

核燃料后处理工学

姜圣阶、任凤仪等编著

原子能出版社

核燃料后处理工学

姜圣阶 任凤仪 等 编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书理论联系实际、全面系统地论述了反应堆乏燃料后处理的全过程,其中包括首端处理、溶剂萃取分离、尾端处理等提取铀回收钍的主工艺过程;还包括裂变产物和锕系元素的提取,放射性三废的处理和处置等辅助工艺过程。书中较为详细地介绍了生产设备、仪表(包括在线分析仪表)、分析监测、辐射防护、临界安全与控制、启动运行、清洗去污和检修等工程技术问题。

本书还阐述了生产堆乏燃料后处理过程中的许多科研和工艺实践的成就,并且总结了大量的生产运行经验。

本书可供放射化工、放射化学、放化分析、仪器仪表、核安全、三废治理、环境保护、核工程设计、核技术开发与应用的工程技术人员、科研设计人员参考,也可供大专院校的有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

核燃料后处理工学/姜圣阶 任凤仪等编著。-北京:原子能出版社,1995.12
ISBN 7-5022-1424-0

I. 核… II. 姜… III. 核燃料后处理工学 IV. TL24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 17778 号



原子能出版社出版发行

责任编辑:鲍世宽

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 32.5 字数 811 千字

1995 年 12 月北京第 1 版 1995 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—600

定价:68.00 元

序

中国科学院学部委员、著名的核科学家姜圣阶同任凤仪等同志编著了这部《核燃料后处理工学》。

这部书理论与实际相结合,系统地论述了反应堆乏燃料后处理厂的设计和工艺生产的全过程,不但深入浅出地阐述了工艺理论和工艺流程,而且详细介绍了生产设备、仪表、分析、辐射防护、核临界安全、工厂运行与检修等重要的工程问题。书中不但叙述了许多科学研究和工艺实践的成就,而且总结了大量的生产运行经验。这是一部选材广泛内容丰富的好书,是一部从理论上和实用上皆有较高参考价值的科技专著。

《核燃料后处理工学》即将出版发行了,以此来纪念我的老朋友、著名的核科学家姜圣阶同志。

我们要继续发扬艰苦奋斗、勤于开拓的精神,为进一步发展我国的核工业而努力奋进!

王淦昌

1993年9月18日

前 言

我国的核工业取得了举世公认的巨大成就。反应堆乏燃料后处理是核工业体系的一个重要组成部分。

我国独立自主地发展了反应堆乏燃料后处理工业。从 1956 年起, 全国大力协同, 并不断汲取国外的经验, 经过许多研究设计院所、高等院校、工矿企事业单位的共同努力, 1964 年决定放弃沉淀法工艺, 改用先进的萃取法工艺, 即采用了以磷酸三丁酯为萃取剂的普雷克斯 (Purex) 工艺流程来处理我国的反应堆乏燃料。1968 年建成了后处理中间试验工厂。1970 年之后我国大型的核燃料后处理厂相继投入运营。

30 多年来, 广大的干部、工人和工程技术人员艰苦奋斗, 辛勤开拓, 不但为国家生产出一定数量的核燃料和放射性同位素制品, 满足了国防建设、工农业生产和科学研究的需要, 而且取得了丰硕的科研成果, 积累了大量的生产实践经验, 并培养锻炼出一批优秀人才。这些都是非常宝贵的财富。

为了和平利用核能, 为了促进核工业的进一步发展, 根据中国核工业总公司的要求, 我们这些长期从事核燃料后处理事业的同志从理论上和实践上做了认真的总结, 撰写了这部《核燃料后处理工学》。

本书遵照理论联系实际的原则, 全面系统地论述了反应堆(主要是生产堆并涉及动力堆)乏燃料后处理的全过程, 其中包括首端处理、溶剂萃取分离、尾端处理等提取铀回收铀的主工艺过程; 还包括裂变产物和锕系元素的提取, 放射性三废的处理和处置等辅助工艺过程。同时还详细地介绍了生产设备、检测仪表、分析监测、辐射防护、临界安全与控制、启动运行、清洗去污和检修等工程技术问题。

