

核燃料工艺技术丛书

放射性废物 处理与处置

丛书主编 王俊峰

主 编 刘坤贤 王 邵 韩建平
张燕春

中国原子能出版社

013033704

TL941
02

核燃料工艺技术丛书

放射性废物处理与处置

丛书主编 王俊峰
主 编 刘坤贤 王 邵 韩建平
张燕春



本书由中核四〇四有限公司资助出版



北航

C1641142

中国原子能出版社

TL941
02

013082707

图书在版编目(CIP)数据

放射性废物处理与处置/刘坤贤等主编.

—北京:中国原子能出版社,2012.6

(核燃料工艺技术丛书/王俊峰主编)

ISBN 978-7-5022-5541-1

I. ①放… II. ①刘… III. ①放射性废物处理

IV. ①TL941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 108952 号

内 容 简 介

本书较为全面地介绍了放射性废物处理与处置的原理、方法。主要内容包括:核能及核燃料循环、放射性废物的特性、放射性废物来源及分类、放射性废物管理;放射性气体废物的处理;放射性废液的凝聚沉淀、蒸发、离子交换和膜分离处理;中低放废液的水泥固化、沥青固化和塑料固化处理;高放废液的固化和分离-嬗变处理;放射性有机废液和含氟废液的处理;放射性固体废物的处理;放射性废物的暂存;放射性废物近地表处置和深地质处置;放射性废物的回收利用技术。

本书可供从事放射性废物管理的专业技术人员、管理人员阅读,也可供大专院校相关专业的学生参考使用。

放射性废物处理与处置

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 卫广刚

技术编辑 丁怀兰

责任印制 潘玉玲

印 刷 北京盛通印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 30.75 字 数 792 千字

版 次 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5541-1 定 价 142.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

发行电话:010-68452845

E-mail:atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

《核燃料工艺技术丛书》

编 委 会

编审委员会

主 编	王俊峰					
副 主 编	张天祥	姚守忠	胡晓丹	韩建平	李江颖	张燕春
常务副主编	张天祥	胡晓丹				
委 员	(按姓氏笔画为序)					
	丁戈龙	于红箭	王 健	王春生	王剑英	车明生
	卢明义	任凤仪	刘坤贤	闫心智	李天福	杨掌众
	吴 伟	吴印清	吴秋林	张 伟	张文祥	张慧忠
	陆治美	陈永红	周镇兴	栗万仁	贾瑞和	高义伦
	高天祥	陶精言	第五永清	章泽甫	梁淑珍	董俊明
	韩秉魁	惠宏伟	景风坤	程沁澄		

办公室

主 任	丁戈龙					
副 主 任	刘文彬	代云水				
成 员	(按姓氏笔画为序)					
	王 邵	王海峰	刘大伟	吴艳平	余东昌	徐玉杰
	蒋建国					

《核燃料工艺技术丛书》

编辑出版委员会

(中国原子能出版社)

主 任	侯惠群					
副 主 任	杨树录					
成 员	(按姓氏笔画为序)					
	丁怀兰	卫广刚	王 丹	王 青	王艳丽	刘 岩
	刘 朔	张关铭	张铄清	赵志军	侯茸方	韩 霞
	谭 俊					

《放射性废物处理与处置》

编 审 人 员

主 编 刘坤贤 王 邵 韩建平 张燕春

参与编写人员 (按姓氏笔画为序)

刘延彰 唐德仲 葛 琴

审 校 人 员 (按姓氏笔画为序)

孙东辉 范显华 罗上庚 章泽甫

总 序

核燃料循环产业是核工业发展的基础。核燃料循环产业的工业体系建设是核工业核心能力的重要组成部分。掌握核燃料循环工业体系各环节的专门工艺和技术是实现核燃料循环的理论向实践、科研实验向工业生产转化的关键环节。

经过五十多年的努力奋斗,特别是经过老一辈核燃料循环专家的刻苦攻关,我国相继突破了铀转化、核燃料后处理、铀钚冶金、氙生产等核燃料循环中的关键工艺环节,取得了一大批创新成果,积累了大量的宝贵经验和工艺技巧,为我国核工业的快速发展奠定了坚实的基础。

为了系统地总结我国核燃料循环领域工艺技术的自主创新成果,借鉴吸收国外同行的最新进展,在广泛吸取我国核燃料各领域专家意见的基础上,中国核工业集团公司所属中核四〇四有限公司、中国原子能科学研究院联合清华大学,历时四年,终于将《核燃料工艺技术丛书》编辑出版。

