




中国原子能科学研究院科学技术丛书

核废物处理技术

顾忠茂 著

 原子能出版社

中国原子能科学研究院科学技术丛书

核废物处理技术

顾忠茂 著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核废物处理技术/顾忠茂著. —北京:原子能出版社,2009.7

(中国原子能科学研究院科学技术丛书)

ISBN 978-7-5022-4585-6

I. 核… II. 顾… III. 放射性废物处置-研究 IV. TL942

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 040820 号

内 容 简 介

本书比较全面和系统地介绍了几十年来国内外在各种类型核废物处理与整备技术方面所积累的经验与成就,并尽可能反映当代的最新发展。

内容主要包括:核废物来源、主要特点及其分类,核废物处理处置基本原则及其现代理念,放射性废气的处理,低中放废水的沉淀、蒸发、离子交换和膜分离处理,放射性有机废液的处理及低放废液的生化处理,低中放废物的整备技术(包括各种固定化和减容技术),高放废液的固化技术及分离-嬗变技术。

本书可供核工业系统从事核燃料循环、核废物管理、核环境科学与工程以及核技术应用等方面的专业技术人员和管理人员参考,可供大专院校相关专业的师生和研究生阅读。

核废物处理技术

总 编 辑 杨树录

责任编辑 付 真

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 26.25 字 数 502 千字

版 次 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4585-6 定 价 82.00 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

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

出版委员会

主任 赵志祥

副主任 张昌明 柳卫平

委员 (按姓氏笔画为序)

万 钢	王 楠	王阿凤	王国保	尹忠红	石永康
叶宏生	叶国安	刘森林	许谨诚	李林虎	李和香
李树源	杨丙凡	张东辉	张生栋	张立红	张和平
张锦荣	张静波	陈 凌	陈建欣	邵焕会	罗志福
岳维宏	赵崇德	柯国土	姜兴东	夏海鸿	强家华
樊 胜					

编审委员会

顾问 (按姓氏笔画为序)

王乃彦	王方定	方守贤	阮可强	张焕乔	周永茂
钱绍钧	黄胜年	樊明武			

主任 赵志祥

副主任 柳卫平 许谨诚

委员 (按姓氏笔画为序)

勾 成	卢玉楷	叶国安	吕忠诚	朱升云	刘一兵
关遐令	汤秀章	杨红义	杨启法	肖雪夫	张万昌
张天爵	张先业	张伟国	张应超	陈玉宙	陈永寿
陈钟麟	范显华	林灿生	罗上庚	罗志福	竺礼华
金小海	金华晋	周祖英	姜 山	赵守智	贺佑丰
袁履正	顾忠茂	党淑琴	徐 铄	浦胜娣	容超凡
谢建伦	裴鹿成				

办公室

主任 尹忠红

副主任 李来霞

成员 (按姓氏笔画为序)

马英霞	王丽英	王宝金	伍险峰	张小庆	骆淑莉
韩翠娥					

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》

编辑工作委员会

主 任 侯惠群

副主任 杨树录

委 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭

张铤清 赵志军 侯惠群 谭 俊

编辑工作小组

组 长 杨树录

副组长 丁怀兰 赵志军

成 员 (按姓氏笔画为序)

丁怀兰 王艳丽 刘 朔 李 宁 杨树录 张关铭

张铤清 赵志军 谭 俊

总 序

中国原子能科学研究院创建于1950年,是我国核科学技术的发祥地和先导性、基础性、前瞻性的综合性核科学技术研究基地。

在党中央和上级部门的关怀和指导下,中国原子能科学研究院为我国的国防建设、国民经济建设和核科学技术的发展做出了重要贡献,造就了7位“两弹一星”功勋科学家和60多位两院院士,培养了大批科技人才,在核物理、核化学与放射化学、反应堆工程技术、加速器工程技术、同位素技术、核电子学与核探测技术、辐射防护、放射性计量等学科形成了自己的特色和优势,并拥有核科学与技术 and 物理学两个一级学科硕士、博士学位授予权。

为了系统地总结原子能院在核科学技术相关优势学科积累的知识和经验,吸收和借鉴国内外核科学技术最新成果,促进我国核科技事业的发展,我院决定组织出版《中国原子能科学研究院科学技术丛书》,并选定王淦昌、肖伦、丁大钊、王乃彦、阮可强等院士编著的《惯性约束核聚变》、《放射性同位素技术》、《中子物理学——原理、方法与应用》、《新兴的强激光》、《核临界安全》5本专著首批出版,今后还将组织撰写更多的学术专著纳入本丛书系列。

谨以此套丛书献给为我国核科技事业献身的人们!

