

国外放射性废物最小化丛书 NO.2

核设施设计阶段废物最小化的考虑

CONSIDERATIONS FOR WASTE MINIMIZATION AT THE DESIGN STAGE OF NUCLEAR FACILITIES

马鸿宾 赵 卷 等译



原子能出版社

国外放射性废物最小化丛书 No. 2

核设施设计阶段 废物最小化的考虑

马鸿宾 赵 卷 都湘君 武毓勇 胡 蓉 颜迎春 译
张 威 杨建文 校

原子能出版社

技术报告丛书 No. 460

核设施设计阶段 废物最小化的考虑

国际原子能机构
维也纳 • 2007

图书在版编目(CIP)数据

核设施设计阶段废物最小化的考虑/国际原子能机构

著;马鸿宾等译. —北京:原子能出版社,2010.3

ISBN 978-7-5022-4820-8

I. 核… II. ①国… ②马… III. ①核设施—设计—研究
②核设施—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 031072 号

内 容 简 介

IAEA 这份技术报告中确定和阐明了在核设施设计阶段对拆除、去污和废物管理应进行的一些考虑,以实现未来产生废物的最小化,使将来的退役工作更容易,优化退役和运行废物及材料的管理。该报告对于从事核设施退役和放射性废物管理的相关监管、管理、设计、建造和运行人员均有很好的指导意义。

核设施设计阶段废物最小化的考虑

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 6.375 字 数 160 千字

版 次 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4820-8 定 价 25.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 68452845

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

《核设施设计阶段废物最小化的考虑》

译校人员

翻译 马鸿宾 赵 卷 都湘君 武毓勇 胡 蓉 颜迎春
校对 张 威 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国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、李忠镝、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》(GB18871—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

在对多年前设计和建造的核设施进行退役的时候,发现了一些与废旧设备拆除以及所产生的材料和废物管理相关的问题。已对老设施退役期间用到的技术进行了广泛的研究、开发和分析,并且对运行和退役废物的数量和特性进行了评价。已积累了相关废物和材料的退役与管理的实际经验。分析表明,如果在核设施的设计阶段就对拆除、去污和管理进行正确的考虑,能够使这些操作得到很好的优化。在设计阶段,对废物最小化、废物管理和退役进行考虑,会影响到核设施运行期间及核设施停运后管理的经济性和安全性。

正是意识到这一主题越来越高的重要性,国际原子能机构推出了这份报告,目的是确定和阐明在核设施设计阶段需要考虑的相关问题,以能够实现未来产生废物的最小化,使将来的退役工作更容易,优化退役和运行废物及材料的管理。国际原子能机构谨对参与各项咨询及技术会议和为准备这份报告提供帮助的人士表示感谢。尤其感谢参与了报告起草全过程工作的比利时的 L. Teunchens 先生和德国的 L. Valencia 先生。

IAEA 负责该报告的官员是核燃料循环与废物技术处的 V. Efremenkov 和 Z. Drace 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,但不管是 IAEA 还是成员国,将不对使用本出版物所可能引起的后果负有任何责任。

使用某些国家或领土的特定名称并不意味国际原子能机构作为出版者对这类国家或领土、其当局和机构或其边界划定的法律地位作出任何判断。

文中提及具体公司或其产品(无论是否表明已注册)或商标并不表示国际原子能机构对它的认可或推介。

作者对国际原子能机构获得受版权保护的资源中的相关材料的复制、翻译或使用的许可负责。

目 录

摘 要	(1)
1 引 言	(3)
1.1 背 景	(3)
1.2 目 的	(3)
1.3 范 围	(4)
1.4 结 构	(4)
2 核设施运行和退役期间产生的废物类型与废物量	(5)
2.1 前 言	(5)
2.2 核设施内低中放废物的产生	(7)
2.2.1 核燃料设施产生的废物	(7)
2.2.2 核电站运行产生的废物	(10)
2.2.3 乏燃料后处理产生的废物	(13)
2.2.4 来自核设施去污和退役的废物	(14)
2.2.5 包括研究实验室在内的公共机构设施和工业设施的废物	(17)
2.3 混合废物流	(18)
3 废物最小化的方法学	(19)
3.1 废物最小化的目标	(19)
3.2 废物最小化方案	(19)
3.2.1 控制放射性废物的产生	(19)
3.2.2 防止活化/污染	(20)
3.2.3 材料的再利用与再循环	(20)
3.2.4 减少放射性废物体积	(21)
4 废物最小化的设计方案考虑	(23)
4.1 前 言	(23)
4.2 污染问题最小化的考虑	(24)
4.2.1 建筑物和设备的布置	(24)
4.2.2 部件的选择	(28)
4.2.3 减少表面污染	(32)
4.2.4 减少泄漏和集污点	(33)
4.2.5 质量控制	(34)

