

# 核燃料后处理工艺

核燃料后处理工艺 编写组



原子能出版社

## 内 容 简 介

本书系中等技术读物。书中以较成熟的铝包壳天然铀辐照燃料元件的处理为重点，系统地介绍了后处理工艺的全过程，其中包括首端处理、溶剂萃取分离、尾端处理以及放射性同位素的提取和放射性三废处理；对于萃取设备也作了较为详细的介绍。

本书可作为核燃料后处理工厂技术工人的自学读物或培训教材，也可供从事有关工作的技术人员和大专院校师生参考。

### 核燃料后处理工艺

《核燃料后处理工艺》编写组

原子能出版社出版

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(限国内发行)

☆

开本787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张24<sup>3</sup>/<sub>4</sub>·字数588千字  
1978年11月北京第一版·1978年11月北京第一次印刷  
统一书号：15175·125  
定 价： 2.55 元

## 前 言

我国的原子能工业，在毛主席“独立自主，自力更生”，“大力协同，做好这件工作”的方针指引下，取得了巨大的成绩。

核燃料后处理是原子能工业的一个重要环节。它的任务是通过一系列化学和物理的方法，从反应堆辐照过的燃料元件中，提取裂变物质（如钚-239），回收还可以利用的核燃料，同时提取多种有用的放射性同位素。

为了适应核燃料后处理工厂广大工人学习业务知识的迫切要求，我们编写了这本《核燃料后处理工艺》。本书可作为后处理工人的自学读物或培训教材。为使内容不致过于繁杂，本书以较成熟的铝包壳天然铀辐照燃料元件的处理为重点，系统地介绍了后处理工艺的全过程，其中包括首端处理、溶剂萃取分离、尾端处理以及放射性同位素的提取和放射性三废处理；对于萃取设备也作了较为详细的介绍。

本书的编写工作是在有关单位党组织的领导下，由工人、干部和技术人员共同努力完成的。在编写过程中得到了许多兄弟单位和高等院校的大力协助，在此谨向支持和帮助编写、修改、审阅本书的各单位领导和同志们表示感谢。

在编写过程中，我们力求以辩证唯物主义和历史唯物主义为指导，理论与实际相结合，尽量做到深入浅出，通俗易懂。但由于我们水平所限，书中仍会有不少缺点和错误，恳请批评指正。

《核燃料后处理工艺》编写组

一九七七年十月

## 目 录

## 第一章 绪 论

- 一、原子能和反应堆····· 1
- 二、核燃料后处理在原子能工业中的地位和任务····· 5
- 三、核燃料后处理的特点····· 9
- 四、核燃料后处理概况····· 12

## 第二章 辐照核燃料及其首端处理

- 第一节 核燃料元件的种类、辐照核燃料的组成和冷却····· 16
  - 一、核燃料元件的种类····· 16
  - 二、辐照核燃料的组成····· 18
  - 三、辐照核燃料的冷却····· 27

- 第二节 铝包壳天然铀辐照元件的去壳和溶芯····· 28
  - 一、铝壳的碱溶解过程····· 28
  - 二、铀芯的溶解过程····· 32
  - 三、溶解尾气的净化····· 37
  - 四、化学去壳和溶芯的工艺流程····· 39
  - 五、溶解器····· 39

- 第三节 锆合金或不锈钢包壳二氧化铀元件的切断-浸取····· 41
  - 一、切断-浸取过程····· 42
  - 二、浸取过程的影响因素····· 43

- 第四节 萃取料液的调制····· 47
  - 一、调料····· 47
  - 二、凝絮····· 48
  - 三、过滤····· 48

## 第三章 辐照核燃料的溶剂萃取分离 (I)

- 第一节 溶剂萃取的基本原理····· 49
  - 一、基本概念····· 49
  - 二、萃取平衡与几个基本参数····· 51
  - 三、多级逆流萃取和分馏萃取····· 53
- 第二节 萃取流程的选择——普雷克斯流程····· 59
  - 一、萃取剂和稀释剂的选择····· 59
  - 二、普雷克斯流程概述····· 62
- 第三节 共去污分离循环····· 63
  - 一、铀、钚、裂变产物初步分离的基本过程····· 63
  - 二、TBP 萃取铀 (VI)····· 63

三、TBP 萃取铀 (IV)	67
四、TBP 萃取硝酸	70
五、TBP 萃取锆、铀、钒	72
六、共去污工艺条件分析	75
七、铀的还原反萃	78
八、铀的反萃	92
第四节 铀净化循环	92
一、铀净化工艺过程	92
二、无铀时TBP对铀和裂片的萃取	94
三、2AF料液的制备	96
四、铀的歧化与水解	98
五、铀萃取的工艺条件分析	100
六、铀反萃的工艺条件分析	101
第五节 铀净化循环	103
一、铀净化工艺过程	103
二、2DF料液的制备	103
三、2D槽和2E槽工艺条件分析	104
<b>第四章 辐照核燃料的溶剂萃取分离 (II)</b>	
第一节 普雷克斯变体流程及其改进	106
一、普雷克斯变体流程	106
二、流程的改进	107
第二节 动力堆辐照燃料的萃取分离	113
一、动力堆辐照燃料的特性	113
二、流程选择	114
三、普雷克斯过程的强化措施	115
第三节 溶剂体系的稳定性、污溶剂净化和废溶剂再生	121
一、溶剂的稳定性	121
二、溶剂降解产物及其对萃取过程的影响	123
三、污溶剂净化	126
四、溶剂的补充和更换	134
五、废溶剂的真空急骤蒸馏法再生	134
<b>第五章 辐照核燃料溶剂萃取分离 (III) —— 萃取设备</b>	
第一节 混合澄清槽	139
一、概述	139
二、混合室两相的搅拌方式及输入能量的计算	141
三、混合澄清槽的传质性能	144
四、澄清室中两相的界面高度	148
五、混合澄清槽的设计	153
六、混合澄清槽的操作	161

