

核设施运行及退役中的废物最小化技术

岳维宏

(中国原子能科学研究院 科研生产处, 北京 102413)

摘要:核设施的运行及退役不可避免会产生放射性废物,废物管理的代价以及对公众、工作人员和对环境的危害取决于废物的数量及废物中所含的放射性核素,在核燃料循环过程中进行废物最小化管理是降低这些影响的一项必须的活动。在有些国家,废物最小化已作为一项国策。本文介绍了放射性废物最小化的环境效益及核设施运行和退役过程中废物最小化的方法,重点介绍了已研发的部分有效的废物最小化技术。通过总结美国等发达国家的放射性废物最小化的经验,提出了如何在我国实现放射性废物最小化的建议。

关键词:放射性废物;废物最小化;核设施运行;核设施退役

中图分类号:TL392 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2011)03-0293-09

Technologies for Minimization of Radioactive Waste During Operating and Decommissioning for Nuclear Facilities

YUE Wei-hong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-125, Beijing 102413, China)

Abstract: It is inevitable to generate a diverse range of radioactive waste which has to be managed in a safe manner to be acceptable to the public and the environment during operating and decommissioning for nuclear facilities. The cost of waste management, the risks to the public and employees, and the detriment to the environment are dependent on the quantity and radioactive content of the waste generated. Waste minimization is a necessary activity needed to reduce the impact from nuclear fuel cycle operations and it is included in the national policy in many a country. The environmental benefits and the methods for the radioactive waste minimization were introduced, and the resultful techniques that had been developed in the world were mainly presented. What's more, through summarizing the achievements and experiences of the radioactive waste minimization from U. S. A. and other developed countries, the paper puts forward how to bring about radioactive waste minimization in China.

Key words: radioactive waste; waste minimization; nuclear facility operation; nuclear facility decommissioning

废物最小化最早是由美国提出^[1]。国际原子能机构放射性废物最小化的定义是使放射性废物的体积和重量合理可达到的最少化,以及废物中包含的放射性核素合理可达到的最少化^[2]。废物最小化是国际原子能机构确定的放射性废物管理的主要原则之一^[3]。

放射性废物最小化意义明显,主要表现在:

1) 对人类健康和环境有利,对当代和未来的人们有益,有重要的环境和社会效益,有利于核事业的持续发展;2) 减少企事业单位处理和处置废物的负担,有重要的经济效益;3) 促进文明生产和科学管理水平的提高。废物最小化是以减少废物的数量和毒性为核心内容,进而减少其处理与处置成本。

2003年颁布的《中华人民共和国放射性污染防治法》中提出核设施营运单位、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。

废物最小化是发展循环经济的主要条件之一。2009年颁布的《中华人民共和国循环经济促进法》中明确规定:循环经济要求以资源的高效利用和循环利用为核心,以减量化、再利用、资源化为原则,采取各种有效措施,以尽可能少的资源消耗和尽可能小的环境代价,取得最大的经济产出和最少的废物排放,实现经济、环境和社会效益相统一。

1 实现废物最小化的方法

1.1 废物最小化的基本要求

放射性废物最小化贯穿于以有效减少废物产生和降低环境影响的广泛全面的废物管理和安全意识的整个过程。它始于核设施的设计,终于核设施的退役。涉及到设计、采购、建造、调试、试运行、运行、关闭、退役等全过程,废物最小化的基本要求是指将实践中产生的放射性废物的量和活度降低到可合理达到的尽量低的水平。执行废物最小化项目必须有政策支持(必须建立相应的废物最小化政策,以作为协同计划执行过程中采取必要措施的政策基础),废物最小化必须是“政府主导、公众参与”。

1.2 实现废物最小化的主要方法

在核设施运行及退役过程中的废物最小化

方法主要包括优化管理、减少源项、废物的再循环、再利用、减容处理等。

1) 优化管理

优化管理是实现废物最小化的重要措施,其内涵丰富,主要包括制定和执行法规、标准;严格废物分类,分出免管废物,对经过处理后达到清洁解控水平的废物解脱控制;建立废物处理处置文档和数据库;建立分区管理、质量控制体系、应急体系;加强培训,使员工熟悉工艺流程、重视废物最小化、提高安全文化素养等。

