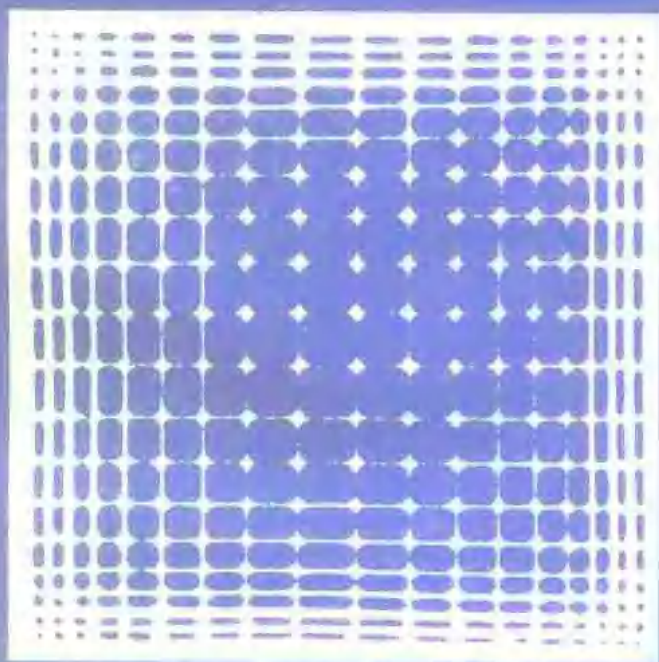


主编 姜圣阶 副主编 柯友之

动力堆 核燃料后处理厂设计



原子能出版社

76248
200

415903

动力堆核燃料后处理厂设计

REPROCESSING PLANT DESIGN FOR
POWER REACTOR NUCLEAR FUEL

主 编 姜圣阶
副主编 柯友之



00415903

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

动力堆核燃料后处理厂设计/姜圣阶主编. —北京: 原子能出版社, 1996. 12

ISBN 7-5022-1423-2

I. 动… II. 姜… III. 动力堆-核燃料后处理厂-设计 IV. TL248

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 21409 号

内 容 简 介

本书描述了动力堆核燃料后处理厂的设计原则、方法和步骤。全书共分九章, 内容包括后处理厂设计总的概况, 选择厂址的原则, 工艺设计, 主要设备的选型和计算, 分析技术, 应用的仪表与控制方法, 辐射防护措施及临界控制, 以及对后处理厂主工艺厂房及辅助设施的要求及设计。书中除简要介绍了国外相关的资料及发展趋势外, 着重叙述了我国几十年来核燃料后处理厂工程设计的主要作法。

本书可供从事核化工领域工作的科研及工程技术人员以及大专院校有关专业的教师、大学生及研究生参考。

©原子能出版社, 1996

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: 850×1168mm 1/32 印张 11 字数 296 千字 插页 1

1996 年 12 月北京第一版 1996 年 12 月北京第一次印刷

印数: 1—500

定价: 18.50 元

序 言

工业发展对能源的需求不断增加，但是化石燃料日渐减少，世界各国都注意发展核电以提供动力。随之而产生的问题是如何对待从核电厂卸下来的乏燃料。一种办法是不再利用，将其作为核废物深地层处置，在深埋以前要进行处理以保证在长年埋藏中放射性核素和有毒核素不会经任何途径透过设置的屏障进入环境，这种处置方法很复杂，费用很高，从充分利用资源看也不尽合理。乏燃料元件中还含有未耗尽的 ^{235}U 和新产生的钚的同位素，它们也是可用的核裂变材料，不采用适当的方法回收利用是很可惜的，何况目前的慢中子堆只用占天然铀的0.7%的 ^{235}U ，而占比率大的 ^{238}U 绝大部分未被利用。今后的方向是发展快中子堆，将 ^{238}U 也充分利用起来。积累钚也是发展快中子堆的一个重要环节。因此，另一种处理乏燃料的办法是建设后处理厂，将铀、钚与裂变核素分离再利用。法、英、德、日都采取这样的技术路线。

