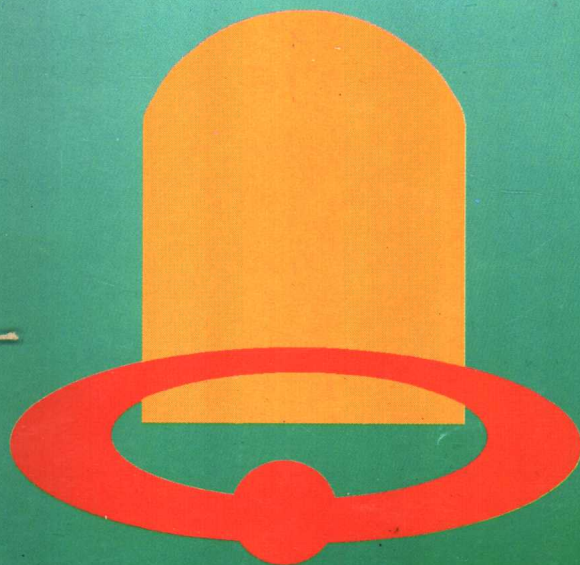


DECONTAMINATION TECHNOLOGY
OF NUCLEAR FACILITIES

核设施去污技术

[日] 石 樽 顯 吉 等 编



原子能出版社

核设施去污技术

[日]石樽顯吉 等编

左 民 李学群 马吉增 译

柯友之 左 民 校

原 子 能 出 版 社

(京)新登字 077 号

图书在版编目(CIP)数据

核设施去污技术/[日]石樽顯吉等编,左民、李学群等译. —北京:原子能出版社,1997.9

ISBN 7-5022-1192-6

I. 核… II. 石… III. 核设施-去污机理-去污
IV. TL944

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 05480 号

内 容 简 介

本书介绍了以轻水堆核电厂为主要对象,兼及其他堆型核电厂与其他核设施中核污染发生与去污的机理,减轻与防止污染的途径和经验,各种去污技术、去污用装备的研究、开发和实用效果及其发展动向。本书还从技术分析与经济分析的角度介绍了对去污技术的评价方法,并说明了在役设施与退役设施对去污技术选用的不同要求。

本书可供从事核电厂或其他核设施的设计、运行和管理的科技人员参考,也可供从事核设施退役的技术人员及有关高等院校师生参考。

核设施去污技术

原子力施設にすける除染技術

© Printed in Japan 1984

©原子能出版社,1997

原子能出版社出版 发行

责任编辑:韩国光

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京市平谷县大北印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 24.5 字数 610 千字

1997 年 9 月北京第 1 版 1997 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—800

定价:40.00 元

序

由于国际上对去污技术的关心程度逐渐高涨,因而与此相关的国际会议召开了若干次。当前,欧美各国所关心的最关键的技术在于运行中的核电厂的去污,因为随着反应堆运行年数的增加,导致核电厂从业人员受照剂量增加,把去污作为降低从业人员受照剂量对策的一环而加以考虑。在日本,为了降低从业人员受照剂量,强调不仅要依赖于去污,还希望采取措施从根本上根绝污染的发生源,虽然如此,但还看不出他们在利用这些措施方面的关心程度比提供去污技术的关心程度高出多少。

但是,要完全根绝放射性核素在一回路冷却剂系统的发生与积累是不可能的,考虑到今后运营的核电厂还要增加,作为选择降低受照剂量对策的优化方案之一,拥有去污技术一事实属极为重要。此外,核电厂运营期间的去污技术与将来的反应堆退役时所必需的去污技术也是有关系的,而且,除核电厂之外,还可能应用于后处理与废物处理设施,从这一意义上讲,去污技术总有一天是要出台的,因此,我以为在当前国际上对其关注的情况下,开发并确立其技术,其意义重大。

如同没有一种包治百病的灵丹妙药一样,也不存在一种能将所有污染全部去除的万能的去污技术,必须根据污染的状态与其结合强度采用相应的技术。因此,当前去污技术是多种多样的,这就造成对这些去污技术的纷繁杂乱的报道。如果站在去污技术使用者的立场来考虑,便要求我们根据各自的去污目的从众多的方法之中选择最合适的方法,为此,我们不仅要深入了解去污技术,还必须深入了解污染状况。

鉴于以上情况,本书所载内容是邀请各个专业的同仁执笔,就放射性核素在一回路冷却剂系统的积累状况及降低措施进行了论述,因为一般认为这是核电厂所发生污染中最讨厌最不易去除的,然后,他们还就多种多样的去污技术,包括尚处于开发中的技术,将手头所得资料进行了整理。

该技术领域的发展日新月异,恐怕在最近的将来就有必要修改本书内容,但是,还是请允许我们先就眼前的情况予以整理。而且,由于要尽可能多邀请一些同仁执笔,在内容方面,前后也难免多少有些重复,亦请读者原谅。