4.2.6	限制腐蚀	(34)
4.2.7	最小化污染扩散	(34)
4.3	方便去污的手段	(35)
4.4	方便拆除和解体的手段	(36)
4.4.1	有害材料使用的最小化	(36)
4.4.2	附加的方便拆除的厂房布置要求	(36)
4.4.3	预先设置拆除辅助措施	(37)
4.4.4	屏蔽	(37)
4.4.5	连接件	(39)
4.4.6	大型部件的整体移出	(39)
4.4.7	文件化	(39)
4.4.8	规划	(41)
4.5	去污和退役技术的开发和改进	(42)
4.5.1	去污技术的开发和改进	(42)
4.5.2	拆除技术的开发和改进	(43)
4.5.3	测量技术的开发和改进	(44)
4.5.4	简化废物管理的进展	(45)
4.5.5	安全封存和延迟拆除的设计	(49)
4.6	监管方法的开发和改进	(50)
4.7	用于废物最小化的核设施设计基本导则	(51)
5	结论	(57)
	参考文献	(59)
	附件	(66)
	术语表	(91)
	起草和审查人员	(92)

摘 要

该报告确定和概述了在核设施的设计阶段需要考虑的议题,以使未来产生的废物最小化,使退役工作更加便利,并优化退役和运行时产生的废物及材料的管理。已对老的核设施退役期间用到的技术进行了广泛的研究、开发和分析,并对运行和退役时废物的产生量和特性进行了评价。也已积累了退役以及相关废物与材料管理的实际经验。分析表明,如果在核设施的设计阶段就对设施的拆除、去污,以及对所产生的废物的管理进行考虑,就能够使这些方面得到很好的优化。在设计阶段对废物最小化、废物管理和退役进行考虑,会对核设施运行以及运行后管理的经济性和安全性产生影响。由于认识到该议题对于成员国日益增长的重要性,国际原子能机构本着确定和概述这些议题的目的推出了这份报告。

方 法

本报告针对核设施和其他处理放射性材料的设施讨论了一些可选方案,旨在优化他们在运行和退役期间对于废物的管理,并便于其安全、有效和及时的退役。这些选项包括设施及其部件布置的考虑、结构材料与部件的选择、维护和支持活动、废物最小化措施、废物管理方案、材料回收与再利用,以及文件和记录的保存。

所讨论的原则适用于所有类型和级别的涉及放射性材料的核设施的设计与运行,以及现有厂房的改造。理论上,在任何核设施运行期间也要考虑这些原则,以便于将来的退役,并且避免或减少产生难以处理和处置的废物形式。

内 容

关于废物产生的最小化,提出一些方案供设计新设施,改进现有设施,或确定未来去污与退役(D&D)操作时考虑。这些方案归纳如下:

- (1) 最小化污染问题的考虑;
- (2) 便于去污的措施;
- (3) 便于拆除与解体的措施;
- (4) 文件化和设计一个记录保存系统;
- (5) 退役计划;
- (6) D&D 技术的开发与改进;
- (7) 监管方法的开发与改进;
- (8) 核设施废物最小化的设计基准的指导方针。

在附件中对核燃料循环的前段和后段相关核设施给出了综述,包括各种动力堆、研究堆、临界装置、研究工作实验室和热室,以及废物管理设施。

结 论

本报告通过总结迄今为止成员国在核设施运行与退役过程中得到的经验,给出了一些结论。虽然核设施的设计水平会继续发展和成熟,此处确定的废物最小化方案依然适用于所有新的核设施,可在新核设施的设计、申请许可证和运行期间,以及现有核设施的改造时作为清单对照使用。详细的结论在本报告的第 5 部分给出。

1 引言

1.1 背景

操作放射性材料的核设施和其他设施,与其他工业设施一样,在生产有用产品的同时也会产出副产品和废物。它们还会产生放射性废物,对这些废物必须妥善处理,以降低其对设施操作人员、公众和环境的潜在危害。任何设施产生副产品和废物的数量及性质,与设施的设计有关,包括布置、采用的工艺和使用的物料(例如在其建造中使用的材料,以及工艺进料)。废物的产生,尤其是有毒和放射性废物的产生,需要尽可能地最小化,这符合作为国际原子能机构安全基本原则第一部分的放射性废物管理原则的第7条原则^[1]。