后处理厂采用的分离、净化技术在国际上是敏感的问题，各国间都相互保密。到现在为止还未见到一本完整地介绍后处理厂设计方法的书籍问世。有鉴于此，原核工业副部长、科技委主任姜圣阶同志立意编写一部有关后处理厂设计的书。核工业第二研究设计院（核二院）承担后处理厂设计已历时30年，不少同志在实践中也积累了一些经验，都愿意协助姜圣阶同志编好这部书。嗣后，姜圣阶同志亲临二院召集参加编写的人员开会动员，并审查和修改了拟定的编写大纲。历经寒暑，书稿得以编成，惜乎姜圣阶同志未及见本书出版已然仙逝，可堪告慰的是在这之前，该书已脱稿并交姜圣阶同志审阅。

前面已述及后处理是国际上的敏感技术，所以本书一概不介绍工艺参数，只向读者介绍设计方法，进行设计时应考虑哪些问题，以

及可资借鉴的办法。本书不仅可供设计者使用，对于从事后处理厂生产的人员也可用作参考，以利于了解设计意图，使之在生产中得到发挥。另外，高等院校的有关专业也可作为参考教材。本书错误之处在所难免，尚祈海内专家指正。

柯友之

1995. 4.

目 录

第一章 设计总论	(1)
第一节 概论	(1)
一、乏燃料后处理的任务及工艺概况	(1)
二、乏燃料后处理厂设计中应考虑的特殊问题	(5)
三、后处理厂的设计阶段和审评程序.....	(11)
四、设计标准与依据.....	(13)
第二节 厂址选择	(18)
一、厂址选择的核安全要求	(18)
二、选址应考虑的因素	(19)
三、确定外部事件的设计基准	(23)
第三节 总图	(24)
一、工程项目组成与功能	(24)
二、总平面布置原则.....	(26)
三、厂区总平面与竖向布置	(27)
四、室外管线	(29)
第四节 其他重要设计事项	(32)
一、核保障	(32)
二、安全分析报告	(40)
三、环境影响评价	(43)
四、退役	(47)
第二章 乏燃料接受与贮存工艺设计	(54)
第一节 乏燃料贮存技术概况	(54)
一、湿式卸料/湿式贮存	(54)
二、干式卸料/湿式贮存	(55)
第二节 工艺过程简述	(55)

一、乏燃料容器的接受与卸料	(55)
二、乏燃料贮存水池	(57)
三、池水冷却与净化	(58)
四、废过滤器芯及失效树脂的处理	(58)
第三节 水池乏燃料贮存技术方案	(58)
一、格架和吊篮	(59)
二、密集贮存技术	(59)
三、乏燃料燃耗信任制贮存设计概念	(62)
四、乏燃料组件检查技术	(62)
第四节 工艺设计原则和技术措施	(65)
一、临界安全控制原则	(65)
二、池水温度控制原则	(65)
三、池水放射性活度水平控制原则	(66)
四、水池不失水控制原则	(66)
五、控制固、液、气态放射性物质向环境排放原则	(67)
六、防止机械操作事故并减少事故的危害程度	(67)
第五节 主要工艺设备	(69)
一、乏燃料容器桥式起重机	(69)
二、乏燃料操作抓取机	(70)
三、乏燃料组件贮存格架	(72)
四、乏燃料组件贮存吊篮	(73)
五、水池密封门	(73)
六、池水冷却装置	(73)
七、池水净化装置	(74)
八、池水冷却-净化组合装置	(74)
第六节 工艺厂房布置	(75)
一、乏燃料湿式卸料/湿式贮存厂房布置	(75)
二、乏燃料干式卸料/湿式贮存厂房布置	(75)
三、乏燃料向后处理厂首端输送	(79)

第三章 乏燃料后处理工艺设计	(81)
第一节 后处理工艺设计的基础	(81)
一、后处理技术和工业发展的回顾与经验教训	(81)
二、后处理厂设计的基础技术	(82)
三、后处理工艺技术的研究开发模式	(85)
四、乏燃料特性及对后处理工艺的影响	(85)
第二节 工艺过程简述	(90)
一、乏燃料准备水池	(91)
二、机械首端	(91)
三、化学首端	(92)
四、铀钚共去污分离循环	(94)
五、铀的净化循环和尾端	(96)
六、钚的净化循环和尾端	(97)
七、溶剂洗涤和回收	(99)
八、工艺废液的处理和硝酸回收	(100)
九、工艺废气净化处理	(102)
第三节 工程方案与重要工艺参数的确定	(103)
一、工艺技术路线的选择	(103)
二、乏燃料冷却和钚返回循环时间的确定	(104)
三、产品方案	(104)
四、产品标准	(105)
五、确定生产能力	(107)
第四节 原理流程设计	(108)
一、原理流程设计的优化目标	(108)
二、对某些核素的考虑	(109)
三、工艺系统的设计	(113)
第五节 物料及放射性平衡计算	(124)
第六节 工艺设备流程设计	(126)
第四章 设备选型与计算	(131)