第二节 脉冲萃取柱 .....	163
一、概述 .....	163
二、脉冲筛板柱的操作特性 .....	164
三、脉冲筛板柱的生产能力 .....	166
四、脉冲筛板柱的传质性能 .....	170
五、脉冲筛板柱设计中的一些问题 .....	176
第三节 离心萃取器 .....	179
一、概述 .....	179
二、离心萃取器的优缺点 .....	179
三、离心萃取器的种类 .....	180
四、离心萃取器的工作原理 .....	183
五、离心萃取器的性能 .....	187
<b>第六章 铀的最终纯化和转化</b>	
第一节 阴离子交换法纯化铀 .....	192
一、概述 .....	192
二、阴离子交换过程 .....	192
三、阴离子交换法纯化和浓缩铀的工艺流程 .....	198
第二节 胺类萃取纯化铀 .....	200
一、概述 .....	200
二、萃取过程机理 .....	202
三、胺类萃取过程的影响因素和工艺条件的选择 .....	202
四、反萃取 .....	207
五、污溶剂洗涤 .....	211
第三节 铀的沉淀和煅烧 .....	211
一、过氧化铀沉淀 .....	212
二、三氟化铀沉淀 .....	214
三、草酸铀(Ⅲ)沉淀 .....	215
四、草酸铀(Ⅳ)沉淀 .....	216
五、草酸铀(Ⅳ)煅烧 .....	222
<b>第七章 铀的最终纯化和转化</b>	
第一节 铀的最终纯化——硅胶吸附 .....	225
一、过程原理 .....	225
二、硅胶吸附锆、铀的影响因素 .....	226
三、工艺过程 .....	229
第二节 硝酸铀酰的流化床脱硝-还原 .....	231
一、气固流态化和流化床反应器 .....	231
二、硝酸铀酰的流化床脱硝和还原 .....	240
第三节 三碳酸铀酰铵沉淀及其煅烧生产二氧化铀 .....	248
一、沉淀反萃过程 .....	248

二、沉淀的过滤 .....	254
三、母液的处理 .....	255
四、三碳酸铀酰胺热分解制取二氧化铀 .....	259
<b>第八章 超铀同位素和裂片同位素的提取</b>	
<b>第一节 离子交换法的基本原理</b> .....	265
一、离子交换剂及其分类 .....	265
二、树脂的性能及其主要影响因素 .....	267
三、分配系数 $K_d$ 与分离因数 $\beta$ .....	269
四、离子交换分离操作过程 .....	269
五、离子交换速度 .....	270
<b>第二节 镭-227的提取</b> .....	271
一、镭的萃取化学 .....	272
二、镭在普雷克斯流程中的行为 .....	276
三、流程介绍 .....	277
四、提取途径评述 .....	279
五、镭的最终纯化与转化 .....	280
<b>第三节 锶-90的提取</b> .....	287
一、从放射性废液中提取锶的方法 .....	287
二、HDEHP 对锶和稀土元素的共萃取 .....	287
三、杂质的洗涤 .....	291
四、锶和稀土元素的分离 .....	293
五、污溶剂处理 .....	294
六、提取锶和稀土元素的工艺流程 .....	294
七、锶-90的精制 .....	294
<b>第四节 钷-147的提取</b> .....	297
一、提取钷的方法 .....	297
二、离子交换排代法从稀土元素中分离钷 .....	297
三、 $Pm_2O_3$ 和 $Pm(NO_3)_3$ 的制备 .....	303
<b>第五节 铯-137的提取</b> .....	304
一、沉淀法 .....	305
二、萃取分离法 .....	305
三、离子交换分离法 .....	306
<b>第六节 镉-99的提取</b> .....	308
一、沉淀法 .....	308
二、萃取法 .....	309
三、阴离子交换法 .....	310
<b>第七节 铟和铊的提取</b> .....	311
一、铟、铊的初步净化 .....	312
二、铟和铊与镧系元素的分离 .....	313

三、镅（镅）的最终纯化 .....	316
<b>第九章 放射性三废的处理</b>	
第一节 放射性废物的来源、分类和处理方法 .....	318
一、放射性废水的来源和分类 .....	318
二、放射性废水的处理原则 .....	319
第二节 放射性废水的蒸发法处理 .....	320
一、基本原理和流程 .....	320
二、蒸发器及其操作 .....	322
三、汽液分离装置 .....	327
四、甲醛脱硝 .....	329
第三节 凝聚沉淀法 .....	332
一、凝聚过程的原理 .....	333
二、影响凝聚效果的因素 .....	333
三、应用凝聚沉淀法时需考虑的问题 .....	334
第四节 离子交换法及其他处理方法 .....	337
一、离子交换法概述 .....	337
二、离子交换装置及其操作控制 .....	338
三、离子交换过程对原废水和交换剂的要求 .....	339
四、离子交换法处理放射性废水 .....	340
五、其他处理方法 .....	342
第五节 放射性废水的贮存、排放和复用 .....	344
一、放射性废水的贮存 .....	344
二、弱放废水的排放 .....	345
三、废水净化后复用 .....	346
第六节 放射性废气的处理 .....	347
第七节 放射性浓缩液的固化和固体废物的处理及处置 .....	349
一、对固化处理的基本要求 .....	349
二、中、弱放浓缩液的固化处理 .....	350
三、强放废液的固化 .....	357
四、固体废物的处理 .....	360
五、废物的处置 .....	361
<b>附 录</b>	
I. 主要核素的放化特性 .....	365
II. 铀-235热中子裂变产物的总 $\beta$ 放射性及各裂变产物在其中的贡献变化曲线 .....	375
III. 铀-235热中子裂变产物的总 $\gamma$ 放射性及各裂变产物在其中的贡献变化曲线 .....	376
IV. 常用萃取剂、络合剂的代号、结构式（或分子式） .....	377
V. 盐酸、硝酸、硫酸、氨水比重-浓度换算表 .....	379
VI. 铀-235的热中子诱发裂变的链产额（%） .....	381
VII. 易燃、易爆、有毒和腐蚀性物质 .....	381