废物最小化概念可以有不同的解释^[2]。它通常意味着减少废物的总数量,可能包括或不包括减少废物总的放射性。这两者中的任意一种情况,都会简化废物管理并且降低总费用,这都是运营者所感兴趣的。与之相反的是,监管者主要关心控制职业辐照和潜在的环境影响。实际上,通常会在废物最小化获得的利益和费用之间进行权衡。

从各种操作核材料与其他放射性材料的设施中,已积累了大量的关于运行期间放射性废物的产生与管理的经验。在过去的10~15年间,放射性废物的产生量已经有了实质性的减少,尤其是在核电站。废物的减少受益于技术的进步和安全文化与废物最小化文化的提升。

从老的核设施退役和相关废物与材料的管理中也积累了实际的经验。退役活动中发现了各种各样与废物管理有关的问题,其中一些问题,鉴于废物的放射性特性,或由废物化学毒性或其他有害性质带来的风险,而需要特别关注。

这些经验表明,理想的情况是在核设施设计与建造期间就考虑废物的管理和退役。大量的报告和研究都强调了现有核设施退役的费用和复杂性。已通过广泛的研究、开发和分析,来评价在核设施退役与拆除过程中所采用的技术的效果,以及评估已经产生或即将产生的退役废物量。结果表明,在核设施的最初设计阶段或者在设施改进之前考虑运行和退役废物的最小化,能显著降低拆除、去污和相关废物管理的难度,尤其是最疑难废物的管理难度。

新设施的设计者和他们的用户对这些议题需要有一定的认识,包括退役和废物管理的策略与技术。退役工程中所取得的经验教训,对于在未来的设计中创造一种“退役友好”特征的意识是非常有价值的^[3]。

对于那些计划建造或改进核设施的成员国,此经验将特别有益。因为在设施的设计阶段,由于更加重视运行和退役废物的最小化,从而使退役工作能够及时、安全、有效地开展,这些设施将从中受益。

1.2 目的

本报告针对于涉及新核设施设计和运行的各领域专家,包括设计工程师、建造者、业主、

运营者、监管者和主管部门。其目的是确定在核设施与其他操作放射性材料的设施的设计和运行期间应该考虑的方案,以优化运行和退役废物管理,为安全、有效和及时的退役提供便利。

这些方案包括:

- (1) 核设施及其部件的布置;
- (2) 结构材料及其部件的选择;
- (3) 维护和支持活动;
- (4) 废物最小化措施和废物管理方案;
- (5) 材料回收与再利用;
- (6) 文件化和记录保存。

通过总结迄今为止成员国在核设施运行与退役过程中得到的经验,给出了这些废物最小化的方案。虽然核设施的设计水平会继续发展和成熟,但此处确定的废物最小化方案依然适用于所有新的核设施,可在新核设施的设计、申请许可证和运行期间,以及现有核设施的改造时作为清单对照使用。

1.3 范 围

本报告中的信息适用于所有类型和级别的处理放射性材料的核设施的设计和运行。其中的原则也可用于现有核设施的改进,并能够在任何设施运行期间予以考虑,以便为将来的退役提供便利,避免或减少难以处理和处置废物的产生。

本报告也对混合废物流和来自于公共机构、工业、临床、医疗和研究过程中产生的废物进行了评论。尽管对于减少这类设施将来产生的废物量,没有确定什么特殊的措施,但是这些原则对于减少现有废物量是有价值的。

本报告没有详述废物处理和特性鉴定的方法。这些都是其他出版物的议题^[4-6]。

1.4 结 构

该报告第2节对现有核燃料循环中各种主要类型的核设施,在运行和退役过程中产生的废弃材料的类型、数量和来源进行了概述。第3节描述了废物最小化的原则,这些原则考虑了某些装置在实际退役期间所取得的经验。第4节讨论了在新设施设计及未来D&D的开发实践中,需要考虑的方案。第5节对这些方案进行了总结,并提出一些结论。在附录中,对核燃料循环的前段、核电站和核燃料循环后段的典型工艺做了简单的描述。在本书的最后给出了本报告中使用的,但未在国际原子能机构放射性废物管理术语中定义的术语。

2 核设施运行和退役期间产生的 废物类型与废物量

2.1 前言

核电站的发电涉及很多设施的运行,包括:生产燃料的核燃料循环设施(燃料循环“前段”);生产出的核燃料随后被送到核反应堆进行照射,照射之后的乏燃料被送去贮存或进行后处理(核燃料的“后段”);对运行放射性废物进行管理所要求的设施;以及对退役废物进行管理的设施,包括放射性废物处理和处置设施。放射性废物流产生于这些核设施(包括核电站)运行或核设施使用期结束时的退役。