第一节 首端主要设备	(131)
一、乏燃料组件剪切机	(131)
二、乏燃料元件溶解器	(136)
三、多管除尘器	(141)
四、沉降式离心机	(142)
五、脉冲过滤器	(146)
第二节 溶剂萃取循环的主要设备	(147)
一、概述	(147)
二、混合澄清槽	(148)
三、脉冲筛板柱	(153)
四、离心萃取器	(157)
五、蒸发器	(164)
六、带中子毒物设备	(166)
第三节 铀尾端设备	(167)
第四节 溶剂再生主要设备	(170)
第五节 废液贮存设备高放废液贮槽	(175)
第六节 箱室设备	(181)
一、功能及设计基本要素	(181)
二、箱室设备分类	(182)
第七节 维修技术与设备	(187)
一、维修和转运容器	(187)
二、袋封技术	(192)
三、活动空气闸门	(194)
第八节 放射性料液输送设备与阀门	(199)
一、屏蔽泵	(199)
二、液下离心泵	(200)
三、立式柱塞计量泵	(203)
四、空气提升装置	(205)
五、蒸汽喷射器	(205)

六、穿地阀门与穿墙阀门	(206)
第九节 机械手	(208)
一、概述	(208)
二、剑式机械手	(208)
三、主从机械手	(209)
四、电随动机械手	(213)
五、动力机械手	(215)
第五章 分析	(220)
第一节 核燃料后处理的分析任务和分析方法	(220)
一、概述	(220)
二、分析任务	(221)
三、核材料衡算	(221)
第二节 分析方法	(225)
一、质谱分析	(225)
二、紫外及可见分光光度法	(227)
三、原子吸收分光光度法	(227)
四、发射光谱分析法	(228)
五、色谱分析	(231)
六、电化学分析	(233)
七、荧光分析法	(235)
八、X 射线谱分析	(236)
九、放射性测量	(239)
第六章 仪表与控制	(241)
第一节 工艺检测仪表	(241)
一、概述	(241)
二、核燃料后处理厂仪表的特点	(242)
三、仪表工程设计指导思想和选型原则	(242)
四、检测点的确定及仪表选型	(243)
五、仪表的安装及维修要求	(245)

第二节	在线分析	(246)
一、	概述	(246)
二、	在线分析装置的设计安装与维修要求	(246)
第三节	自动控制	(247)
一、	放射性厂房自控设计特点、要求和原则	(247)
二、	控制保护问题	(248)
三、	联锁	(248)
四、	控制室布置	(249)
五、	电缆敷设	(249)
第七章	辐射防护与临界控制	(251)
第一节	辐射防护	(251)
一、	概述	(251)
二、	辐射安全措施	(251)
三、	辐射屏蔽	(255)
四、	辐射及剂量监测	(260)
第二节	临界控制	(265)
一、	临界控制的特点	(265)
二、	临界控制的设计准则	(265)
三、	主要工艺操作步骤的临界控制	(269)
第八章	厂房布置、厂房建筑与结构	(276)
第一节	厂房布置	(276)
一、	放射性厂房布置分区原则	(276)
二、	厂房工艺布置和维修	(277)
三、	工艺布置设计要求与步骤	(282)
四、	工程设计中实现“密封原则”的具体措施	(285)
第二节	厂房建筑与结构	(286)
一、	总体设计	(286)
二、	卫生设施的设置	(287)
三、	放射性厂房的室内装修	(292)

四、核燃料接收和贮存厂房的建筑设计	(292)
五、核燃料后处理厂房的建筑设计	(293)
六、厂房结构特点与要求	(296)
七、结构体系与选型	(300)
八、结构的抗震设计	(302)
第九章 放射性厂房辅助设施的设计	(306)
第一节 通风设计	(306)
一、概述	(306)
二、送风中心	(306)
三、红区通风	(308)
四、橙区通风	(311)
五、绿区通风	(312)
六、白区通风	(313)
七、气衣通风	(313)
八、检修通风	(314)
九、排风中心	(314)
十、防火设计	(316)
十一、排烟设计	(317)
第二节 给排水设计	(317)
一、概述	(317)
二、给水设计	(318)
三、排水设计	(319)
四、冷却水系统的设计	(320)
五、应急供水系统的设计	(320)
六、去离子水系统的设计	(321)
七、消防用水系统设计	(321)
第三节 供电设计	(323)
一、概述	(323)
二、负荷分类	(323)