# 第一章 绪 论

## 一、原子能和反应堆

### 1. 原子能

伟大领袖和导师毛主席指出：“人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。”几千年来，人类一直在为寻找和扩大新能源，提高自己驾驭自然界的能力而斗争。从十九世纪末叶开始，原子核的秘密逐渐被揭开；本世纪三十年代末铀核裂变现象的发现，终于找到了一条通向利用原子能的现实道路。这一发现，为人类利用原子能展示了广阔的前景，并很快地得到了实际应用，导致了核武器的发明以及数以百计的核电站和各种核动力船舰的建造。原子能继化学燃料（包括煤、石油、天然气等）和水力资源之后，已经成为地球上第三种主要能源。原子能的利用大大地扩大了人类支配自然界的能力。

原子能是在原子核结构发生变化的过程中释放出来的能量，确切一些应称之为原子核能。由结合能较小的原子核分裂或聚合成结合能较大的新原子核时都会放出能量，前者称为重核裂变能，后者称为轻核聚变能，原子能主要就是指的这两个方面。

某些重元素同位素的原子核吸收一个中子后，会分裂成两个或两个以上不同质量的较轻的新原子核，同时还会放出新的中子和巨大的能量，这一过程称为原子核的中子诱发裂变反应，简称核裂变。其原子核在中子作用下容易发生裂变的物质，如铀-235、钚-239、铀-233等，称为裂变物质。核裂变产生的较轻的新原子核及其衰变产物统称为裂变产物或裂片。

裂变物质在裂变过程中释放出来的能量是非常巨大的。例如每一个铀-235原子核发生裂变时，平均会放出大约 200 兆电子伏的能量。以此推算，1 克铀-235 完全裂变时可以产生大约  $1.93 \times 10^7$  千卡的能量。但是铀-235 在裂变的同时，不可避免地有一部分会发生非裂变的中子俘获反应，因此实际消耗 1 克铀-235 可以产生大约  $1.6 \times 10^7$  千卡的能量，这个数字相当于二百万克（两吨）优质煤完全燃烧时所放出的能量。例如一座电功率为 30 万千瓦的大型火电站，每年耗煤量将近 100 万吨，而同样规模的核电站只要每年供给 60 吨左右的天然铀。

原子能也可以从一些轻核（例如氘、氚、锂-6 等）的聚变而获得。聚变反应需在几千万度的极高温下才能进行，所以也叫热核反应。以同样重量相比较，轻核聚变时放出的能量比重核裂变能还要大好几倍，例如 1 克氘化锂 ( ${}^6\text{Li}$ ) 完全反应所产生的能量约为  $5 \times 10^7$  千卡，相当于 1 克铀-235 裂变能的三倍。

地球上蕴藏的原子能资源是十分丰富的。目前仅资本主义国家已查明有经济开采价值的铀资源为 200 万吨左右，加上稍低品位的铀矿和尚未利用的钍资源，包含的总裂变能量折合  $1.2 \times 10^{20}$  千卡，相当于现在掌握的地下煤资源的 7 倍或者石油资源的 100 倍以上。如

果考虑到浩瀚的海洋中尚含有大量的铀（约40亿吨），那就可以预计今后几百年内裂变能将是人类的一个重要能源。聚变能的资源简直可以说是取之不尽用之不竭的，例如一升水所含氘的聚变能相当于400升优质石油完全燃烧时所放出的能量。如果可控热核反应得以实现，那末人类在几亿年内的能源问题就可认为基本上解决了。

## 2. 反应堆

上面说过，裂变物质的原子核吸收一个中子发生裂变时，还会放出新的中子，一般为二到三个。这些新产生的中子又能使裂变物质的其他原子核继续发生裂变，在一定的条件下，裂变反应可以持续不断地进行下去。这种持续不断地由中子引起裂变、裂变又放出新中子、新中子又引起裂变的过程叫做裂变链式反应（如图1.1所示）。正是这种链式反应，才使原子能的大规模利用有了现实的可能性。

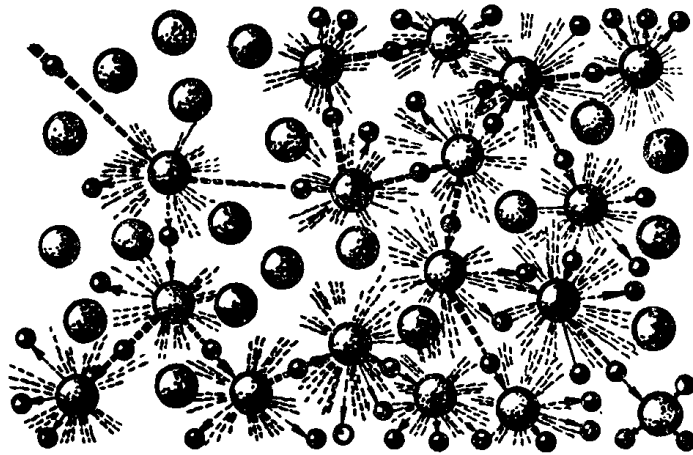
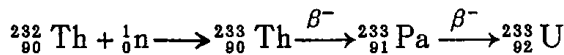
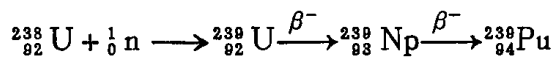