本书若能对日本去污技术的健康发展,以及对在本领域有兴趣之士多少有些帮助的话,编者将感到无比欣慰。

石樽顯吉

1984年12月

译者的话

我国核工业的发展已有 40 余年的历史,进入 90 年代以来,秦山核电厂(300MW)与广东大亚湾核电厂($2 \times 900\text{MW}$)的相继建成发电,标志着我国核工业迈进了一个新的发展时期。

随着核电厂运行时间的推移,放射性核素必然在反应堆堆芯内发生与积累,并将被主冷却剂通过一回路系统带到有关的系统,造成系统与设备的放射性污染。另一方面,为了保证核电厂的长期、安全与稳定运行,必须实行定期检查与维修,甚至更换某些部件。为了降低运行、检查与维修人员的受照剂量,必须对核电厂,主要是对一回路进行去污,所用的去污技术不应损伤被去污设施的设计功能,不应加速二次污染,而且应该是简便易行和经济的。

我国早期的核设施,不少已进入停运、退役阶段,也需要适当的去污技术,以保证安全、经济地实施退役。

因此,去污技术在我国日益引起重视,已有不少单位在开展这方面的研究。在这种情况下,人们希望有一本比较全面地介绍核设施去污技术的书。

本书以核电厂为主,介绍了各种核设施污染的发生、积累的机理和减少污染发生源的途径,并针对运营中去污与退役时去污等不同目的,说明了各种去污方法的原理、开发过程、实际应用情况及其展望,对运营设施的去污还介绍了防止去污后二次污染的途径。本书基本上搜集了 1984 年以前国际上所发表的文献,并加以整理,内容十分丰富,并有大量实验与实测数据。

由于成书较早,1985 年以后的情况未予记入。但若考虑到去污技术的开发大体可以 1980 年左右为分界线,在此之前是以污染机理、去污技术本身的研究开发为主,在此之后则以应用开发为主,并通过实际应用改进去污技术。本书是 1984 年编写的,各种去污方法的基本内容在本书中均有详细论述。考虑到去污技术是跨学科、理论性与实践性都特别强的一门新技术,总体来说还处于发展时期,因此本书内容并未过时,对我国读者仍不失其很好的参考价值。

本书可供从事核电厂和反应堆工程、后处理和三废处理及各种核设施退役工程研究、设计和运行人员参考,亦可供高等院校有关专业师生参考,如能达此目的,译者将感到无比欣慰。

在本书翻译过程中,曾得到原书主编石樽顯吉教授的帮助和指导,日本(株)テクノ・プロジェクト等出版社的友好协助,并得到国家设计大师柯友之高级工程师(教授级)和韩国光编审的帮助和指导,特此一并致谢。

目 录

第一章 总 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 反应堆一回路的水化学	(2)
1.2.1 放射性核素的蓄积	(2)
1.2.2 不溶性腐蚀产物(CRUD)的行为	(4)
1.2.3 氧化膜的构造	(9)
1.2.4 降低措施	(11)
1.3 去污技术	(12)
1.3.1 去污技术的发展	(12)
1.3.2 去污技术的概况	(13)
1.3.3 去污化学	(14)
第二章 核电厂减少不溶性腐蚀产物(CRUD)的对策	(22)
2.1 沸水堆中减少 CRUD 对策	(22)
2.1.1 引言	(22)
2.1.2 发电堆长期停堆时的措施	(23)
2.1.2.1 热排水对策	(23)
2.1.2.2 热阱清扫	(25)
2.1.3 起动时的对策	(25)
2.1.3.1 给水、凝结水系统净化运行	(25)
2.1.4 发电堆运行时的措施	(26)
2.1.4.1 向给水、凝结水注氧	(26)
2.1.5 设备方面的措施	(26)
2.1.5.1 改进凝结水脱盐塔	(26)
2.1.5.2 凝结水前置过滤器	(27)
2.1.5.3 改进一回路设备与管道的材质	(28)
2.1.6 增加反应堆净化装置的容量	(28)
2.2 压水堆核电厂的放射化学管理	(29)
2.2.1 引言	(29)
2.2.2 压水堆核电厂一回路冷却剂系统与放射化学管理概况	(29)
2.2.2.1 一回路冷却剂系统概况	(29)
2.2.2.2 放射化学管理概况	(30)
2.2.2.3 水质标准值与限值	(30)
2.2.3 放射化学管理的现状	(31)