三、供电系统	(324)
四、电气设备的选型和布置	(328)
五、照明设计	(329)
第四节 供气设计	(331)
一、概述	(331)
二、压缩空气的供应	(331)
三、氧气、氮气等气体的供应	(332)
第五节 消防设计	(332)
一、起火原因和特征	(332)
二、消防设计原则	(334)
三、火灾预防	(334)
四、火灾探测、报警和灭火	(335)
五、工艺设计中应考虑的措施	(336)
六、通风设计中应考虑的措施	(336)
七、电气设备和电缆防火	(337)
八、火灾探测和报警系统	(337)
九、其它	(338)
第六节 通信设计	(338)
一、自动电话系统	(338)
二、调度电话系统	(339)
三、对讲电话系统	(339)
四、有线广播系统	(339)
五、闭路电视监视系统	(340)

第一章 设计总论

本章主要论述动力堆乏燃料后处理工厂的任务和主要生产过
程，工厂设计的一般原则，工厂设计和安全审评的程序，工厂设计
中与核安全有关的特殊问题，应遵循的法规、标准。还论述后处理
工厂选址原则，工程子项组成和功能，以及总平面布置的原则。

第一节 概论

一、乏燃料后处理的任务及工艺概况

(一) 乏燃料后处理的任务及重要性

乏燃料后处理的任务，是用化学处理方法分离乏燃料中的裂变
产物，以净化和回收铀和钚，也可以回收镎及有价值的裂片元素 Sr、
Cs、Pm 和 Np、Am、Cm 等超铀元素。所以乏燃料后处理是燃料循
环中的重要环节，它的重要性可归纳为以下三个方面：

1. 可以从乏燃料中回收有价值的可裂变物质 ^{235}U ， ^{233}U 和 ^{239}Pu ，
把它们制造成各种形式的堆用燃料，可节约铀资源以促进我国核电
事业的发展。

2. 可以从乏燃料后处理所产生的高放废液 (1AW) 中，提取 ^{90}Sr
及 ^{137}Cs 作为辐射源和能源，提取贵金属 Np, Am 及 Cm 以发展同
位素在医疗、航天等方面的应用，造福于人类。

3. 乏燃料经过后处理，可以从高放废液中，分离出长寿命裂片
元素 ^{90}Sr 和 ^{137}Cs ，超铀元素和稀土，并分别进行处理与处置。还可将
超铀元素送入反应堆中照射嬗变，以减少存放高放废物时的长期潜
在危险。

(二) 乏燃料后处理的主要生产过程

乏燃料后处理的方法分为水法和干法两大类。水法后处理又分溶剂萃取法、离子交换法和沉淀法三种。世界各国反应堆乏燃料后处理，目前都采用成熟的溶剂萃取 Purex 工艺流程。

乏燃料后处理工厂的生产过程可以分为乏燃料接受与贮存部分和乏燃料后处理部分。

1. 乏燃料接受与贮存

(1) 乏燃料的接受与贮存过程

载有乏燃料容器的运输专用车辆进入接受与贮存大厅后，卸掉容器两端的防震块。再将容器吊入容器卸料准备坑。吊走容器密封盖，再将容器吊入水池卸料坑，在水下吊走容器屏蔽盖。以上卸料准备工序完成后，用抓取机或入桥吊将容器内的乏燃料组件抓出，并运到乏燃料贮存水池，放入贮存格架或贮存吊篮内。

卸料方法分干法和湿法两种。

干法卸料：卸料过程在热室中进行，乏燃料容器与热室入口连接后，用动力机械手从容器中取出乏燃料组件，再转入乏燃料贮存水池。

湿法卸料：已如前述整个卸料过程在水下进行。

(2) 池水的冷却与净化

乏燃料释放出的热量使水温升高，故必须冷却池水以保证水的温度低于等于 40°C 。另外，又必须净化去掉水中的可能存在的放射性物质，使池水的放射性浓度低于等于 $1.85 \times 10^6 \text{Bq/L}$ 。