《中国原子能科学研究院科学技术丛书》出版委员会

2005年9月1日

序

为了满足世界人口的增加及其对生活水平提高的需要,各国对能源的需求日益增长,越来越多的国家期望通过发展核能来确保长期的能源安全,减少温室气体的排放,改善环境质量。

由于核能的能量密度很高,所以,与常规能源生产相比,核能生产过程中所产生的废物量很少。然而,由于核废物具有放射性,对人体有危害,并对环境构成放射性污染和其他污染,所以必须对核废物进行严格管理。核废物如果不能得到妥善的处理与处置,将制约核能的可持续发展。

在过去的半个世纪里,世界各国在核废物处理方面已开展了大量的研究开发工作,形成了一系列成熟的处理技术,建立和有效运行了各种处理设施,并积累了丰富的经验。但国内多年来缺少一本系统介绍核废物处理技术的专著。

本书比较全面和系统地介绍了几十年来国内外(包括中国原子能科学研究院)在各种类型核废物处理技术方面所积累的经验,并尽可能反映当代的最新技术成就和理念,内容比较丰富,论述有一定深度,具有实用意义。希望本书能对从事核废物管理、环境科学等方面的专业人员和管理者有一定的参考价值。

王方定

2008年11月25日

前 言

核废物的安全处置是制约核能可持续发展的重大问题,核废物的妥善处理则是其安全处置的前提,即核设施运行过程中产生的各种类型的核废物在处置之前,必须经过适当的处理和整备,转化成可处置的形式之后,才能实现安全处置。

在过去的 10 年里,国内已陆续出版了几本有关核废物处理与处置的专著,涉及面较广。至于对核废物处理技术的专门论述,国内仅有 1 本 20 世纪 70 年代出版的关于放射性废水处理专著,其介绍的处理方法与技术均属国际上早期开展的工作。此后,多年来尚未有 1 本较为系统地论述各种类型核废物处理技术的专著,本书试图比较全面和系统地介绍几十年来国内外在各种类型核废物处理技术方面所积累的经验,并尽可能反映当代的最新成就。本书的主要内容包括各种形态(气体、液体和固体)和各种放射性水平(低放、中放和高放)核废物的合适的处理与整备技术。

本书共分 10 章。第 1 章介绍核废物治理基础知识、基本原则及核废物治理的现代理念;第 2 章介绍放射性废气处理技术;第 3 章至第 5 章介绍低放或中放废水的经典处理技术,包括化学沉淀、蒸发和离子交换;第 6 章介绍低中放废水的新型处理技术——膜分离;第 7 章介绍低放有机废液处理技术,考虑到低放废液的生物处理主要是对有机物的破坏,故这部分内容也放在该章;第 8 章和第 9 章分别介绍低中放废物的固定化和减容技术;第 10 章介绍高放废物的固化技术和分离—嬗变技术。

中国科学院院士王方定为本书做了序。我国核燃料循环及核废物管理领域知名专家严叔衡研究员和管宗洲研究员级高工审阅了全书,并提出许多修改建议。对于他们的指教与帮助,作者谨向他们表示深切谢意。

在本书编写过程中,得到了我院不少同仁的热情鼓励和全力支持,其中骆大星、庞合鼎等同志为作者提供了我院在放射性废物处理研究开发方面发表的论文和研究报告,刘春秀、祁光茂、刘富国、李美山等同志提供了我院在放射性废物管理方面所积累的有关资料,章泽甫、张生栋、丁有钱等同志提供了核废物处理技术资料和相关核素核数据资料,四〇四厂杨掌众等同志提供了该厂在就地水泥固化方面所积累的实践经验,李金英、叶国安、管宗洲、庞合鼎、骆大星、刘春秀、张生栋、刘黎明、张振涛、姚军等同志对本书的修改提出了宝贵建议。在此表示衷心感谢。