核燃料循环的前段包括铀的提取、转化、浓缩和燃料元件的制造,以及铀/钚混合燃料元件(MOX)的制造。后段包括乏燃料的贮存和/或后处理,以及对由此产生的运行废物的管理^[2,4-8]。核燃料循环路线及物料流程如图 1 所示。

各种非反应堆设施包括一些系统和工艺,它们与建立在反应堆厂址上的设施相似。这些设施主要有辐照后燃料的贮存设施(湿式或干式);放射性废物搬运、处理和贮存设施;辅助设施,如水净化回路、通风厂房、实验室和维护设施。

对相关核设施运行和退役期间产生的废物的管理工作,具有长期性特点,而且多数情况下,废物的源项和途径也不尽相同。废物管理工作要以一种保护现在和将来的人类健康与环境的方式进行。需要考虑跨越国界的影响,要避免遗留给后代不适当的负担,废物要最小化,要建立适当的法律框架,并且要考虑所有这些措施的相互依赖性^[1]。这些原则引出如下要求:

- (1) 规定所有类型废物的最终安全的和令人满意的条件;
- (2) 实际可行尽量早地将废物转至最终状态;
- (3) 确保中间步骤不会妨碍或使最终状态的完成复杂化,并且/或者确保设施的设计和废物管理实践,能作为总体系统和其生命周期优化的一部分而得以优化;
- (4) 涵盖生命周期内所有废物管理的费用;
- (5) 涵盖生命周期内所有阶段的累积责任^[9]。

一个核设施去污和退役(D&D)所产生的大部分固体放射性废物,与其运行期间产生的废物相同^[7]。基于核设施的性质,此类废物包括:

- (1) 高放废物、低中放长寿命废物以乏燃料、后处理产物或被长寿命核素污染的材料的形式存在。这些废物通常与核设施的实际拆除无关。
- (2) 低中放短寿命废物以受照物项和被短寿命核素污染的材料的形式存在。这些可能包括核设施部件、设备,以及建筑材料,例如仅含有低浓度放射性核素的钢和混凝土。

在 D&D 活动期间产生的液体和气体流出物,通常与正常运行期间产生的流出物相似,当然对于去污时使用了特殊化学试剂的情形就该另当别论了。

由于与正常运行期间产生的废物相似,因此大多数退役废物的管理,是利用现场已有的

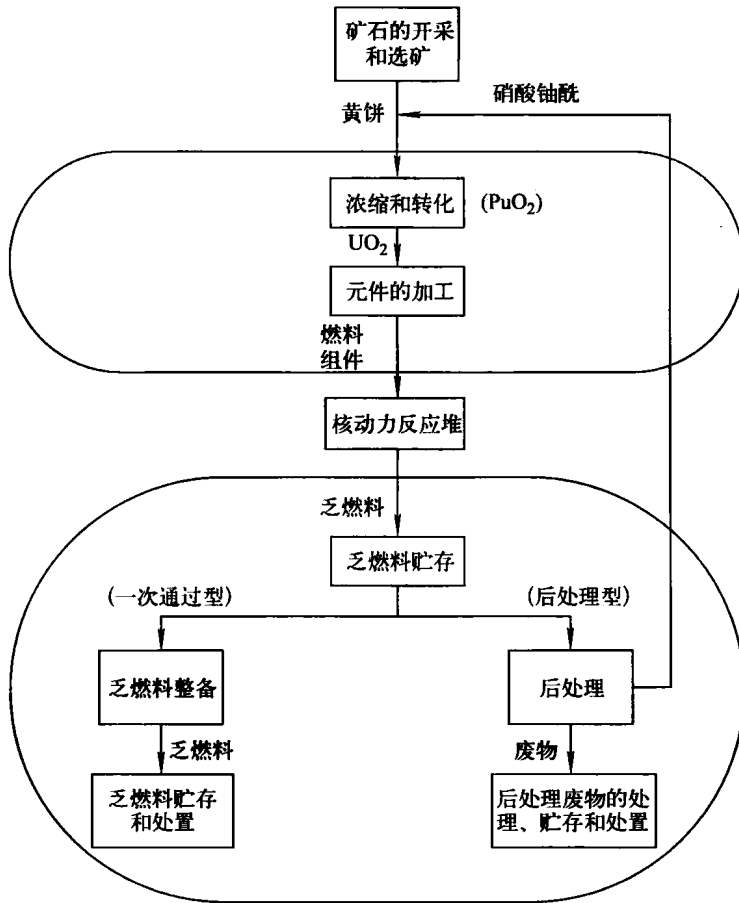


图1 简化的核燃料循环图

处理运行废物的方式进行。这些处理方法通常都得到了很好的开发,而且它们的费用是已知的。然而对于 D&D,其中一些废物是特殊的,包括:

- (1) 核电站内的大型物项,例如热交换器。
- (2) 大量含有长寿命放射性核素的石墨,在某些情况下可能构成火灾危险。
- (3) 含有有毒或有害物质的混合废物,如含有钠、铍、铅或石棉。

(4) 放射性核素浓度接近于豁免水平的相对大量的材料,依照当地的法律法规,根据其后续的用途可以有条件释放或无条件释放。这也可以包括经过去污的材料,例如钢铁、混凝土或者其他有用的材料。

(5) 大量的废物不是放射性的,但仍受监管控制,这是因为此类废物来自于经许可的核厂址。这些废物有时按照“疑似废物”来处理,因为它们有被污染的可能性^[7]。

退役废物的处理、贮存和处置费用可能在总体退役费用中占据显著的位置。因此,应尽可能再利用或再循环经过去污和回收的材料,以及最小化需要作为放射性废物进行管理的材料的量^[7]。

解控原则已经在一些国家成功应用。在欧盟内部,已经由欧洲委员会为解控原则的实际应用制定了导则。欧盟成员国有权制定自己的清洁解控水平。实际应用中出现任何不

一致,都有可能给国际贸易或跨界运输造成困难。还应该引起注意的是,依照核法规从源头解控材料所设定的最大放射性核素水平,要比来源于传统工业的材料的无条件使用或处置的水平低很多,后者含有经技术提高的天然核素水平。这些材料的产生速率和它们的累积量要比 D&D 过程中产生的低放射性核素浓度材料高几个数量级^[7]。

在大多数经合组织核能机构(OECD/NEA)成员国中,在设施设计阶段即开始考虑 D&D 和废物管理,最常见的做法是选择合适的材料和建造技术。这种方法反映了废物管理的第一条基本原则,称为“放射性废物的产生应保持可实现的最小化”^[1]。

例如,在现有的重水反应堆系统中,会通过选择材料 and 设计操作程序,以提高反应堆的效率及限制工作人员和公众的受照剂量。这就促成了环境中低的放射性核素浓度和良好的环境特性。已经或正在实施对反应堆的很多改进,以进一步降低剂量和环境排放,如对一些现有的重水反应堆进行了改进,这些改进工作不仅降低了剂量和减少了放射性排放,而且减少了化学物质和金属腐蚀产物的排放。提高反应堆的效率、降低剂量和改进环境性能三方面是共同作用的,比较理想的是在计划阶段即对这几方面进行考虑。很明显,通过在设计阶段选用合适的材料和采用适当的废物管理程序,核设施对环境的影响能够降到很低的水平(到非常低的水平)^[10]。

2.2 核设施内低中放废物的产生

本节谨对以下环节中产生的废物的类型、典型数量和来源做一个简单的描述。

- (1) 核燃料制造;
- (2) 核电站运行;
- (3) 乏燃料后处理;
- (4) 非反应堆核设施的 D&D;
- (5) 其他公共机构和工业的设施,包括研究实验室。

2.2.1 核燃料设施产生的废物

下文列出了在精制、转化、浓缩和燃料制造环节使用的典型工艺,同时对这些工艺中产生的废物的类型、数量和来源做了一个总结^[2]。

2.2.1.1 精制

精制是指对铀矿浓缩物(UOCs)进行加工,以生产 UO_3 或 UO_2 的工艺过程。该工艺可以在一个单独的厂址进行,也可以作为包含不同厂址的组合工艺的一部分。生产 UO_3 和 UO_2 的不同工艺过程如下:

- (1) 纯化;
- (2) UO_3 和 UO_2 的生产,通过:
 - 1) 热脱硝(TDN)工艺;
 - 2) 重铀酸铵(ADU)工艺;
 - 3) 三碳酸铀酰铵(AUC)工艺。

表 1 列出了假定生产能力为 1 000 t 铀的核设施,其精制过程产生的典型废物。精制过程中产生的主要废物与纯化阶段或硝酸铀酰液体(UNL)的生成有关。纯化阶段之后,硝酸