

国外放射性废物最小化丛书 No.6

核设施去污和退役中放射性 废物最小化的方法

METHODS FOR THE MINIMIZATION OF RADIOACTIVE WASTE FROM DECONTAMINATION AND DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES

李廷君 孙东辉 等译



原子能出版社

国外放射性废物最小化丛书 No. 6

核设施去污和退役中 放射性废物最小化的方法

李廷君 孙东辉 等译
孙东辉 杨建文 校

原子能出版社

技术报告丛书 No. 401

核设施去污和退役中 放射性废物最小化的方法

国际原子能机构
维也纳 • 2001

图书在版编目(CIP)数据

核设施去污和退役中放射性废物最小化的方法/国际
原子能机构著;李廷君等译. —北京:原子能出版社,
2010.4
ISBN 978-7-5022-4874-1

I. 核… II. ①国… ②李… III. ①核设施—放射性去污—
放射性废物处置—研究 ②核设施—退役—放射性废物处置—
研究 IV. TL94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 066651 号

内 容 简 介

本书为 IAEA 出版的技术报告丛书第 401 号。书中介绍了核设施退役阶段的划分、退役产生的废物源项和特性;核设施退役和拆除技术的选择;退役中实施废物最小化的基本原则和需要考虑的因素;为实现废物最小化所开展的研发工作。

本书可供项目管理人员、工程设计人员和厂矿企业的技术人员参考。

核设施去污和退役中放射性废物最小化的方法

总 编 辑 杨树录
责任编辑 孙凤春
责任校对 冯莲凤
责任印制 丁怀兰 潘玉玲
印 刷 保定市中国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 7.625 字 数 190 千字
版 次 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-4874-1 定 价 32.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

国外放射性废物最小化丛书

编审委员会

潘自强 刘森林 刘福东 杨建文 徐勇军 崔安熙 黄 勃

《核设施去污和退役中放射性废物最小化的方法》

译校人员

翻译 李廷君 孙东辉 岳会国 吕希强 鲍 芳 都湘君
校对 孙东辉 杨建文

前言

放射性废物最小化是放射性废物管理的基本原则之一,主管部门和监管部门都很重视。它既涉及环境的安全也与经济效益直接相关。2009年初国家国防科技工业局下达了“放射性废物最小化战略和顶层设计研究”项目,这一计划得到环境保护部(国家核安全局)以及中国核工业集团公司、中国广东核电集团有限公司、中国电力投资集团公司和中核清原环境技术工程有限责任公司的支持。“放射性废物最小化战略和顶层设计研究”总体组由潘自强、刘森林、范仲、李俊杰、马成辉、边慧英、刘建桥、刘振河、刘振领、何文新、李忠镛、李承、陈凌、费洪澄、黄来喜、鲍家斌、程理、潘英杰等组成。

在《放射性污染防治法》中规定“第三十九条,核设施营运单位、核技术利用单位、铀(钍)矿和伴生放射性矿开发利用单位,应当合理选择和利用原材料,采用先进的生产工艺和设备,尽量减少放射性废物的产生量。”在《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB 18871—2002)中规定“8.5.1 注册者和许可证持有者应确保在现实可行的条件下,使其所负责实践和源所产生的放射性废物的活度与体积达到并保持最小。”这些法律和标准对放射性废物最小化提出了原则和要求。为了贯彻执行这一原则和要求,有必要进行深入的研究和分析。

为了借鉴国外放射性废物最小化的经验,项目组组织了对国外有关废物最小化文献的编译工作,并以丛书形式出版。该套丛书共分八册:第一分册《国外一些废物最小化规定与实践》;第二分册《核设施设计阶段废物最小化的考虑》;第三分册《铀尾矿管理和限定的现状》;第四分册《铀纯化、浓缩和燃料制造废物最小化》;第五分册《核电站和核燃料循环后段的放射性废物最小化》;第六分册《核设施去污和退役中放射性废物最小化的方法》;第七分册《放射性废物的最小化和区分》;第八分册《核燃料循环设施废物流中材料与部件的再循环再利用》。上述文献均系放射性废物最小化的基本材料,有些文献是20世纪90年代初出版的,但仍然有较大参考价值。文献翻译得到了国际原子能机构和有关单位的支持,在此表示衷心的感谢。