图1.1 原子核裂变链式反应示意图

核反应堆就是一种由裂变物质自己维持链式反应、可以人为控制反应快慢的装置，通常由核燃料、慢化剂、冷却剂、控制棒、反射层和屏蔽层等构成。图1.2为一种典型的石墨水冷实验堆的示意图。

核燃料是用于维持反应堆正常运行的材料，通常除了裂变物质外还含有转化材料。后者吸收中子后可转化成新的裂变物质。例如：



天然资源中，只有铀-235一种裂变物质，且只占总铀量的0.7115%（重量），而转化材料铀-238和钍-232则是很丰富的，因此上面两个转化反应对于核燃料的充分利用具有关键意义。核燃料后处理的重要任务之一也就是提取由这两个转化反应生成的裂变物质钚-239和铀-233。

反应堆的种类很多，可按用途、慢化剂、冷却剂和燃料的种类，中子的能量以及燃料

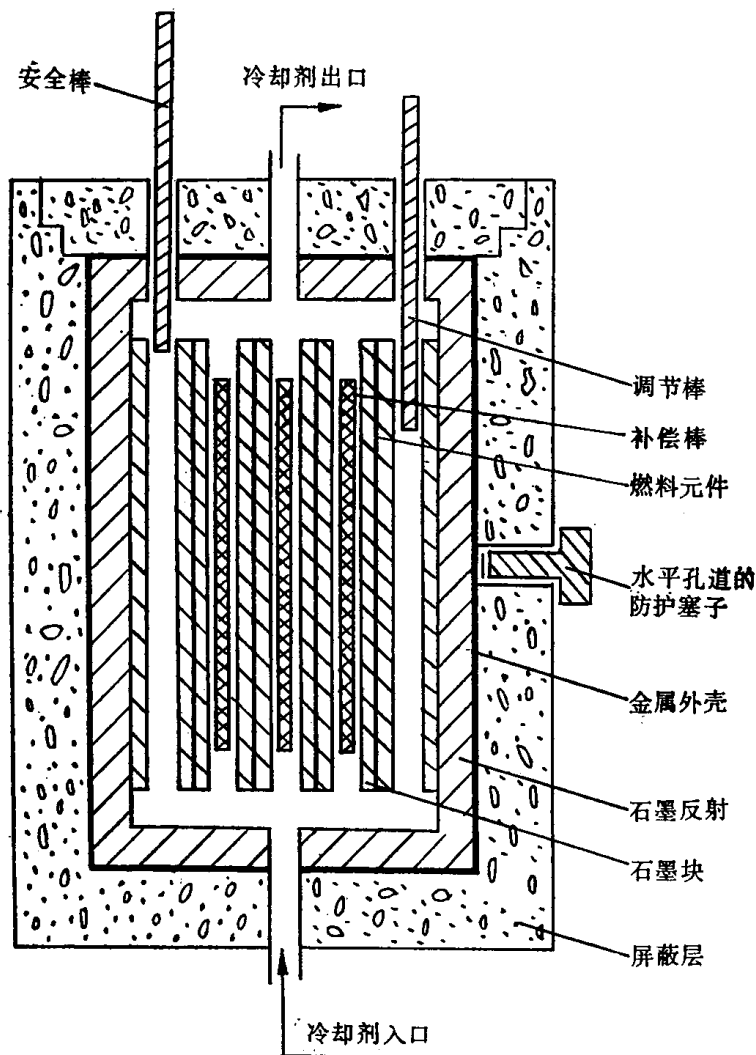


图1.2 典型的石墨水冷实验堆的示意图

布置形式等加以分类，如表 1.1 所示。

反应堆的类型决定了核燃料的种类、形态以及燃料在反应堆中的工况，因此它对核燃料后处理影响很大。例如，核燃料的化学形式和包壳材料直接决定应该采用何种首端处理方法；核燃料的初始富集度和燃耗深度决定了后处理的负荷；燃耗深度和比功率决定了辐照核燃料的比放射性的 高低和后处理净化要求，从而影响主工艺流程和设备的选择。又如快堆燃料的裂变物质含量要比热堆燃料高一、二十倍，因此要缩短快堆辐照燃料冷却时间，快速进行处理，以减少裂变物质的积压，加速燃料周转，这就给后处理带来了一系列问题需要研究解决。由此可见，后处理工厂与它处理哪一种反应堆的辐照燃料元件有密切的关系。从事后处理工作的人员，必须了解和区别自己的处理对象，必须关心反应堆技术和元件制造等方面的情况和发展趋势。现将某些堆型的常用燃料和材料以及某些堆型辐照燃料的特性分别列于表 1.2 和表 1.3。