2) 减少源项

减少源项是实现废物最小化重要和有效的做法。从源头抓起,避免废物产生,例如:严格按规章制度操作,避免污染事故发生;严格分类管理废物,防止交叉污染;淘汰废物产生较多的落后工艺,发展遥控操作技术;严格控制进入污染区的材料、工器具等。

3) 废物的再循环、再利用

当放射性废物已不可避免地产生,则应通过适当处理,使废物尽可能地再利用和再循环。实行再循环和再利用,应进行代价-利益分析,衡量在经济上是否有意义。

4) 减容处理

对于不可再循环再利用的废物应作减容处理。减容处理的方法很多,最重要的有去污、焚烧、压缩、废金属熔融处理及破碎切割等。

以上4种废物最小化方法的代价和效果不尽相同,优化管理是废物最小化投资最少、效果最明显的方法,其次是减少源项方法,再其次是废物再循环、再利用及废物减容处理。

必须强调,废物最小化并不是一味追求废物最少,它必须是代价和利益优化的结果。2000年,IAEA出版的技术文件《核燃料循环设施废物流中物料和组件的再循环和再利用》^[4]中也强调了再循环和再利用的优化以及废物管理优化。

2 国内外废物最小化现状

2.1 美国放射性废物最小化实践

美国1976年制定的联邦政策资源保护与回收法(RACR)中就包含有废物最小化的内容,在RACR中明确规定了逐级行政管理废物并达到废物最小化的要求。美国1990年制定

的《污染防治法》更加强了废物最小化的要求,强调只要可行,就要尽可能减少废物的源项。美国国家环保局编制的《废物最小化评价手册》规定了一套系统性的、能够有效组织的、持续努力的程序来实施废物最小化。另外,美国环保局颁布的《废物埋藏处置限值》中强烈鼓励实施废物最小化,限制不加处理就直接土地埋藏处理有毒废物^[1]。

美国能源部作为美国核武器和核能技术研发的管理部门,负责实施管理和处理其所属机构产生的放射性废物。能源部的废物减量化政策要求所有能源部所属的组织通过减少源项和实施废物再循环再利用后减少废物产生的数量和处置的数量。能源部废物最小化实施要求所有的运行核设施和机构:1) 制定一套全面的有明确废物最小化的目标、程序和计划;2) 建立废物流向跟踪管理方法及系统;3) 确定每个设施实施废物最小化的方法和技术;4) 建立废物最小化员工意识培训计划;5) 遵守联邦政府、州政府的管理规定,遵守能源部废物最小化的要求。

美国能源部 DOE 54001.1^[5] 条令规定,要求对每个营运单位每年进行最小化审查,并规定每3年要对废物最小化计划进行升级修订。

20世纪80年代,美国核管会发布了低放废物政策法,对废物处置有最小化的严格要求,处置费用大幅提高,迫使核电厂重视废物最小化。1995年,美国核电厂沸水堆和压水堆固体废物的体积分别约为1980年的1/9和1/17^[6]。

美国汉福特厂址是美国军工生产的最重要的厂址之一,面临军工遗留的大量核设施退役、放射性废物处理的问题。美国能源部根据 DOE 54001.1 条令规定,每年对汉福特厂址下达废物最小化的目标。在下达的计划中,明确规定了各种废物减量、再循环利用等的数量要求和管理要求,根据这个计划,汉福特厂址运营者制定废物最小化计划,同时,汉福特运营者每年要向能源部提交废物最小化报告,能源部每年要对废物最小化工作进行认真的审查^[7-9]。

为实现废物最小化目标,汉福特厂址除了采取各种废物减量措施和技术外,特别强调了员工废物最小化意识的培养,认为员工的污染防治意识是废物最小化实现的关键环节之一,具体管理体现在以下几个方面:1) 让每个员工