作为一名长期从事核燃料循环领域科研和生产的科技工作者,我对于核燃料循环技术在向工业化转化中突破工艺和掌握技术的复杂性和艰巨性有着深刻的体会,对于殚精竭智、献身于我国核燃料循环的众多专家学者怀有由衷的敬意和深厚的感情,对于我国核燃料循环产业的发展壮大充满无限的期望和信心。

我相信,此套丛书的出版必将促进我国核燃料循环领域工艺技术的系统化和科学化发展,推动核燃料循环产业的不断技术创新与进步,鼓舞和激励核燃料循环科研生产一线的广大干部职工,薪火相传,奋发图强,为我国核燃料循环产业的持续健康发展做出更大的贡献。

最后,感谢长期以来大力支持中国核工业集团公司核燃料循环产业的国家相关部委和地方政府的各级领导,感谢长期关心指导中国核工业集团公司核燃料循环产业发展的各领域的专家学者。

祝我国核燃料循环领域的工艺技术不断取得新的突破,我国核燃料循环产业取得更大的发展。

中国核工业集团公司总工程师

雷增光

2011年12月

序

放射性废物处理与处置是核燃料循环的一个组成部分,是制约核能可持续发展的一个重要因素。20 世纪 60 年代以来,我国对放射性废物的处理与处置给予了高度重视,广泛开展了放射性废物治理科研工作,开发了许多行之有效的放射性废物处理、处置技术,为保护环境和人类生存安全作出了重要贡献。我相信,《放射性废物处理与处置》一书的出版发行将对我国放射性废物处理与处置事业的发展起到积极的作用。

本书从放射性废物的来源、分类到放射性废物的处理与处置及放射性废物的回收利用,较全面系统地介绍了放射性废物处理、整备、贮存、处置及回收利用的理论、方法和存在的问题。全书注重理论和生产实践的紧密结合,内容丰富,具有较强的实用性。

本书作者多年来从事放射性废物处理的研究和生产实践,本书是他们在多年的研究和生产实践的基础上,综合了国内外本领域的最新研究成果和应用经验编纂而成,实属难得。

本书对于从事放射性废物处理与处置专业的生产技术人员、工程技术人员了解、掌握和应用放射性废物处理与处置理论和技术,指导生产和应用将有重要的作用。同时,本书对大、专院校师生也具有较好的参考价值。

我衷心祝贺《放射性废物处理与处置》一书的出版,并向广大读者推荐。

中国工程院院士

潘自强

2011 年 11 月

前 言

随着我国核电事业的发展,核电厂数目越来越多,由此产生的放射性废物也会越来越多。因此,放射性废物处理与处置成为制约核能可持续发展的主要问题。近年来,国际上放射性废物处理与处置技术得到了迅速的发展,并在实际生产中得到广泛的应用。本书结合多年的放射性废物处理与处置经验,在广泛调研的基础上,总结了各种放射性废物的处理与处置工艺技术。

本书共分为 10 章,第 1 章介绍放射性废物处理与处置的重要性、放射性废物分类及来源、放射性废物管理基本方法和原则、放射性废物最小化的基本概念和方法、放射性废物处理与处置基本方法;第 2 章介绍放射性气载废物处理基本技术;第 3 章介绍了放射性废液净化浓缩处理工艺技术,包括凝聚沉淀法、蒸发法、离子交换法和膜分离技术;第 4 章介绍中低放废液固化处理方法,包括水泥固化、沥青固化、塑料固化等,重点介绍了中放废液大体积浇注水泥固化的原理、流程以及关键技术;第 5 章介绍高放废液处理基本技术,包括固化技术(玻璃固化、陶瓷固化、人造岩石固化等)和分离嬗变技术,重点介绍了玻璃固化技术的原理、流程以及发展状况;第 6 章介绍了两种特殊放射性废液——有机废液和含氟废液的处理技术;第 7 章介绍了放射性固体废物处理技术,包括预处理(化学去污、电化学去污、机械去污、熔炼去污等)、压缩、焚烧以及一些先进的去污方法;第 8 章介绍了放射性废物暂存技术,主要介绍了高放废液、中低放固体废物和 α 废物暂存要求和方法;第 9 章介绍了放射性废物的处置,主要介绍了工程掩埋、近地表处置、中等深度的处置和深地质处置等方法的适用范围、要求和原理;第 10 章介绍了放射性废物的回收与利用,主要介绍了从高放废液中提取超铀核素、从有机废液纯化 TBP、从硝酸废液中回收硝酸等。