书中阐述了许多科研和工艺实践的成就, 如 Purex 流程的铀线和铀线由三个萃取循环改为二个萃取循环; 氧化还原剂与电解还原的试验; 硝酸铀酰的脱硝和还原试验; 从强放废液中提取裂变产物和锕系元素; 从溶解尾气和废液中回收硝酸; 用真空急骤精馏法再生污 TBP-煤油; 强、中放废液浓缩液的固化试验; 在线分析技术的研究与应用; 全逆流混合澄清槽、脉冲萃取柱和离心萃取器的研究与应用等。

本书还总结了生产堆乏燃料后处理过程中大量的生产运行经验,其中包括元件去壳和溶解、混合澄清槽、脉冲萃取柱等在生产操作过程中容易出现的问题,以及对这些问题的处理等;草酸铀和三碳酸铀酰胺在沉淀、过滤和煅烧过程中如何降低杂质含量,确保产品质量的措施;如何减少金属流失、提高金属回收率的措施;减少脉冲萃取柱液泛的措施;降低萃取器中乳化物和界面污物危害的措施;强、中放废液的“清蒸”工艺;废液返循环和有机相闭路循环的措施;开停车、清洗去污和设备检修的经验;以及典型的事故分析及其处理措施等。

本书各章节的撰稿者在相应的章节列出。全书由姜圣阶和任凤仪统稿。芦荣光教授和张文青教授认真负责地审校了本书的全部章节。鲍世宽副编审为本书的筹划、编辑和出版做了大量的工作。

本书的撰写工作是在中国核工业总公司、核燃料后处理厂、北京核工程研究设计院、原子能出版社,以及有关科研院所、高等院校等许多单位的领导和同志们的大力支持和帮助下完成的。对此我们一并表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限,不足之处在所难免,敬请读者给予批评指正。

编 著 者

1992年12月于北京

目 录

第一章 核燃料后处理及其展望	(1)
第一节 核能与核燃料循环	(1)
一、核能	(1)
二、核燃料循环	(2)
第二节 核燃料后处理在核工业中的地位	(5)
一、核燃料后处理的重要性	(8)
二、核燃料后处理的任务	(9)
第三节 核燃料后处理的特点	(10)
第四节 核燃料后处理的发展概况	(11)
一、后处理工艺进展概况	(13)
二、核燃料后处理的发展趋势	(16)
三、我国核燃料后处理的展望	(17)
参考文献	(19)
第二章 乏燃料元件的组成及其去壳和溶解	(20)
第一节 乏燃料元件的组成与冷却	(20)
一、燃料元件的构成与种类	(20)
二、乏燃料元件的组成	(23)
三、辐照元件的冷却	(35)
第二节 化学法去壳	(38)
一、概况	(38)
二、溶解生产堆元件的铝壳	(39)
第三节 溶解铀芯	(42)
一、溶解铀芯的化学原理	(42)
二、溶解铀芯过程的影响因素与工艺条件的确定	(43)
第四节 溶解尾气的净化及回收硝酸	(51)
一、溶解尾气的净化	(51)
二、回收氮氧化物复用硝酸	(53)
第五节 料液的调制	(55)
一、调料	(55)
二、絮凝	(56)
三、过滤	(56)
第六节 溶解器及设备流程	(57)
一、溶解器	(58)
二、去壳和溶芯的设备工艺过程	(59)
参考文献	(62)