序

在许多的 IAEA 成员国中有大量的核设施在不远的将来将退役,因此核设施退役已成为一个非常重要的课题。退役和去污过程会产生大量的放射性材料,且种类繁多,这些放射性材料可以作为废物,或者当这些材料还有经济价值时,可以进行再循环或再利用。退役废物的数量可能是巨大的,因而采用合适的最小化策略成为一个非常重要的议题。

正是认识到这一课题的重要性,IAEA 决定编制一份技术报告,回顾核设施退役和去污中减少废物产生的已有实践。本报告对选择废物最小化策略时需要考虑的原则和因素进行了分析,例如技术的开发程度或可用性,国家政策和法规,技术方法和经济性考虑。本报告的首要目的是在退役过程中规划和实施退役废物最小化大纲时,明确(识别)决策过程中所有的重要阶段和组成部分。

IAEA 对所有参与准备这份报告的人员表示感谢,尤其感谢参与了报告起草全程工作的比利时的 L. Teunckens 先生。IAEA 负责该报告的官员是核燃料循环和废物技术处的 V. M. Efremenkov 先生。

编者按

尽管对本出版物中所含的信息已尽最大可能保证其准确性,但不论 IAEA 还是成员国,都不对使用本出版物所可能引起的后果负有任何责任。

在文中使用的国家或地区的名称并不表达出版者(IAEA)对这些国家或地区、其当局和机构、或其疆界的法律地位有任何看法。

文中提及特定公司或其产品或商标并不表示国际原子能机构对它的认可或推荐。

目 录

1 引 言	(1)
1.1 背 景	(1)
1.2 目 标	(1)
1.3 范围和结构	(2)
2 退役策略,退役和去污产生的放射性材料的来源和特性	(3)
2.1 核设施退役的分级	(3)
2.2 退役策略	(3)
2.3 去污和拆除产生的产物	(6)
3 核设施退役和拆除技术的选择	(9)
3.1 定义和总体考虑	(9)
3.2 去污的理由以及维修与退役采用的去污技术的比较	(10)
3.3 去污技术的选择	(11)
3.4 退役去污技术	(12)
3.4.1 为分割部件所选择的退役技术的特点	(12)
3.4.2 为建筑物表面所选的去污技术的特点	(13)
3.5 选择拆除技术的考虑因素	(15)
3.6 退役中使用的拆除技术	(15)
3.6.1 热和电热切割技术	(15)
3.6.2 切割和分裂的机械系统	(16)
4 废物最小化的基础	(17)
4.1 基本原则	(17)
4.1.1 放射性废物产生的控制	(17)
4.1.2 污染的预防	(17)
4.1.3 材料的再循环和再利用	(17)
4.1.4 放射性废物体积的减小	(18)
4.2 基本原则的实际应用	(18)
4.2.1 运行文化	(18)
4.2.2 行政控制和管理推动	(19)

4.2.3	避免产生放射性材料的技术因素	(19)
4.2.3.1	装置的设计	(19)
4.2.3.2	材料的选择	(20)
4.2.3.3	装置和系统的维护	(20)
4.2.3.4	清洁度和去污	(20)
4.2.4	退役期间材料的特性鉴定和分类	(20)
4.2.5	测量技术和基础设施	(21)
4.2.6	材料的解控	(22)
4.2.7	废物减容的工艺/处理	(24)
4.2.7.1	废物处理的要求	(24)
4.2.7.2	整备后废物的运输、贮存和处置	(25)
5	退役过程中影响废物最小化的因素和限制	(26)
5.1	介绍	(26)
5.2	影响废物最小化的因素	(26)
5.2.1	废物最小化技术的可行性/可用性	(26)
5.2.2	经济因素	(27)
5.2.3	应用于解控实践的辐射防护因素	(27)
5.2.4	国家政策、法规趋势,公众接受和法律责任	(29)
5.2.4.1	国家政策	(29)
5.2.4.2	公众接受	(29)
5.2.4.3	法律责任	(30)
5.2.5	处置方案:有效性和局限性	(30)
5.2.6	危害和风险	(30)
5.3	基于影响再循环和再利用因素作出决定的方法论	(31)
5.4	退役过程中废物最小化影响因素的相互关联:总体最优化	(32)
6	退役和去污中废物最小化的未来发展	(34)
6.1	引言	(34)
6.2	在核设施设计阶段考虑退役和去污中废物最小化	(34)
6.3	减少污染问题的方法	(35)
6.3.1	厂房和设备布置	(35)
6.3.2	部件的选择	(36)
6.3.3	减少泄漏和杂质沉积	(37)
6.3.4	质量控制	(37)
6.3.5	限制腐蚀	(37)
6.3.6	减少污染扩散	(38)