本书由多位具有丰富理论知识和实践经验的技术人员合作编写。参加撰写的同志有王邵(第 1 章,第 3~6 章,第 8~9 章),刘延彰(第 2 章),唐德仲、王邵(第 7 章),葛琴、王邵(第 10 章)。刘坤贤、章泽甫、张燕春对全书进行了认真的统稿。

中国工程院院士潘自强为本书作了序。罗上庚、范显华、孙东辉、章泽甫等

专家分别对全书进行了认真审阅,提出了许多宝贵的建议和修改意见。中核四〇四有限公司核信息中心的诸位同志及余东昌、罗劲松、杨莉同志为本书的出版做了大量的工作。对此我们一并表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,也得到了有关领导和专家的大力支持和帮助,谨向他们表示谢意。

由于编者水平有限,不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2011年7月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 核能与核燃料循环	(1)
1.1.1 核能	(1)
1.1.2 核燃料循环	(2)
1.1.3 核反应堆	(3)
1.1.4 核燃料后处理	(5)
1.2 放射性废物来源	(7)
1.3 放射性废物的分类	(9)
1.3.1 国际原子能机构推荐的放射性废物分类	(10)
1.3.2 我国的放射性废物分类	(12)
1.4 放射性废物的主要特性	(16)
1.4.1 放射性废物的核素组成	(16)
1.4.2 放射性废物的放射性及衰减特性	(18)
1.4.3 放射性废物的放射毒性	(19)
1.4.4 放射性废物的热效应	(19)
1.4.5 放射性废物的辐射化学特性	(20)
1.5 放射性废物管理	(20)
1.5.1 放射性废物管理方法	(20)
1.5.2 放射性废物管理基本原则	(21)
1.5.3 放射性废物的处置前管理	(23)
1.5.4 放射性废物的处置	(29)
1.5.5 放射性废物最小化	(31)
参考文献	(33)
第 2 章 放射性气载废物的处理	(34)
2.1 放射性废气的来源及特点	(34)
2.1.1 放射性气体	(35)
2.1.2 放射性气溶胶	(35)
2.2 放射性气体的净化处理	(36)
2.2.1 加压衰变贮存	(36)
2.2.2 碘的去除	(37)
2.2.3 含 ⁸⁵ Kr 废气的处理	(42)
2.2.4 除氟	(48)
2.2.5 除 ¹⁴ C	(50)
2.2.6 除氦	(52)

2.3 放射性微粒的净化处理	(52)
2.3.1 预处理	(53)
2.3.2 粗过滤	(57)
2.3.3 高效微粒空气过滤器	(58)
2.4 核燃料后处理厂放射性废气处理系统	(59)
参考文献	(61)
第3章 放射性废液浓缩净化处理	(62)
3.1 概述	(62)
3.2 凝聚沉淀法	(63)
3.2.1 凝聚沉淀原理和过程	(64)
3.2.2 凝聚沉淀试剂	(65)
3.2.3 常用凝聚沉淀方法	(66)
3.2.4 凝聚沉淀工艺流程及设备	(73)
3.2.5 影响凝聚沉淀的因素	(75)
3.2.6 使用凝聚沉淀方法需要注意的几个问题	(76)
3.3 放射性废液的离子交换处理	(77)
3.3.1 离子交换处理放射性废液的原理	(78)
3.3.2 离子交换剂	(79)
3.3.3 离子交换树脂的结构及分类	(81)
3.3.4 离子交换树脂的基本性能	(84)
3.3.5 离子交换平衡及选择性	(87)
3.3.6 离子交换动力学	(91)
3.3.7 放射性废液离子交换的操作方式和设备	(92)
3.3.8 离子交换操作过程	(94)
3.3.9 离子交换法处理放射性废液	(96)
3.3.10 离子交换在放射性废液处理中的应用	(99)
3.4 放射性废液的蒸发浓缩处理	(100)
3.4.1 放射性废液蒸发浓缩处理原理	(102)
3.4.2 蒸发浓缩设备	(102)
3.4.3 蒸发浓缩工艺过程及流程	(107)
3.4.4 影响蒸发器净化效果的主要因素	(108)
3.4.5 影响浓缩倍数的主要因素	(110)
3.4.6 操作过程中应注意的几个问题	(112)
3.4.7 蒸发系统的操作安全	(116)
3.4.8 汽液分离	(117)
3.4.9 脱硝	(120)
3.5 放射性废液的膜分离技术	(123)
3.5.1 概述	(123)
3.5.2 压力驱动膜分离技术	(125)