第三章 铀、镭、钚和裂变产物的水溶液化学	(63)
第一节 主要的物理化学性质	(63)
一、铀、镭、钚氧化态离子的存在形式	(63)
二、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-HNO}_3$ 水溶液的沸点和冰点	(64)
三、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2\text{-HNO}_3$ 水溶液的密度和粘度	(65)
第二节 铀、镭、钚及裂片元素的水解和络合	(67)
一、水解和络合的一般规律	(67)
二、铀、镭、钚的水解	(68)
三、铀、镭、钚的络合	(73)
四、裂片元素的水解和络合	(80)
第三节 铀、镭、钚及裂片元素的氧化还原	(84)
一、氧化还原电位	(84)
二、铀、镭、钚离子的歧化	(89)
三、镭的氧化还原	(92)
四、钚的氧化还原	(93)
五、裂片元素的氧化还原	(98)
第四节 氧化还原剂的选择及还原剂试验	(99)
一、氧化还原剂的选择	(99)
二、还原剂试验	(102)
第五节 电解还原试验	(104)
一、基本原理	(104)
二、单级和多级混合澄清槽电解还原试验	(105)
参考文献	(111)
第四章 溶剂萃取化学原理	(112)
第一节 溶剂萃取的基本概念和基本参数	(112)
一、几个基本概念	(112)
二、几个基本参数	(114)
第二节 有机溶剂的主要物理性质及有机溶剂的选择	(116)
一、萃取剂	(116)
二、稀释剂	(118)
三、溶剂稳定性的指标	(119)
四、萃取过程中有机溶剂物理性质的变化	(121)
第三节 溶剂萃取的基本原理	(122)
一、萃取反应与萃取能力	(122)
二、影响分配系数的因素	(123)
三、磷酸三丁酯萃取铀	(125)
四、磷酸三丁酯萃取钚	(128)
五、磷酸三丁酯萃取镭	(132)
六、磷酸三丁酯萃取硝酸	(133)

七、磷酸三丁酯萃取铈、铈、钕等裂片元素	(135)
第四节 分馏萃取	(141)
一、单级萃取	(142)
二、多级逆流萃取	(142)
三、多级逆流洗涤	(144)
四、分馏萃取	(145)
第五节 有机溶剂的降解及降解产物、界面污物对萃取过程的影响	(148)
一、溶剂的降解及降解产物对萃取过程的影响	(148)
二、界面污物的形成及其影响	(153)
参考文献	(157)
第五章 溶剂萃取工艺过程	(158)
第一节 普雷克斯流程概述	(158)
第二节 共去污-分离循环	(159)
一、过程概述	(160)
二、工艺条件的选择	(162)
第三节 铀的净化循环	(172)
一、无铀时 TBP 对铀及裂片元素的萃取	(172)
二、铀净化循环工艺过程	(175)
第四节 铀的净化循环	(182)
一、工艺过程	(182)
二、2DF 料液制备	(182)
三、选择工艺条件	(184)
第五节 萃取工艺流程的改进	(184)
一、铀线三个萃取循环改为两个萃取循环	(184)
二、铀线由三循环流程改为两循环流程	(189)
第六节 真空急骤蒸馏法再生污 TBP-煤油	(190)
一、急骤气化-精馏法的原理、流程和主要设备	(190)
二、主要工艺操作条件	(193)
三、结果及讨论	(194)
参考文献	(196)
第六章 铀的纯化和转化	(197)
第一节 铀的纯化	(197)
一、阴离子交换法纯化铀	(197)
二、阴离子交换法纯化和浓缩铀的工艺流程	(200)
第二节 铀的沉淀	(201)
一、过氧化氢沉淀铀	(201)
二、草酸沉淀铀(Ⅲ)	(203)
三、草酸沉淀铀(Ⅳ)	(203)
四、溶解草酸铀沉淀和含铀有机相的处理	(207)