本书可供从事核废物管理、环境科学方面的专业技术人员、管理人员和大专院校的师生阅读。

由于作者学识所限,书中难免有错误和偏颇之处,敬请读者指正。

顾忠茂

2008年8月8日

目 录

第 1 章 总论	(1)
1.1 核废物管理概述	(1)
1.2 核废物的来源	(2)
1.2.1 民用核燃料循环	(2)
1.2.2 军用核燃料循环	(12)
1.2.3 非核燃料循环	(12)
1.2.4 天然存在放射性物质	(13)
1.3 世界核废物产生现状	(14)
1.3.1 军工遗留废物	(14)
1.3.2 民用核动力生产积累的核废物	(17)
1.4 核废物分类	(19)
1.5 核废物的主要特性	(21)
1.5.1 放射性废物的核素类型	(21)
1.5.2 放射性废物的放射性活度	(24)
1.5.3 放射性废物的放射毒性	(26)
1.5.4 放射性废物的热效应	(26)
1.6 核废物处理处置基本原则	(27)
1.7 核废物治理的几个现代理念	(29)
1.7.1 极低放废物和清洁解控	(29)
1.7.2 废物最少化	(30)
1.7.3 核废物多国处置库	(33)
参考文献	(36)
第 2 章 放射性废气的处理	(38)
2.1 放射性废气的来源	(38)
2.1.1 天然放射性核素衰变产生的氡气	(38)
2.1.2 人工核反应产生的放射性气态物质	(40)
2.2 放射性废气的净化处理概述	(41)

2.2.1	加压储存衰变	(41)
2.2.2	过滤法	(41)
2.2.3	吸附法	(43)
2.2.4	过滤与吸附系统的检验	(45)
2.3	核电站和后处理厂放射性废气的处理	(46)
2.4	几种重要放射性废气的净化处理	(49)
2.4.1	碘的去除	(49)
2.4.2	氙-85 的去除	(52)
2.4.3	氟的控制	(56)
2.4.4	碳-14 的控制	(62)
2.4.5	氢的控制	(69)
	参考文献	(77)

第3章	低中放废水的化学沉淀处理	(80)
3.1	化学沉淀的特点	(80)
3.2	化学沉淀的基本过程	(81)
3.3	废水预处理	(83)
3.3.1	pH 调节	(84)
3.3.2	化学氧化	(84)
3.3.3	化学还原	(86)
3.4	常用的凝聚方法	(87)
3.4.1	氢氧化物沉淀法	(89)
3.4.2	石灰-苏打软化法	(94)
3.4.3	磷酸盐沉淀法	(95)
3.4.4	锰盐絮凝沉淀法	(96)
3.4.5	几种重要放射性核素去除法	(97)
3.4.6	放射性废水的组合处理过程	(100)
3.5	化学沉淀设施示例	(100)
3.6	化学沉淀法的过程设备	(108)
3.6.1	预处理设备	(108)
3.6.2	絮凝沉降设备	(109)
3.6.3	过滤设备	(112)
3.6.4	辅助设备	(114)
3.7	小结	(116)

参考文献	(117)
第4章 低中放废水的蒸发处理	(118)
4.1 放射性废水蒸发处理法概述	(118)
4.1.1 放射性废水蒸发处理的基本原理及适用范围	(118)
4.1.2 放射性废水蒸发处理的去污因子和浓缩倍数	(119)
4.1.3 蒸发系统中各段去污因子的分配	(120)
4.1.4 蒸发操作应注意的主要问题	(121)
4.2 蒸发器的类型及其选择原则	(122)
4.2.1 釜式蒸发器	(122)
4.2.2 自然循环式蒸发器	(123)
4.2.3 强制循环蒸发器	(125)
4.2.4 单程型蒸发器	(126)
4.2.5 其他类型蒸发器	(129)
4.2.6 蒸发器选择原则	(132)
4.3 蒸发器中的传热	(134)
4.4 蒸发器的操作方法	(136)
4.4.1 废水的预处理	(136)
4.4.2 蒸发器操作	(136)
4.4.3 蒸发条件控制	(137)
4.4.4 蒸发器操作的集中控制	(139)
4.5 雾沫的形成及消除夹带的方法	(139)
4.5.1 蒸发过程中的雾沫夹带	(139)
4.5.2 消除夹带的方法	(140)
4.6 结垢问题	(149)
4.6.1 结垢的形成原因及对蒸发效果的影响	(149)
4.6.2 防垢与去垢方法	(149)
4.7 腐蚀问题	(151)
4.8 含有机物或可爆物的问题	(152)
参考文献	(152)
第5章 低中放废水的离子交换处理	(154)
5.1 离子交换法去除水中放射性核素的特点及其适用范围	(154)
5.2 离子交换原理简介	(156)

