物理、传热学和质量转移理论、材料科学、化学、固体和流体力学等综合知识。
- **制造检测**：一般由芯体和包壳组成。长期在强辐射、高温、高压、高流速的环境下工作，对芯体和包壳材料、结构和使用寿命有很高的要求。



二氧化铀陶瓷芯块

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



钷-239

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





轻水堆的燃料组件

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废
物的处理

第3讲 放射性废
物的处置

退出





乏燃料元件的运输

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

元件制造产生的废物

- 含铀固渣
- 制造混合氧化物燃料元件（MOX）所产生的铀污染废物，要作长寿命放射性废物处置。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

“前处理”小结

- 联合国环境规划署估计：铀矿山对环境的剂量贡献是水冶厂的3倍，是元件制造厂的30倍。
- 中国核工业30年辐射环境质量评价：我国铀矿冶职业照射集体剂量占核燃料循环系统的63.3%，环境公众受照集体剂量占核燃料循环系统的83.4%，我国铀矿山尾矿等排出氡产生的年集体剂量达2.5人·Sv。
- “前处理”过程的废物管理是应该加强的。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.2反应堆运行废物

- **反应堆运行功能：**动力堆、生产堆、研究堆
- **废物的核素来源：**裂变过程、活化过程
- **活化核素绝大多数为短寿命核素，而裂变核素以长半衰期为特征。**
- **途径：**元件泄漏和冷却剂净化，换料大修和设备检修产生气、液、固体废物。
- **实施废物最小化，废物量正在不断减少。**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

大亚湾核电站





研究实验反应堆

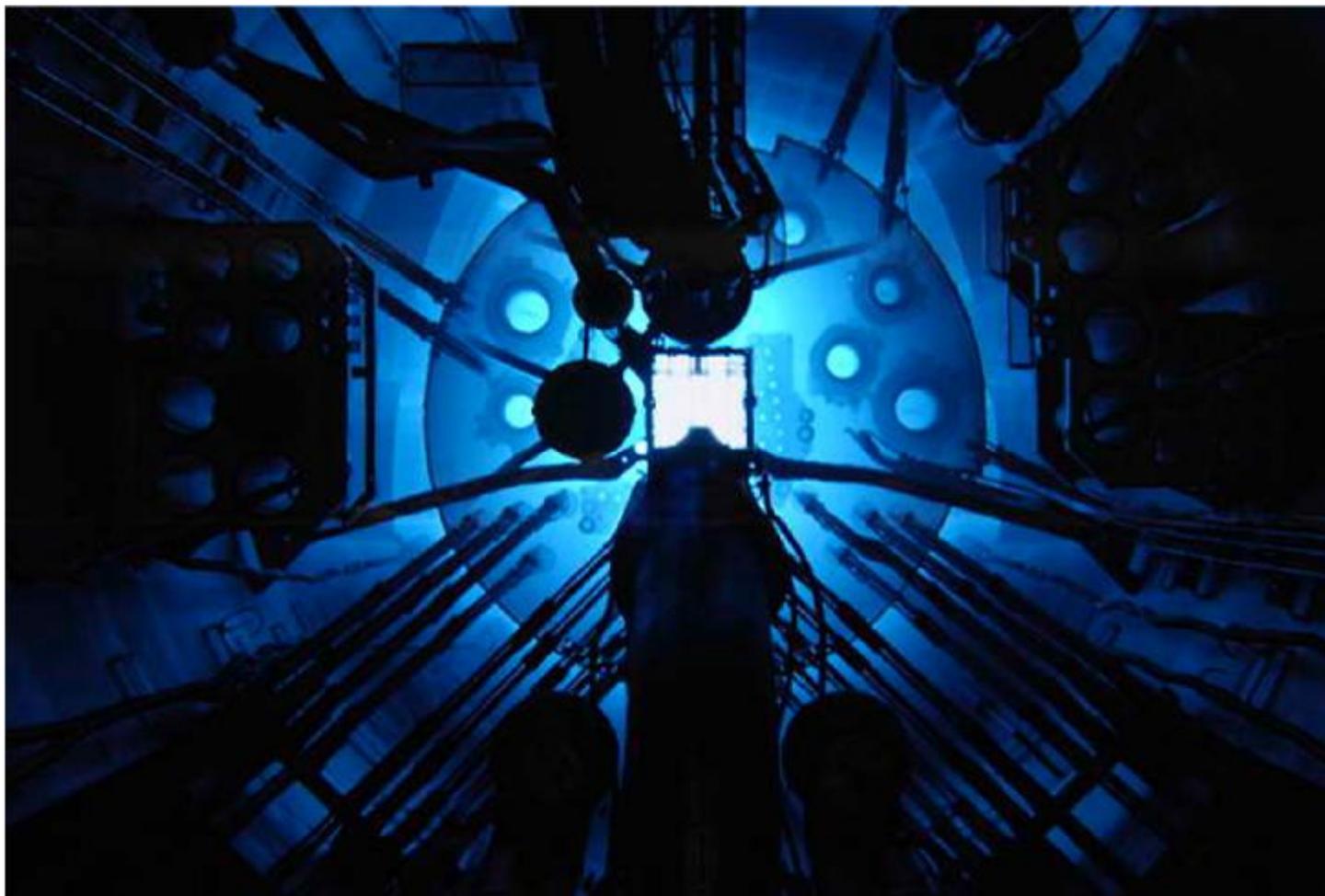
放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





中国核动力研究院高通量工程试验堆

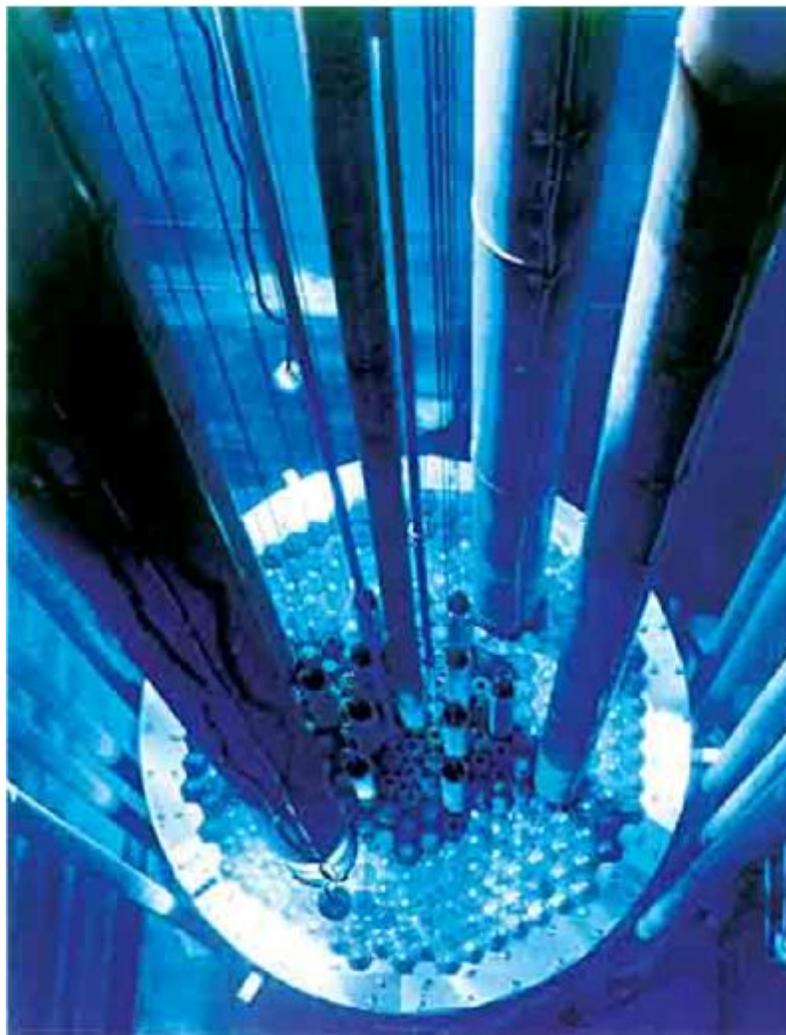
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





清华大学低温供热实验堆

放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出





清华大学高温气冷实验堆

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





中国原子能院钠冷实验快堆

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

举例：核电站废物的来源

- **裂变过程：**燃料元件包壳破损（通常小于0.1%）；
- **活化过程：**反应堆结构材料冲蚀-腐蚀产物 ^{60}Co 、 ^{55}Fe 、 ^{51}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{59}Ni 、 ^{65}Zn ；冷却剂 ^{13}N 、 ^{19}O 、 ^3H ；化学添加剂、冷却剂中杂质 ^{24}Na 、 ^{27}Mg 、 ^{45}Ca ；



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

^3H 的来源

- 冷却剂中氘的活化: $^2\text{H} + \text{n} \rightarrow ^3\text{H}$
- 冷却剂中锂的活化: $^6\text{Li} + \text{n} \rightarrow ^3\text{H} + ^4\text{He}$
- 硼的中子俘获: $^{10}\text{B} + \text{n} \rightarrow ^3\text{H} + 2^4\text{He}$
- 铀核三裂变反应
- ^3H 以HT和HTO进入废气和废液中



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

^{14}C 的来源

- 气体中杂质的活化反应
- ^{17}O 核反应: $^{17}\text{O} (\text{n}, \alpha) ^{14}\text{C}$
- ^{14}N 核反应: $^{14}\text{N} (\text{n}, \text{p}) ^{14}\text{C}$
- ^{13}C 核反应: $^{13}\text{C} (\text{n}, \gamma) ^{14}\text{C}$
- ^{14}C 以 CO_2 进入废气和废液中



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **一回路**冷却剂带有很强放射性，**二回路**介质也可能有放射性。
- 根据反应堆类型、功率、燃耗深度，计算机程序**可以推算出**堆芯裂变产物的核素组成和活度。根据燃料组件气密性，破损率，**可以推算出**包壳空隙内裂变产物的活度，以及一回路冷却剂中裂变产物和活化产物的活度。根据蒸汽发生器的泄露率，**可以推算出**二回路介质中裂变产物和活化产物的活度。
- 其他放射性废物主要产生于检修活动。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.3 核燃料循环后段废物

- 一次通过：乏燃料不作后处理，永久性的最终处置。
- “后处理”：回收乏燃料中的铀和钚并加以复用，只将裂变产物作最终处置。
- 高放废物和长寿命低中放废物
- 主要核素： ^{239}Pu 、 ^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs
- α 废物和超铀废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **乏燃料贮存**

- 据IAEA统计，到200年底，全世界积存的乏燃料约13万t，已进行后处理的乏燃料约7万t，现在，全世界卸出的乏燃料量约10500t/a。

- **贮存废物**

- 废树脂和废树脂再生废液
- 废空气过滤器和液体过滤器



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

乏燃料后处理

- (1) 回收铀和钚。相当于22000t石油/1t乏燃料。
 - (2) 转变成公众可接受的易于安全处置的形式。
 - (3) 可提取 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{99}Tc 、 ^{147}Pm 等有用元素。
- 对后处理的要求：能接受不同的核燃料；适合连续作业；最少量的直接维修。
 - 分离净化方法：湿法和干法
 - 后处理工艺流程：冷却、首端处理、化学分离（Purex流程）。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废

物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

普雷克斯 (Purex) 流程简图

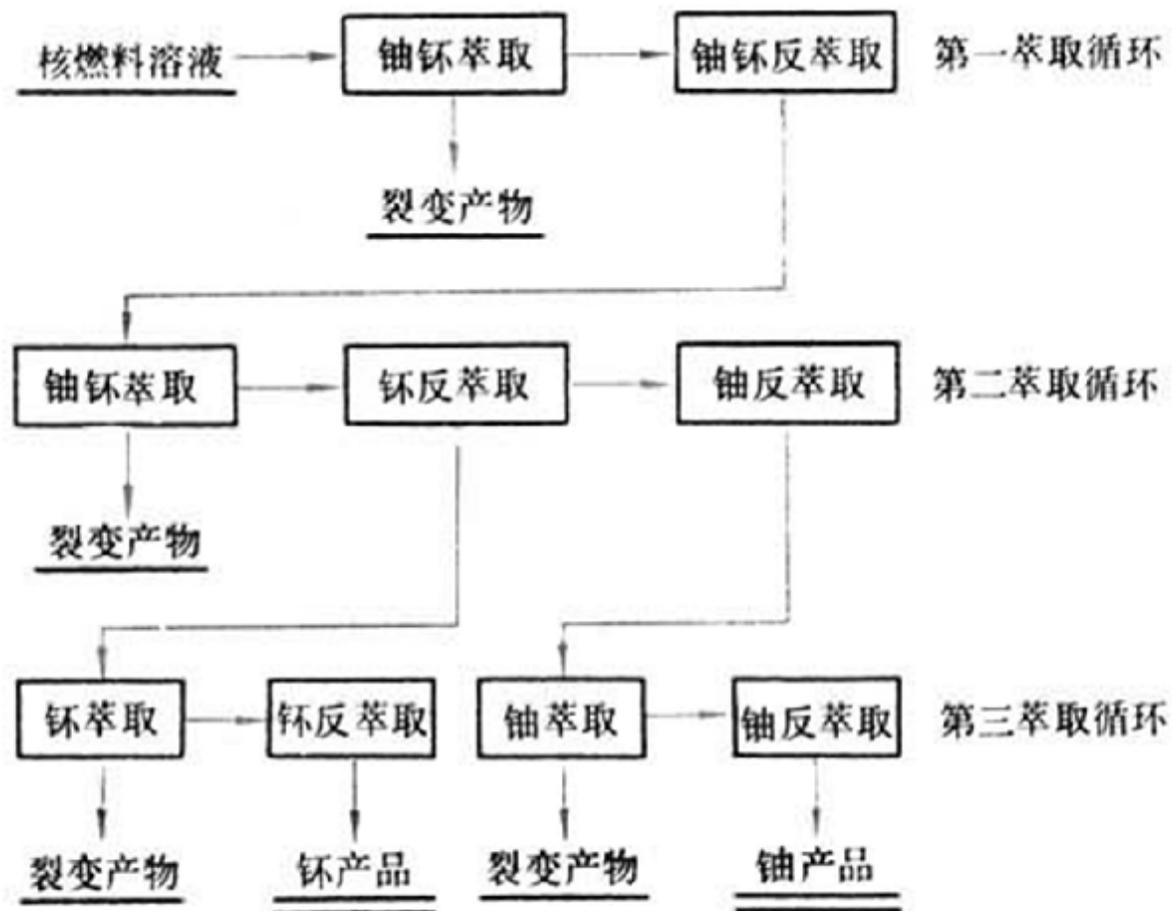


图2 普雷克斯流程



美国早期铀元素分离车间内景

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



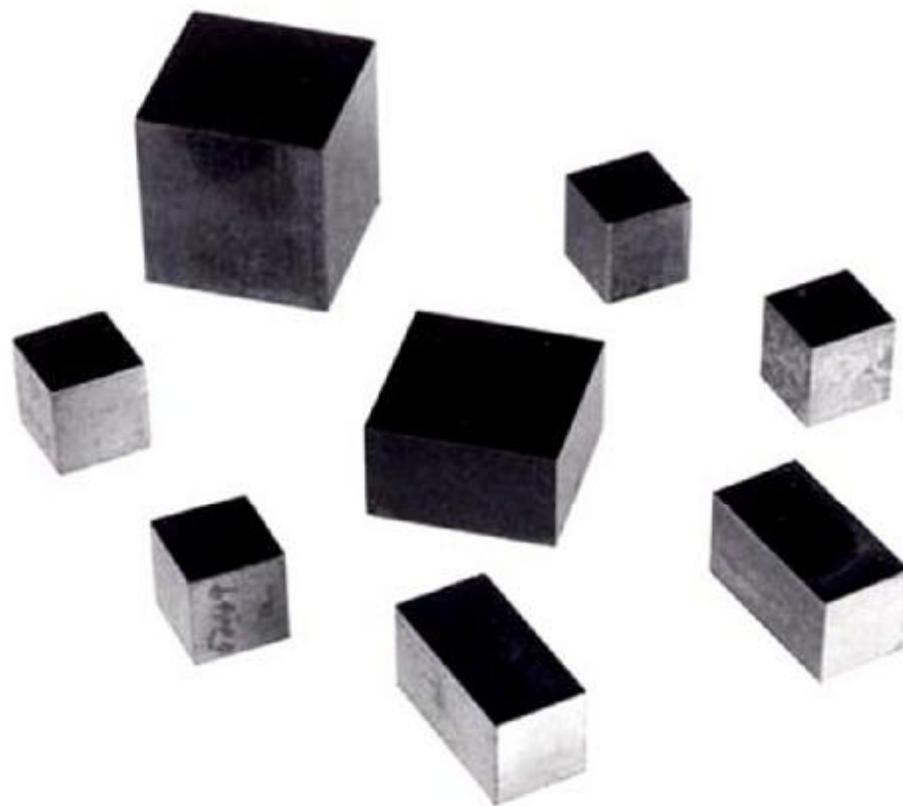
美国洛斯阿拉莫斯实验室 已经初步加工的铀金属块

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



酒泉原子能联合企业（404厂） 动力堆乏燃料元件中间试验工厂

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **废物产生量**（处理1t动力堆乏燃料）：
 - 0.1m³高放废物（含95%放射性）
 - 1m³中放废物（含3%放射性）
 - 4m³低放废物（含1%放射性）
 - 废有机溶剂：0.01~0.10m³/t燃料
- **重要核素**
 - 气载流出物：³H、¹⁴C、⁸⁵Kr和¹²⁹I。
 - 液态流出物：³H、¹³⁷Cs、⁹⁰Sr和钷。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.4核设施退役废物

- **退役**：使一核设施从服役进入计划的**永久退出服役**所需做的工作。
- 源项调查
- 放射性去污
- 拆除解体
- 环境恢复



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

IAEA规定的退役“三部曲”：

- (1) 一级退役：**监护封存期**。设备倒空、清洗、去污、管线封堵，适当进排风；对厂房内外监测并定期检查。
- (2) 二级退役：**局部拆除期**。设备部分拆除，人员进出不需监测，不需进排风；对防污染屏障抽样监测，定期环境检查，**厂址有限制开放**。
- (3) 三级退役：**最终处置期**。设施全部拆除，设备全部运走，不需监测检查，**厂址无限制使用**。

退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

退役废物的特点：

- (1) 绝大部分的是低放固体废物；
 - (2) 数量和体积庞大，组分复杂；
 - (3) 污染较牢固，不易去除，活化产物不可能分离与去除。
- 一座电功率1300MW压水堆退役产生废物15000~18000m³，含放射性约为 2×10^{17} Bq，**99%集中在反应堆堆芯中。**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.5 核技术利用废物