表1.1 反应堆简要分类

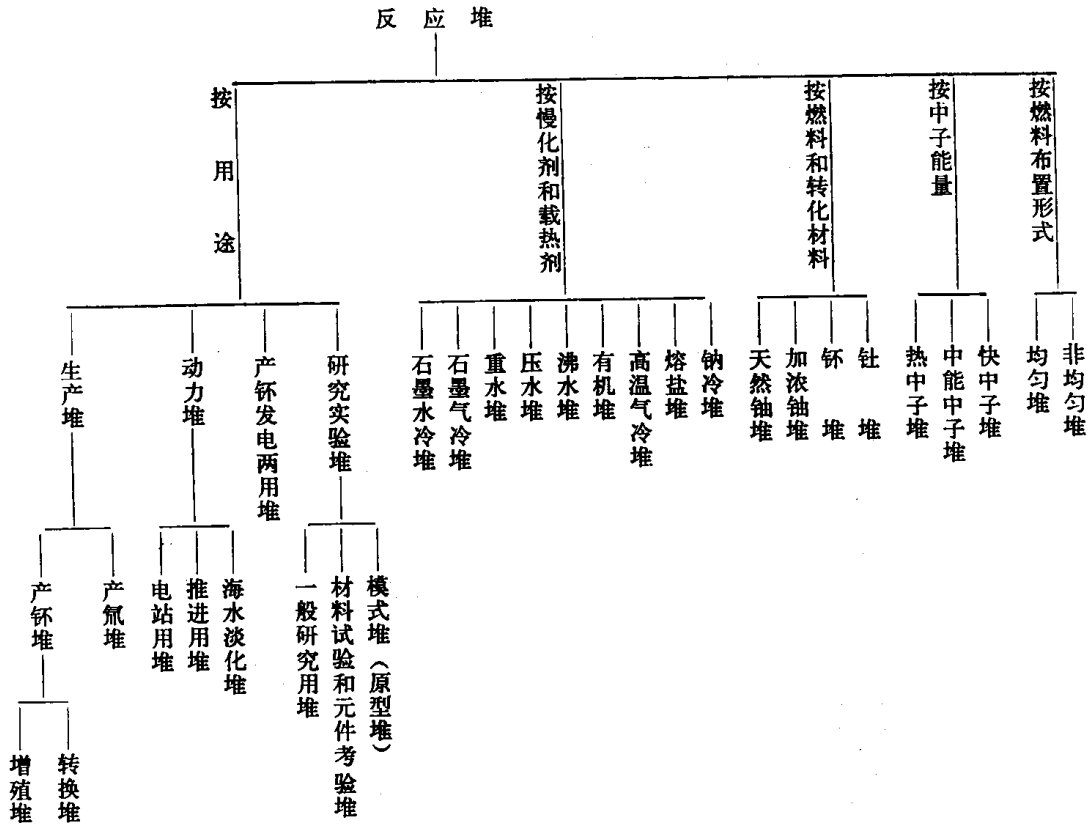


表1.2 某些类型反应堆的常用燃料和材料

堆 型		燃 料	燃 料 元 件 形 式	元 件 包 壳 材 料	慢 化 剂	冷 却 剂
生 产 堆	石墨水冷堆	天然铀金属	棒 状	铝	石 墨	普 通 水
	重水堆	天然铀金属	棒状、管状	铝	重 水	重 水
	石墨气冷堆	天然铀金属	棒 状	镁 合 金	石 墨	二 氧 化 碳
动 力 堆	镁格诺克斯型堆	天然铀金属	棒状、管状、环状	镁 合 金	石 墨	二 氧 化 碳
	改进型气冷堆	2.0—2.5%加浓度的二氧化铀	棒束	不 锈 钢	石 墨	二 氧 化 碳
	沸水堆	1.5—2.5%加浓度的二氧化铀	棒束	锆-2合金 不 锈 钢	普 通 水	普 通 水
	压水堆	3.0—3.5%加浓度的二氧化铀	棒束	锆-4合金 不 锈 钢	普 通 水	普 通 水
	加压Candu型	天然铀二氧化物	棒束	锆-2合金	重 水	重 水
	沸腾轻水Candu型	天然铀二氧化物	棒束	锆-4合金	重 水	普 通 水
	沸腾轻水冷却重水慢化堆	2.0%加浓度的二氧化铀	棒束	锆-2合金	重 水	普 通 水
	高温气冷堆	大于90%加浓度的二氧化铀或ThC <sub>2</sub> +UC <sub>2</sub>	涂敷颗粒	石 墨 层	石 墨	氨 气 或 二 氧 化 碳
	快中子堆	15%加浓度的二氧化铀与二氧化钚混合物	棒束	不 锈 钢	无	液 态 金 属 钠 或 氨 气

表1.3 某些类型反应堆辐照燃料的特性

堆型	重水堆	石墨气冷堆	轻水堆	快中子堆
燃料	天然铀棒	铀金属棒	低浓缩二氧化铀元件束 (铀-235含量5%)	混合氧化铀-氧化钚元件束
平均燃耗, 兆瓦日/吨	400	4000	33000	80000(堆芯)
辐照元件冷却 150 天后的比放射性, 居里/公斤	110	1400	4500	18000
辐照燃料中裂变产物总量, 克/吨	400	4160	35000	85000
辐照燃料中锕系元素量, 克/吨				
镎(Np)	1.2	22	760	180
钚(Pu)	400	2600	9100	194000
镅(Am)			150	2320
锔(Cm)			35	80
铀(U)	999200	992500	约955000	719000
锕系元素总量	999600	995000	965000	915000

## 二、核燃料后处理在原子能工业中的地位和任务

### 1. 核燃料循环

正是由于原子能资源丰富, 能量集中, 因此短短的三十多年来, 原子能事业发展极为迅速, 并已建立起一个完整的原子能工业体系。原子能工业是一个综合性的工业部门, 大致可以分成四大部分: (1) 铀矿的勘探和开采; (2) 核燃料循环; (3) 反应堆的建造和运行; (4) 核武器制造。图 1.3 为简略的原子能工业示意图。