5.2.1	离子交换类型	(157)
5.2.2	离子交换平衡与选择性	(158)
5.2.3	离子交换容量	(160)
5.2.4	离子交换动力学	(161)
5.3	离子交换材料	(163)
5.3.1	天然存在的离子交换材料	(165)
5.3.2	人工合成离子交换剂	(166)
5.4	放射性废水的离子交换处理	(171)
5.4.1	放射性废水的离子交换处理方式	(171)
5.4.2	离子交换剂的再生	(178)
5.4.3	离子交换与其他处理技术的组合应用	(179)
5.5	放射性废水的离子交换处理系统设计	(180)
5.5.1	离子交换法处理反应堆水的设计	(180)
5.5.2	离子交换法处理一般实验室和工厂废液的设计	(185)
	参考文献	(187)

第 6 章	低放废水的膜分离处理	(190)
6.1	膜分离法概述	(190)
6.1.1	膜分离技术特点	(190)
6.1.2	膜的类型及其在放射性废水处理中应用的概述	(191)
6.2	压力驱动膜分离处理放射性废水概况	(194)
6.2.1	压力驱动膜概述	(194)
6.2.2	反渗透	(196)
6.2.3	纳滤	(196)
6.2.4	超滤与微滤	(197)
6.3	压力驱动聚合物膜和无机膜简介	(198)
6.3.1	聚合物膜	(198)
6.3.2	无机膜	(200)
6.4	压力驱动分离膜组件的构型	(200)
6.5	压力驱动分离膜的运行参数	(204)
6.5.1	膜通量	(204)
6.5.2	截留率、去污因子和浓缩因子	(205)
6.6	膜过程的设计和运行考虑	(206)
6.6.1	初步设计考虑	(206)

6.6.2	系统设计考虑	(208)
6.6.3	废水预处理需求	(210)
6.6.4	系统最终设计考虑	(211)
6.6.5	运行考虑	(212)
6.7	膜的运行性能与维护	(213)
6.7.1	膜的压实	(213)
6.7.2	浓差极化	(213)
6.7.3	膜污染	(215)
6.7.4	膜污染的征兆	(216)
6.7.5	膜的清洗和恢复	(217)
6.7.6	膜运行性能监督	(218)
6.8	膜技术处理放射性废水的应用现状与发展	(219)
6.8.1	废水的来源、类型和特性	(219)
6.8.2	压力驱动分离膜处理放射性废水的应用情况	(219)
6.8.3	其他膜分离法处理放射性废水研究	(226)
	参考文献	(231)
第7章	放射性有机废液的处理及低放废液的生物处理	(235)
7.1	放射性有机废液的来源	(235)
7.2	放射性有机废液管理的总体考虑	(236)
7.3	放射性有机废液的处理	(237)
7.3.1	放射性有机废液的焚烧处理	(237)
7.3.2	放射性有机废液的氧化处理	(241)
7.3.3	放射性有机废液的碱性水解处理	(246)
7.3.4	放射性有机废液的蒸馏处理	(249)
7.3.5	放射性有机废液的加合物形成相分离-焚烧处理	(251)
7.4	低放废液的生物处理技术	(252)
7.4.1	低放废液生物处理技术概述	(252)
7.4.2	生物降解	(254)
7.4.3	生物吸附	(260)
7.4.4	生物累积	(262)
7.4.5	放射性废液生物处理法的特点和展望	(263)
	参考文献	(265)