全面知道污染防治计划、要求、目标;2) 告诉员工汉福特特别的环保方面的问题;3) 培训员工污染防治的责任心;4) 使员工认识到只有通过污染防治才能改善环境条件;5) 采取一些鼓励措施,激励员工投入污染防治等。

爱达荷国家实验室是美国核能、核军工科研生产的重要基地之一。为实现废物最小化要求,开发了一套全员废物最小化意识建立和培训计划,培训课程制成光盘发放;通过实事通讯宣传、发放宣传册和在团体组织的一些活动中广泛进行宣传。对主要工作和核设施配备有废物最小化监督协调人员,要求每一项工作活动和活动必须明确废物最小化的要求,工作方案和程序必须进行审查以确保此项工作包含执行废物最小化的工作。爱达荷国家实验室退役项目废物量化的常规方法和措施^[10]如下:1) 通过如对混凝土去污染热点和污染设备解体最大限度地分开放射性材料和清洁材料;2) 个人防护设备的重复使用;3) 非污染钢材最大限度再循环利用;4) 将污染土壤填入废物包装箱中的剩余可用空间;5) 使用高效过滤的净化装置防止退役活动中气溶胶的污染扩散;6) 详细阐明工作程序已达到首先分离污染物项并最大限度减少交叉污染;7) 设备等的表面去污;8) 要求使用无毒去污剂以防止有害或混合废物产生等。

另外,对废物最小化实施进行检查和质量保证控制。

在爱达荷国家实验室,污染预防可能性评价(PPOAs)是废物最小化的第一步,污染预防可能性评价是用于评价每一项工作和任务中如何减少污染源项的可能性;污染预防部门(PPU)每季度要形成废物最小化报告,报告废物最小化的进展情况。

美国能源部下属的所有其他核武器研究实验室和民口实验室均要求严格执行废物最小化政策。如在萨凡那河国家实验室甚至将废物最小化工作作为考核领导业绩的重要内容之一。

2.2 法国废物最小化实践^[11]

法国高度重视废物最小化,在前处理方面,重视贫化铀的再利用,采取了以下两项措施:

1) 用激光技术处理贫化铀,将其富集成4%的低浓铀,供制造燃料元件使用;

2) 将贫化铀同较高富集度的铀混合,制造核燃料,或将贫化铀的 UF_6 转变为 U_3O_8 ,同 PuO_2 一起制造混合氧化物燃料。

在后处理方面,法国采取了很多有效措施,如:1) 提高铀、钚回收率,达到 99.88%,减少排出的放射性;2) 停止用沥青固化法处理中放浓缩物;3) 将水泥固化废包壳和端头部件改为超高压压缩处理;4) 扩大焚烧的应用;5) 实行废金属的熔炼再利用,如用来制造屏蔽体和废物包装容器等。

2.3 其他国家废物最小化

德国在 1994 年颁布了《促进废物循环利用和保障合乎环境承受能力的废物处理法》。日本从 20 世纪 90 年代开始,颁布了一系列与此有关的政策法律,诸如,《日本资源有效利用促进法》、《日本促进包装容器的分类收集和循环利用法》、《日本特定家用电器再商品化法》、《日本报废汽车再生利用法》和《日本促进建立循环型社会基本法》。

2.4 国内废物最小化管理现状

废物最小化管理在我国是近年来提出的新课题,但缺乏系统的经验,从现有的零星经验中可看出它的巨大潜力。未来几年要初步实现放射性废物最小化的科学管理,在执行政策、规范方法研究、安全意识教育、污染物料去污及减容过程的目标管理、环境整治安全目标的优化、 α 废物的全过程管理、废物监测技术以及极低放废物的填埋处置等方面将必须取得实质性进展。