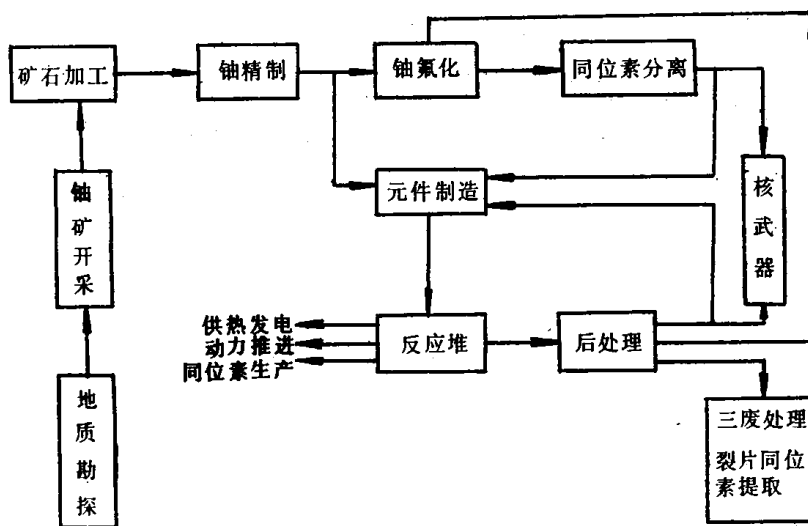


图1.3 原子能工业简图

核燃料循环一般包括以下几个步骤: 铀矿石的加工, 铀的精制 (纯化、氟化和还原), 铀同位素分离, 元件制造, 燃料堆照, 辐照燃料元件的处理和放射性废物的处理及处置。相对于反应堆来说, 通常将铀矿石的加工和铀的精制称为前处理, 而将经反应堆辐照过的核燃料的处理称为后处理。

燃料的循环方式主要取决于所选用的反应堆的类型、用途和要求达到的燃料利用率。

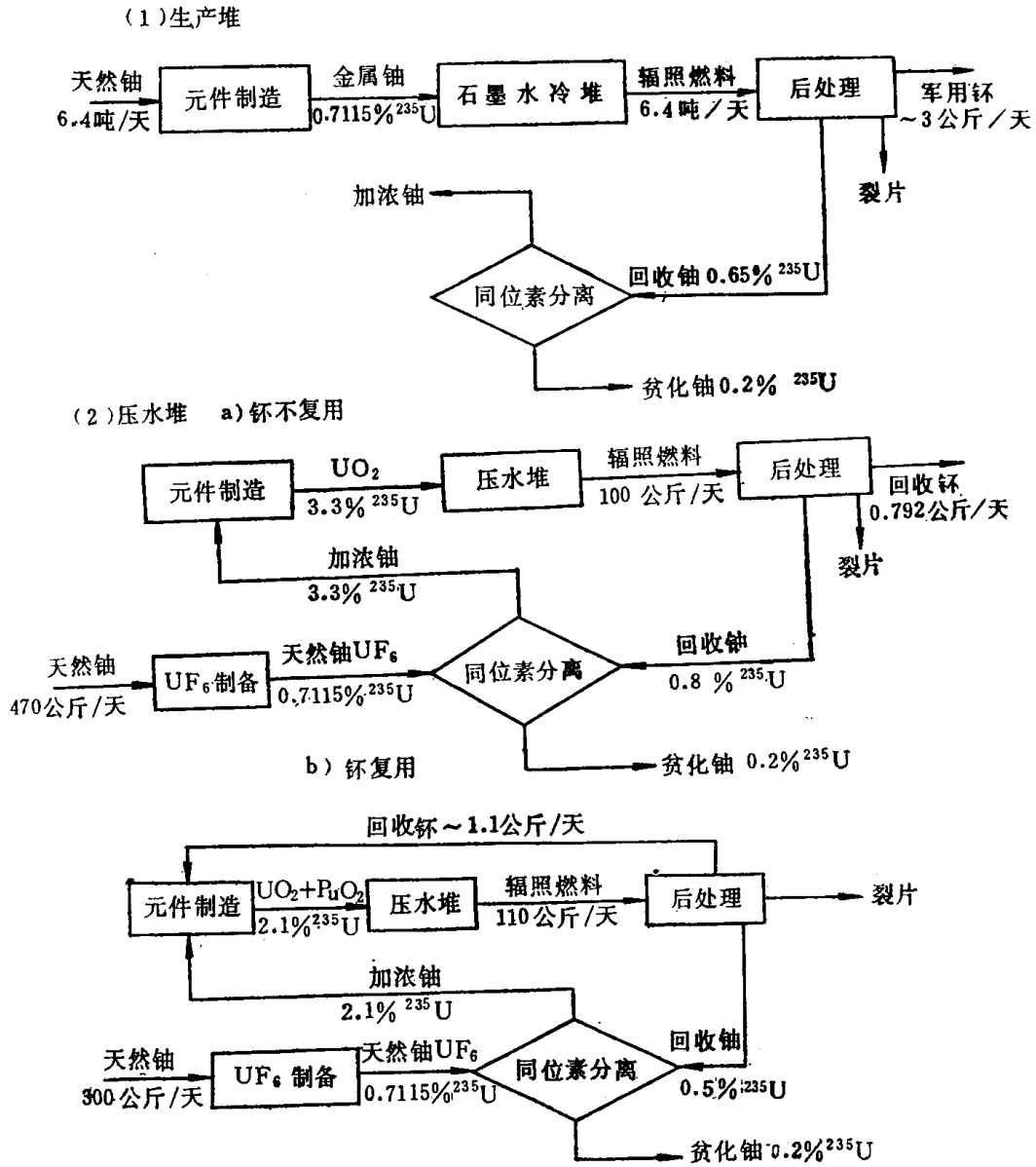


图1.4 典型的核燃料循环

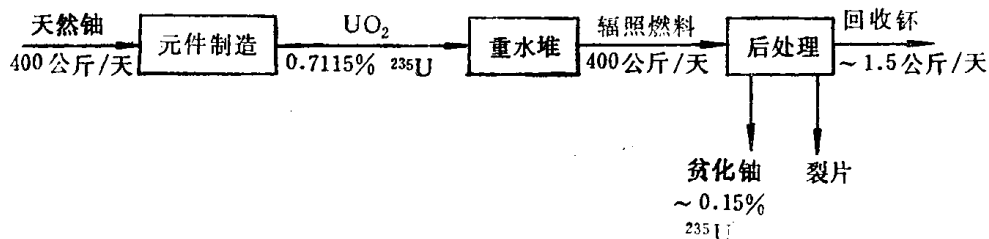
不同类型的反应堆所用的燃料是不同的，例如重水堆以天然铀金属为燃料，而轻水堆则用低加浓铀二氧化物作燃料，因此燃料循环方式也就自然不同。同样以天然铀金属为燃料的反应堆中，生产堆的目的是生产军用铀，动力堆的目的是发电，燃料利用率不同，循环方式就不一样。图 1.4 列出了几个有代表性的部分简化的核燃料循环。由此可以看出，对于不同的反应堆，不同的燃料循环方式，后处理所遇到的辐照燃料所含裂变物质的种类、加浓度以及燃料总量有很大的差别。因此后处理工厂从规模到流程方案的选择，都必须结合整个核燃料循环综合考虑。