- **同位素废物**：来源分散，分类差，夹带生物废物。
- **废放射源**： ^{226}Ra 源、 ^{60}Co 源和 ^{137}Cs 源。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.1.6 伴生放射性矿废物

- **伴生矿废物：**含有较高水平天然放射性核素浓度的非铀矿，按建筑材料放射性核素限量（GB6566—2001）管理。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.2 放射性废物的分类

- 1.2.1 放射性废物的分类方法
- 1.2.2 国际原子能机构推荐的分类体系
- 1.2.3 我国的放射性废物分类
- 1.2.4 介绍几个国家的废物分类体系
- 1.2.5 豁免、清洁解控和极低放废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废物分类的作用

- 制定废物管理策略
- 规划和设计废物管理设施
- 确定放射性废物整备技术和处置方案
- 确定操作程序和组织实施
- 掌握各类废物的潜在危害
- 便于国际交流



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.2.1放射性废物的分类方法

- (1) **按物理、化学形态**: 气载废物、液体废物、固体废物
- (2) **按放射性水平**: 低放废物、中放废物、高放废物
- (3) **按放射性废物来源**: 核燃料循环废物、核技术利用废物、退役废物、铀伴生矿废物
- (4) **按半衰期**: 长寿命废物、短寿命废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(5) **按辐射类型分类**: β/γ 放射性废物、 α 废物

(6) **按处置方式**: 免管废物、可清洁解控废物、近地表处置废物、地质处置废物

(7) **按毒性**: 低毒组、中毒组、高毒组、极毒组废物

(8) **按释热性**: 高发热、低发热、微发热废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射源的分类

- I 类源，极度危险源：辐射装置等
- II 类源，高度危险源：工业 γ 照相源
- III类源，危险源：固定工业测量
- IV类源，低危险源：仪器源（学校）
- V 类源，极低危险源：医疗诊断



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.2.2 国际原子能机构推荐的分类体系

- IAEA 1970年提出的分类系统：**基于辐射防护要求**。
- **缺点**：不能为处置方式提供依据
- IAEA 1994年推荐的分类体系：**基于放射性废物处置**，适用于固体废物的分类。
- **特点**：处置方式、界限标准



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射性废物的区分

- 放射性废物和免管废物：0.01mSv
- 短寿命和长寿命低中放废物：
400Bq/g
- 短寿命低中放废物：10~20 $T_{1/2}$
- 长寿命低中放废物：地质处置
- 高放废物：释热率2KW/m³，深地质处
置
- 伴生矿废物：特殊，灵活处理



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

IAEA 2006年编制的分类标准，拟将放射性废物分为六类：

1. 免管废物
2. 极短寿命废物
3. 极低放废物
4. 低放废物
5. 中放废物
6. 高放废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.2.3 我国的放射性废物分类

- 国家标准：根据IAEA提出的建议，修订颁布了放射性废物分类标准(GB9133—1995)。
- 先按物理状态：气载废物、液体废物和固体废物；
- 再按比活度：高放、中放、低放、豁免废物；
- 固体废物按半衰期长短分为四类。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

气载废物的分类

名称	气载放射性废物浓度 A_v (Bq/m^3)		
类别	低放	中放	
限值	排放限值 $< A_v \leq 4 \times 10^7$	$A_v > 10^7$	

【注】**排放限值**：审管部门规定的限值和要求。如 $DAC_{\text{公众}}$ ：公众导出空气浓度，年摄入量限值除以参考人一年吸入空气量 $100000 m^3$ 。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

导出限值

辐射防护监测中，测量结果很少能直接用剂量当量来表示。但是，可以根据基本限值，通过一定的模式导出一个供辐射监测结果比较用的限值，这种限值称为导出限值。

- 气载放射性浓度的导出限值用导出空气浓度DAC表示，为年摄入量限值ALI (Bq/a) 除以标准人在一年工作时间内吸入的空气体积 V (m^3/a) 所得的商，即

$$DAC = ALI / V \quad (Bq/m^3)$$

- DAC可以用于评价工作场所空气污染状况时的参考。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

液体废物的分类

名称	液体放射性废物浓度 A_v (Bq/L)			高放
类别		低放	中放	
限值		排放限值 $<$ $A_v \leq 4 \times 10^6$	$4 \times 10^6 < A_v \leq 4 \times 10^{10}$	$A_v >$ 4×10^{10}

【注】**排放限值**：审管部门规定的限值和
要求。如 $DIC_{\text{公众}}$ ：公众
导出食入浓度，年摄入量限值除以参考人一年食入水量 800 kg。



固体废物的分类

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

名称	固体放射性废物比活度 A_m (Bq/kg)		
类别	低放	中放	高放
$T_{1/2} \leq 60d$	解控水平 $<$ $A_m \leq 4 \times 10^6$	$A_m > 4 \times 10^6$	
$60d < T_{1/2} \leq 5a$	解控水平 $< A_m \leq 4 \times 10^6$	$A_m > 4 \times 10^6$	
$5a < T_{1/2} \leq 30a$	解控水平 $< A_m \leq 4 \times 10^6$	$4 \times 10^6 < A_m \leq 4 \times 10^{11}$	$A_m > 7 \times 10^{11}$
$T_{1/2} > 30a$	解控水平 $< A_m \leq 4 \times 10^6$	$A_m > 4 \times 10^6$	$A_m > 4 \times 10^{10}$
α废物	单个货包 α 核素 $A_m > 4 \times 10^6$ ，平均每个货包 $A_m > 4 \times 10^5$		

豁免废物：对公众成员照射所造成的年剂量值小于0.01mSv，对公众的集体剂量不超过1人·Sv/a的含极少放射性核素的废物。

退出



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

1.2.4介绍几个国家的废物分类体系

- **美国放射性废物分类**
- 高放废物和铀矿冶废物
- **超铀废物**： α 核素 $\geq 3.7 \times 10^3 \text{Bq/g}$ ， $T_{1/2} \geq 20\text{a}$ 的超铀废物。
- **混合废物**：既含有放射性物质又含有化学危险物质的废物
- **低放废物**：分A、B、C三类，A、B类主要含短寿命核素，可近地表处置，C类含有较多或很多长寿命核素，必须作地质处置。州政府管辖的其他废物。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 国外有人提出一种分类方法，这种分类同时考虑放射性物质和化学毒物的所有毒性，用**废物分类指数WCI**来衡量和决定处置方案：

$$WCI = \log HI = \log \sum_{n=1}^k HI_n$$

- 式中，**HI—危害指数**；
- **k—废物中有害物质类的总数**；
- **HI_n —废物中第n种放射性物质或化学毒性物质的危害指数。**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

$$HI = HI_R + HI_C$$

- 式中， HI_R —放射性物质危害指数；
- HI_C —化学毒物危害指数。

$$HI_C = HI_{CG} + HI_{CH} + HI_{CE}$$

$$HI_R = HI_{RG} + HI_{RH} + HI_{RE}$$

- 式中， G —食入途径；
- H —吸入途径；
- E —照射或皮肤侵入途径。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

• 总废物分类指数WCI

$$WCI = \log \sum_{n=1}^i (HI_{RGn} + HI_{RHn} + HI_{REn}) + \log \sum_{n=1}^j (HI_{CGn} + HI_{CHn} + HI_{CEn})$$

- 式中， i — 放射性物质总数；
- j — 化学毒物总数。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.2.5 豁免、清洁解控和极低放废物

- **排除**：指有些辐射是不必受控制的。
- **豁免**：对公众成员有效剂量低于 $10\mu\text{Sv/a}$ ；所引起的年集体有效剂量不超过 $1\text{人}\cdot\text{Sv}$ 。
- **解控**：指经过去污、清污、熔炼等措施，低于或达到解除审管控制的活度浓度限值。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

极低放废物

- 放射性水平比豁免水平略高的低放废物，采用简易包装和简易填埋，可以处置在浅层填埋场中，覆土压实，监控30年场址就可以开放使用。
- 极低放废物比活度（活度浓度）的限值，高出免管废物1~2数量级。
- 多产生于核设施退役和环境整治过程，可占退役废物总量的50%~75%。



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

有些国家固体废物无限制释放的限值

国家	表面污染限值/(Bq/cm ²)	比活度限值/(Bq/g)
瑞典	4(β,γ)	0.5
芬兰	0.4(β,γ)	1
比利时	0.4(β,γ),0.04(α)	1

清洁解控水平国际上尚无统一规定。中国制定了豁免管理原则GB 13367—1992，钢和铝的清洁解控水平GB 17567—1998。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.3 放射性废物管理内容和废物最小化

- 以“安全”为目的，“处置”为核心。全过程(产生、预处理、处理、整备、运输、贮存和处置)的**优化管理**。
- 宗旨：**废物最小化**——拿出豁免的废物，可再利用的物料、能循环使用的物料。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.3.1 放射性废物的法制管理

国家法律：

- 《环境保护法》 1989年12月26日
- 《放射性污染防治法》 2003年6月28日
- 《水污染防治法》 1984年5月11日
- 《大气污染防治法》 1987年9月5日
- 《海洋环境保护法》 1982年8月23日



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射性废物管理的组织机构

- 行业主管： 国家国防科工局
- 最高安全监管： 环保部国家核安全局
- 环境监测： 省市县环保部门

- 主要产生和管理部门： 中核集团公司
- 直接责任者： 企业法人



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

国家法规、标准：

- 《放射性废物安全监督管理规定》
- 《放射环境管理办法》
- 《放射环境管理实施细则》
- 《建设城市放射性废物库的暂行规定》
- 《城市放射性废物管理办法》
- 《中低水平放射性废物库处置的环境政策》
- 《放射性废物管理规定》
- 《放射性废物分类标准》



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.3.2 放射性废物管理的基本原则

- 国际原子能机构国际原子能机构（IAEA）在放射性废物管理原则中提出了九条基本原则：
 - （1）**保护人类健康**：工作人员和公众受到的照射在国家规定的允许限值之内。
 - （2）**保护环境**：确保向环境的释放最少，对环境的影响达到可接受的水平。
 - （3）**超越国界的保护**：保护他国人员健康和环境影响。及时交换信息和保证越境转移条件。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- (4) **保护后代**：后代的健康。
- (5) **不给后代造成不适当的负担**：应尽量不依赖于长期对处置场的监测和对放射性废物进行回取。
- (6) **国家法律框架**：放射性废物管理必须在适当的国家法律框架内进行，明确划分责任和规定**独立的审管**职能。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- (7) 控制放射性废物产生：尽可能少。
- (8) 放射性废物产生和管理间的相依性：必须适当考虑放射性废物产生和管理的各阶段间的相互依赖关系。
- (9) 设施的安全：必须保证放射性废物管理设施使用寿期内的安全。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.3.3 放射性废物管理的重要环节

- (1) 进行安全分析和环境影响评价
- (2) 了解安全文化

美国三哩岛事故和**苏联切尔诺贝利事故**，安全文化是单位和个人对安全的认识和态度的总和，安全意识淡化是滋生安全隐患的重要原因之一。

- (3) 质量保证



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- (4) 研究和开发
- (5) 文件化和数据库
- (6) 人员培训和资格认定
确保废物的管理工作人员有必要的知识和技能。
- (7) 应急计划
针对有重大潜在危害因素的活动。
- (8) 有组织的控制



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

1.3.4 废物最小化

- 指废物量（体积和重量）和活度，**合理可达到的最小**。是放射性废物管理**基本原则之一**。
- **从源头抓起**
- **全过程管理**
- **共同负责任**
- **实现废物最小化方法**：优化管理、减少源项、循环利用、减容处理。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **最重要的措施：优化管理**
- 执行标准
- 严格分类
- 质量保证
- 周密计划
- 应急准备
- 培训人员
- 建数据库
- 专家把关
- 集中处理
- 流动处理



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **最有效的方法：减少源项**
- 先进工艺
- 优化设计
- 降低泄漏
- 减少维修
- 避免事故
- 减少污染
- 分类处理
- 二次废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **最倡导的方向：循环利用**
- 水的循环使用
- 酸碱回收
- 含硼废液循环使用
- 贫化铀再利用
- MOX燃料使用
- 废金属再利用
- 容器、工具、防护用品多次使用



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **最先进的手段：减容处理**
- 焚烧：减容20~100倍，减重10~80倍
- 压实：减容2~10倍
- 熔炼
- 去污
- 分拣
- 破碎
- 先进固化技术



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- α 废物最小化：重大经济和环境效益。
- **废物最小化的国际趋势**
- 法国：高放废物玻璃固化体从 $3\text{m}^3/\text{t}$ 重金属燃料降到 $0.5\text{m}^3/\text{t}$ ，处理1t乏燃料元件现在只产生2罐高放废物（1罐玻璃固化体，1罐压实的包壳和端头部件）。
- 法国核电站低放固体废物减容的成绩也很显著：1985年为 $375\text{m}^3/$ （堆年），2001年降到 $99.8\text{m}^3/$ （堆年）。



第一讲 完

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

第2讲 放射性废物的处理

内容提要

- 2.1 气载和液体低中放废物的处理
- 2.2 核电站废物的处理



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **2.1 气载和液体低中放废物的处理**
 - 2.1.1 气载低中放废物的特点
 - 2.1.2 气载放射性废物的处理
 - 2.1.3 低中放废液的净化处理
 - 2.1.4 先进净化处理工艺
 - 2.1.5 流出物的排放
 - 2.1.6 有机废液的处理



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射性废气

- 放射性废气主要产自放射性操作工艺过程的排气和设备泄漏，此外，还来自放射性实验室和厂房的排风。放射性废气中通常含有放射性粉尘、气溶胶、惰性气体和挥发性核素等。
- 与液体、固体废物相比，气载放射性废物排放可能造成的污染范围更大，对环境的影响更难预测和控制，因此，其净化处理及排放控制更应引起足够的重视。



2.1.1 气载低中放废物的特点

1. **活化和裂变**产生的人工核素、天然核素。
2. 伴随**常量有害物质**：粉尘、NO_x、SO_x、HF、CO₂、CO等。
3. 以放射性**气体、气溶胶和悬浮物**形式存在。
4. **放射性气溶胶**是固体或液体放射性微粒悬浮在空气或气体介质中形成的分散体系，粒径为 $10^{-3} \sim 10^3 \mu\text{m}$ ， $< 0.1 \mu\text{m}$ 不沉降， $> 10 \mu\text{m}$ 缓慢沉降。
5. **重要核素**：碘、氪、氙、氡、氙、碳、铯和钷。



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

- **碘**：卤族元素， ^{125}I ($T_{1/2}=60\text{d}$)、 ^{129}I ($T_{1/2}=1.6\times 10^7\text{a}$)、 ^{131}I ($T_{1/2}=8\text{d}$)。

来自核电厂运行和乏燃料后处理裂变产物，废气中碘量较大，对人体的危害较大。

用碘吸附器衰变贮存和湿法洗涤去除。

- **氙**：惰性气体， ^{133}Xe ($T_{1/2}=5.7\text{d}$)，裂变产额较高。
- **氪**：惰性气体， ^{85}Kr 不易分离，回收或稀释。
- **氡**：镭射气 ^{222}Rn ($T_{1/2}=3.82\text{d}$)，钍射气 ^{220}Rn ，锕射气 ^{219}Rn ；吸附和稀释。



南华大学氡实验大楼

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





氡实验装置

放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **氚**：氚在环境中主要以氚化水（HTO）形式存在，有极高迁移性，分离除去非常困难，氚易挥发、易扩散、易渗透。极易污染环境和被人体吸收。
- **碳**： ^{14}C 主要为活化产物，常以 CO_2 形态出现；当 $\text{pH}=10.2\sim 10.8$ 时， ^{14}C 主要以碳酸盐形式存在，可用阴离子交换树脂去除。
- **铯和钚**： ^{137}Cs 易挥发或 ^{106}Ru 半挥发核素，进入尾气系统。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.1.2 气载放射性废物的处理

- **处理对象：**放射性气体、放射性微尘和放射性气溶胶
- **处理目的：**是去除或降低放射性污染物，保护工作人员、公众和环境。
- **处理方法：**
 - 衰变式：**通风稀释、衰变贮存、低温回收
 - 处置式：**干法除尘、湿法除尘、吸附过滤



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

举例 放射性气体的处理

常见放射性气体为 ^{85}Kr 、 ^{133}Xe 、 ^{222}Rn 等**惰性气体核素**，不能用过滤法去除，一般可采用通风稀释、贮存衰变、活性炭滞留、液体吸收、低温分馏装置等方法去除。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

通风法

- 通风实际上是一种稀释法，通风降尘除氡，气流组织由低污染区流向高污染区，防止发生逆流和窜流。
- 白区（监督区）、绿区（清洁区或非限制区）、橙区（限制区或维修区）、红区（热区或污染区）。
- 橙区、红区的排风必须经过高效过滤器净化，监测合格排放。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

衰变贮存

对象：核电站工艺废气中短寿命的惰性气体

- **加压贮存**：约0.8MPa，贮存60d左右， ^{133}Xe 可衰变掉99.9%以上。
- **优缺点**：工艺成熟，系统简单；但设备庞大，容易出现泄漏。
- **活性炭滞留床**：工艺废气的氦和氙
- **优点**：常温常压运行，操作简单，可靠性高。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **活性炭滞留床**是利用活性炭的吸附特性，将放射性废气中的惰性气体在活性炭滞留床中滞留一定的时间，使惰性气体核素衰变到所要求的水平。
- 活性炭对 ^{85}Kr 、 ^{133}Xe 有良好的吸附性能，滞留床为常温操作，操作压力低，保持干燥状态的滞留床可长期使用，不需再生和更换活性炭。



填料吸收塔分离效率实验装置

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

实验室一角





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

液体吸收装置

- 利用各种气体成分在溶剂中的溶解度不同，使用氟利昂吸收溶解度较高的惰性气体 ^{85}Kr 和 ^{133}Xe ，再用洗涤法净化和分别回收惰性气体。
- 这一方法制冷成本低，溶剂价廉易得，稳定性好。



液膜分离实验设备

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废

物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物

的处理

第3讲 放射性废物

的处置

退出



圆盘塔中 CO_2 吸收液膜
传质系数测定设备



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

低温分馏装置

- 是将气载废物在 -170°C 低温下液化，通过分馏使惰性气体从气体中分离并得以浓集，这种方法对 ^{85}Kr 的回收率大于99%。



分馏实验装置

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出



流化床干燥实验装置



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射性粉尘的处理

- 一般工业除尘设备可用于处理含有放射性粉尘的气体。
- **干法除尘机理：**采用多孔介质或纤维物质作滤材，使气体通过时把不同粒径的尘粒和气溶胶截留在滤材上，达到净化要求。
- **净化效率：**微粒的粒径、密度、气流速度、滤材性质、滤材设置等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **旋风除尘器**：适于 $>5\mu\text{m}$ 尘粒；结构简单，操作方便。
- **袋式过滤器**：适于 $<1\mu\text{m}$ 尘粒，除尘效率可达98%。结构简单，费用低。
- **电除尘器**：适于 $0.05\sim 50\mu\text{m}$ 尘粒，除尘效率99%~99.9%。气流阻力小，能处理高温、高湿气体。
- **硅胶柱吸附器**：适于去除水蒸气和 NO_x 。
- **高温陶瓷过滤器**：内装微孔碳化硅陶瓷管元件，对 $5\mu\text{m}$ 尘粒，除尘效率99%。
- **烧结金属过滤器**