6.4	便于去污的方法	(38)
6.5	便于拆毁和分割的方法	(38)
6.5.1	尽量少用有害物质	(39)
6.5.2	改进布置	(39)
6.5.3	预先设置拆除手段	(39)
6.5.4	屏蔽	(39)
6.5.5	连接件	(40)
6.5.6	文件和计划	(40)
6.6	退役和去污技术的开发和改进	(40)
6.6.1	去污技术的开发和改进	(40)
6.6.2	拆除技术的开发和改进	(41)
6.6.3	测量技术的开发和改进	(42)
6.7	监管方法的开发和改进	(43)
7	结 论	(45)
附录 I	退役去污技术	(47)
I.1	化学去污	(47)
I.1.1	概 述	(47)
I.1.2	去污废液	(48)
I.1.3	选择合适的化学去污技术	(49)
I.1.4	优 点	(50)
I.1.5	缺 点	(50)
I.2	电化学去污	(50)
I.2.1	概 述	(50)
I.2.2	化学试剂	(51)
I.2.3	二次废物的产生	(51)
I.2.4	选择合适的电化学去污技术的指导方针	(51)
I.2.5	优 点	(52)
I.2.6	缺 点	(52)
I.3	设备和部件的机械去污	(52)
I.3.1	概 述	(52)
I.3.2	喷砂去污系统	(54)
I.4	用于建筑物去污的机械技术	(54)
I.4.1	耙 松	(54)
I.4.2	针剥落	(54)
I.4.3	粗 琢	(55)

I. 4. 4	混凝土刮削	(55)
I. 4. 5	液压/气动锤打	(56)
I. 4. 6	粉尘收集	(56)
I. 5	熔炼去污	(56)
I. 5. 1	概 述	(56)
I. 5. 2	目前的熔炼实践	(57)
I. 5. 3	熔炼作为一种去污技术的优点	(57)
I. 6	其他去污技术	(58)
附录 II	退役用的拆除技术	(60)
II. 1	混凝土的切割和拆毁技术	(60)
II. 1. 1	控制爆破	(60)
II. 1. 2	球锤和扁锤	(62)
II. 1. 3	反向铲式冲头	(62)
II. 1. 4	火焰切割	(62)
II. 1. 5	铝热反应刀	(63)
II. 1. 6	劈石机	(63)
II. 1. 7	膨胀灰浆	(63)
II. 1. 8	金刚石或碳化物圆盘锯	(64)
II. 1. 9	连续钻孔	(64)
II. 1. 10	取芯钻孔	(64)
II. 1. 11	爆炸切割	(64)
II. 1. 12	激光切割	(65)
II. 1. 13	磨料水喷射切割	(65)
II. 1. 14	线锯切割	(66)
II. 2	金属部件的分割	(66)
II. 2. 1	电弧锯切割	(66)
II. 2. 2	热切割技术	(66)
II. 2. 3	铝热反应刀	(69)
II. 2. 4	爆炸切割	(69)
II. 2. 5	激光切割	(70)
II. 2. 6	机械切割装置	(70)
II. 2. 7	摩擦切割器(砂轮切割机)	(70)
II. 2. 8	弓锯和剪断锯	(71)
II. 2. 9	磨料水喷射切割	(71)
II. 2. 10	破裂切割	(71)

II.3 应用拆除技术前需要注意的问题	(71)
附录 III 退役中的测量技术	(73)
III.1 仪器仪表和程序的可用性	(74)
III.1.1 辐射探测设备	(74)
III.1.2 特殊设备	(80)
III.2 通过测量的特性分析	(81)
III.2.1 参照谱	(81)
III.2.2 现场就地测量	(82)
III.2.3 实验室测量	(83)
III.3 其他方面	(85)
III.3.1 质量保证	(85)
III.3.2 记 录	(86)
附录 IV 核设施去污和退役中实现废物最小化策略的方法汇编	(88)
参考文献	(95)
术 语	(104)
参与起草和审定的人员	(108)