五、铀的几种沉淀方法比较	(209)
第三节 草酸铀(IV)的焙烧及二氧化铀的性质	(211)
一、草酸铀(IV)的焙烧	(212)
二、二氧化铀的性质	(213)
参考文献	(214)
第七章 铀的纯化和转化	(215)
第一节 硅胶吸附法纯化铀	(215)
一、硅胶吸附的基本原理	(215)
二、影响硅胶吸附铀、钚的主要因素	(216)
三、工艺流程	(219)
第二节 三碳酸铀酰胺沉淀	(221)
一、沉淀反萃	(221)
二、过滤	(226)
三、母液处理	(227)
第三节 煅烧三碳酸铀酰胺生产二氧化铀	(229)
一、影响三碳酸铀酰胺热分解的因素	(229)
二、煅烧三碳酸铀酰胺的工艺流程	(229)
三、尾气的除尘和碳酸铵的回收	(232)
第四节 硝酸铀酰的脱硝与还原	(233)
一、流化床脱硝	(233)
二、提高三氧化铀活性的措施	(235)
三、脱硝过程的尾气处理	(235)
四、流化床还原	(236)
第五节 一步法脱硝还原生产二氧化铀	(236)
一、原理、工艺流程及主要设备	(236)
二、试验情况	(240)
三、问题讨论	(245)
四、改进措施	(247)
五、结论	(248)
参考文献	(248)
第八章 裂变元素和超铀元素的提取	(249)
第一节 概述及从尾气中提取氮	(249)
一、概述	(249)
二、从溶解尾气中提取氮	(250)
第二节 ^{90}Sr 的提取	(252)
一、从高放废液中提取铯的方法	(253)
二、HDEHP 萃取、分离铯和稀土元素	(253)
三、 ^{90}Sr 的精制	(259)
第三节 ^{99}Tc 的提取	(261)

一、沉淀法提取 ⁹⁹ Tc	(261)
二、萃取法提取 ⁹⁹ Tc	(261)
三、阴离子交换法提取 ⁹⁹ Tc	(263)
第四节 ¹³⁷ Cs 的提取	(264)
一、沉淀法	(264)
二、溶剂萃取法	(265)
三、离子交换法	(265)
第五节 ¹⁴⁷ Pm 的提取	(268)
一、沉淀-离子交换法提取钷	(268)
二、溶剂萃取法提取钷	(268)
三、离子交换排代法提取钷	(269)
四、Pm ₂ O ₃ 的制备	(272)
第六节 ²³⁷ Np 的提取	(273)
一、从萃取浓缩废液中提取镎	(273)
二、从普雷克斯一、二循环中提取镎	(275)
三、从铀线或钚线提取镎	(277)
四、提取镎的改进流程	(280)
五、镎的纯化与转化	(281)
第七节 镅、锔的提取	(285)
一、溶剂萃取-离子交换法提取并净化镅、锔	(286)
二、加压离子交换法分离、纯化镅、锔等锕系元素	(290)
参考文献	(293)
第九章 放射性废物的处理和处置	(294)
第一节 放射性废水的处理和处置	(294)
一、凝聚沉淀	(294)
二、蒸发	(299)
三、离子交换	(306)
四、膜分离技术	(309)
五、废液的固化	(313)
六、水力压裂技术	(321)
第二节 放射性废气的处理	(322)
一、概述	(322)
二、气溶胶	(322)
三、净化处理	(322)
四、氟的处理	(323)
第三节 放射性固体废物的处理和处置	(324)
一、放射性固体废物的处理	(324)
二、放射性固体废物的处置	(325)
参考文献	(327)