气体净化试验装置

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

工业规模布袋除尘实验装置





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **湿法除尘机理：**废气中的颗粒或放射性物质与水或其它液体接触，由于重力沉降、惯性碰撞、截留、扩散沉积与溶解等作用而去除废气中的颗粒和有害气体。适于净化高温、易燃、易爆的含尘气体。
- **除尘效率：**一般大于90%，可达到99.5%。
- **缺点：**耗能较大，产生废液和泥浆等二次废物较多。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 筛板塔
- 泡罩塔
- 填料塔：填料增加气液两相的接触面积。对于 $>3\mu\text{m}$ 粒径的颗粒，去除率约为90%。
- 喷淋洗涤器：喷淋的碱洗液如NaOH、KOH或 Na_2CO_3 ，可吸收 NO_x 、 SO_x 、HF、HCl等。
- 文丘里洗涤器：包括收缩段、喉管和扩散段。可去除气体中较多尘粒和吸收气态污染物，对 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ 尘粒，去除率80%~99%。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 碘同位素的处理
- 碘同位素（ ^{131}I 、 ^{129}I ）是放射性废气中主要的挥发性放射性核素，当排气中含有一定量的放射性碘时，需要采用**活性炭吸附器**进行处理。
- **液体洗涤吸收**是去除废气中碘同位素的另一种有效方法。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 常用吸附过滤器：碘吸附器
- 挥发性碘：I、I₂、HI、CH₃I等
- 碘吸附剂：活性炭对分子碘去除率不低于99.9%，对有机碘不低于99%。采用AgNO₃浸渍活性炭，不仅有吸附作用，还发生同位素交换去除碘，效果大大提高。





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

放射性气溶胶的处理

- 常见核素 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、钚及超钚元素，通常以很小的微粒被空气夹带，颗粒平均几何直径 $0.02\sim 0.7\mu\text{m}$ ，而且浓度很低，通常为 $10^{-3}\text{mg}/\text{m}^3$ 量级。
- 捕集放射性气溶胶粒子最有效的过滤装置是高效微粒空气过滤器（HEPA），有很高的除微粒效率，对于粒径 $<0.3\mu\text{m}$ 的颗粒，去除效率 $>99.97\%$ ，广泛用于几乎所有的核设施内。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

高效微粒空气过滤器

- **过滤机理**：通过碰撞、扩散、惯性、重力和静电等多种效应实现捕集微粒。
- **滤芯材料**：由玻璃纤维、石棉、聚氯乙烯纤维或陶瓷纤维构成，滤膜是以孔径为 $1\sim 4\mu\text{m}$ 的织物为基质材料的亚微孔纤维织物，层间用有机粘合剂粘合。滤膜的厚度仅为 $4\mu\text{m}$ ，质量厚度为 $80\text{g}/\text{m}^2$ ，因此，质地脆弱易碎，是一种**一次使用失效后即行废弃**的干式过滤器。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

HEPA的使用

- 两端设置压差计，发生阻塞，压差会升到高于500Pa；发生蚀穿，压差会降到低于10Pa，必须**更换过滤器芯**。
- 设置固定式 γ 仪表，监测过滤器外表面 γ 辐照剂量率。
- 前端设置预过滤器、除雾器，将进气加热升温到露点以上。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

气载废物处理方法的比较

- **除尘工艺和设备选择：**以安全、可靠为主。维修少，二次废物量少，人员受照剂量少。
- 核燃料循环活动中，**后处理厂、玻璃固化和焚烧炉运行**产生的气载废物的净化要求最高，难度更大，所采用的尾气净化装置是湿法加干法的综合处理系统。
- 例：原子能科学研究院¹³¹I生产车间除碘工号。



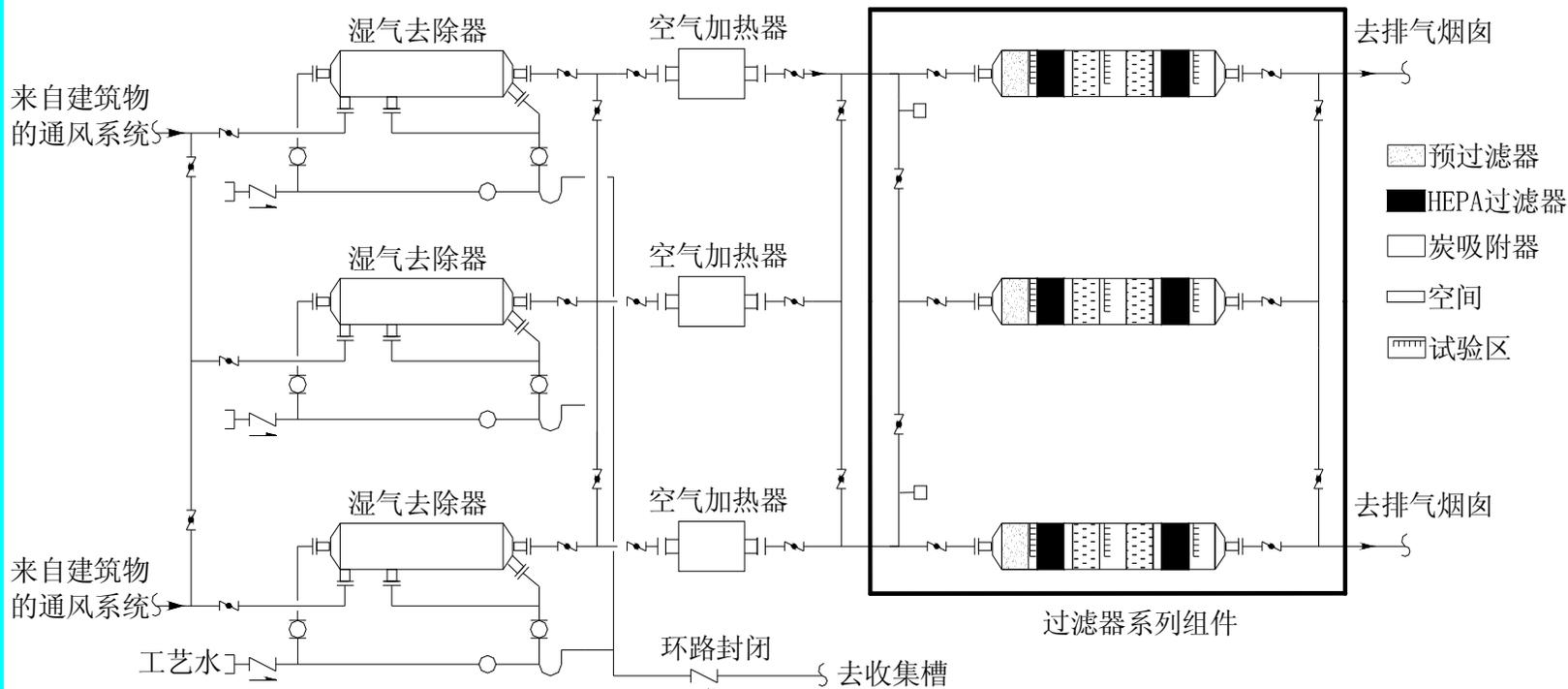
典型的废气处理流程图

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



核工业中常用的废气净化设备的去污因数

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

设备名称	颗粒物	挥发性钚	碘	NO ₂
旋风分离器	10	1	1	1
文丘里洗涤塔	100~600	10	2	2
冷凝器	100~1000	200	1	2
NO _x 吸收塔	10	10	20	5
填充喷雾塔	1000	100	1	4
硅胶柱	8	1000	1	100
碘塔	1	1	500	1
烧结金属过滤器	1000	1	1	1
高效微粒空气过滤器 (HEPA)	1000	1	1	1

退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.1.3 低中放废液的净化处理

- 各类放射性废液的比活度、含盐量差别很大，处理方法也不一样。
- 核工业放射性工艺废液一般需要多级净化处理，低、中放废液常用的处理方法有絮凝沉淀、蒸发、离子交换（或吸附）和膜技术（如电渗析、反渗透、超滤膜）。高放废液比活度高，一般只经过蒸发浓缩后贮存在双壁不锈钢贮槽中。



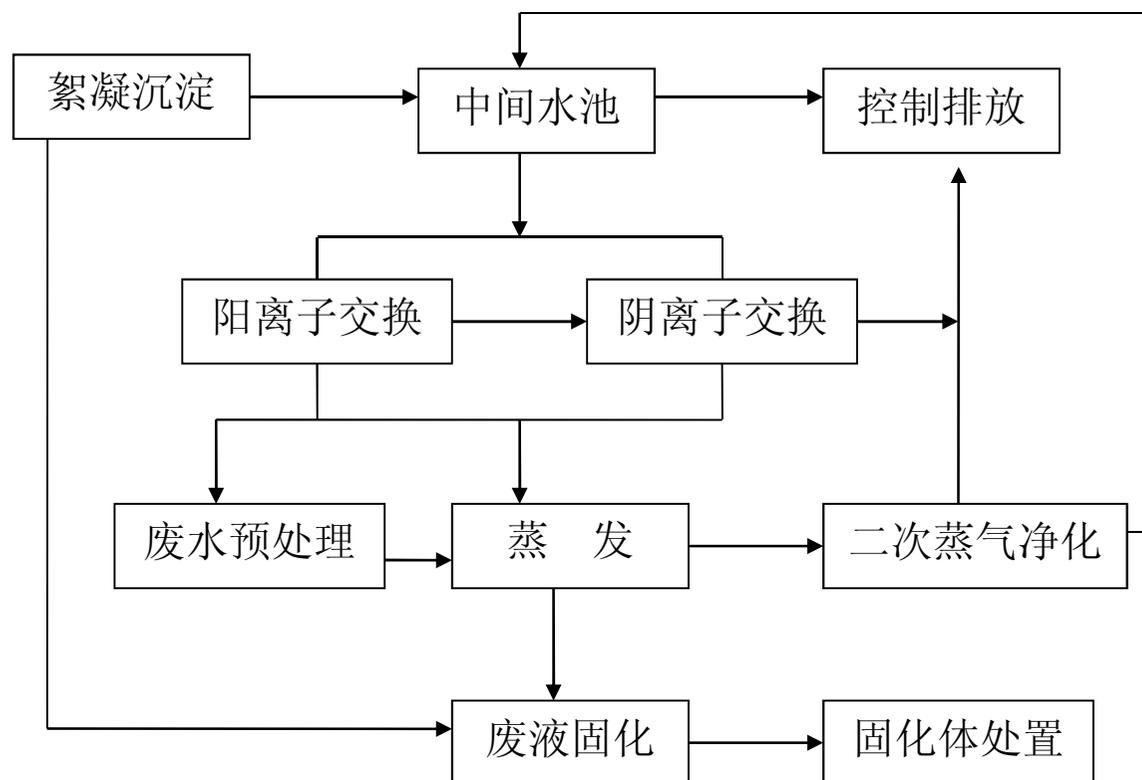
典型放射性废水处理工艺流程

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

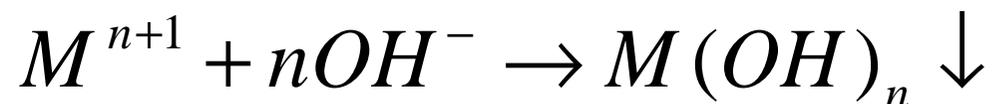
第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

沉淀法

- **去污机理**：离子态核素通过加入另一种离子或化合物使之转变成不溶性或难溶性化合物沉淀来达到分离。有沉淀、共沉淀或吸附作用。



- 式中，M—离子态核素
- 离子浓度的乘积大于浓度积，生成**沉淀**。
- 加入载体，发生**共沉淀**。
- 被吸附在别的沉淀物或晶体的表面，形成**吸附共沉淀**。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **放射性核素胶体**
- 溶液中絮凝剂**水解和缩聚反应**生成线性结构聚合物，与胶粒或微小悬浮物**吸附桥联**，或者因胶体粒子的**双电层受压缩和电中和**而凝聚。
- **影响因素**：加入试剂的种类、浓度、用量、加入的速度和方式、搅拌情况，废水的离子浓度、温度和pH值等。
- 去污因子 <10



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

沉淀法工艺流程与特性

- 沉淀法操作过程
- **沉淀法评价**：絮凝沉淀工艺较多用于处理组分复杂的低、中水平放射性废水，其方法简便，成本低廉。在去除放射性物质的同时，还去除悬浮物、胶体、常量盐，有机物和微生物等，一般与其他方法联用时作为预处理方法。
- 缺点是放射性**去除效率较低**，一般为50%~70%。产生的**污泥量较多**，需要进一步处理。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

蒸发浓缩法

- **工作原理：**加热把废液中大量水份汽化，将放射性物质浓缩、减少废液的体积。除少量易挥发性核素一起进入蒸汽和少量放射性核素被雾沫夹带出去外，绝大部分放射性核素被保留在蒸发浓缩物中，贮存等待进一步固化处理。
- **蒸发器类型：**釜式蒸发器、自然循环蒸发器（中央循环管式和外加热循环）、强制循环蒸发器、刮膜蒸发器等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

蒸发器的问题

- 结垢、腐蚀和**发泡**
- **蒸发法评价**：较多用于高、中放废液，可处理含盐量高达200~300g/L的各种废液。处理能力大(0.5~6t/h)，**净化效率高**($10^3 \sim 10^6$)，**减容倍数大**（几十倍至几百倍）。
- 蒸发法**不适合**处理含有易起泡物质（如某些有机物）和易挥发核素（如Ru, I）的废水；**蒸发耗能大**，系统复杂、运行和维修要求高，**处理费用较高**。
- 太阳能蒸发：天然蒸发池和太阳能蒸发



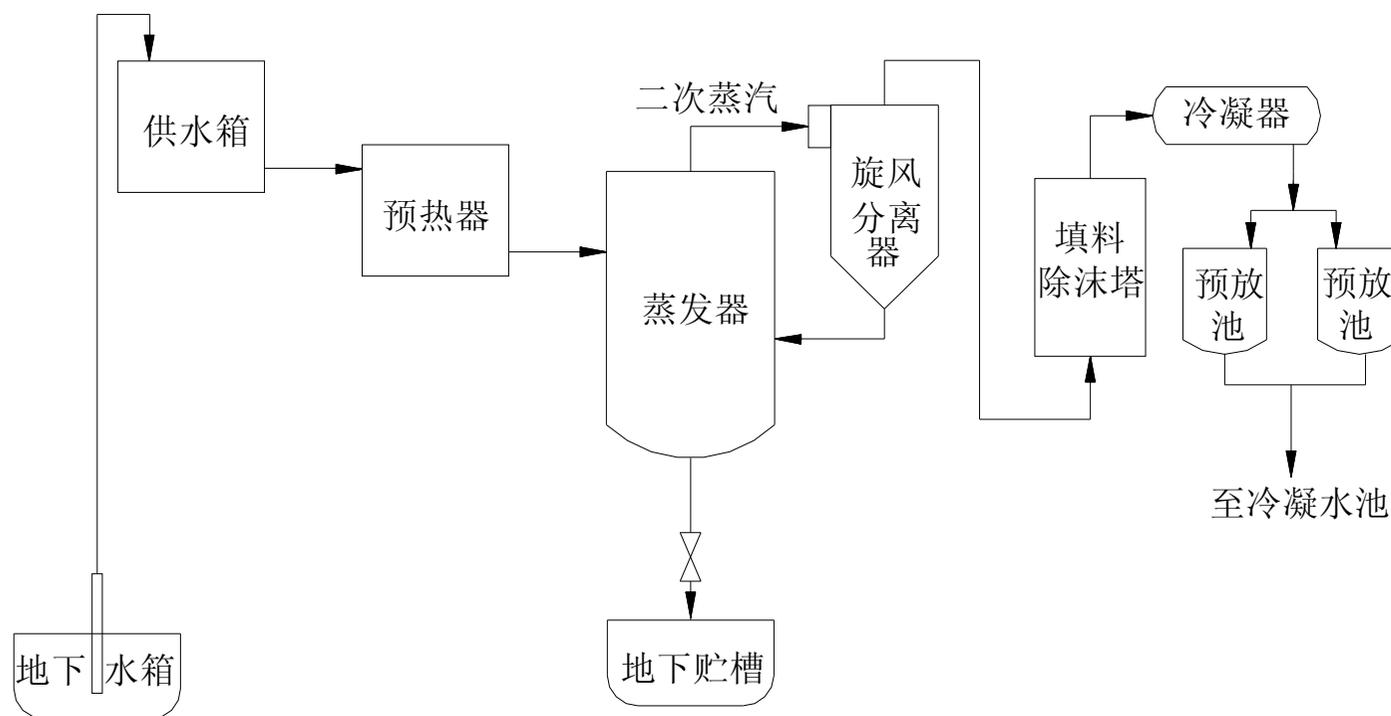
美国汉福特放射性废水蒸发处理系统

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

离子交换法

- **工作原理：**借助**离子交换剂**上的可交换离子（活性基团）和溶液中的离子进行交换，选择性地去除溶液中以离子态存在的放射性核素，使废液得到净化。
- 离子交换剂是不溶解的固体物质。
- 当离子交换剂与某种电解质溶液接触时，这些离子可**按化学计算的当量值交换相同电荷**的其它离子。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 离子交换是可逆反应，其反应通式可表达为：