### 2. 核燃料后处理的重要性

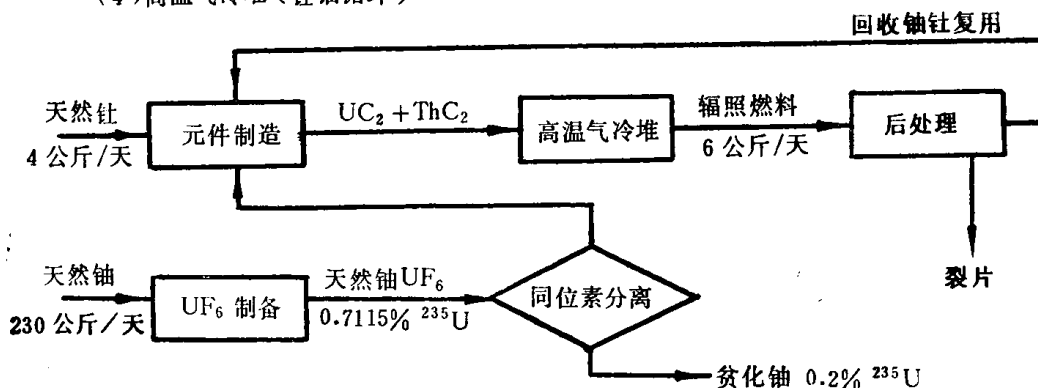
从上面可以看出，核燃料后处理是原子能工业的一个重要环节，在原子能工业中占有很重要的地位。后处理的重要性具体表现在以下几个方面。

(1) 后处理是生产核武器装料钚-239必经的一步。迄今为止，核武器的装料仍然主

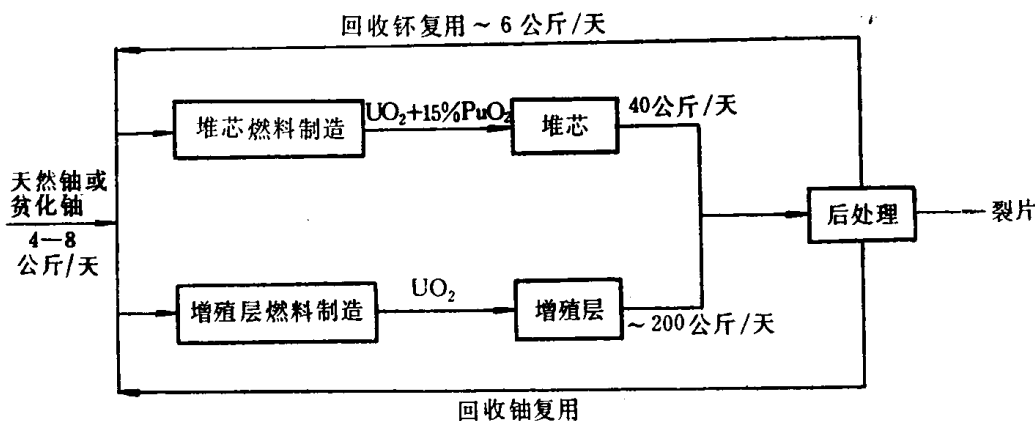
(3) 重水堆



(4) 高温气冷堆 (钍铀循环)



(5) 快堆



(反应堆热功率300万千瓦)

要是铀-235和钚-239。高浓度的军用铀-235，可以从同位素分离工厂获得，但这种工厂的投资和耗电量是很大的。而用天然铀作燃料，在反应堆内生成钚，然后通过后处理提取军用钚，则是技术上经济上比较容易实现的途径。另外从核武器的性能来说，钚弹的效率比铀弹高，同样威力的钚弹装钚量只有铀弹装铀量的三分之一左右，所以钚弹容易做到小型化。

(2) 后处理对于充分利用核能资源关系极大。核燃料在反应堆内“燃烧”的过程中，将产生大量的裂变产物，其中有一些能强烈地吸收中子（称为中子毒物）。当它们积累到一定程度时，会影响反应堆的正常运行，因此必须进行化学分离，将这些中子毒物除去。这样，燃料在反应堆中使用一次，就只能利用燃料总量的一小部分。而对于生产堆来说，由于军用钚对钚-240的含量有一定要求，燃料的燃耗必须较浅，燃料的利用率就更低。只有通过后处理才能将辐照核燃料中新生成的裂变物质、没有用完的裂变物质和尚未转化

的转化材料分离净化，回收复用。也只有经过堆照——后处理——元件再加工多次循环，才能使自然界核能资源中占绝大部分的铀-238、钍-232充分转化成裂变物质而加以利用。

(3) 后处理对核电经济性将有日益重要的影响。为了充分利用天然铀资源，今后反应堆将不断提高转化材料的转化率，发展先进的增殖堆，同时实现回收的工业铀的复用。因此后处理和元件再加工这两个环节的费用在燃料循环费用中所占的比重将不断上升。为了适应这种情况，必须在后处理工厂中不断地降低单位重量燃料的后处理费用。另外，由于环境安全的要求越来越严格，今后在三废处理方面的费用肯定会大幅度提高。例如增建一个强放废液玻璃固化车间，后处理厂的投资就要增加8—12%。