3.5.3	压力驱动分离膜类型	(129)
3.5.4	压力驱动膜的膜组件	(131)
3.5.5	压力驱动膜运行参数	(134)
3.5.6	压力驱动膜分离技术在放射性废液处理中的应用	(136)
3.5.7	其他膜分离处理技术	(138)
参考文献		(146)
第4章 中、低放废液整备		(148)
4.1	概述	(148)
4.2	水泥固化	(150)
4.2.1	水泥固化基材	(151)
4.2.2	水泥水化及凝结硬化	(154)
4.2.3	水泥固化原理	(156)
4.2.4	水泥固化体性能及要求	(156)
4.2.5	影响水泥固化体性能的因素	(159)
4.2.6	水泥固化工艺	(162)
4.3	沥青固化	(165)
4.3.1	沥青种类及特性	(166)
4.3.2	沥青固化体性能及要求	(166)
4.3.3	沥青固化方法	(169)
4.4	塑料固化	(172)
4.4.1	塑料种类及特性	(173)
4.4.2	塑料固化原理	(173)
4.4.3	塑料固化体性能要求	(173)
4.4.4	塑料固化方法	(174)
4.5	大体积浇注水泥固化	(177)
4.5.1	大体积浇注水泥固化工艺流程	(177)
4.5.2	值得重视的几个问题或技术	(178)
4.5.3	大体浇注水泥固化工程屏障	(183)
4.5.4	大体积浇注水泥固化工艺配方及影响固化体性能的因素	(183)
4.6	中、低放废液固化体性能的测定	(190)
4.6.1	水泥固化体	(190)
4.6.2	沥青固化体	(193)
参考文献		(195)
第5章 高放废液的处理与整备		(197)
5.1	高放废液的来源及特点	(197)
5.2	高放废液的固化处理	(200)
5.2.1	煅烧固化	(200)
5.2.2	玻璃固化	(202)
5.2.3	陶瓷固化	(217)

5.2.4 玻璃-陶瓷固化	(218)
5.2.5 人造岩石固化	(220)
5.3 高放废液分离嬗变	(222)
5.3.1 高放废液分离	(222)
5.3.2 嬗变	(227)
5.4 高放废液的特性分析	(227)
5.4.1 高放废液特性分析的主要成分	(227)
5.4.2 物理、化学特性分析	(228)
5.4.3 放射性测量	(229)
5.5 玻璃固化体性能的测定	(230)
5.5.1 化学性能	(230)
5.5.2 物理性能	(231)
5.5.3 机械性能	(231)
5.5.4 热性能	(232)
5.5.5 抗辐照性能	(232)
参考文献	(232)
第 6 章 放射性有机废液和含氚废液的处理与整备	(235)
6.1 放射性有机废液的处理与整备	(235)
6.1.1 放射性有机废液的来源及特征	(235)
6.1.2 处理与整备技术	(236)
6.1.3 焚烧处理	(237)
6.1.4 湿法氧化处理	(240)
6.1.5 吸收	(244)
6.1.6 水泥固化	(245)
6.1.7 直接化学氧化	(245)
6.2 含氚废液的处理与整备	(246)
6.2.1 氚的基本性质	(246)
6.2.2 氚的来源	(247)
6.2.3 含氚废液的处理方法	(248)
6.2.4 含氚废液的处置	(254)
参考文献	(256)
第 7 章 放射性固体废物的处理与整备	(258)
7.1 概述	(258)
7.2 放射性固体废物的预处理	(260)
7.2.1 放射性固体废物的分拣	(260)
7.2.2 放射性固体废物的去污处理	(260)
7.2.3 放射性固体废物的切割	(264)
7.3 压缩减容技术	(269)
7.3.1 衡量压缩减容效果的指标	(269)