- 阳树脂 + 阳离子 = 饱和树脂 + 交换离子



- 阴树脂 + 阴离子 = 饱和树脂 + 交换离子



强酸性阳离子交换树脂结构

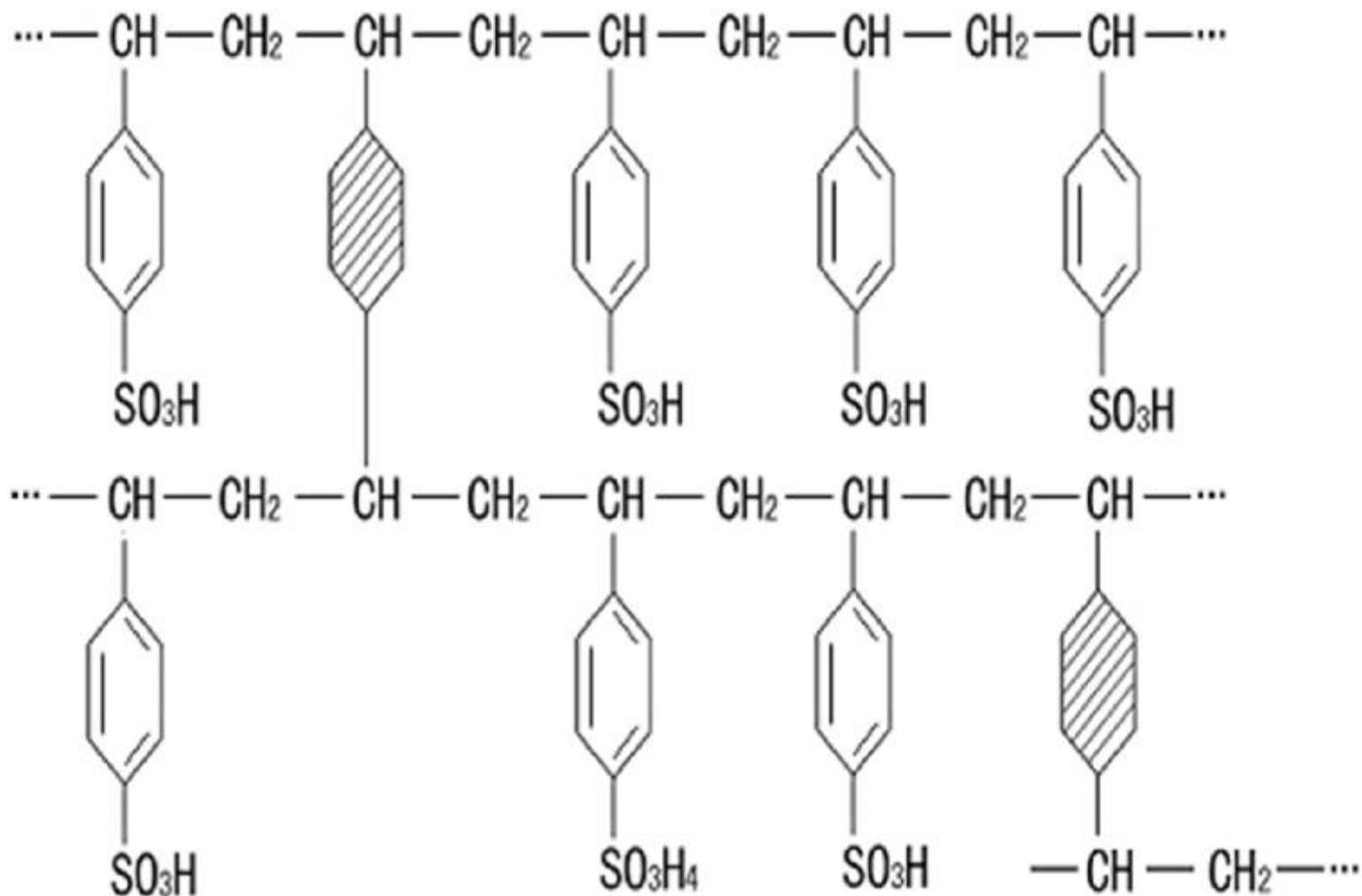
放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





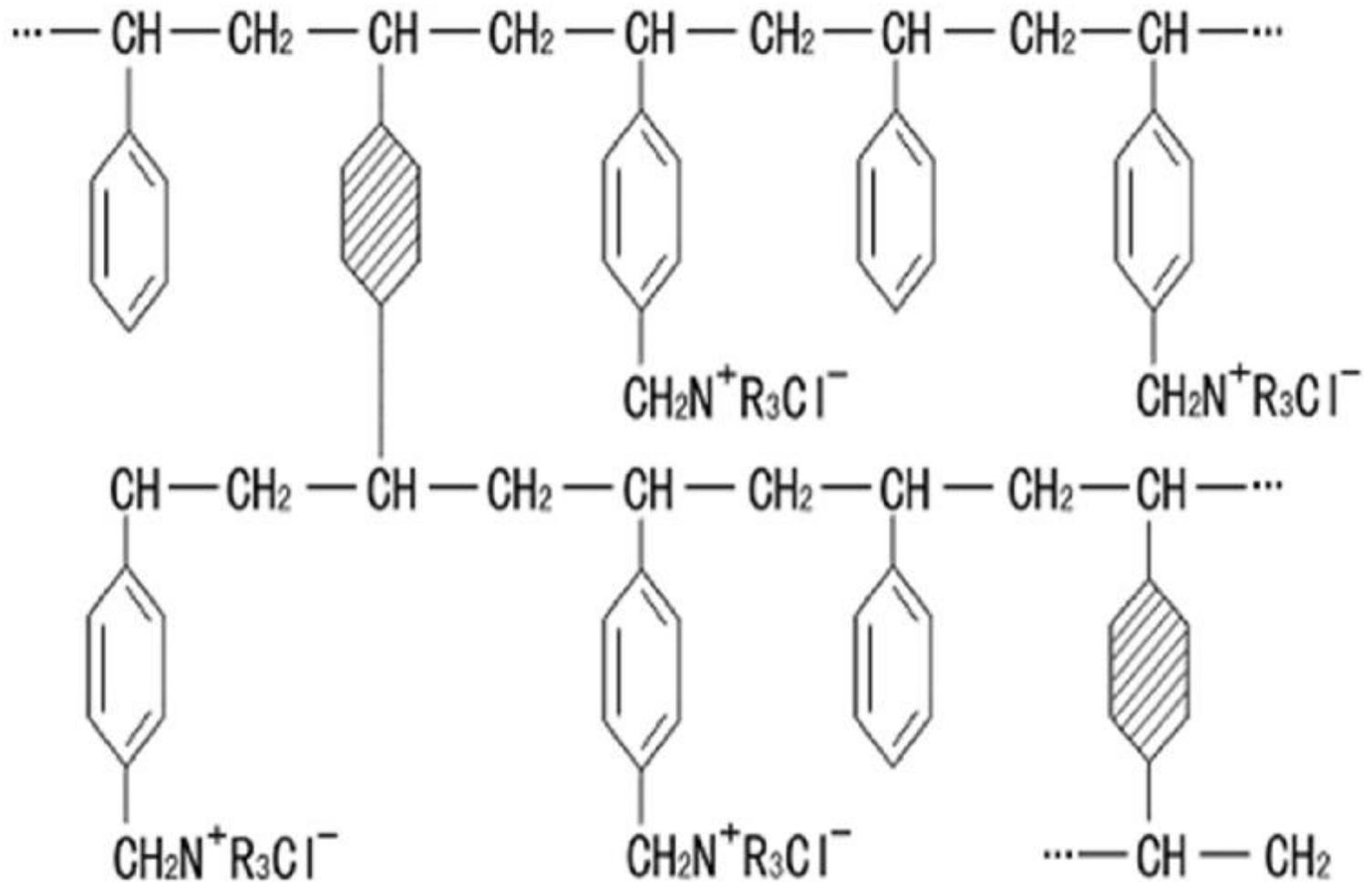
强碱性阴离子交换树脂结构

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 人工合成离子交换树脂：交换正离子的酸性阳离子树脂和交换负离子的碱性阴离子树脂。
- 天然离子交换和吸附剂：有天然无机材料如天然沸石、粘土（膨润土或高岭土）、蒙脱石、蛭石、硅藻土、海泡石等；天然有机吸附剂如活性炭、木屑和磺化煤等；
- 人工无机材料：合成沸石、硅酸、炉渣、金属的水合氢氧化物和氧化物、多价金属难溶盐基吸附剂和一些金属粉末等。



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

工艺和设备

- **树脂的再生**：酸碱或盐型。压水堆核电站一次性使用。
- **废树脂**：可焚烧或固化，再生液多用蒸发处理。
- **废液条件**：悬浮固体物浓度小于4mg/L，含盐量小于1g/L，核素必须以离子态存在，液体温度不能太高，不含油类和油脂物质。
- **优点**：工艺成熟，去污因子较高10~100，适于连续运行和自动化操作。



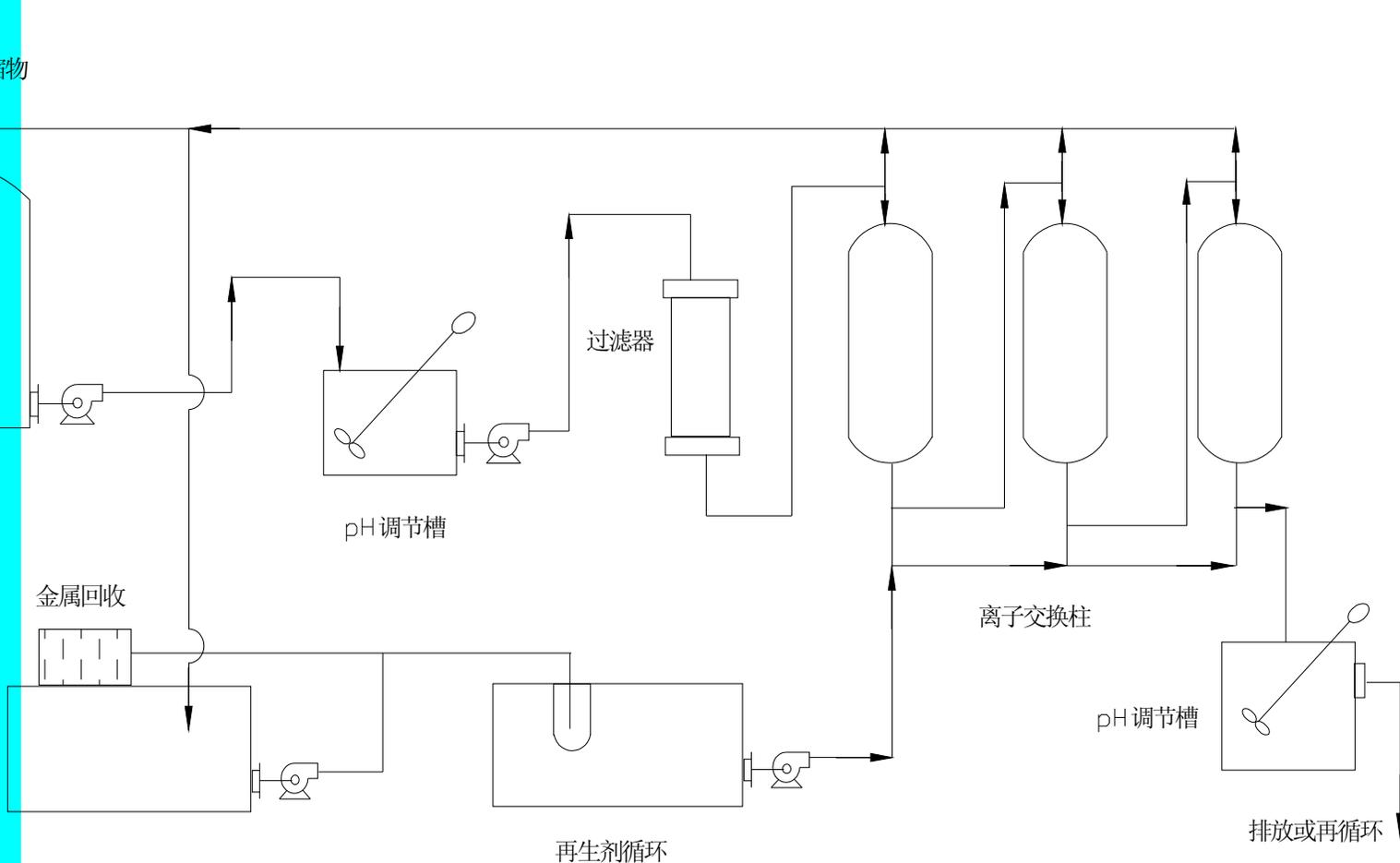
典型的离子交换处理废水流程

放射性废物处理与处置

第1讲 放射性废物的来源、分类与管理

第2讲 放射性废物的处理

第3讲 放射性废物的处置



退出



离子交换实验装置

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

电渗析

- **工作原理：**在直流电场作用下，利用离子交换膜的选择透过性，让阳离子透过阳膜，阴离子透过阴膜，使溶液中的离子发生定向迁移，达到净化和浓缩液体的目的。
- 多作为离子交换前料液脱盐的**预处理**。
- 问题：**浓差极化**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

反渗透

- **工作原理：**在浓侧施加压力（ $P > \pi$ ，1.5~10MPa），让浓溶液中的溶剂通过半透膜进入稀溶液中，使浓溶液更浓，起到浓缩作用。
- **去污因子：**10~100
- 适于处理含盐量较低的废液如洗衣废水和洗澡水，含硼废水等，浓缩液体占料液的10%左右。
- **半透膜：**醋酸纤维素膜，空心纤维膜



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

超滤

- **工作原理：**借助于压力和选择透过性薄膜，使分子量小的物质（如水、溶剂和电解质）通过，分离出大分子（分子量大于500）悬浮颗粒和胶体，达到浓缩、分离的作用。
- **工艺：**聚丙烯腈管式膜等，工作压力0.1~1.4MPa，浓缩倍数可达 10^4 。
- **去污因子：**10~100
- **优点：**能耗低、操作简单



超滤、纳滤、反 渗透组合膜分离

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出



中空纤维超滤膜实验设备



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

膜分离

- 借助膜的选择渗透作用，在外界能量或化学位差的推动下对混合物中溶质和溶剂进行分离、分级、提纯和富集。
- 与其他传统的分离方法相比，膜分离具有过程简单、无相变、分离系数较大、节能高效、可在常温下连续操作等特点，是近年来发展较快的化工分离技术。



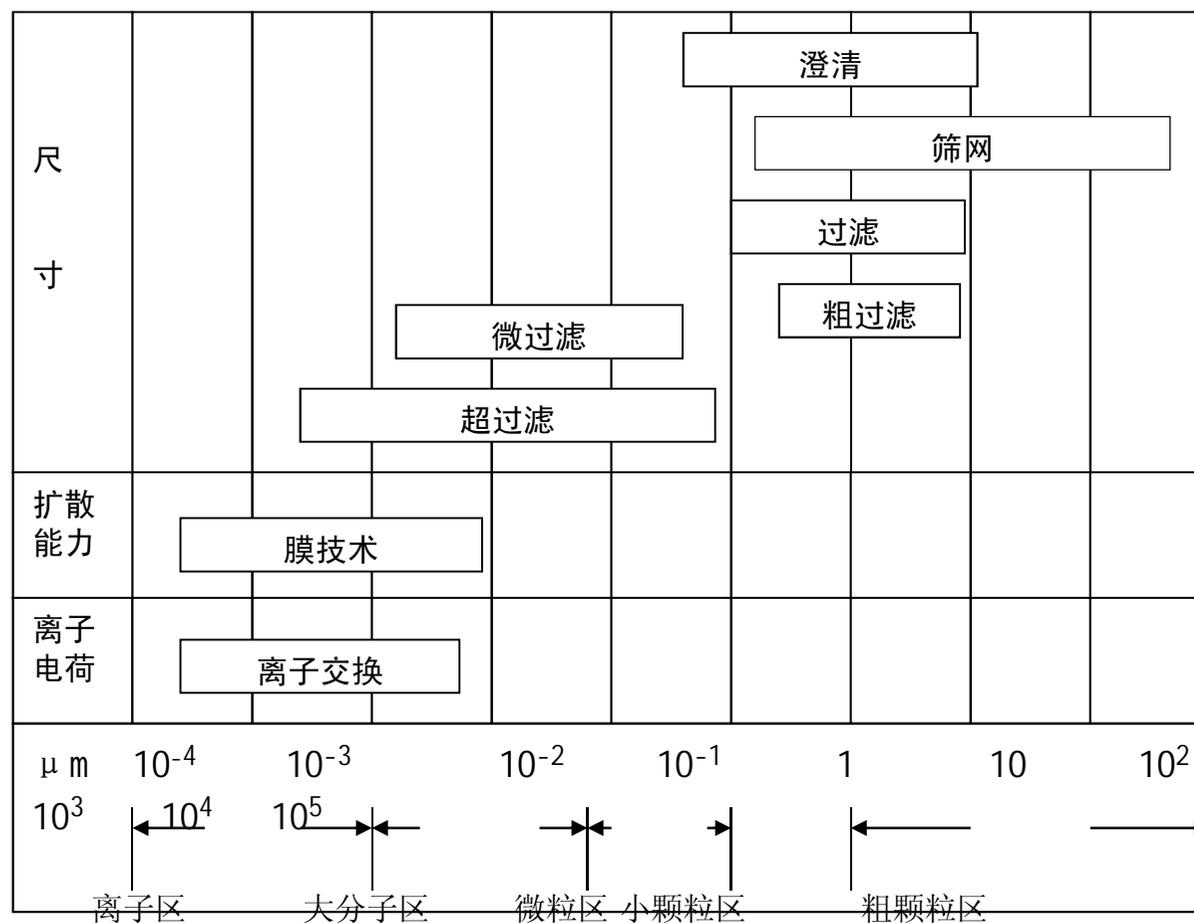
物理分离工艺和颗粒尺寸的关系

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



膜分离实验装置

放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





旋转流膜管试验装置

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **固液相分离：过滤**
- 对于含有污染物浓度更高，颗粒尺寸更大（小于 $10\mu\text{m}$ ）的废液，首先选用的技术是沉降（澄清）和过滤。
- 用于冲洗、冷却或去污产生的放射性废水一般都含有污染颗粒物，常见的有砂、粘土、胶体和溶解的物质，应当在废水进一步处理（或排放）前把这些颗粒物除去。
- 砂过滤器
- 筒式过滤



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

过滤：对于含有污染物浓度更高，颗粒尺寸更大（小于 $10\mu\text{m}$ ）的废液，首先选用的技术是沉降（澄清）和过滤。用于冲洗、冷却或去污产生的放射性废水一般都含有污染颗粒物，常见的有砂、粘土、胶体和溶解的物质，应当在废水进一步处理（或排放）前把这些颗粒物除去。