2.2.3.1	电厂起动时的放射化学管理	(31)
2.2.3.2	正常运行时的放射化学管理	(31)
2.2.3.3	停堆时的放射化学管理	(32)
2.2.4	结束语	(34)
2.3	压水堆核电厂的 CRUD 降低措施	(34)
2.3.1	引言	(34)
2.3.2	压水堆核电厂 CRUD 的特征	(34)
2.3.2.1	PWR 核电厂的特点	(35)
2.3.2.2	CRUD 的行为	(35)
2.3.3	降低 CRUD 的措施	(37)
2.3.3.1	通过水质管理降低 CRUD 发生量	(37)
2.3.3.2	通过去污降低 CRUD	(41)
2.3.4	关于减少 CRUD 发生量与去污技术的研究开发	(41)
2.4	研究开发动向与今后的课题	(42)
2.4.1	轻水堆水化学	(42)
2.4.2	水化学管理的目的	(43)
2.4.2.1	确保燃料包壳管的完整性	(43)
2.4.2.2	降低一回路冷却剂系统的辐射剂量率	(43)
2.4.2.3	确保一回路结构材料的完整性	(43)
2.4.3	水化学管理的基本思想及其应用	(44)
2.4.3.1	BWR 水化学管理的特征	(44)
2.4.3.2	PWR 水化学管理的特征	(45)
2.4.4	轻水堆降低 CRUD 措施的沿革	(46)
2.4.4.1	冷却剂与水化学	(46)
2.4.4.2	推进 CRUD 降低措施	(47)
2.4.4.3	BWR 中腐蚀产物的行为	(49)
2.4.4.4	PWR 中腐蚀产物的行为	(52)
2.4.5	今后的研究课题	(54)
2.4.5.1	研究开发动向	(54)
2.4.5.2	放射性腐蚀产物的蓄积过程	(54)
2.4.5.3	有关水化学的基础研究	(54)
2.4.5.4	改善水化学管理	(55)
2.4.5.5	提高测量技术	(55)
2.4.5.6	开发去除 CRUD 的技术	(55)
2.4.5.7	材料选择	(56)
2.4.5.8	去污	(56)
第三章	去污技术	(57)
3.1	各种去污方法与去污技术现状	(57)
3.1.1	引言	(57)

3.1.2	去污方法分类	(57)
3.1.2.1	按原理分类	(57)
3.1.2.2	按去污对象分类	(58)
3.1.2.3	按去污目的分类	(58)
3.1.2.4	按去污对象设施的状态分类	(59)
3.1.3	在役(期间)去污	(59)
3.1.4	解体(废堆)去污	(60)
3.1.4.1	解体前系统化学去污	(60)
3.1.4.2	为减少污染废物量的去污	(61)
3.1.5	事故修复时的去污	(62)
3.1.6	化学去污的现状	(62)
3.1.6.1	CRUD 的特征	(63)
3.1.6.2	化学去污法的种类与特征	(64)
3.1.6.3	BWR 用化学去污剂	(66)
3.1.6.4	PWR 用化学去污剂	(69)
3.1.6.5	反应堆化学去污的实施情况	(77)
3.1.6.6	核燃料物质及核裂变产物所用的化学去污法	(78)
3.1.7	非化学去污法与其他去污方法现状	(80)
3.2	去污的经济效益	(85)
3.2.1	去污的经济效益分析	(85)
3.2.1.1	引言	(85)
3.2.1.2	降低受照剂量的对策与去污	(86)
3.2.1.3	经济效益分析的考虑方法	(88)
3.2.1.4	受照剂量降低量的评价	(89)
3.2.1.5	去污费用的估算	(92)
3.2.1.6	人·Sv 费的估算	(92)
3.2.1.7	结束语	(94)
3.2.2	稀溶液去污的经济效益分析	(95)
3.2.2.1	引言	(95)
3.2.2.2	稀溶液去污法所达到的去污程度	(96)
3.2.2.3	受照剂量的降低量	(96)
3.2.2.4	1 人·Sv 的价格	(98)
3.2.2.5	稀溶液去污的经济效益	(98)
3.2.2.6	辅助系统的去污	(99)
3.2.2.6.1	情况 1	(99)
3.2.2.6.2	情况 2	(99)
3.2.2.6.3	情况 3	(100)
3.2.2.7	关于辅助系统去污的讨论	(101)
3.2.2.8	全系统去污	(101)