### 3. 核燃料后处理的任务

经过上面的分析，后处理的任务也就很清楚了，归纳起来大致有以下四个方面。

- (1) 提取和纯化新生成的裂变物质；
- (2) 回收和纯化没有用完的裂变物质和尚未转化的转化材料；
- (3) 提取有用的裂片同位素和超铀同位素；

(4) 为完成上述任务，必须将元件的包壳去除，将辐照燃料溶解，结果产生大量的放射性废物（占整个原子能工业产生的放射性废物的99%以上），后处理工厂必须对这些放射性废物进行安全处理和妥善处置。

通常，前两项任务由后处理工厂的主工艺车间承担，而后两项由辅助车间完成。对主工艺车间的核燃料分离纯化和回收有如下要求。

(1) 产品收率是后处理工厂的一项重要经济指标和技术指标，一般水法流程对铀的收率可以达到99.8%以上，对钚的回收率可以达到99.5%以上。但也不能一概而论。生产堆燃料后处理工厂由于辐照燃料比放射性较低，工厂又是连续处理单一类型的燃料，因此损失较小，收率指标很高。反之当燃料比放射性较高，而工厂又要处理多种不同燃料时，由于停车清洗较为频繁，收率指标就要稍低一些。

(2) 产品放射性是后处理工厂的一项主要质量指标。对产品放射性的要求应根据辐照燃料的特性、产品用途、元件再加工技术以及经济、安全等方面综合考虑。通常规定铀产品的放射性应不超过天然铀放射性（ $\beta$ , 0.67微居/克； $\gamma$ , 0.16微居/克）的两倍，钚产品的 $\gamma$ 放射性小于10微居/克。经常用净化系数来衡量后处理对产品分离净化的效率。根据上述质量指标，一般要求净化系数为 $10^6$ — $10^8$ 。

后处理的产品，除了对放射性外，对其他杂质的含量也有一定的要求。表1.4和表1.5分别列出了国外某些后处理工厂的净化系数和产品收率以及对产品的质量要求。

表1.4 大型后处理工厂的典型净化系数和产品收率

指 标 工 厂	钚产品的 总净化系数	铀产品的 总净化系数	铀钚分离系数		铀回收率, %	钚回收率, %
			钚中去铀	铀中去钚		
美国汉福特工厂	$>10^8$	$10^7$	$>10^7$	$10^6$	99.9	99.9
英国温茨凯尔工厂	$3 \times 10^8$	$10^7$	$10^7$	$3 \times 10^5$	99.97	99.8

(3) 产品形式。后处理工厂的产品形式与选用的流程有密切的关系。

铀产品一般有三种形式，即硝酸铀酰、三氧化铀和三碳酸铀酰胺。早先建成的后处理



表1.5 国外一些后处理厂的产品质量要求

工厂	铀 产 品			钚 产 品		
	产品形式	放 射 性	杂质含量, ppm	产品形式	γ 放射性	杂质含量, ppm
欧洲化学公司工厂	硝酸铀酰	天然铀的一倍	Pu<10, P<30, Si<100	二氧化钚 (钚含量>85.0%)		U<300, Fe<300
英国温茨凯尔工厂	三氧化铀	<0.1毫居/公斤铀	Pu<0.006	硝酸钚	<1毫居/公斤钚	总金属杂质:<200
法国阿格工厂	硝酸铀酰	天然铀的200%	V:5, Si:150, Cr:50, P:150, W:5, 卤素:25, S:500, Sb>1, C:200, Nb>1, Mo:8, B:1, Ru, Ta, Ti, Pu, 10 <sup>-2</sup>	二氧化钚 (钚含量>85%, 烧结温度<400°C, 粒度, 325目)	<8微居/克钚	U:300, Th:200, Fe:500, Ni:150, Cr:200
美国设计指标	硝酸铀酰	β放射性、γ放射性均为天然铀的100%	Pu<0.01, P<100, S<100, Si<100, Mo<10, 其他<350	硝酸钚	<0.5—1微居/毫克钚	U<1000
美国汉福特工厂				金属钚 ( <sup>240</sup> Pu<3%)		Mn:20, Ni:10, Mg:20, Al:8, Pb:10, Cu:2, Fe<50, Ag<1
西德卡尔斯鲁厄工厂	硝酸铀酰	γ放射性, 0.6微居/克铀	Pu, 0.1	硝酸钚	0.06毫居/克钚	

工厂的铀产品大都是硝酸铀酰溶液。但是由于安全方面的新规定，要求所运输的放射性物质都成为固体形式，因此新建工厂的铀产品一般为三氧化铀。例如，英、日两国就是在后处理厂内完成产品脱硝以三氧化铀形式出厂的。苏联流程中采用沉淀成三碳酸铀酰铵产品形式，沉淀过程有附加的净化作用，且三碳酸铀酰铵经加热分解可直接得到二氧化铀，因而可以省掉三氧化铀的氢还原步骤；但是，在这个流程中，硝酸不能回收，硝酸铵废物量大，沉淀系统操作不便，缺点较多。

钚产品通常采用硝酸钚溶液或二氧化钚形式。硝酸钚溶液对以后使用较为灵活，但运输和保存均不安全，今后趋向采用二氧化钚的产品形式。

### 三、核燃料后处理的特点

后处理工厂的主要任务是从大量结构材料、转化材料和裂变产物的复杂体系中提取少量的裂变物质，分离系数和产品收率都有严格的要求，因此必须仔细控制工艺参数和操作条件。不过这些并不是后处理工厂特有的技术困难，实际上这样一些分离净化和收率指标