放射性废物 处理与处置

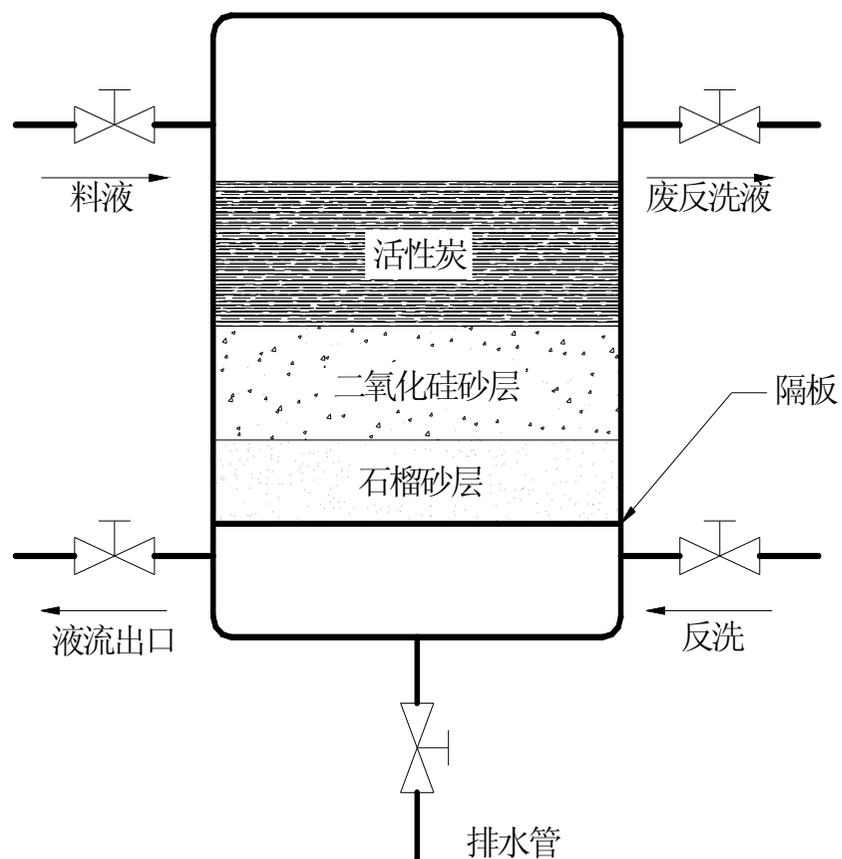
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

典型过滤器的组成





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.1.4 先进净化处理工艺

- 高选择性离子交换剂
- 过滤/离子交换模块结构代替蒸发处理
- 臭氧/活性炭/反渗透处理洗衣废水



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.1.5 流出物的排放

- 禁止利用渗水、渗坑、天然裂隙、溶洞或者其他方式排放。
- 大气或水体环境的容量和稀释、弥散条件。
- 控制排放总量
- 常规排放和非常规排放
- 有组织排放和无组织排放



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 流出物排放的控制
- 关键人群组
- 流量和浓度的监控设备
- 采用槽式排放
- 不得排入普通下水道
- 排放限值：国家规定
- 运行限值：自行制定
- 运行水平：达到阈值浓度
- 流出物排放的监测



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.1.6 有机废液的处理

- **特点：**易燃、易挥发、易辐射分解、热分解、生物降解。
- 废萃取剂TBP/煤油、废机油、润滑油、测量低能 β -射线 ^3H 和 ^{14}C 的有机闪烁液。
- **塑料固化：**聚乙烯、聚苯乙烯固化TBP，包容量可达50%。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **TBP/煤油焚烧处理**
- **热解焚烧：** TBP 350~450℃发生热解，生成 P_2O_5 和 C_4H_{10} 、 C_4H_9OH 。
- P_2O_5 与 $Ca(OH)_2$ 反应生成焦磷酸钙，可水泥固化处置。煤油和丁烷与丁醇在后燃烧室被烧掉
- 存在问题：磷酸的腐蚀和尾气处理困难。
- **TBP回收：**
 - (1) 真空蒸馏回收
 - (2) 分离TBP和煤油再利用
- **吸收剂吸收后处理：** 焚烧或固化（固定）



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **有机废液水泥固化**
- 直接固化：包容量低（小于8%）。
- 用活性炭吸收TBP/煤油后水泥固化，包容量可达14%。
- **研究和应用：**低中放废物的处理技术正在革新和改进，我国目前较多沿用传统工艺流程，开发研究投入力度不够大，研究成果转化到工程应用也不够多。



清华水污染控制国家重点实验室

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出







放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.2 核电站废物的处理

- 2.2.1 核电站废物的来源
- 2.2.2 核电站废物的管理系统
- 2.2.3 核电站废物的处理方法
- 2.2.4 核电站流出物的排放
- 2.2.5 核电站废物的废物最小化



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

世界核电厂的现状

- 2007年底全世界33个国家和地区的**436座**核电站在运行，总容量392.3GW，占世界电力总装机容量**约11%**
- 全球正在建设中的核电反应堆29座
- 全球计划建设的核电反应堆53座



中国大陆已投入运行的核电站

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

项目	堆型	机组情况	并网时间
秦山一期	压水堆（单机）	1×300MWe	1991年12月
广东大亚湾	压水堆（双机）	2×1000MWe	1993年8月
秦山二期	压水堆（双机）	2×650MWe	2002年2月
广东岭澳	压水堆（双机）	2×1000MWe	2002年2月
秦山三期	重水堆（双机）	2×700MWe	2002年11月
江苏田湾	压水堆（双机）	2×1060MWe	2006年5月

退出



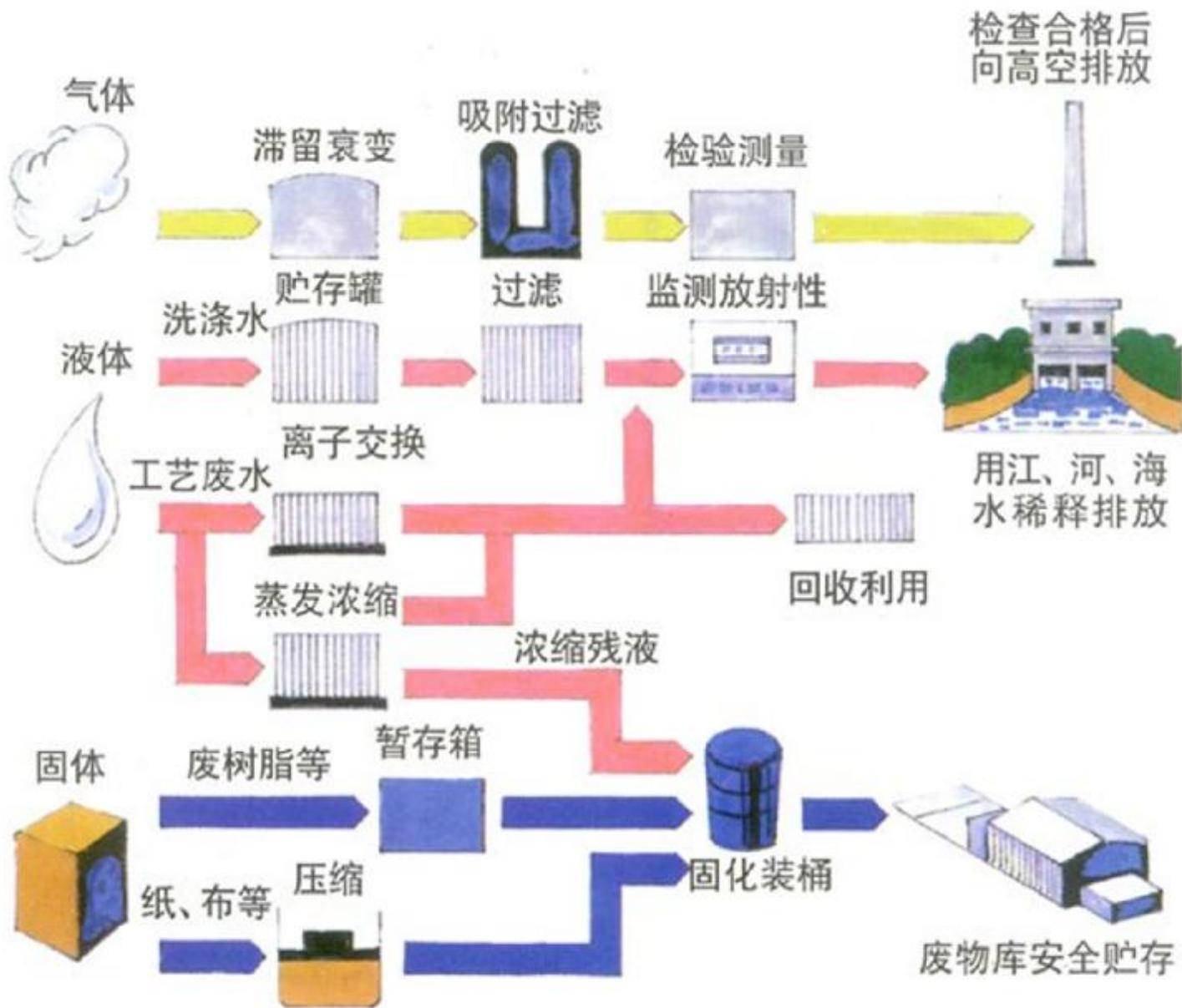
放射性废物处理与处置

第1讲 放射性废物的来源、分类与管理

第2讲 放射性废物的处理

第3讲 放射性废物的处置

退出



核电厂的废物处理系统

核电站放射性废物处理系统



核电站辐射监测仪表系统

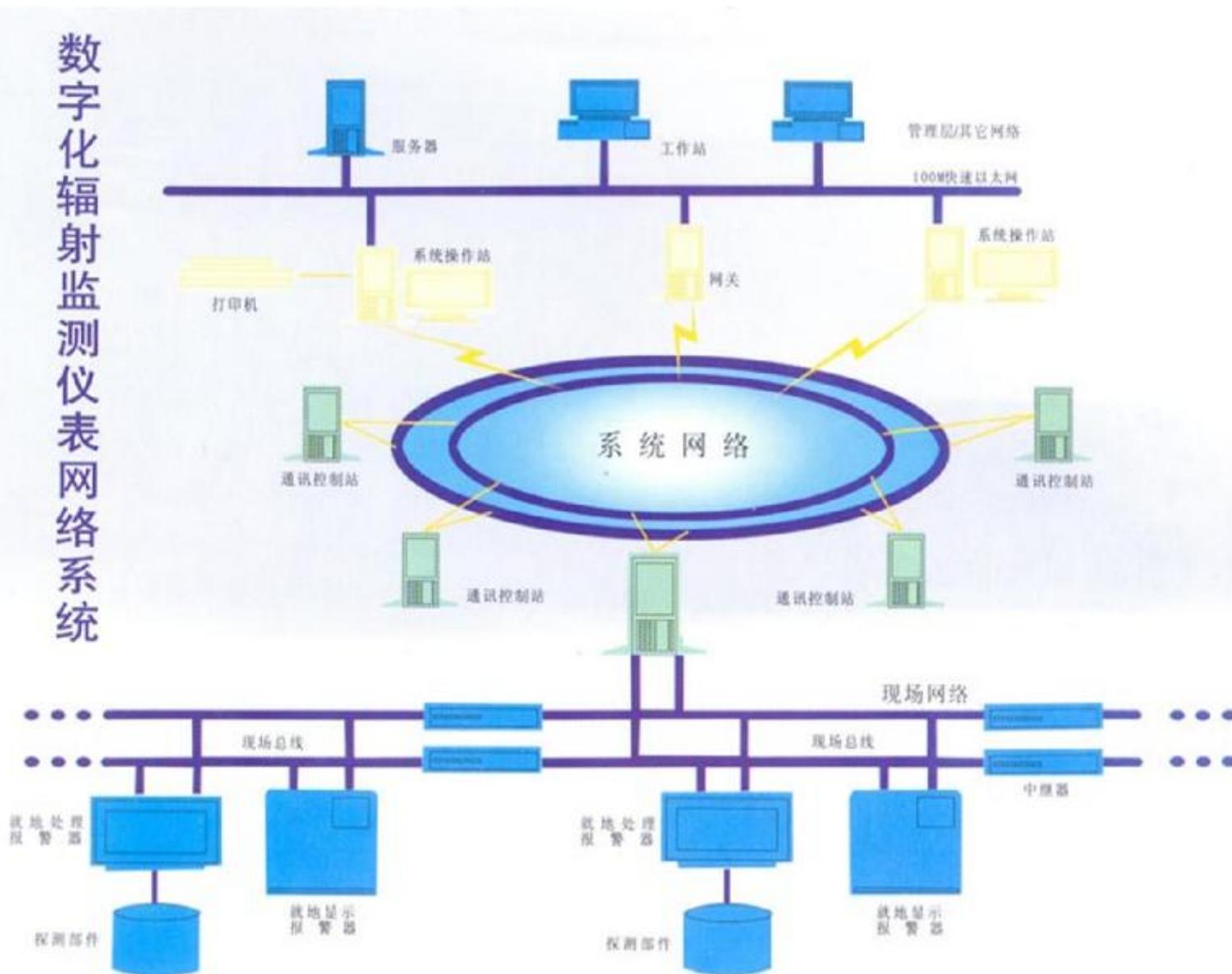
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **放射性废气**：工艺废气和排风系统
- **放射性废液**：系统、管道阀门的泄漏，设备疏水，离子交换再生液，地面冲洗水，去污废液
- **固体废物**：蒸发浓缩废液，废树脂，废过滤芯，高效过滤器芯，废设备部件，劳保用品
- **分类收集、处理和贮存**：**废气和废液**达标排放；**固体废物**减容、包装后临时库内存放不超过5年，送往低中放废物处置场进行处置。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.2.3 核电站废物的处理方法

(1) 废气处理工艺和设备

含氢废气和含氧废气，主要放射性组分：惰性气体、碘和气溶胶、碳-14和氚

1. **含氢废气（高放无氧工艺废气）**：氢气和氮气
 - **处理方法**：采用**压缩贮存衰变**或**活性炭延迟床**处理，工艺流程见图12-1、图12-2。
 - **排放控制**：取样分析和连续监测报警
 - **燃爆事故**：氮气稀释， H_2 浓度4%以下



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2. 含氧废气（低放有氧工艺废气）：呼排气和鼓泡排气

- 处理方法：采用高效过滤器和碘吸附处理，工艺流程图12-3
- 排放控制：连续排放
- 厂房排风
- 气流流向：从低污染区向高污染区流动
- 不同来源采用不同工艺流程处理：
- 燃料厂房排风
- 反应堆厂房排风



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(2) 废液处理工艺和设备

分类收集和贮存，分类进行处理

- **蒸发法**：强制循环蒸发和自然循环蒸发
- **离子交换法**：表12-3 常用的离子交换床
- 一般不再生。秦二核根据进出口压差0.15MPa和外表剂量率15mSv/h 更换树脂



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

压水堆核电站各类废水处理工艺

- **工艺排水**：放射性水平高，化学物质含量低
- **处理工艺**：离子交换，蒸发处理或蒸发与离子交换串联使用，见图12-4 工艺排水处理工艺流程图
- **化学废液**：化学物质含量高
- **处理工艺**：蒸发处理，见图12-5 化学排水处理工艺流程图



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **地面疏水：**含一定量的化学物质和固体颗粒，放射性水平比较高时蒸发处理。
- **淋浴水和洗衣水：**放射性水平通常很低，过滤或吸附处理，或蒸发处理。
- **含油废水：**废油小于10mg/L，单独处理。
- **生活污水：**生化处理站处理。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(3) 固体废物处理工艺和设备

- 湿固体废物：泥浆、浓缩废液、废树脂和废过滤器芯
- **浓缩废液**：硝酸钠、硼酸或硼酸盐，最大含盐量400g/L。
- 通常进行水泥固化，硼酸根离子有缓凝作用，加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 预处理； SO_4^{2-} 有促凝作用，需要加入缓凝剂。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废树脂：迄今尚无较好的处理工艺

- 压水堆核电站废树脂中主要核素 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{58}Co
- 树脂的特点：比活度很高、有机物、辐解产生燃爆性气体、不易焚烧、不能直接处置。
- 开发研究（见图12-6）
- 不破坏树脂有机结构：压实、装桶、低温固化
- 破坏树脂有机结构：分解、降解、高温固化
- 水泥固化体：树脂溶胀龟裂和破碎，要限制废树脂的包容量。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废过滤器芯

- 通过铅屏蔽转运容器装入混凝土容器中，注入水泥砂浆固定，装在200L金属桶中。
- **干固体废物**
- 废活性炭、石墨、吸附剂、废高效过滤器芯、废设备、部件、工具、劳保用品、擦拭材料、铺垫或覆盖用的塑料，堆内测量部件等。
- 分为可压实废物和不可压实废物，可燃废物和不可燃废物。
- 我国各核电站都设有压实机。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(4) 固体废物的包装和运输

- 钢桶：200L、400L
- 混凝土容器：I、II、III、IV；自屏蔽效能好，抗腐蚀作用强；废物包装率低。
- A型包装：渗水试验、负载试验、贯穿试验和1.2m自由坠落试验；
- B型包装：增加高温燃烧试验、9m坠落试验和水浸试验；
- **固体废物的暂存**：不超过5a的废物量；可回取；辐照剂量率限值。
- 对废物的要求：不超过设计限值和运输限值。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.2.4 核电站流出物的排放

(1) 流出物排放的审批和监督

- **三同时**：废物处理设施和主工艺设施同时设计、同时建设、同时投产
- **四统一**：多堆统一管理、统一申请排放限值、统一实行环境监测、统一组织应急响应和实施排放
- 分配气载和液体流出物的排放总量，实行总量与浓度双重控制，以**总量控制**为主。
- 年排放总量按季度控制，连续3个月内不得超过排放目标值的1/2，**实际排放量**向国家环境保护总局报告。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(2) 气态流出物的排放

- 连续排放和约定排放
- 分析取样:
- 惰性气体（测量总 β 和 γ 谱）
- 气溶胶（测量总 β 和 γ 谱）
- 碘（测量总 γ 和 γ 谱）



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(3) 液态流出物的排放

- 槽式排放
- 废水排放双重控制
- 取样分析：总 γ 、总 β 、氡、 ^{90}Sr 和 γ 谱。
- 在线连续监测包括在排放管路上的辐射监测和流量监测。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(4) 排放的质量保证和质量控制

- 核电站流出物的监测由核电站和当地环保部门分别独立进行，监测结果公布。

(5) 非放射性有害物质的控制



核电站排放大气扩散试验

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出



核电站大气扩散试验百米铁塔



辐射环境监测车

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

2.2.5 核电站废物的废物最小化

- **环境管理方针：**遵守法规、安全运行、减少排放、节约资源、持续改进、保护环境。
- 大亚湾核电站：下降50%（管理）
- 秦山核电站：逐年下降
- 台湾省核电站：下降50%（减容技术）



第2讲 完

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

第三讲 放射性废物的处置

3.1 低、中放和极低放废物的处置

3.2 高放废物的处置



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1 低、中放和极低放废物的处置

- 3.1.1 近地表处置场的选址
- 3.1.2 近地表处置场的设计和建造
- 3.1.3 地表处置场的运行
- 3.1.4 处置场的关闭和关闭后的监护
- 3.1.5 近地表处置的安全评价
- 3.1.6 低中放废物处置国内外状况
- 3.1.7 极低放废物处置