第十章 溶剂萃取设备及其它	(328)
第一节 概述	(328)
第二节 混合澄清槽	(329)
一、混合澄清槽的混合澄清过程.....	(329)
二、混合澄清槽的结构.....	(330)
三、混合澄清槽的搅拌方式.....	(333)
四、混合澄清槽的传质性能.....	(335)
五、混合澄清槽的操作运行.....	(338)
六、全逆流混合澄清槽.....	(341)
第三节 脉冲萃取柱	(343)
一、脉冲筛板柱的结构.....	(343)
二、脉冲筛板柱的特点及其应用.....	(345)
三、脉冲筛板柱的操作特性.....	(345)
四、脉冲筛板柱的传质特性.....	(347)
五、液泛及纠正液泛的措施.....	(351)
六、环形脉冲筛板萃取柱.....	(356)
第四节 离心萃取器	(359)
一、概述.....	(359)
二、离心萃取器的工作原理.....	(364)
三、离心萃取器的优缺点.....	(365)
第五节 其它设备和装置	(367)
一、输液设备和装置.....	(367)
二、过滤设备.....	(369)
三、运输通道和气动送样.....	(371)
四、阀门.....	(372)
参考文献	(375)
第十一章 生产过程的检测和控制	(377)
第一节 概述	(377)
一、生产对检测和控制的要求.....	(377)
二、检测仪表和控制装置的使用情况与改进.....	(378)
三、检测仪表和控制装置的检修.....	(379)
第二节 检测仪表	(380)
一、液位、界面检测仪表.....	(380)
二、温度检测仪表.....	(387)
三、流量检测仪表.....	(390)
四、压力、压差检测仪表.....	(392)
五、其它检测仪表.....	(395)
第三节 典型生产设备的检测和控制	(397)
一、1A 柱的检测和控制.....	(397)

二、强放废液蒸发器的检测	(399)
第四节 在线分析检测技术	(400)
一、概述	(400)
二、在线分析在工业生产过程中的作用	(401)
三、在线分析的设置原则	(401)
四、在线分析仪表的特点和组成部分	(402)
五、液流成分定量分析对在线仪表的要求	(404)
六、一次装置设计安装的一般考虑	(404)
七、我国核燃料后处理厂在线分析的概况及评论	(406)
八、国内外几项技术难题的解决情况	(409)
九、用于射线测量的二次仪表	(418)
十、在线仪表应用时几个特殊技术问题的处理	(420)
十一、仪表的运行、维护和检修	(421)
第五节 国外后处理检测和控制技术的现状和发展	(422)
一、主要工艺参数的检测和控制	(422)
二、典型设备的检测与控制	(423)
三、国外后处理厂计算机的应用	(427)
参考文献	(428)
第十二章 分析检测	(429)
第一节 铀的分析	(429)
一、工艺料液中铀的分析	(429)
二、铀产品分析	(431)
第二节 钚的分析	(432)
一、工艺料液中钚的分析	(432)
二、钚产品分析	(436)
第三节 镅及超钚元素分析	(439)
一、镅的分析	(439)
二、 ^{241}Am 的分析	(441)
第四节 裂片元素的分析	(441)
一、裂片元素总 γ 放射性活度的单道 γ 谱仪测定	(442)
二、用五道谱仪测定裂片元素的 γ 能谱	(442)
三、 γ 裂片元素的 $\text{Ge}(\text{Li})\gamma$ 能谱分析	(442)
四、总稀土的测定	(443)
五、单个裂片元素的测定	(443)
第五节 酸度分析	(445)
一、游离硝酸及铀的pH定值电位滴定	(445)
二、游离硝酸的电导测定	(445)
三、碳酸根和碳酸氢根的容量法测定	(445)
第六节 其它项目的分析	(446)