3.2.2.9	关于全系统去污的讨论	(102)
3.2.2.10	结束语	(103)
3.3	各种去污法	(104)
3.3.1	化学去污法	(104)
3.3.1.1	CAN-DECON 法	(104)
3.3.1.1.1	引言	(104)
3.3.1.1.2	CAN-DECON 法的概要	(105)
3.3.1.1.3	轻水堆中的沉积氧化物	(107)
3.3.1.1.4	CAN-DECON 法的化学过程	(108)
3.3.1.1.5	去污装置	(109)
3.3.1.1.6	CAN-DECON 法的实绩与应用实例	(109)
3.3.1.1.7	关于今后的展望	(118)
3.3.1.2	LOMI 法	(118)
3.3.1.2.1	引言	(118)
3.3.1.2.2	CRUD 的还原溶解	(120)
3.3.1.2.3	试剂制备	(120)
3.3.1.2.4	试剂的贮存	(121)
3.3.1.2.5	去污程序	(122)
3.3.1.2.6	CRUD 的溶解反应	(124)
3.3.1.2.7	试剂的耐辐照性能	(125)
3.3.1.2.8	母材的腐蚀	(127)
3.3.1.2.9	LOMI 去污法的优点和存在问题	(129)
3.3.1.2.10	实用举例	(129)
3.3.1.3	POD 与 NP-LOMI 法	(132)
3.3.1.3.1	本去污法的特点	(132)
3.3.1.3.2	去污剂的组成及去污过程	(132)
3.3.1.3.3	POD 法去污试验	(134)
3.3.1.3.4	NP-LOMI 法去污试验	(141)
3.3.1.3.5	去污废液处理	(145)
3.3.1.4	NS-1 法	(146)
3.3.1.4.1	引言	(146)
3.3.1.4.2	NS-1(D)去污法的特征	(147)
3.3.1.4.3	NS-1(D)去污法的概要	(147)
3.3.1.4.4	离子交换处理	(148)
3.3.1.4.5	NS-1(D)去污剂	(148)
3.3.1.4.6	用 NS-1(D)法进行去污	(150)
3.3.1.4.7	NS-1 对燃料棒的腐蚀试验	(153)
3.3.1.4.8	NS-1 与燃料芯块的反应试验	(154)
3.3.1.4.9	γ 照射对 0.7wt%NS-1 的影响	(154)

3.3.1.5 KURI-DECON 法	(155)
3.3.1.5.1 引言	(155)
3.3.1.5.2 开发 KURI-DECON 的思路	(155)
3.3.1.5.3 KURI-DECON 系列去污剂概要	(155)
3.3.1.5.4 KURI-DECON 系列去污剂的特性	(156)
3.3.1.5.5 KURI-DECON 系列去污剂的应用实绩	(162)
3.3.1.6 TURCO 去污法	(163)
3.3.1.6.1 前言	(163)
3.3.1.6.2 去污剂与去污系统	(163)
3.3.1.6.3 废液处理	(166)
3.3.1.6.4 核电厂用去污剂与欧美的使用方法	(167)
3.3.1.6.5 去污剂	(169)
3.3.1.7 还原去污法	(179)
3.3.1.7.1 引言	(179)
3.3.1.7.2 化学去污技术的基本想法与存在问题	(189)
3.3.1.7.3 还原去污法的开发过程及其结果	(181)
3.3.1.7.4 结束语	(189)
3.3.2 物理(机械)去污法	(189)
3.3.2.1 喷射水去污法	(189)
3.3.2.1.1 喷射水去污法概况	(190)
3.3.2.1.2 喷射水去污的设计方法	(194)
3.3.2.1.3 存在的问题与对未来之展望	(198)
3.3.2.2 喷丸处理	(200)
3.3.2.2.1 喷丸处理的原理	(200)
3.3.2.2.2 喷丸设备	(203)
3.3.2.2.3 喷丸材料的种类	(205)
3.3.2.2.4 喷丸法去污	(208)
3.3.2.2.5 今后的课题	(210)
3.3.2.3 超声波法	(213)
3.3.2.3.1 引言	(213)
3.3.2.3.2 超声波清洗的原理与制约清洗效果之诸因素	(213)
3.3.2.3.3 超声波清洗装置与应用方法	(215)
3.3.2.3.4 超声波去污在核设施中的应用	(216)
3.3.2.4 氟利昂法	(222)
3.3.2.4.1 引言	(222)
3.3.2.4.2 氟利昂的物理性质与作为去污液的可行性	(223)
3.3.2.4.3 氟利昂去污的具体应用方法	(229)
3.3.2.4.4 氟利昂去污用例与效果	(232)
3.3.3 物理(机械)去污用去污设备	(235)