处置(disposal)

- 把废物放进**经过批准**的设施中，采用**工程屏蔽和天然屏蔽**相结合的多重屏蔽体系为被处置的废物提供安全隔离，确保：
 - (1)包容的**短寿命核素**衰减到无害水平；
 - (2)包容的**长寿命核素**和其他有毒物质的释放量极低，进入环境的浓度处于可接受水平。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

低、中放固体废物的处置方案

- (1) 陆地浅埋（土壤等松散沉积物） 广泛应用
- (2) 废矿井处置（盐、铁、铀矿等） 广泛应用
- (3) 深岩洞处置（岩盐、岩石等） 较少用
- (4) 海岛处置（土壤、岩石） 国际上禁止
- (5) 滨海海底处置（处置介质为岩石） 瑞典 芬兰
- (6) 水力压裂处置（页岩等） 美国停止 中国
- (7) 海洋投弃（海水） 沿海国家采用， 现禁止



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

3.1.1 近地表处置场的选址

- **选址：**在地表上或地表下或洞穴内
- **安全隔离期：**300~500a
- **选址过程**
 - (1) 规划选址：建立选址原则
 - (2) 区域调查：提出候选场址
 - (3) 场址初选：确定推荐场址
 - (4) 场址确定：确定一个场址，提出场址的安全分析报告和环境影响评价报告



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

• 选址准则

- (1) **地质**：高地震风险区和活动断裂带
- (2) **水文地质**：地下水
- (3) **表生作用**：地表水，洪水
- (4) **气象**：极端降水
- (5) **人为事件**：危险设施、地下资源、道路、**人口和经济的发展**、旅游区、文物考古、珍贵动植物、**公众态度**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.2 近地表处置场的设计和建造

- 以满足法规、标准要求为准则
- **设计原则**：工程弥补自然条件的不足
- 限制核素释放
- 工作人员照射
- 分区布置
- 防水设计：一避二防三排，防止“浴盆效应”
- 处置场结构和屏障
- 长期维护的依赖
- 辅助设施



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **处置场的建造**
- 处置单元：全地下、半地下、全地上构筑方式
 - (1) **简单土沟、土坑埋藏**：适用于极低放废物
 - (2) **地下混凝土工程**：长度从几米到几百米，宽度和深度从几米到几十米，顶板厚0.5~1米，侧壁厚0.4~0.5米，底板厚0.4~0.8米，内隔墙0.3~0.4米，底部设排水孔和集中导水系统。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(3) **混凝土井穴**：直径数米，深几米到二三十米；印度、加拿大

- **半地下式**又称坟丘式：法国芒什
- **全地上式**：法国奥布、广东北龙
- **洞穴式**：天然或人工挖掘洞穴，德国
- **地下岩洞式**：瑞典、芬兰海下岩洞处置场



广东北龙中低放处置场建设

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置



退出



低放固化物处置场

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

建设周期和费用

- 选址4~6a，审批1~3a，建造1~2a
- 运行20~30a，封闭3~5a，有组织控制期100~300a（300~500a）
- **核电废物**产生者付款，**军工废物**国家财政拨款
- 处置费用是普通废物的**10倍**



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.3 地表处置场的运行

- 废物申报单内容
- 废物来源
- 废物货包体形状、体积和重量
- 放射性核素种类和总活度
- 表面剂量率
- 废物产生、处理和整备说明
- 货包编号，发送日期等
- 废物包装容器：碳钢和混凝土桶



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **废物运输：**放射性物质运输规定
- **废物接收：**废物接受准则
- **废物的存贮**
- 活度较高的货包放在处置单元底部或中央位置。
- 货包间隙浇注水泥砂浆（金属桶）或砾石或沙土（混凝土容器）。
- 处置单元上面浇灌混凝土，防渗流及屏蔽辐射。
- 设置可移动防雨帐房



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

废物货包的运输

反应堆顶盖废物包装





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

废物货包的检测—接收



吊入
C1-
4处
置单
元





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.4 处置场的关闭和关闭后的监护

- 处置场的关闭
- 正常关闭：达到许可证规定的放射性废物总量或总活度
- 提前关闭：事故和自然灾害
- 覆盖层（顶盖厚3~5m）的功能和作用
- 处置场多层结构见图10-8（p230）



大亚湾核电站低放废物货包



放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置



台电核废料处置

退出



广东北龙低中放废物处置场

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

处置场关闭后的监护

- 一般为300a
- 主动监护
- 防止侵扰
- 适当维修
- 适当监测
- 非主动监护
- 限制进入、限制土地使用、设立永久性标志



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.5 近地表处置的安全评价

- **定量预测**处置系统的性能，对处置场运行周期以及将来关闭之后的人类受照剂量和环境影响**做出评价**。
 - (1) **确定**能够导致放射性核素释放、影响释放速率、影响核素通过环境介质运输速率的**景象**。
 - (2) **估计**发生的**概率**，**定量表示**对处置系统的影响。
 - (3) **计算**核素释放的辐射**后果**。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 评价方法
- 景象-后果分析法
- 概率法
- 系统论法
- 安全评价流程 如图10-9



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 景象分析
- 三类景象，如表10-9
- 评价模式和程序
- 数学模式和计算程序：释放模式，迁移模式、剂量模式
- 源项：核素从废物固化体浸出，进入包气层、含水层或大气中，经过食物链转移，产生对人体的辐照剂量。



放射性废物 处理与处置

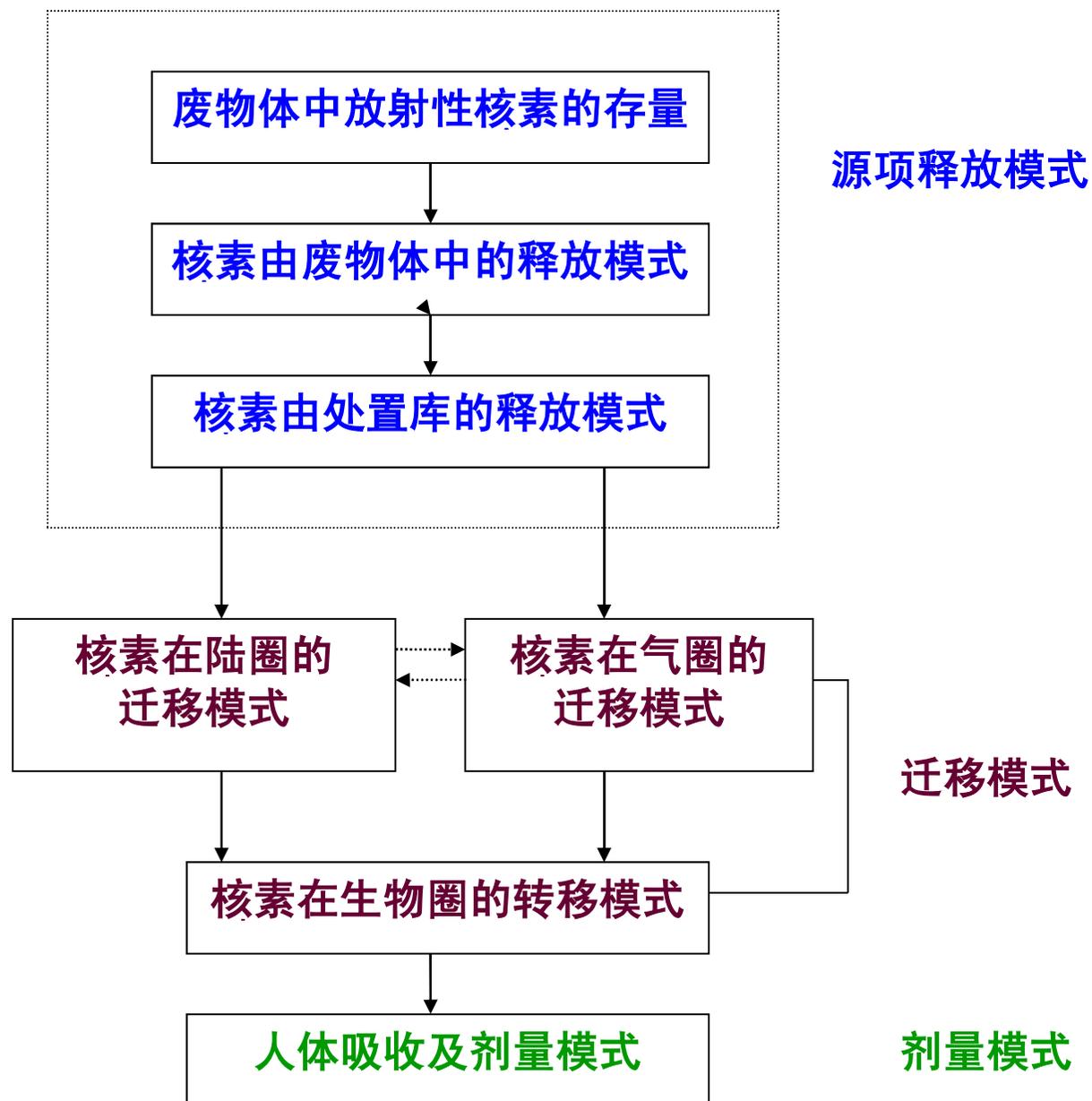
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

概念模式的组成





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 我国规定从处置场通过各种途径对公众中的个人 $E < 0.25 \text{mSv/a}$ ($E = \sum W_T H_T$)
- 我国可处置的低中放废物范围
 - (1) $T_{1/2} \leq 5\text{a}$, 任何比活度的废物
 - (2) $5\text{a} < T_{1/2} \leq 30\text{a}$, $A_m < 3.7 \times 10^{10} \text{Bq/kg}$
 - (3) 300~500a内比活度降到非放的废物



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

我国对安全评价的规定

- **评价区域：**以处置场为中心半径10km范围；
- **评价标准**
- **环境质量现状评价：**公众个人0.25mSv/a；
- **环境影响评价：**公众个人0.01mSv/a，事故短期闯入者5mSv/a，事故长期居住者1mSv/a；
- **职业辐照：**5年平均不超过20mSv/a，任何一年不超过50mSv。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.6 低中放废物处置国内外状况

- 1946-1982年，在太平洋和大西洋中投弃了上百万桶低放废物，总活度为70PBq。
- 全世界136个低中放废物处置设施，工程式占67%，简易式22%，矿穴式7%，地质处置库占4%。
- 美国能源部16个低放废物处置场，6个商用近地表处置场，现有3个在运行（表10-11）。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **法国：芒什处置场，奥布处置场**

中国

1. 1992年，低中放射性废物区域性处置
2. 1998年建成**西北处置场**，处置容量20万 m^3 ，先建成2万 m^3 ；
3. 2000年建成**广东北龙处置场**，处置容量24万 m^3 ，先建成8800 m^3 。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.1.7 极低放废物处置

- 简易包装和简易填埋，集中处置在专设的极低放废物填埋场。
- 法国：1~100Bq/g（平均为10Bq/g）；
- 80%来自核设施退役，20%来自使用天然放射性物质工业；
- 处置对象：废水泥、碎石、土壤、废旧设备
- 监管期30a



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

中国的极低放废物

- 核设施退役产生大量比活度略高于清洁解控水平的废物，经批准后作为极低放废物填埋，可大大减少退役工程费用和加快退役工程的进程，有重大的意义。
- 问题：确定极低放废物限值和政策
- 清原公司、中物院积极性很高



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

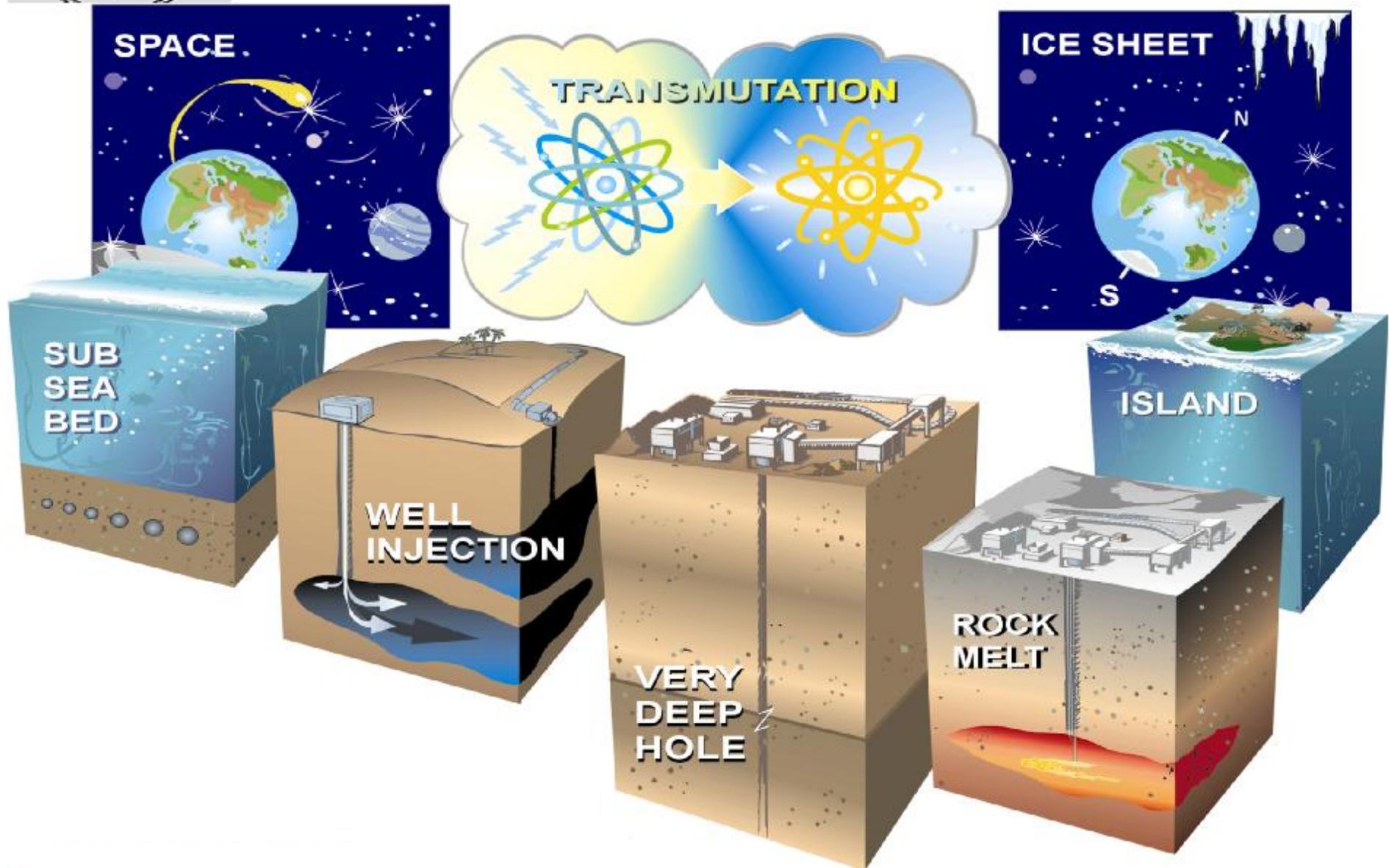
退出

3.2 高放废物的处置

- 3.2.1 高放废物地质处置
- 3.2.2 处置库的选址
- 3.2.3 处置库的设计建造
- 3.2.4 高放废物处置的研究开发活动
- 3.2.5 核素迁移研究
- 3.2.6 高放废物处置的国际现状



高放废物处置方法





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

高放废物固化体处置方案

- | | |
|----------------------------|-------------|
| (1) 深岩洞处置(岩盐、花岗岩) | 各国拟采用 |
| (2) 废矿井处置(盐矿等) | 德国采用 |
| (3) 深钻孔处置 (岩盐、花岗岩等) | 实验开发 |
| (4) 深海床置(粘土) | 实验开发 |
| (5) 核嬗变处理 | 实验开发 |
| (6) 冰层处置 | 设想 |
| (7) 太空处置 | 设想 |



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

高放废物的深地层处置

- 高放废物的最终处置备受世人关注，是世界上
最复杂的技术难题之一。
- **高放废物深地层处置的基础：**地球表面许多地
区的地层长期以来（长达几亿年）极为稳定，
故可以放心地贮存废物，实现与生物圈的长期
隔离。
- 适宜的地层主要有岩盐、花岗岩、凝灰岩、粘
土岩等。



3.2.1 高放废物地质处置

压水堆电站乏燃料主要核素组成

U-238	U-235	Pu-239	裂变产物 (FP)	次锕系元素 (MA)
约95%	约0.9%	约1%	约3%	约0.1%

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

高放废物处置：将高放废物同人类生活圈隔离起来。1957年美国国家科学院提出地质处置方案。

把高放废物处置在**500~1000m深**的地质体中，通过建造一个天然屏障和工程屏障相互补充的多重屏障体系，使高放废物对人类和环境的有害影响低于审管机构规定的限值，并且可合理达到尽可能低。

退出



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

多重屏障体系

- (1) **工程屏障**：高放废物固化体、包装容器、缓冲/回填材料和处置库工程构筑物，这些构成**近场**。近场包括全部工程屏障和最近工程屏障的一小部分主岩（通常伸展几米或几十米远）。
 - (2) **天然屏障**：主岩和外围土层等，构成**远场**，即从处置库近场一直延伸到地表生物圈的广阔地带。
- 多重屏障体系的作用是依靠和发挥**整体性能**的作用，某一屏障的不足性可由其他屏障的作用来弥补。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.2.2 处置库的选址

- 寻找满足要求的场址，难觅最佳场址。
 - (1) 构造地质调查；
 - (2) 水文地质调查
 - (3) 工程地质调查；
 - (4) 地球化学调查
 - (5) 气候/气象调查；
 - (6) 人文/经济/社会调查
- 主岩：花岗岩、凝灰岩、岩盐和黏土岩
- 花岗岩：强度大、导热系数大；稳定性好，孔隙率小，含水量少。缺点是存在节理裂隙。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

选址原则

- (1)地质稳定，远离活断层和强地震带。
- (2)主岩有足够厚度和面积。
- (3)水文地质条件清楚。
- (4)主岩孔隙度小。
- (5)主岩导热性能好。
- (6)主岩机械强度高、热稳定性和辐照稳定性好。
- (7)主岩化学吸附性能良好。
- (8)人烟稀少，无地下资源。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.2.3 处置库的设计建造