(3) 接受、贮存厂房与后处理厂房的关系

当贮存能力很小时，可布置在后处理厂房内，作为一个工段，如果贮存能力比较大时，可建成一个独立的乏燃料接受与贮存厂房，通过水下运输通道与后处理厂房联系。

2. 乏燃料后处理

乏燃料后处理工艺过程，主要包括首端处理、化学分离和铀、钚

尾端处理过程。

(1) 首端处理

① 首端机械处理——乏燃料组件的切割

乏燃料组件必须切割成段，从包壳中露出铀芯才能进行化学溶解。

② 首端化学处理——乏燃料元件的溶解、过滤、调料。

表 1-1 废锆包壳超铀元素的含量 (Bq/g)

核素 含量, Bq/g 燃 耗	实测值	计算值*	
		35000Mwd/tU (40MW/tU)	34000Mwd/tU (29.5MW/tU)
²³⁷ Np	—	—	14.8
²³⁸ Np	—	0.741	—
²³⁹ Np	—	—	740
²³⁵ Pu	—	—	11.1
²³⁸ Pu	96.2	370	370
²³⁹ Pu	18.1	37	37
²⁴⁰ Pu	25.9	72	72
²⁴¹ Pu	9.47×10^3	2.37×10^4	1.55×10^4
²⁴² Pu	0.26	—	—
²⁴¹ Am	41.1	37	22.2
^{242m} Am	—	—	1.48
²⁴² Am	—	0.74	1.48
²⁴³ Am	2.96	—	2.96
²⁴² Cm	352	5.92×10^3	2.96×10^3
²⁴³ Cm	—	2.96	0.37
²⁴⁴ Cm	363	370	370
²⁴⁵ Cm	—	—	14.8

* 按每吨铀 250kg 锆包壳，其中含 0.1% 超铀元素计。

用硝酸在沸腾或非沸腾温度下，浸取溶解锆包壳内的二氧化铀。达到溶解终点时，抽走硝酸铀酰溶液，漂洗锆包壳，通过 γ 测量仪或无源中子测量仪，测量废锆包壳中的残留铀，一般应小于等于

0.1% (重量)。合格后, 从溶解器中排走废锆包壳。废锆包壳超铀元素的含量见表 1-1^[1]。

溶解所得的硝酸铀酰溶液中, 含有由贵金属裂片产物元素组成的不溶性残渣, 其含量与乏燃料元件的燃耗深度有关 (见表 1-2^[2]), 必须从溶解液中分离出去, 使溶液中的残渣量小于 5mg/L, 粒子直径小于等于 3 μm 。在后处理厂一般采用沉降式离心过滤器、烧结管脉冲过滤器、预涂层为过滤介质的过滤器等、或几种不同的过滤器的组合。

表 1-2 不溶性残渣的组成

核素	样品 8 UO ₂ 燃料		样品 12 UO ₂ -Gd ₂ O ₃ 燃料	
	mg	%	mg	%
Mo	1.16	21.6	0.24	6.9
Tc	0.05	1.0	0.082	2.4
Ru	2.84	53.0	1.74	50.1
Rh	0.41	7.6	0.13	3.7
Pd	0.43	8.1	0.36	10.4
Cr	0.027	1.0	0.08	2.3
Fe	0.14	2.6	0.17	4.9
Ni	<0.01	—	—	—
Zr	0.29	5.5	0.67	19.3
Pu	0.004	0.07	0.002	0.04
总和	5.36	100	3.47	100
测得燃料, MWd/t	34100		25700	
不溶性残渣量, mg	7.0		4.3	
初始 U 量, g	2.153		1.154	

过滤后的溶解液调节铀价态, 调节料液的硝酸浓度以满足化学分离工艺条件的要求。

溶解尾气中含有 NO_x 和放射性气体⁸⁵Kr、¹³³Xe、³H、¹²⁹I、¹³¹I、¹⁴C 和夹带的放射性气溶胶。尾气净化一般采用冷凝冷却器、多管除尘器、中效过滤器、高效过滤器、除碘过滤器等。对⁸⁵Kr 的净化与回收要看对⁸⁵Kr 的需要, 确定是否需要设置⁸⁵Kr 的回收净化系统。除