我国放射性废物最小化管理最早是在大亚湾核电站审管过程中接触到的一个命题。由于世界核电站运营者组织(WANO)每年都要公布核电站运行数据,放射性固体废物产生量曾被列为 10 项主要运行指标之一,因而形成了改进废物管理的强大压力。大亚湾核电站的运营者首先醒悟到了废物最小化可给企业带来利益,他们实行逐年的目标管理成绩显著。由于重视并在实践中努力实施废物最小化原则,从废物的源头控制、处理工艺、测量估算技术和监督管理等方面不断改进,大亚湾核电站自 1994 年投产以来,放射性固体废物产生量连年下降,2002 年每台机组减少到 63.5 m^3 ,约为 1995 年 127 m^3 的 50%,达到法国同类核电机组的先进水平;从 1994 年到 2002 年的 9 年间,两台机组

累计的放射性固体废物产生量为 1563.51 m^3 ,仅为设计值的 18%,废物货包符合安全处置的标准和要求^[12]。

3 放射性废物最小化技术

3.1 固体废物整备技术

1) 压缩及超压技术。低压压缩机,一般指压力只有几吨的压缩机,废物的减容系数可达到 2~5 倍;超级压缩机,一般指压力超过 1 000 t 级的压缩机,废物减容系数可到 6~10 倍。超级压缩机可压缩的物料种类包括了金属管道等低压压缩机不能压缩的废物。国外固体废物压缩技术广泛应用,有些国家(如美国)提供移动商业服务。

2) 碎化技术。碎化被污染的纸张、工作服和塑料废物能够减少废物体积达到十分之一。

3) 切割技术。对不再具有去污和再利用价值的被污染的硬件设备、管道等,除了采用传统的锯切割外,一些特殊的切割技术,如氧乙炔切割、等离子弧切割技术等可采用,切割处理后的小废物将会大量减容。

5) 熔融技术。熔融技术是金属部件去污和废物最小化的有潜力的方法。通常,熔融将放射性污染物转入熔渣中,而金属获得再循环利用。但目前的熔融技术费用较高,因此,工业化应用还需要做工作。

6) 焚烧技术。如果在源头上能将废物很好地分类,焚烧技术是处理可燃废物最佳的选择,据估计,科研院所科学实验过程中产生的放射性散料废物有一半多是可燃固体废物。焚烧处理废物的减容比可达到 100:1 或更高。相比其他处理技术,焚烧处理废物费用高些。

3.2 去污技术

IAEA 第 401 号技术报告介绍了核设施去污与退役废物最小化的技术^[13]。该报告明确指出,选择去污技术的原则是作业产生的放射性废物量在考虑安全与经济因素的基础上最少。有若干去污技术可同时作为核设施退役和设备去污的技术支持。

适用于金属性材料的放射性去污技术和方法主要分化学去污法和机械去污法。化学去污法是使用去污剂通过与去污物项接触溶解被污染的金属基体或覆盖在金属上的污染层实现去

污,开发了泡沫浸泡、乳胶涂层剥脱等技术;机械去污法属于物理方法,已发展了包括清洗、擦洗等技术,机械去污还包括干法或湿法喷射技术和喷砂研磨去污技术等。另外,包括化学浸渍技术、电化学技术、电抛光技术、生物或超声波方法等去污新技术也有不同程度的发展。

3.3 放射性废液处理技术

处理放射性废液是将废液转化为固体废物或去除废液的放射性,以便采用更方便的方法进行处置。

1) 沉淀。对于悬浮于液体废物中的含放射性的颗粒物通过沉淀池沉淀,简单有效。特别是絮凝沉淀,效果更好。它常用作大体积废液预处理。

2) 蒸发。蒸发技术是最常用,也是处理效率最高的处理中低放射性废液的方法。蒸发器也有多种类型,单级蒸发器的去污因子可达 10^4 。

3) 过滤/超级过滤。过滤技术用于去除废液中的细小的粒子放射性,或可作为离子交换的前处理。因自然的过滤速度较慢,通常采用加压、抽真空方法加快处理速度。典型的过滤材料有经压缩处理的纸材、人造纤维或瓷土等。