高放废物处置库的概念设计

- 在选定地层深处(大于500m)钻孔或利用废矿井建设处置库，设置若干处置单元和处置孔。
- 从处置孔中心往外形成一个由**废物体—废物容器—缝隙—金属套筒—回填材料—岩石**组成的严密的阻滞和屏障系统。
- 废物放满后**封堵处置孔**，最终关闭处置库。可回取库封闭难度更高。
- 全部地下处置工作必须由**地面操纵**的机械完成。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **通用概念设计方案：**采用两口以上的竖井分别运输废物和工作人员。在选定深度的工作层面上建巷道，根据高放废物自释热和工程屏障热传导情况布置钻孔，在钻孔中叠放废物罐厚封堵钻孔。见图11-1。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **美国尤卡山处置库概念设计方案：**
在300a内可回取，设计在选定深度的工作层面上打出一条主巷道，在主巷道上分出许多支巷道，高放废物货包罐卧放在地下火车上，拉到设定存放的支巷道中，卧放在支巷道里，上面覆盖防滴水作用的钛防护罩。见图11-2。



放射性废物 处理与处置

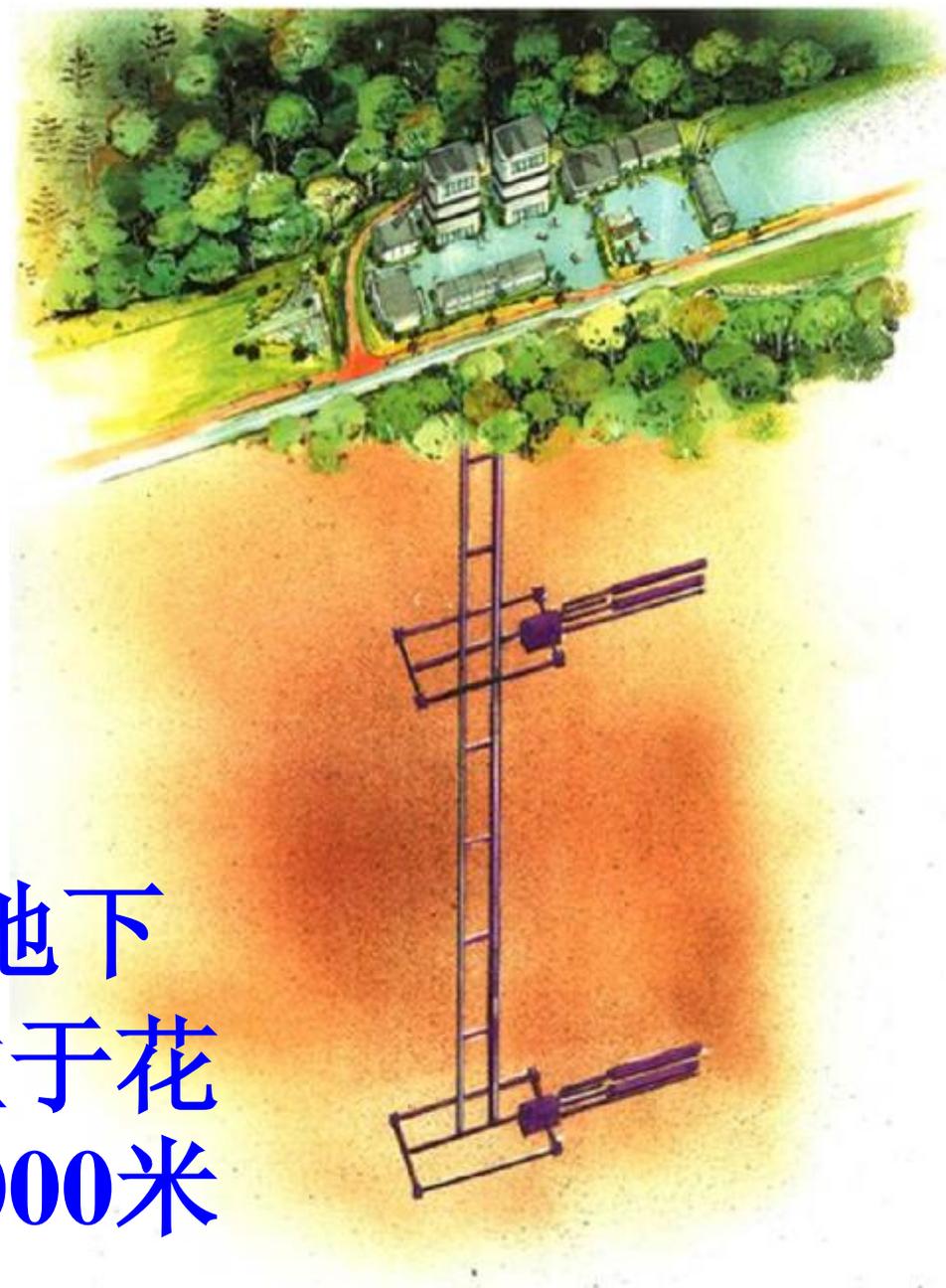
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

日本瑞浪地下
实验室：位于花
岗岩，~1000米





放射性废物 处理与处置

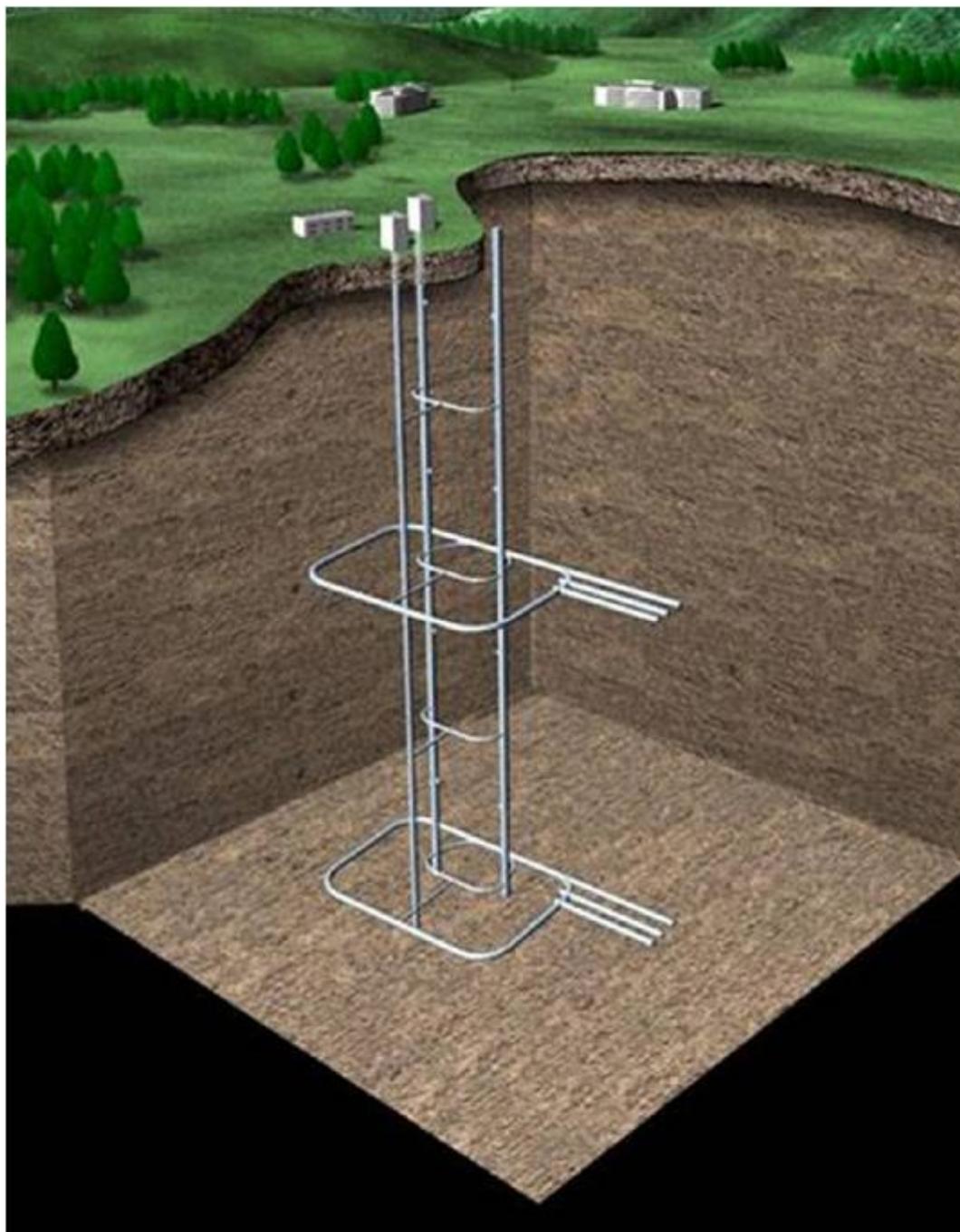
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

日本幌延 地下实验室 ~ 500m





瑞典深地质处置：竖井--巷道型

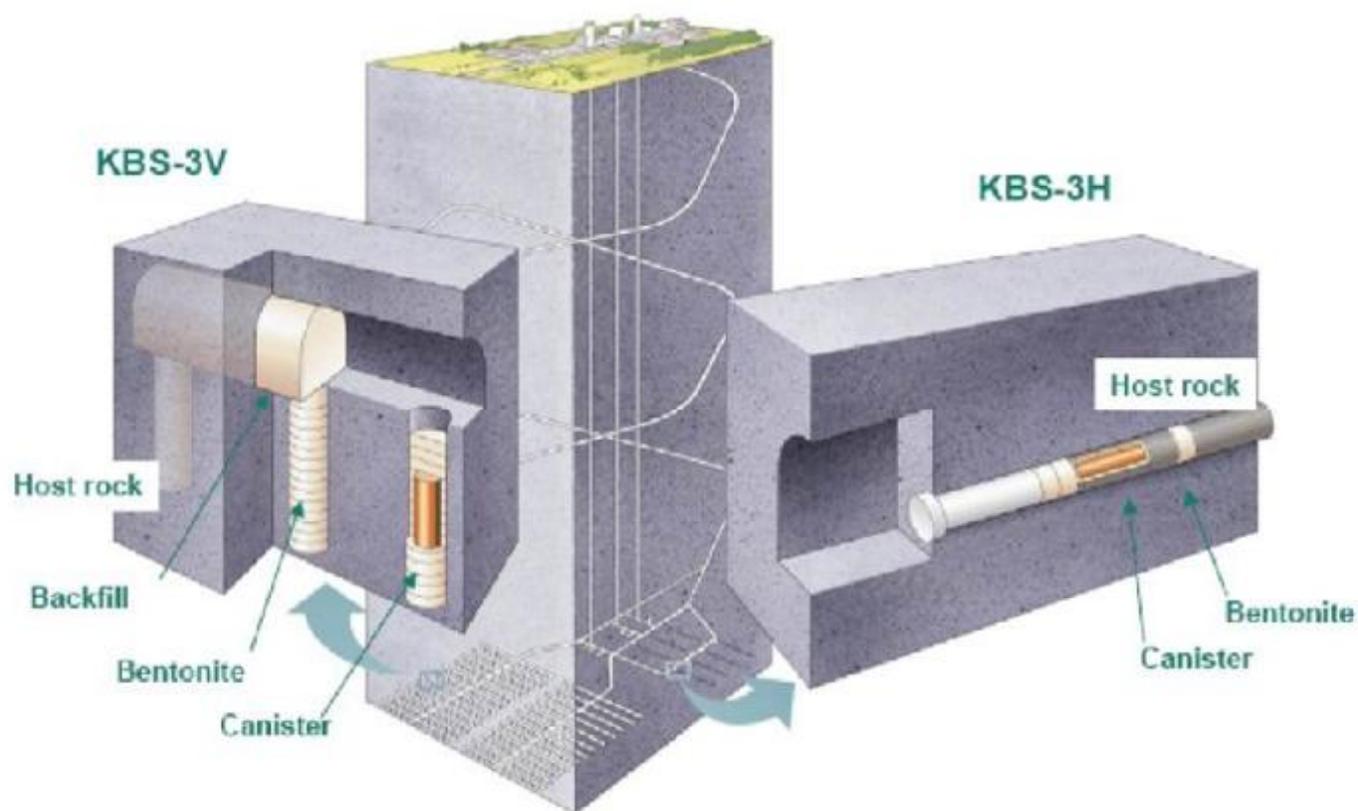
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

KBS-3 disposal concept: alternatives



退出



美国内华达州的尤卡山场址

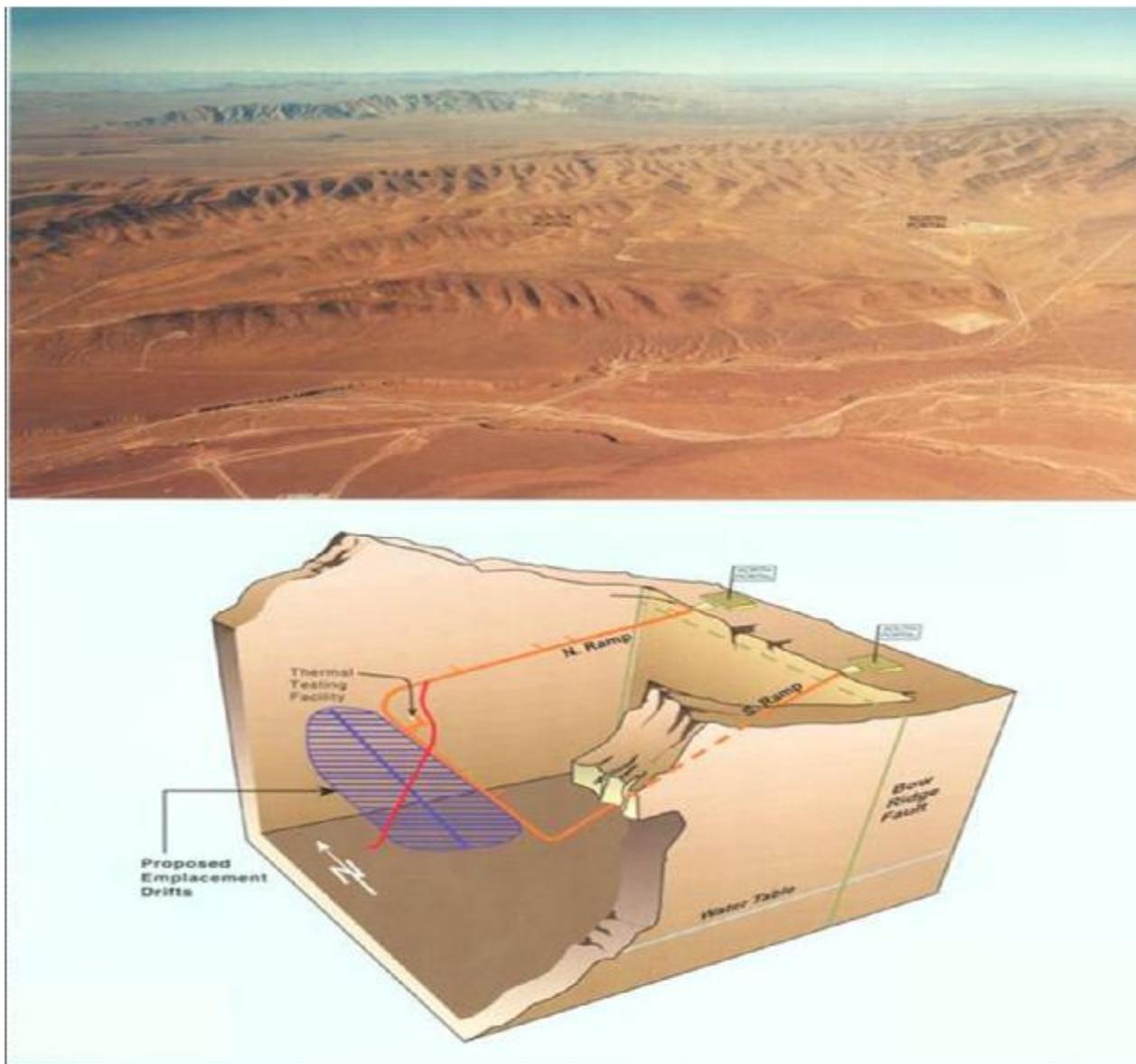
放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.2.4 高放废物处置的研究开发活动

地下实验室（URL）

- 提供接近实际处置条件的地质环境系统，提供设计参数、实践经验、人员培训，以及与公众沟通和国际合作。
- 现在全世界已建成和在建的地下实验室共17个，**有8个已投入运作**。分属美国（凝灰岩）、德国（废盐矿）、瑞士（花岗岩、粘土）、法国（粘土）、日本（花岗岩）、比利时（粘土）、加拿大（花岗岩）等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

(1) **普通地下实验室**：德国Asse

(2) **特定场址地下实验室**：美国尤卡山ESF、芬兰Onkalo、加拿大Whiteshell和比利时Mol。

- **地下实验室的选型和费用估算**
- 建特定场址地下实验室的前提条件是处置库场址已基本选定。
- 达到亿欧元级水平



放射性废物 处理与处置

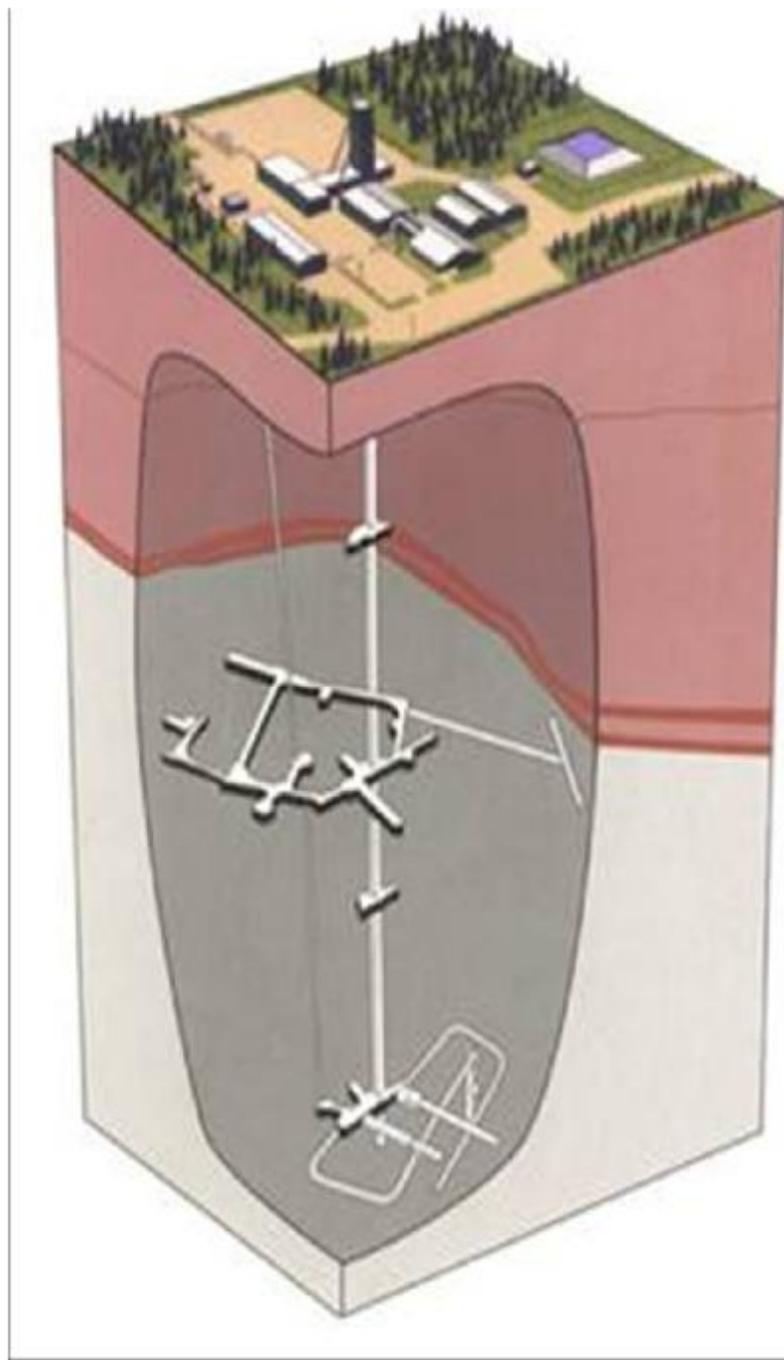
第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

加拿 大 地 下 实 验 室



放
处

第1

第2

第3



Figure 2-2. Äspö HRL near the Simpevarp Peninsula, north of Oskarshamn.