7.3.2	影响压缩减容的因素	(270)
7.3.3	压缩设备	(271)
7.3.4	超级压缩减容技术在放射性固体废物处理中的应用	(272)
7.3.5	废离子交换树脂的热超级压缩减容	(276)
7.4	放射性金属熔炼技术	(277)
7.4.1	感应熔炼原理	(278)
7.4.2	金属熔炼的造渣技术	(279)
7.4.3	金属熔炼配方	(280)
7.4.4	主要熔炼设备	(281)
7.4.5	放射性金属废物熔炼处理工艺	(283)
7.4.6	熔炼装置的应用	(289)
7.4.7	清洁解控水平与金属废物再利用	(290)
7.5	可燃放射性固体废物的焚烧	(293)
7.5.1	概述	(293)
7.5.2	干法焚烧	(296)
7.5.3	湿法焚烧	(304)
7.5.4	焚烧过程中值得重视的几个问题	(305)
7.6	放射性固体废物的其他处理方法	(307)
7.6.1	放射性固体废物熔盐氧化处理	(307)
7.6.2	放射性固体废物等离子体高温熔融处理	(312)
7.7	放射性固体废物固化	(316)
7.7.1	废物固定体性能的基本要求	(316)
7.7.2	水泥固定配方	(317)
7.7.3	水泥固定工艺	(317)
7.7.4	水泥固定介质特性的鉴定	(318)
7.8	α 废物的处理与整备	(318)
7.8.1	湿法焚烧	(318)
7.8.2	可燃 α 废物的焚烧处理	(321)
7.8.3	α 焚烧灰或残渣的处理或整备	(321)
7.9	废放射源的处理与整备	(322)
7.9.1	放射源的分类	(323)
7.9.2	中、低活度废放射源的整备	(323)
7.9.3	高活度废放射源的整备	(325)
7.9.4	长寿命废放射源的整备	(326)
7.9.5	国外一些国家的废放射源的整备	(327)
7.10	放射性固体废物的放射特性鉴定	(328)
	参考文献	(331)
第8章	放射性废物的暂存	(334)
8.1	概述	(334)

8.2	高放废液的贮存	(335)
8.2.1	高放废液暂存厂房的组成	(335)
8.2.2	高放废液贮存的技术要求	(335)
8.2.3	高放废液贮槽设备设计	(339)
8.2.4	美国高放废液贮存情况	(340)
8.3	中、低放固体废物的暂存	(341)
8.3.1	中、低水平放射性固体废物贮存厂房的一般组成	(342)
8.3.2	中、低放固体废物的包装	(343)
8.3.3	中、低放固体废物暂存实例	(348)
8.4	α 废物的暂存	(350)
8.4.1	α 废物的定义及来源	(350)
8.4.2	α 废物的包装	(350)
8.4.3	α 废物暂存的工艺	(350)
8.5	高放固化体的暂存	(351)
8.5.1	技术要求	(351)
8.5.2	高放废液玻璃固化体暂存实例	(351)
	参考文献	(354)
第9章	放射性废物的处置	(355)
9.1	概述	(355)
9.2	中、低放射性废物的处置	(356)
9.2.1	概述	(356)
9.2.2	近地表处置	(357)
9.2.3	中等深度处置	(363)
9.2.4	水力压裂处置	(366)
9.2.5	低、中放废物处置的多重屏障	(368)
9.3	高放废物的处置	(369)
9.3.1	概述	(369)
9.3.2	深地质处置方法	(370)
9.3.3	地质处置的影响因素及分析	(372)
9.3.4	高放废物处置的屏障	(372)
9.3.5	高放废物处置的岩石特征	(373)
9.3.6	处置库的选址	(376)
9.3.7	安全评价	(377)
9.3.8	高放废物处置的研发	(377)
9.4	极低放废物的处置	(382)
9.4.1	极低放废物的来源	(383)
9.4.2	极低放废物的处置方法	(383)
9.4.3	极低放废物处置的多重屏障	(384)
9.5	流出物的排放	(385)