一、含钷溶液中草酸根的容量法测定	(446)
二、分光光度法测定亚硝酸根含量	(447)
三、含钷溶液中总还原值的测定	(447)
四、偏铝酸钠中铝的络合滴定	(447)
五、酸饱和法测定 TBP 浓度	(448)
六、TBP-煤油-硝酸-硝酸铀酰体系中 DBP 的红外分光光度测定	(448)
七、30% TBP-煤油体系中还原值的光光度测定(以正丁醇计量)	(448)
参考文献	(448)
第十三章 辐射安全防护	(450)
第一节 概述	(450)
一、防护原则	(450)
二、防护标准	(450)
三、防护措施	(451)
第二节 后处理生产过程的辐射环境分析	(452)
一、元件溶解	(452)
二、铀钷分离和净化	(453)
三、铀、钷的最终纯化和转化	(453)
四、三废处理	(454)
五、清洗去污和设备检修	(454)
第三节 后处理厂的辐射监测	(455)
一、工作场所监测	(455)
二、个人剂量监测	(462)
三、流出物监测	(464)
第四节 辐射防护评价	(467)
一、工厂运行的辐射安全评价	(467)
二、环境影响评价	(469)
参考文献	(471)
第十四章 核临界安全与控制	(473)
第一节 核临界控制的基本原则与措施	(473)
一、基本原则	(473)
二、控制措施	(475)
第二节 生产堆核燃料后处理厂的临界控制	(477)
第三节 核化工厂发生的临界事故及其经验教训	(481)
参考文献	(490)
第十五章 工厂运行、去污和检修	(492)
第一节 工厂运行中的开车和停车	(492)
一、开车	(492)
二、停车	(493)
第二节 清洗去污	(495)

一、清洗去污的目的	(495)
二、清洗去污的一般原则	(495)
三、清洗去污的方法	(496)
四、清洗去污试剂	(496)
五、典型设备的清洗去污	(497)
六、其它污染的去除	(498)
第三节 设备检修	(499)
一、远距离检修	(499)
二、直接检修	(500)

第一章 核燃料后处理及其展望

为了从反应堆辐照核燃料中提取核纯的 ^{239}Pu 及其它核物质而发展起了乏燃料后处理工业。乏燃料后处理工业经历了一个不断发展并取得成就的过程,现已步入了稳步发展阶段。本章主要论述国内外后处理工业的发展概况,并展望我国后处理工业的发展前景。

第一节 核能与核燃料循环

一、核 能

几千年来,人类一直在寻找和扩大新能源,提高自己驾驭自然界的能力。从19世纪末叶开始,原子核的秘密逐渐被揭开。本世纪30年代末核裂变现象的发现开辟了一条利用核能的现实道路。1942年美国建成了第一座天然铀石墨反应堆,使可控链式反应从理论变为现实。从此,50多年前的这一发现,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设。核能继化石燃料(包括煤、石油和天然气等)和水力资源之后,已成为世界上第三种主要能源。

核能是在原子核结构发生变化的过程中释放出来的能量,确切一些称之为原子核能。由结合能较小的重原子核分裂或由轻原子核聚合为结合能较大的新原子核时都会放出巨大能量,前者称之为重核裂变能,后者称为轻核聚变能,通常所谓“核能”主要就是指这两个方面。

某些重核素的原子核,吸收一个中子后,会分裂成为两个较轻的原子核的反应,简称核裂变。其原子核在中子作用下容易发生裂变的物质, ^{235}U , ^{239}Pu , ^{233}U 等,称为可裂变物质。核裂变中产生的较轻的新原子核及其衰变产物统称为裂变产物。

裂变物质在裂变过程中释放出的能量是非常巨大的。例如每一个 ^{235}U 原子核发生裂变时,平均会放出约200 MeV的能量。以此推算,1 g ^{235}U 完全裂变时可以产生约 7.95×10^{10} J的能量。但是 ^{235}U 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 g ^{235}U 可以产生约 6.7×10^{10} J的能量。这个数字相当于两吨多优质煤完全燃烧时所放出的能量。

核能也可以从一些轻核(例如氘、氚、锂-6)的聚变而获得。通常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。以同样质量相比较,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 g 氘化 ^6Li 完全反应时所产生的能量约为 2.09×10^{11} J,相当于1 g ^{235}U 裂变能的3倍。