瑞典ASPO地下实验室外景



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

地下实验室的功能和作用

地下实验室是建库的一次实际演习。

- (1) 开发场址特性评价和场址监测的方法与设备
- (2) 试验和验证处置库模型
- (3) 开发建库工程技术方法和设备，积累经验，培训人员
- (4) 支持监管活动
- (5) 吸引国际合作
- (6) 提高公众对高放处置的了解、信任和支持



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 天然类比研究
- 提供佐证
- 提供借鉴
- 提供旁证
- 铀（钍）矿自然类比研究
- 中核、南大：铀矿石和围岩中的铀钍迁移范围十分有限，在 5×10^6 年间不超过30~35m。
- 东华：青铜文物的腐蚀和模拟研究。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

天然物考古自然类比研究

- **奥克洛现象**：西非加蓬共和国的奥克洛天然反应堆，在20亿年前发生链式反应，持续约 $10^5 \sim 10^6$ 年，“燃烧”了1000~2000t铀，产生了大量裂变产物和**钶系核素**，估计产生了4t钷，20亿年仅仅迁移几米远，**证明**地质构造可以实现安全隔离放射性核素。



古老的核反应堆——奥克洛铀矿

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废

物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物 的处理

第3讲 放射性废物 的处置

退出





青铜文物腐蚀层的研究

疏松亚层、 Cu氧化物亚层、 Cu碳酸盐亚层

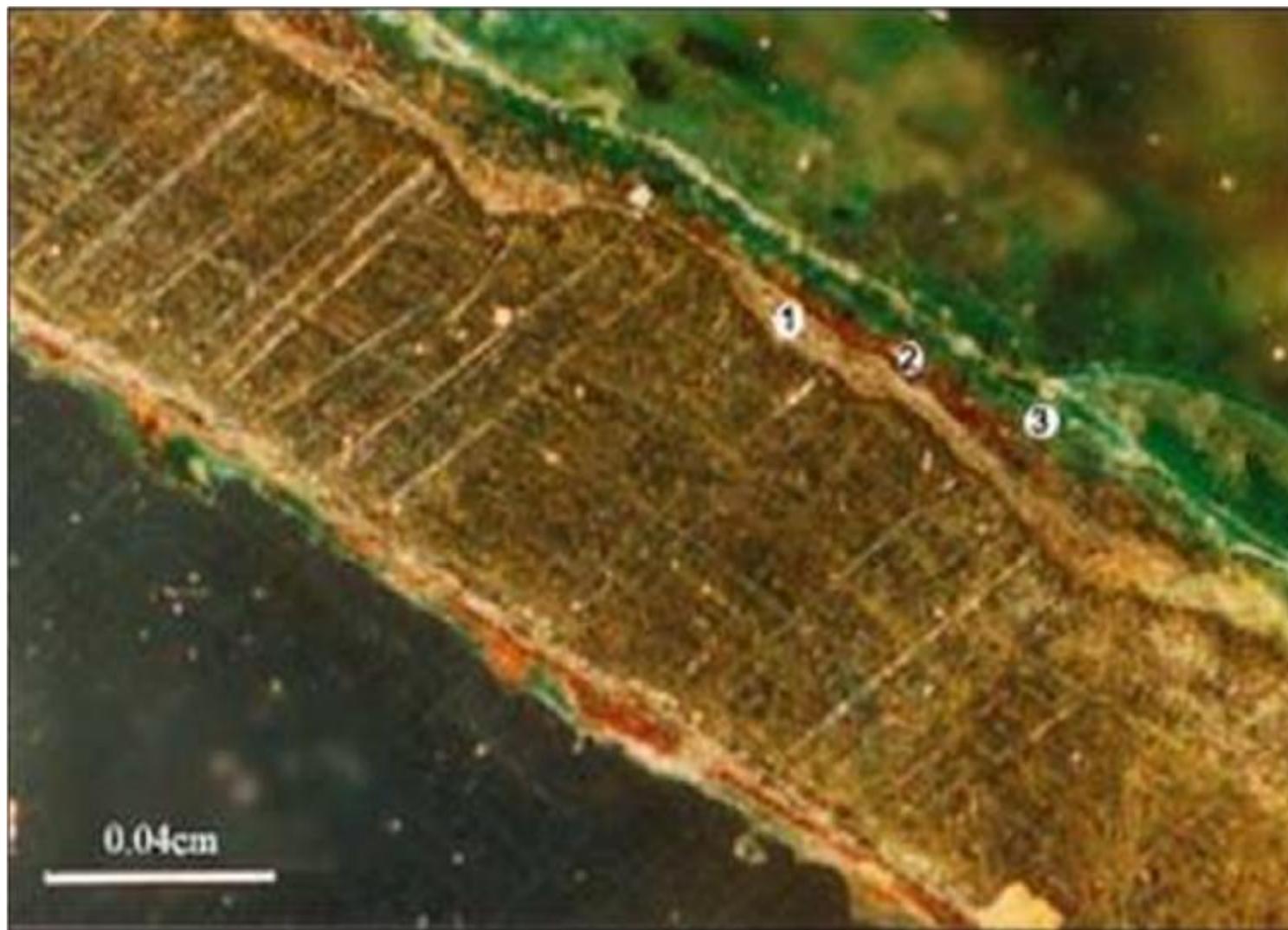
放射性废物
处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **天然玻璃体**——高放废物玻璃固化体的耐久性。
- **铁陨石**——高放废物包装容器腐蚀速率；金属容器在处置环境中的腐蚀机理主要是化学和电化学反应。
- **人物造考古自然类比研究**
- 马王堆汉墓的发掘显示了木炭和黏土密封层2100年隔水、隔气的有效性，黏土类物质作为缓冲和回填材料对废物处置工程屏障的有效作用。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

• 评价模式和参数

- 高放废物处置库安全隔离的期限远远超出了现有试验和验证的时间与空间尺度，**只能依靠数学模式计算来推断**。废物处置系统的安全评价需要开发和使用能够定量描述处置系统重要情景及其后果的模式。
- 建立模式通常要作许多简化和假定，需要用许多参数。选用复杂模式可能有些数据不容易获得，而且**存在较大的不确定度**。
- 参数获取的难度和工作量都很大。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- 情景分析和后果分析
- 识别会导致处置库性能改变或造成放射性核素转移到生物圈和可能引起生物学后果的过程或事件：自然产生的，废物本身诱发的，人类活动引起的。
- 美国尤卡山处置库：
- 地质灾害
- 火山活动
- 核临界事故
- 人类闯入
- 气候改变



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

不确定度分析和灵敏度分析

- **不确定度分析**使一个系统的预测性能与真实性能偏离的程度定量化。
- 不确定度主要来自两个方面：一是来自模式和参数接近真实系统的程度；二是来自人类活动、地质和气候变化及处置系统长期演变的不确定性。
- **灵敏度分析**帮助找出对安全评价结果有重要影响的那些参数和假定。
- **安全评价**
- **数据库建设**



3.2.5 核素迁移研究

- 处置在500~1000m深地下的废物体处于温度场（T）—渗流场（H）—应力场（M）—化学场（C）—生物场（B）—辐射场（R）**耦合作用**的环境中。
- 核素迁移过程的物理化学行为十分复杂，影响因素很多：**核素的物理化学性质**如水解、聚合、吸附、溶解、配合、沉淀、矿化、氧化还原、离子交换等；**环境条件**如Ph、Eh、离子强度、温度、辐射场、压力和应力以及微生物和腐殖质的存在等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **迁移作用**：**正向作用**如溶解、弥散、扩散、渗透、地下水运输、胶体载带、微生物载带；**逆向作用**如自身衰变、离子交换、吸附、沉淀、沉降、聚凝、矿化、分散稀释等，实际的迁移，是这两方面因素**共同作用**和**平衡**的结果。
- **迁移类型**：**机械迁移**、**物理化学迁移**、**生物迁移**
- **迁移载体**：地下水的运动速度和方向是关键因素。
- **重要核素**：长寿命核素 ^{239}Pu 、 ^{237}Np 、 ^{99}Tc 、 ^{129}I ；特长寿命核素 ^{126}Sn 、 ^{79}Se 、 ^{36}Cl 、 ^{107}Pd 、 ^{59}Ni 等。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

核素迁移研究

- **分配系数 $K_d(\text{ml/g})$** : 表征平衡时放射性核素在液相与固相分配特征。
- **扩散系数 $D_a(\text{m}^2/\text{s})$** : 扩散是由浓度差引起的, 遵循费克定律。
- **滞留因子 R_f** : K_d 值越大说明固相滞留核素的能力越强。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **配合反应**：阴离子与核素的阳离子发生配合反应，改变核素形态，影响它们迁移行为。
- **水解反应**：锕系核素在中性和碱性条件下发生水解反应。
- **胶体的形成**：胶体是促进Np、Pu、Am、Cm、Th传输和迁移的重要载体。
- **腐殖质作用**：锕系元素可形成腐殖质配合物，增加在地下水中的溶解度，促进锕系核素的迁移作用；另一方面，它又容易被黏土和岩石物质所吸附，这有阻滞锕系核素迁移的作用。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

微生物作用

- (1)微生物酶催化作用促进废物固化体贮罐的腐蚀
- (2)侵蚀玻璃固化体；
- (3)改变地下水的pH和Eh；
- (4)破坏缓冲/回填材料——膨润土；
- (5)生物降解腐殖质，产生CO₂和CH₄等气体；
- (6)直接摄取核素——吸附、吞食和滞留核素；
- (7)作为配位体，络合核素和促进核素的迁移；
- (8)作为核素的载体，形成假胶体；



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

辐解作用

- 水辐解会产生自由基、氧化剂 H_2O_2 和还原剂 H_2 ，废物辐解形成 NO_x 、 SO_x 、 CO_2 和 CH_4 等气体和酸性物质，加速金属容器的腐蚀；也会改变地下水pH，改变核素的氧化还原态。
- **气体的生成**
- 金属腐蚀和微生物降解有机物是产生气体的主要来源。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

3.2.6 高放废物处置的国际现状

进展迟缓 原因:

- 乏燃料是资源还是废物有争论
- 处置库选址条件高，场址难找
- 处置费用大，技术难度高，资源不足
- 公众对处置安全性的认同和社会/政治阻力



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

美国已建成运行WIPP

- 位于新墨西哥州的卡尔斯巴德，属**超铀废物隔离试验设施**，投资20多亿美元，1999年3月正式投入使用，属于深地质处置库，处置容量17.6万 m^3 。
- 离地面650m深地下的盐层中，处置库有7个单元，每个高6m×宽10m×长100m，设有4个竖井运送人员、材料、废物和通风。
- 处置**军工核设施**700 m^3 需远距离操作的超铀废物，17万 m^3 可直接操作(表面剂量率小于2mSv/h)的超铀废物，设计运行35年，期间废物可以回取。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

美国尤卡山处置库正在建设

- 1983年在6个州选出9个预选场址，1989年选定尤卡山；1998年完成可行性报告，2002年批准建设，计划2016年建成。
- 南距拉斯维加斯180km，东距内华达核试验场35km，处置库位于地表下300m。
- 设计容量为7万t，100年内可回取，预计投资600亿美元。
- 现已建立特定场址地下实验室ESF。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

- **芬兰：**建成地下实验室
- 2000年，选定奥尔基洛托核电站附近的花岗岩为处置场址，预计2010年建成ONKALO地下实验室，计划2012年开始建造处置库。
- **法国：**高放研究3大方向，继续研究15~20年
- 分离—嬗变、地下实验室、地表长期贮存
- **高放废物处置国际合作交流**
- IAEA鼓励开展合作研究
- 重视公众信任和社会支持



芬兰：2.8 km 的坑道已完成

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





瑞典候选场址Simpevarp鸟瞰图

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出



Figure 14-6. Photomontage of proposed positioning of the above-ground portion of the deep repository at Simpevarp. The area of interest for site investigations, besides the Simpevarp Peninsula itself, is shown in the background.



法国 BURE 地下实验室

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废

物的来源、分类
与管理

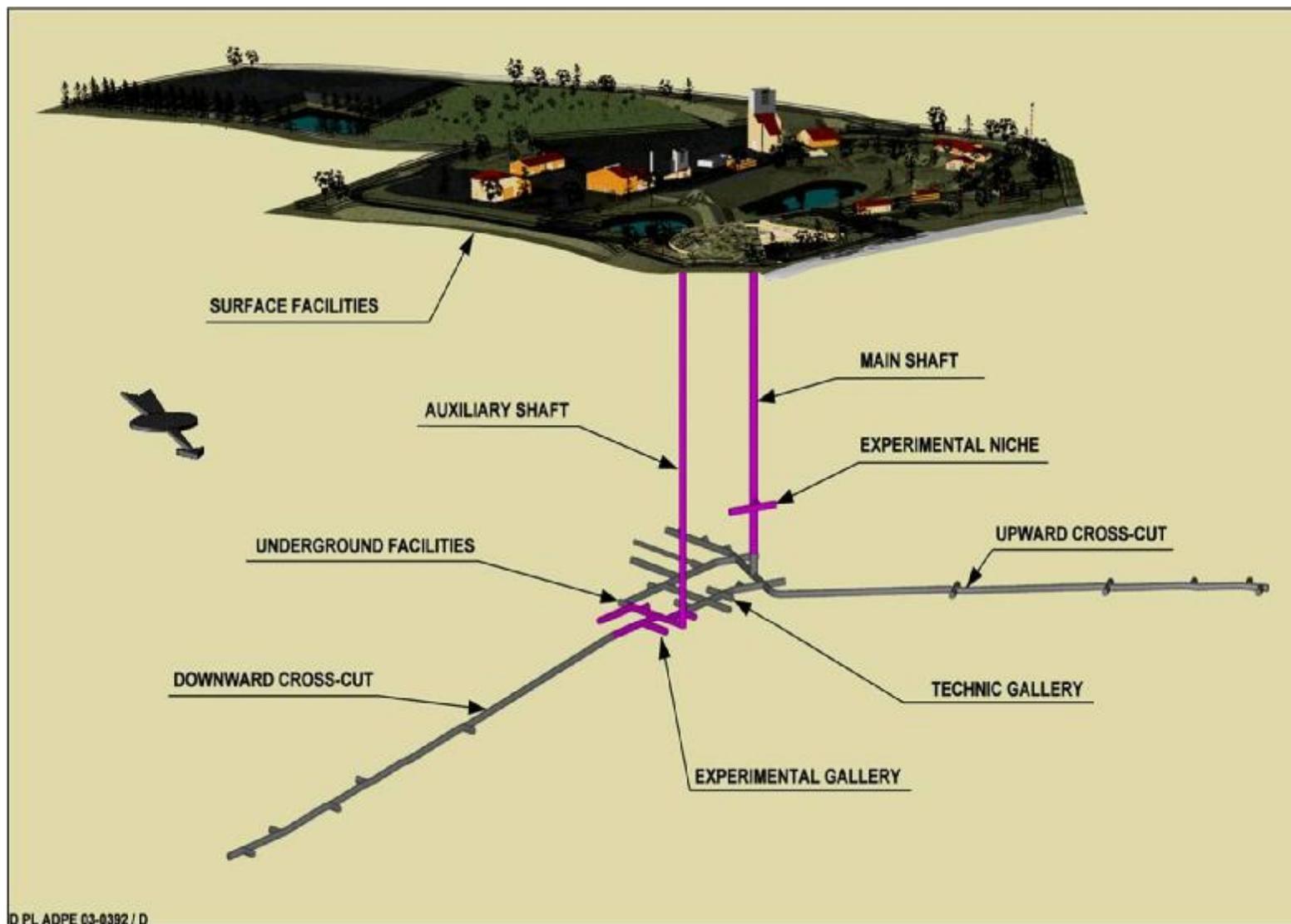
第2讲 放射性废物

的处理

第3讲 放射性废物

的处置

退出





法国 BURE 地下实验室外景

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

可回取性和可逆转性

- (1) 地质环境的不均匀性和长期包容能力的不确定性，可能存在着我们尚未认识的风险。
 - (2) 可予挽救和弥补，缓解人们的担忧和顾虑。
 - (3) 保留以后再开发利用的机会。
 - (4) 是对后代人能力的信任。
- 可回取性对废物包装容器和处置库设计等许多方面提出了更高要求，增加处置的难度和投资。
 - 尤卡山设计巷道卧放，不用缓冲回填材料。



放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出

我国高放废物安全处置工作

- 国防高放废液玻璃固化；2020年近1000t/a乏燃料。
- 高放废物地质处置研究开始于1985年，主要成绩：
 - 甘肃北山场址选址
 - 核素迁移科研
 - 缓冲/回填材料研究
- 2006年，国防科工委、科技部、环保总局发布《高放废物地质处置研究开发规划指南》，规划2020年前后建成地下实验室，21世纪中叶建成高放废物地质处置库。



北山日出——中国甘肃

放射性废物 处理与处置

第1讲 放射性废
物的来源、分类
与管理

第2讲 放射性废物
的处理

第3讲 放射性废物
的处置

退出





放射性废物 处理与处置

- 第1讲 放射性废物的来源、分类与管理
- 第2讲 放射性废物的处理
- 第3讲 放射性废物的处置

退出

第3讲 完

Over, thank you!