9.5.1	液态流出物的排放	(385)
9.5.2	气态流出物的排放	(386)
9.5.3	流出物排放的控制	(386)
参考文献		(387)
第 10 章 放射性废物的回收与利用		(389)
10.1	从高放废液中提取裂片元素和超铀元素	(389)
10.1.1	裂片元素和超铀元素的应用	(390)
10.1.2	放射性同位素的提取与分离	(392)
10.2	硝酸的回收利用	(406)
10.2.1	硝酸水溶液的性质	(407)
10.2.2	工艺原理及流程	(410)
10.2.3	主要设备	(411)
10.2.4	工艺流程选择中应注意的几个问题	(414)
10.2.5	精馏塔的操作	(415)
10.3	TBP-煤油的回收	(417)
10.3.1	TBP-煤油的物理化学性质	(417)
10.3.2	TBP-煤油在萃取过程中的降解及其对萃取过程的影响	(423)
10.3.3	工艺原理和流程	(428)
参考文献		(434)
附录 I 放射性废物固化体长期浸出试验(GB 7023—1986)		(435)
附录 II 混凝土收缩与质量损失试验[EJ 914—2000(附录 A)]		(439)
附录 III 沥青针入度测定法(GB/T 4509—1998)		(441)
附录 IV 沥青软化点测定法(GB/T 4507—1999)		(445)
附录 V 石油产品闪点与燃点测定法(GB/T 267—1988)		(449)
附录 VI 重锤自由落体冲击试验方法(EJ 1186—2005)		(452)
附录 VII 玻璃导热系数试验方法(JC/T 675—1997)		(454)
附录 VIII 混凝土抗氯离子渗透性的实验方法[EJ 914—2000(附录 C)] ...		(457)
附录 IX 水泥胶砂流动度测定方法(GB/T 2419—2005)		(462)
附录 X 水泥胶砂强度检验方法(GB/T 17671—1999)		(464)

第1章 绪论

关于放射性废物,国家标准 GB 9133—1995《放射性废物的分类》将其定义为“为审管的目的,放射性废物为含有放射性核素或被放射性核素污染,其浓度或活度大于国家审管部门规定的清洁解控水平,并且预计不再利用的物质”。废物的清洁解控水平是指由国家审管部门规定的,以放射性浓度、放射性比活度和/或总活度表示的一组值。对那些虽然含有放射性物质,但其放射性浓度、放射性比活度或污染水平不超过国家审管部门规定的清洁解控水平的废物,不属于放射性废物。

1938年发现的核裂变现象为核能的利用提供了基础,并首先应用于核军工。20世纪40年代初,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,并在此基础上发展了原子弹、氢弹,随后苏联、英国、法国等国家也发展了核军工。1954年,苏联建成了世界上第一座核电站,从此以后核能和平利用得到迅速的发展。截至2010年8月,世界上已有29个国家运行着441台核电机组,总容量为375 GW,还有60台总容量为58.6 GW的机组正在建造之中。

核能继化石燃料(如煤、石油、天然气等)和水力资源之后,已成为世界上第三种主要能源。核能的开发利用在给人类社会带来巨大的经济效益和社会效益的同时,也给职业工作人员、公众的健康以及环境安全带来风险。据估计,一个发电量为6 GW的核发电体系在运行40 a间产生的放射性废物总量约为 $19.4 \times 10^4 \text{ m}^3$ (不包括铀尾矿、燃料元件加工废物等)。以发电量375 GW计,产生的放射性废物的量约为 $12.3 \times 10^6 \text{ m}^3$,这个数字是相当可观的。因此,如果不对这些废物进行有效的处理与处置,将对公众及其子孙后代的健康产生有害的影响,也关系到核能的可持续发展,关系到国土环境的安全。

1.1 核能与核燃料循环

1.1.1 核能

核能的准确说法应是原子核能,是在原子核结构发生变化的过程中释放出来的能量。获得核能的途径主要有两个:裂变和聚变。

裂变是指一个重原子核分裂为两个(在少数情况下,可分成三个或更多个)质量为同一量级的碎片的现象,其原子核在中子作用下容易发生裂变的物质,如 ^{235}U 、 ^{239}Pu 、 ^{233}U 等,称为易裂变物质。核裂变过程中产生的较轻的新原子核及其衰变产物统称为裂变产物。核裂变过程中释放的能量是非常巨大的。在反应堆中,1 g ^{235}U 裂变时可以产生约 $6.7 \times 10^{10} \text{ J}$ 的能量,该能量值相当于2 000 kg优质煤完全燃烧时所释放的能量。

聚变是指两个较轻的原子核(如氘、氚、锂等)聚合成一个较重的原子核,同时释放出巨大的能量。聚变需要在几千万摄氏度的温度下才能进行,因此也称为热核反应。轻核聚变时释放的能量比重核裂变的能量大得多。例如,1 g 氘化 ^6Li 完全反应时所产生的能量约为