3.3.3.1	去污用设备举例(BWR 用).....	(235)
3.3.3.1.1	堆坑与设备坑壁面去污机器人	(235)
3.3.3.1.2	壁面吸附式去污机	(239)
3.3.3.1.3	设备坑底面去污用水下去污机	(240)
3.3.3.1.4	弛压室内表面去污机	(242)
3.3.3.1.5	地面去污机	(243)
3.3.3.1.6	高统胶靴去污装置	(244)
3.3.3.2	反应堆坑的去污	(246)
3.3.3.2.1	水下清扫机	(246)
3.3.3.2.2	壁面刷洗机	(248)
3.3.3.2.3	小车式刷洗机	(249)
3.3.3.2.4	喷射水式燃料清洗装置	(250)
3.3.3.3	蒸汽发生器水室去污装置	(251)
3.3.3.3.1	引言	(251)
3.3.3.3.2	去污原理	(252)
3.3.3.3.3	去污装置的构成	(253)
3.3.3.3.4	去污效果	(255)
3.3.3.3.5	结束语	(256)
3.3.3.4	用刷去污	(256)
3.3.3.4.1	用刷去污的效果	(256)
3.3.3.4.2	刷子的性能	(257)
3.3.3.4.3	去污实验	(258)
3.3.3.4.4	壁面去污装置	(259)
3.3.4	电解抛光法	(265)
3.3.4.1	技术概况	(265)
3.3.4.1.1	引言	(265)
3.3.4.1.2	电解抛光去污法的原理	(266)
3.3.4.1.3	电解抛光去污法的实用性	(267)
3.3.4.1.4	以电解抛光技术为中心的金属废物的去污系统	(274)
3.3.4.1.5	去污技术应用时的问题	(278)
3.3.4.2	技术开发之原委	(280)
3.3.4.2.1	巴特尔西北实验室的开发情况	(280)
3.3.4.2.2	其他的开发研究情况	(284)
3.3.4.2.3	美国电解抛光去污实绩	(287)
3.3.4.2.4	日本电解抛光去污实绩	(289)
3.3.4.3	基本原理	(292)
3.3.4.3.1	电解抛光的基本概念	(292)
3.3.4.3.2	电解抛光的机理	(293)
3.3.4.3.3	电解抛光面的特性	(294)

3.3.4.3.4	电解抛光技术应用实例	(297)
3.3.4.4	去污系统	(298)
3.3.4.4.1	引言	(298)
3.3.4.4.2	电解抛光去污技术的种类	(299)
3.3.4.4.3	电解抛光去污法的特征	(299)
3.3.4.4.4	电解抛光去污的施工方法	(302)
3.3.4.4.5	电解抛光去污法的应用对象	(303)
3.3.4.4.6	结束语	(305)
3.3.4.5	稀硫酸法	(305)
3.3.4.5.1	引言	(305)
3.3.4.5.2	通过基础试验进行比较	(306)
3.3.4.5.3	去污验证试验	(307)
3.3.4.5.4	工程规模验证试验	(308)
3.3.4.5.5	与磷酸体系电解液之比较	(309)
3.3.4.5.6	结束语	(310)
3.3.4.6	电化学机械复合抛光法(ECB法)	(310)
3.3.4.6.1	引言	(310)
3.3.4.6.2	电化学机械复合抛光法的原理	(310)
3.3.4.6.3	加工特性	(315)
3.3.4.6.4	电化学机械复合抛光法的系统与装置	(317)
3.3.4.6.5	核领域中的应用	(318)
3.4	各类设施的去污	(321)
3.4.1	发电堆的去污	(321)
3.4.1.1	沸水堆	(321)
3.4.1.1.1	去污的必要性与地位	(321)
3.4.1.1.2	去污方式的选择	(321)
3.4.1.1.3	去污技术实施现状	(322)
3.4.1.1.4	放射性去污技术今后的发展方向	(324)
3.4.1.2	压水堆	(326)
3.4.1.2.1	去污在各种降低受照剂量措施中的地位	(326)
3.4.1.2.2	压水堆核电厂去污的现状	(327)
3.4.1.2.3	反应堆腔超声波去污实证试验	(335)
3.4.1.2.4	关于去污的课题与今后的动向	(336)
3.4.2	放射性废物处理设施的去污	(337)
3.4.2.1	引言	(337)
3.4.2.2	废物处理系统概况	(337)
3.4.2.3	主要去污对象	(338)
3.4.2.4	去污方法	(339)
3.4.2.5	放射性废物处理系统设备的系统去污	(339)

3.4.2.6 去污废液的处理	(342)
3.4.2.7 结束语	(346)
3.4.3 后处理设施的去污	(347)
3.4.3.1 后处理工序概况	(347)
3.4.3.2 后处理设施的去污	(347)
3.4.3.3 后处理设施的去污经验	(351)
3.4.3.4 动燃东海村后处理厂去污	(358)
第四章 海外动向	(362)
4.1 引言	(362)
4.2 阿杰斯塔(Agesta)堆的去污计划	(362)
4.2.1 去污计划的程序	(362)
4.2.2 对去污工艺的要求	(362)
4.2.3 关于阿杰斯塔堆	(362)
4.2.4 第1期:对去污方法的研究开发	(363)
4.3 德累斯顿一号堆去污计划	(369)
4.4 三里岛2号堆(TMI-2)的去污计划	(372)
4.4.1 引言	(372)
4.4.2 TMI-2 的现状	(373)
4.4.3 TMI-2 一回路冷却剂系统的去污程序	(374)
4.5 其他动向	(377)
4.6 结束语	(378)