1 引言

1.1 背景

对核设施来说,退役是继选址、设计、建造、试运行和运行之后寿期中的最后一个阶段。它包括去污、厂内设备和设施的拆除、建筑物和结构的拆毁及对产生的材料进行管理 etc 工艺过程。所有这些活动均考虑了操作人员和普通公众的健康和安全要求,也考虑了它们对环境产生的任何影响。核设施的退役已成为很多成员国最感兴趣的问题,因为大量的核设施建于多年以前,在不久的将来必须退役。

退役和去污操作将产生各式各样的材料:有些是带有放射性的;有些还有经济价值和/或处于一种可以再循环或再利用的形态。其他没有或几乎没有经济价值的材料,就是废物,必须进行处置,或者如果没有合适的处置方法就必须贮存。不论是处置还是贮存都将使工业部门付出很大的经济代价,并最终会使社会付出经济代价。本文针对退役和去污过程中产生材料最小化、分类、再利用、再循环、贮存和处置,着重阐述与制定适宜的策略有关的原则、要素、经验和未来发展的趋势。它将帮助成员国在规划核设施退役时,可以借鉴其他国家在持续的技术进步中获得的经验。

本文中将废物最小化定义为放射性的产生和扩散的范围最小,以及在退役和去污操作过程中由材料管理而产生的放射性废物的体积最小,同时考虑安全 and 经济因素使之满足可合理可行尽量低(ALARA)的水平。这包括使它们对环境的影响最小和减少总的退役和去污费用。

应该考虑最终目标,即退役和去污操作的最终“产品”是场址、设施、装置或材料用于其他用途时,可以无条件解控或再利用。退役和去污的中间产品可以是拆除的设施或装置,或者是经过去污允许其解控或可再用于其他核领域的材料。不能有条件或无条件解控或再利用的材料和必须作为放射性废物处理的材料,可看作是退役和去污过程的副产品。因此,本文中废物最小化可以视为尽可能避免产生那些不需要的副产品的一种策略。如果副产品不可避免,就需要采取措施来减小它们的体积。

1.2 目标

本文的目标是为成员国和他们的决策者(从监管者、战略家、规划和设计者到运行者)提供可以减少核设施退役和去污中产生的放射性废物可能性的相关信息。这样可使废物最小化方案作为国家、场址和工厂废物管理政策的一部分进行正确的规划和评估。

这一目标将通过以下途径实现:审查退役和去污活动产生的放射性材料的来源和特性;审查废物最小化原则和目前实际应用情况,在审查中应同时考虑影响废物最小化实践的监管、技术、财政和政策等因素;审查在退役和去污期间改进废物最小化实践的当前趋势。

本文也将涉及其他 IAEA 出版物中论述的放射性废物最小化问题,相关出版物如下:

- (1) 核燃料循环的前段^[1];

- (2) 核电厂及核燃料循环的后段^[2]；
- (3) 核燃料循环设施产生的放射性污染材料的再循环和再利用^[3]；
- (4) 研究堆退役技术^[4]；
- (5) 非反应堆核设施退役^[5]；
- (6) 固体材料中放射性核素的清洁解控水平^[6]。

1.3 范围和结构

本文的范围包括讨论整个核工业退役和去污活动产生的所有非燃料(non-fuel)放射性材料的废物最小化。包括被中子辐照的活化材料,也包括由于与放射性物质接触而污染的材料。

本文的第2章确定了与退役和去污相关的策略、方法和技术问题,描述了在这些活动过程中产生的材料的来源和特性。第3章是核设施去污和拆除技术的概述和总体考虑。第4章描述了废物最小化原则及其实施。第5章讨论退役中与考虑废物最小化方案有关的因素,以及它们对实现再循环或解控退役中产生的材料的意义。同时考虑前几章确定的策略的、技术的、政策的、监管的、经济的和其他限制因素。第6章描述在材料选择、退役和拆除方法方面,以及在支持废物最小化的监管方法方面的未来发展趋势。最后,第7章是本文的结论。此外,附录I、II和III包含去污、拆除和退役操作产生的材料的放射性特性方面的技术资料。附录IV是核设施退役和去污中实施废物最小化策略的方法的总结。

应该强调的是本文的目的是为了在决策过程中给予帮助,而不是规定,使废物最小化成为全部退役策略的一个组成部分。

2 退役策略,退役和去污产生的放射性材料的来源和特性

2.1 核设施退役的分级

在其他 IAEA 出版物中定义了退役的三个基本级别^[7-9],其中乏燃料、工艺废液和运行废物的去除通常属于退役前的活动。这些定义主要应用于反应堆设施的退役。对某些核设施只能采用有顺序退役级别的总原则。因此,如后续出版物中所述^[5],三个基本级别的定义已被修改,归纳如下:

(1) 1 级:安全封存监护。

(2) 2 级:大规模的工厂去污,部分拆除并移走工厂系统。场址有限制地解控用于非核用途。

(3) 3 级:工厂去污和拆除达到场址无条件解控用于非核用途。

总的说来,可能的退役策略如下所述:

(1) 最终停止运行后立即全部退役;

(2) 使工厂在安全封存条件下维持几年,然后全面拆除;

(3) 分几步拆除,每一步之前和之后都有适当长的安全封存期。

此外,核设施退役通常通过三个主要阶段实现:

(1) 在必要或可行的地方进行清洗和初步去污;

(2) 拆除、移走系统和设备,并进行适当去污;

(3) 建筑物和结构的拆毁或再利用(有条件或无条件)。

总之,原来定义的三个级别与上述的三个阶段没有必要有任何联系。然而,取决于特定项目采用的方法,任何阶段都包含安全封存期的相互交叉。

选择退役策略主要基于技术、安全、监管和费用几个方面,需要考察各种可能的方法,同时比较每一种方法的优点和缺点。一个国家核能发展的总政策及其特定的废物管理政策是选择退役策略决策过程中的主要因素。

考虑了这些一般要求、退役设施的规模和类型以及所选择的退役策略,退役操作将产生不同种类和数量的污染材料(它们的特性、数量、产生率等都会不同)。对于每一种方案都有必要考虑减少需要贮存和处置的废物的放射性活度和体积,也要减少对环境的影响以及减少污染材料的总管理费用。因此,退役活动所选择的策略和技术对废物的最小化有很大的影响,在选择合适的方案时需要考虑到这一点。

2.2 退役策略

当决定最终关闭核装置或规划实施最终关闭操作时,必须制定一套策略、战术和技术方案。适宜的、相关的废物最小化和废物管理是所有这些重大方案的重要组成部分^[10]。实际上,这三种方案都是互相联系的,并出现在研究和讨论的反复过程中。选择和实施退役策略

的决策过程见表 1。

退役策略决策指确定全面拆除装置的最佳时间和在完全拆除前确定 2.1 节中划分的各阶段。在审查各种可能方法的基础上,必须进行充分的选择,比较每一种方案的优点、缺点和费用,并考虑国家的退役和废物管理政策^[7,11]。这应该包括:

- (1) 官方部门的责任;
- (2) 控制核安全和辐射防护的相关法规(包括组织和程序);
- (3) 雇佣法规/法律和工业安全规范;
- (4) 社会和经济因素。

在选择退役策略的过程中,应该考虑下列技术、监管、经济和社会因素,其中有些因素是废物最小化策略的主要组成部分:

(1) 最终关闭后装置的材料状态。这包括设备、结构和包容系统的老化状态的评价;为其长期的变化留出余量。材料状态决定维护、监督和检查所需的要求,使材料在规定时间内能保持在安全关闭状态,避免设备、结构和包容系统破坏,减少污染的扩散,防止退役和去污在后一阶段变得更加困难。

(2) 装置的辐射状态。包括评价退役工作开始后或在等待期间的潜在危害。这可以指导选择废物管理和废物最小化方案。

(3) 核安全和辐射防护方面的限制、工业安全和相关风险分析可以评价最佳防护的手段,评价放射性优化方法,确定维护、检查、监测和监督要求。还需考虑设备、结构和包容系统可能的破坏情况,以及尽量减少污染的扩散和防止退役和去污在后一阶段变得更加困难。

表 1 选择和实施退役策略的决策过程

步骤	需要做的决定	决策中考虑的因素
策略	全部的时间表	不同方法退役的技术和经济调研的决定
	完成前的各阶段	国家退役和退役废物管理政策 技术、监管、经济和社会方面的考虑: — 最终关闭后装置的材料状态 — 最终关闭后装置的放射性状态 — 核安全、防护和工业安全的限制 — 废物管理基础设施的可获得性 — 控制材料再循环和再利用规定 — 与运行、维护、仪表监测和监督有关的服务 — 再利用场址和建筑物以及恢复工厂、设备和材料的可能性 — 是否存在技术资源、专家队伍和地方支持 — 费用和筹资 — 社会因素的考虑,公众的理解