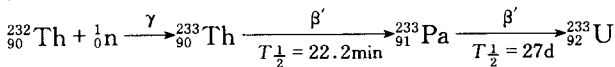
地球上蕴藏的核能资源是十分丰富的。目前仅西方国家已查明有经济开采价值的铀资源2 Mt左右。加上品位稍低的铀矿和尚未利用的钍资源,包含的总裂变能量折合为 5.4×10^{23} J,相当于现已探明的地下煤资源的7倍,石油资源的100倍以上。如果考虑到浩瀚的海洋中尚含有大量的铀(约40亿吨),那就可以预计今后几百年内裂变能将是人类一个重要能源。聚变能的资源简直可以说是取之不尽,用之不竭的,例如1 L水所含氘的聚变能相当于400 L优质石油完全燃烧时所放出的能量。如果可控聚变核反应得以实现,那么,人类在几亿年内的能

源问题就都可以解决了。

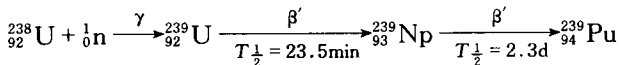
目前,世界上可裂变物质只有三种,即 ^{233}U 、 ^{235}U 和 ^{239}Pu 。下面略述这三种核燃料的来源。

(一) ^{235}U 。这是唯一存在于天然矿物中的核燃料。但从铀矿提炼出来的天然铀中, ^{235}U 的含量只占 0.714%,而另一个不为热中子分裂的同位素 ^{238}U 却占了 99.28%,其余的 0.006%为 ^{234}U 。因此,工业上为获得高浓度的 ^{235}U ,必须用气体扩散、高速离心和激光分离等方法把这几种铀的同位素分开。

(二) ^{233}U 、 ^{239}Pu 。这两种核燃料在自然界里尚未发现,因此,只能用人工方法来制造。在生产核燃料的反应堆中, ^{232}Th 和 ^{238}U 吸收中子(主要是吸收热中子)后并经过一系列的放射性衰变,分别生成可裂变的核燃料 ^{233}U 和 ^{239}Pu 。因此,这两个转化反应对于核燃料的充分利用具有重大意义,其变化过程大致如下:



${}_{92}^{233}\text{U}$ 是 α 放射体,放出 α 后变成 ${}_{90}^{229}\text{Th}$,半衰期 $1.62 \times 10^5 \text{a}$ 。



${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 是 α 放射体,放出 α 后变成 ${}_{92}^{235}\text{U}$,半衰期 $2.44 \times 10^4 \text{a}$ 。

在完成上述变化过程以后,从辐照过的 ^{232}Th 和 ^{238}U 中,用化学、化工的方法,分别提取 ^{233}U 和 ^{239}Pu ,这是后处理工厂的任务。

反应堆的类型决定了使用核燃料的种类、形态以及核燃料在反应堆中的工况。反应堆类型对核燃料后处理工艺影响很大,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,核燃料的初始加浓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活度的高低和后处理净化要求,从而决定主工艺流程和设备的选择。又如快中子堆燃料的裂变物质的含量要比热中子堆燃料高一、二十倍,因此要依照快堆辐照燃料的冷却时间,进行快速处理,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。从事后处理的工作人员,必须了解和区别处理对象,必须关心反应堆技术和元件制造等方面的工艺特点和发展趋势。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 1-1 和表 1-2。

二、核燃料循环

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,燃料辐照,辐照燃料元件的处理和放射性废物的处理及处置,如图 1-1 所示。

对不同的反应堆,不同燃料循环方式,后处理所遇到的辐照燃料所含裂变物质的种类、加浓度,以及燃料总量都有很大的差别。因此后处理工厂从生产规模到流程方案的选择,都必须结合整个燃料循环综合考虑。图 1-2 为典型的核燃料循环示意图。

辐照燃料元件的后处理是化学的、机械的操作过程。反应堆中的固体燃料元件,由于以下原因之一,迟早会被卸出和更换:(一)补充裂变物质,(二)过分的腐蚀与辐射损伤,(三)回收转换得到的(增殖的)裂变物质,(四)除去吸收中子的裂变产物。对辐照燃料是否进行后处理应