第一章 总 论

1.1 引 言

近年来,国内外对退役技术日益关心。人们从很久以前就使用“去污”这一术语,这一术语中并没有多少“新技术”的意思。从核电厂到使用放射性同位素的实验室,由放射性核素引起的污染形式极其多种多样。人们将清除这类污染的工作统称为去污。因此,不管是清除滴在实验室地板上的放射性同位素溶液,还是采用特殊的去污剂将蓄积在反应堆一回路的放射性核素溶解去除,同样都被称之为去污。前者是日常进行的工作,是从我们开始使用放射性同位素之时起就采用的积累了大量经验的操作。相反,后者要求对结合力更强的大范围污染系统地进行去污,也许可将其称之为新技术。本书所述主要属于后者。本书试图以核电站为中心,包括核燃料后处理等核设施,对其污染之系统去污技术的开发现状及存在问题加以汇总。

如上所述,虽然笔者认为日常的去污操作和去污技术在术语使用方面应划定一个明确的界限,但其区别未必很明确,这一不甚明确之处,正是去污技术的主要特征所在。其原因之一,例如核电站所产生的污染就是多种多样的,从一回路管道内结合力强的污染到地板、墙壁表面等结合力弱的污染,当前不仅仅对前者,而且对后者的去污也逐渐得到一定程度的重视。此外,如果我们看一下几种去污方法,包括现在正在开发的方法,可见其原理与日常的去污操作是相同的,但多将其规模扩大并已系统化。这样,为应付多种形式的污染,要求采用多种形式的去污措施,是去污技术的一大特征。

反应堆一回路的去污,其技术上的难度与反应堆运行管理的关系十分密切,可以认为在多种去污技术开发中,反应堆的运行管理是最为重要的因素。从世界范围来看,目前的技术开发工作也均以此为焦点。本书的核心也在于此。一回路的放射性污染的产生和蓄积,与管道内表面的腐蚀过程关系密切,与单纯的表面沾污相比,其去除要困难得多。并且由于堆型及水质管理方面的不同,放射性核素的沉积情况也有很大差异。为切实有效地进行去污,对污染状况和污染过程的了解无疑是极其重要的。虽然目前世界各国都在积极努力,但很难说对一回路冷却系统放射性核素的迁移及其蓄积的机理已有足够的认识。特别是金属表面的氧化膜的细微构造和其中的放射性核素的存在状态是与去污过程紧密相关的问题。当前,随着表面分析技术的发展,刚刚开始积累数据,恐怕可以说这是我们的认识极为贫乏的领域之一。

目前对去污技术的最大要求就是降低人员受照剂量。例如,在核电厂,工作人员受照剂量的大部分与停堆时进行的定期检查等维护管理作业有关。所以,若在反应堆停堆后立即对一回路管道、机器进行去污,将对降低工作人员的受照剂量作出极大贡献。但是,去污仅仅转换污染的形态,并不从本质上消除污染。去污虽然可将管道表面的污染转移到离子交换树脂与废液中,尽管其形态与发生量会有差异,但去污过程中肯定会产生二次废物。因此,作为降低人员受照剂量的措施,单纯依赖去污技术并不是为人们称道的方向,而应同时努力从根本上断绝污染源的产生。但这绝不意味着不需要去污技术。根绝污染的产生是非常困难的,至少,若不考虑

代价-效益(Cost effective)的话,将最大限度降低污染源的努力与去污技术有机结合,力求降低人员受照剂量,也许可以说是最合理的。

从上述观点出发,在本书中,将对反应堆一回路冷却剂系统中放射性核素的积累机理、氧化膜的构造,核电站中的去污予以说明,此外,对其它降低受照的措施也将进行论述。

1.2 反应堆一回路的水化学

1.2.1 放射性核素的蓄积

在商用核电厂,随着反应堆运行年数的增长,工作人员的受照剂量呈增加的趋势。图 1-1 所示为美国平均一个核电厂年平均受照剂量随时间的变化情况^[1]。

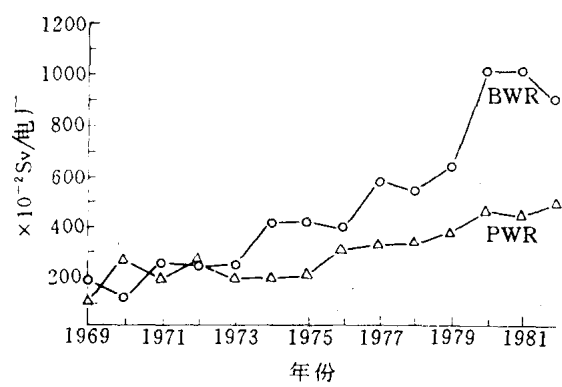


图 1-1 美国商用核电厂年受照射剂量当量历年变化^[1]
(1rem=10⁻²Sv)