第 8 章 低中放废物的固化化	(267)
8.1 低中放废物固化化概述	(267)
8.2 低中放废物的水泥固化化	(268)
8.2.1 水泥固化配方	(268)
8.2.2 水泥固化/固定化工艺过程	(271)
8.2.3 几种特殊废物的水泥固化方案	(278)
8.2.4 水泥固化的优缺点	(281)
8.3 低中放废物的沥青固化	(282)
8.3.1 沥青和沥青固化概述	(282)
8.3.2 用于固化放射性废物的沥青特性	(282)
8.3.3 适于沥青固化的废物类型	(285)
8.3.4 沥青固化工艺	(287)
8.3.5 沥青固化操作安全性	(293)
8.3.6 沥青固化体性能评价	(295)
8.3.7 结论	(299)
8.4 低中放废物的聚合物(塑料)固化	(300)
8.4.1 聚合物类型及其性质	(300)
8.4.2 聚合物固化前的废物预处理	(301)
8.4.3 聚合物固化工艺	(304)
8.4.4 聚合物固化法小结	(309)
8.5 低中放废物的玻璃固化	(310)
8.5.1 核电站废物的玻璃固化	(310)
8.5.2 历史遗留低中放废物的玻璃固化	(316)
参考文献	(322)
第 9 章 低中放固体废物减容技术	(325)
9.1 低中放固体废物的分类及相应的减容技术	(325)
9.2 压缩减容技术	(326)
9.2.1 压缩减容技术概述	(326)
9.2.2 桶内压缩	(327)
9.2.3 超级压缩	(329)
9.2.4 特种废物(废树脂)的热压减容	(334)
9.2.5 真空压缩	(335)
9.3 焚烧减容技术	(335)

9.3.1	焚烧减容技术概述	(335)
9.3.2	焚烧减容工艺过程	(337)
9.3.3	典型的焚烧设施举例	(340)
9.3.4	低中放固体废物焚烧装置的设计考虑	(342)
9.4	熔融减容技术	(344)
9.5	开发中的新型减容技术	(345)
9.5.1	湿法氧化	(345)
9.5.2	热化学处理	(346)
9.5.3	熔盐氧化	(347)
9.5.4	生物处理	(348)
9.6	几种重要减容技术比较	(349)
	参考文献	(350)
第 10 章	高放废物处理	(352)
10.1	高放废物特点及其处理概述	(352)
10.2	高放废液的预处理	(354)
10.2.1	高放废液的蒸发浓缩	(354)
10.2.2	高放废液的储存	(356)
10.3	高放废液固化	(357)
10.3.1	高放废液的固化技术发展历史	(357)
10.3.2	高放废液固化体	(359)
10.3.3	高放废液的固化工艺	(367)
10.4	高放废液分离—嬗变	(381)
10.4.1	分离—嬗变与废物最少化	(381)
10.4.2	分离	(382)
10.4.3	嬗变	(395)
	参考文献	(398)

第1章 总论

1.1 核废物管理概述

世界上所有的工业生产过程均会产生一些有害的废物。为了保护公众健康和人类赖以生存的地球环境,必须妥善处理 and 处置各种废物。目前,世界上唯有核能产业对核能生产的全过程中产生的所有放射性废物进行处理与安全处置。由于核能的能量密度很大,所以,与常规能源生产相比,核能生产过程中所产生的废物量很少。以工业发达的英国为例,每年产生各类有害废物约 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中放射性废物仅占约 1%。然而,由于核废物具有放射性,对人体和环境有危害,所以必须对核废物进行严格管理。

放射性废物是指含有放射性核素或被放射性核素污染、其放射性浓度或放射性比活度超过国家规定限值的废弃物。相应的,放射性浓度或放射性比活度低于或等于国家规定限值的废物,按非放射性废物进行管理,称作豁免(Exemption)废物,可以实行清洁解控(Clearance),如采用一般焚烧处理和浅土掩埋处置等,或者进行有限制或无限制的再利用/再循环。目前,国际上尚无被普遍接受的清洁解控水平,也无一致同意的标准解控程序。

放射性废物按其放射性活度水平可分为低放废物、中放废物和高放废物(见表 1-1)^[1],按其物理形态可分成气体废物、液体废物和固体废物三类。

放射性废物处理是改变放射性废物的物理、化学性质,使之变成适于往大气、水体排放或作最终处置的状态所实施的工艺过程;放射性废物处置则是为使放射性核素在衰变到对人类无危害水平之前保持与生物圈隔离所采取的措施。一般而言,放射性废物处置是不可回取的处理。由于固体废物不会流动,它的长期贮存或永久处置更加安全且较易监督,所以一般应将放射性废物转化成为不溶解的、稳定的固体状态,然后处置。废气和废液经净化(将放射性核素分离出来进入固体废物),达到符合排放标准后有控制地排入环境,也是一种处置方式。

表 1-1 各类放射性废物的大致构成^[1]

废物类型	所占体积/%	所占放射性活度/%
低放废物	90	1
中放废物	7	4
高放废物	3	95