就年受照剂量当量来说,沸水堆(BWR)电站最近一二年呈降低的趋势,但总体看来,压水堆(PWR)、沸水堆电站均呈渐增的趋势。日本的历年变化情况与美国极为相似。该受照剂量的大部分与定期检查等维护管理操作有关。

图 1-2 所示为日、美几个有代表性的沸水堆在停堆时一回路冷却系统再循环管道表面的剂量率的逐年变化情况。剂量率的增加趋势因核电厂的不同而有很大差异。多数核电厂在运行数年后表面剂量率呈饱和趋势。但也有看不到这种饱和趋势,即存在其剂量率一味增加,达到很高剂量率的核电厂。

图 1-3 所示为典型的压水堆及沸水堆电厂中对管道表面剂量率有贡献的放射性核素的比例^[2]。不论在什么核电厂,对剂量率贡献大的都是 Co。在图 1-3 所示的压水堆中,⁵⁸Co 的贡献高于⁶⁰Co。但随着运行年限的增长,⁶⁰Co 的相对贡献呈增加趋势。在沸水堆电厂,⁶⁰Co 的贡献占压倒优势。其他有贡献的核素是⁵⁹Fe,⁵⁴Mn 等。上述趋势在许多电厂是共同的。这些核素的生成反应示于表 1-1。

正如此表所示,这些核素都是结构材料因腐蚀而析出的微量腐蚀产物在堆芯经中子照射后的活化产物。近年来,燃料包壳的质量明显提高,因此,几乎再未见到因核裂变产物从燃料包壳针孔泄漏而使剂量率提高的事件。

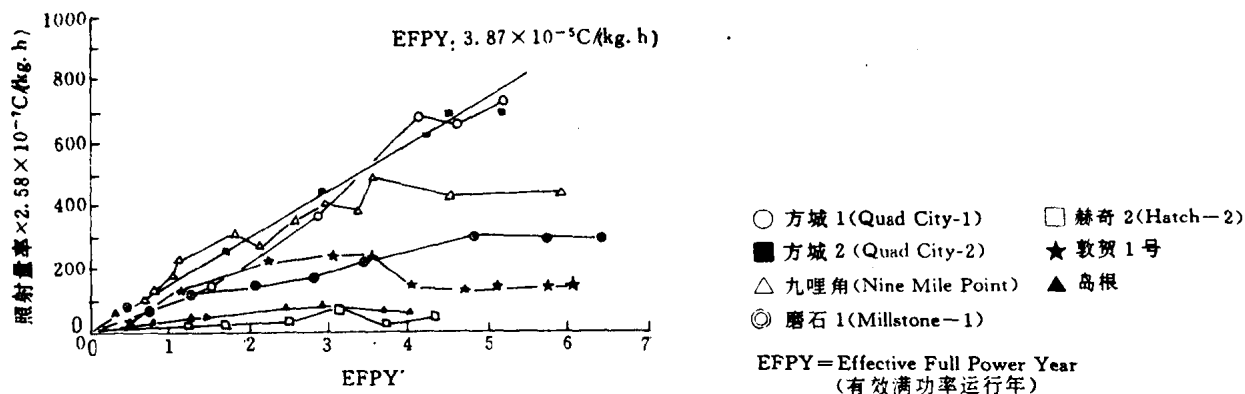


图 1-2 日美两国的 BWR 核电厂中管道表面照射量率随运行年的上升情况
 $[1\text{mR/h} = 2.58 \times 10^{-7} \text{C/(kg.h)}]$

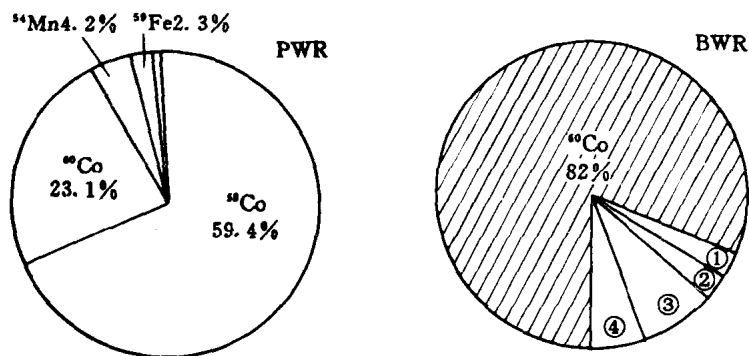


图 1-3 对轻水堆管道表面剂量率有贡献的典型核素^[2]
 ①¹⁰³Ru 等(2.2%); ②⁵⁹Fe(2.3%); ③⁵⁴Mn(7.7%); ④⁵⁸Co(5.8%)。

表 1-1 放射性核素的生成

核 素	半 衰 期	生 成 反 应
⁶⁰ Co	5.3a	⁵⁹ Co(n, γ)
⁵⁸ Co	72d	⁵⁸ Ni(n, p)
⁵⁹ Fe	45d	⁵⁸ Ni(n, γ)
⁵⁴ Mn	310d	⁵⁴ Fe(n, p)
⁵¹ Cr	28d	⁵⁰ Cr(n, γ)

根据迄今的研究结果可以认为,结构材料的腐蚀产物被活化后附着于管道表面,其机理①大体上如图 1-4 所示。

① 原文为“结构”,疑有误。——译者注

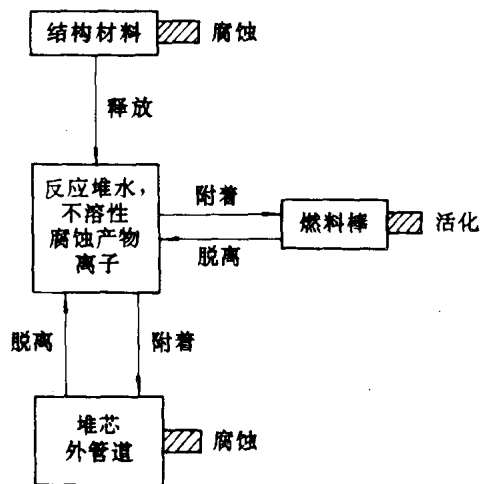


图 1-4 放射性物质在一回路蓄积的机理概要

结构材料析出的微量腐蚀产物被冷却水带到堆芯, 在这里, 它们的大部分附着于燃料表面, 受中子照射后活化。被活化的腐蚀产物的一部分脱离燃料表面, 被带到堆芯外, 吸附并蓄积于管道表面。该放射性的蓄积机理虽然不因堆型的变化而改变, 但各过程的详细机理, 对于压水堆和沸水堆, 则因水质及系统的不同而有很大差异。

表 1-2 为日本压水堆及沸水堆一回路冷却水特性的比较。在压水堆中, 作为化学补偿而添加硼酸, 从抑制腐蚀的观点出发, 添加 LiOH, 以控制其 pH 值。因硼酸浓度随反应堆的运行而变化, 所以堆水的 pH 值可在一定范围内变动, 这是压水堆的一大特征。另外, 为抑制水在堆芯的辐射分解, 添加 H_2 , 这是压水堆的另一特征。这样, 堆水中几乎不存在 O_2 , 反应堆水处于还原状态。与此相反,

在沸水堆, 由于堆芯是沸腾的, 采用添加物来控制堆水环境是困难的, 所以采用堆水纯化措施。因此, 通过极力减少由给水系统带入堆芯的杂质量而对堆水进行控制。但对给水中的 O_2 浓度例外, 最近, 已逐渐清楚, O_2 以某一浓度存在于给水中, 对于抑制给水系统管道因腐蚀而导致铁的析出很有必要。一般认为, 在给水系统中溶解 O_2 浓度的最佳水平为 30~50ppb。因在沸水堆中不添加 H_2 , 在堆芯会发生水的辐射分解, 其结果使堆水中的 O_2 达 200ppb 的水平, 这样, 与压水堆不同, 沸水堆的堆水是氧化状态。

表 1-2 日本 PWR 及 BWR 的一回路冷却水的特性比较

PWR 堆水水质特性			BWR 堆水水质特性		
	标准值	限值		堆水	给水
B, ppm	0~4000	—	电导率, $\mu S/cm(25^\circ C)$	≤ 0.1	≤ 0.1
Li, ppm	0.2(0.7)~ 2.2	2.2	Cl, ppb	≤ 100	*
H_2 , cc/kg(STP)	25~35	15~50	pH (25 $^\circ C$)	5.6~8.6	6.7~7.5
电导率, $\mu S/cm(25^\circ C)$	1~40	—	O_2 , ppb	—	20~200
pH (25 $^\circ C$)	4.2~10.5	—	金属	—	—
O_2 , ppb	<5	<1000	总金属, ppb	—	≤ 15
Cl, ppb	<50	<1500	Cu, ppb	—	≤ 2
F, ppb	<50	<1500			

* 按堆水水质要求控制。

以上详细叙述了压水堆和沸水堆的一回路冷却水的水质及其管理方面的不同, 这些不同点对于如何考虑后述的腐蚀产物的行为与氧化膜的构造有着极其重要的意义。

1.2.2 不溶性腐蚀产物(CRUD)的行为

前节简要说明的放射性核素在一回路的蓄积机理是极其复杂的现象, 尽管各国都在积极