4) 反渗透。反渗透膜技术是应用半渗透性膜将进料中的水(溶剂)和溶质离子(或小分子)分离,从而达到纯化和浓缩的目的来处理废液。一般,单个系统的去污因子为 $10 \sim 100$ 。该技术中,渗透膜的堵塞是处理效率降低的主要因素。

5) 离子交换。离子交换包括有机离子和无机离子交换。离子交换的去污因子可达 $10^2 \sim 10^4$ 。但这种技术处理存在胶体、去污剂、溶解的有机物的废液时,由于树脂的堵塞等造成处理的难度增加。

4 废物最小化技术应用的实例

4.1 金属放射性废物熔炼处理技术

美国橡树岭国家实验室生态环境科学部(SEG)设计了1套熔融炉处理装置处理低水平放射性污染的金属^[10],该装置核心设备是一重20 t、7.2 MW、高效和自动化程度较高的感应炉,其工作温度可超过 $1\ 650\ ^\circ\text{C}$ 。

SEG 制定的金属再循环和熔融减容的限值条件分别列于表 1 和 2。

表 1 SEG 制定的金属再循环放射性限值
Table 1 SEG radiological criteria for metal recycling

| 放射性水平 | |
|-----------------------------|---|
| 废物 | 剂量率/(Sv·h ⁻¹) |
| 表面污染或活化金属 | $\leq 5 \times 10^{-4}$ (平均,无遮蔽) |
| | $\leq 5 \times 10^{-6}$ (平均) |
| 放射性核素限值 | |
| 核素 | 平均浓度 ¹⁾ /(Bq·g ⁻¹) |
| 总放射性(不包含下列核素) | ≤ 7.4 |
| ³ H | ≤ 0.37 |
| ¹⁴ C | ≤ 1.1 |
| ¹²⁹ I | $\leq 0.003\ 7$ |
| ²²⁶ Ra(仅适用于 DOE) | ≤ 370 |
| ²²⁶ Ra(对于商业化的) | 需专门审批 |
| TRU | ≤ 37 |
| 含其他特殊核素的材料 ²⁾ | 需专门审批 |

注:1) 包装体内放射性平均值

2) 包括含²³³U、²³⁵U或²³³U和²³⁵U混合的材料

表 2 SEG 制定的放射性金属熔融减容处理放射性限值
Table 2 SEG radiological criteria for reducing volume of metal

| 放射性水平 | |
|-----------------------------|---|
| 废物 | 剂量率/(Sv·h ⁻¹) |
| 表面污染或活化金属 | $\leq 5 \times 10^{-4}$ (平均,无遮蔽) |
| | $\leq 5 \times 10^{-6}$ (平均) |
| 放射性核素限值 | |
| 核素 | 平均浓度 ¹⁾ /(Bq·g ⁻¹) |
| 总放射性(不包含下列核素) | $\leq 3\ 700$ |
| ⁶⁰ Co | $\leq 1\ 850$ |
| ¹³⁷ Cs | ≤ 74 |
| ³ H | ≤ 0.37 |
| ¹⁴ C | ≤ 1.1 |
| ¹²⁹ I | $\leq 0.003\ 7$ |
| ²²⁶ Ra(仅适用于 DOE) | ≤ 37 |
| ²²⁶ Ra(对于商业化的) | 需专门审批 |
| TRU | ≤ 3.7 |
| 含其他特殊核素的材料 ²⁾ | 需专门审批 |

注:1) 包装体内放射性平均值

2) 包括含²³³U、²³⁵U或²³³U和²³⁵U混合的材料

该技术废物最小化效果是经熔融处理,放射性炉渣约是总重量的 3%,平均减容比约为 20:1。

4.2 超级压缩机用于减容处理放射性固体废物

超级压缩机已在德国、美国、法国有成熟的产品,它是公认的固体废物减容的有效方法之一。中国原子能科学研究所、大亚湾核电站等已分别从国外引进超级压缩机。美国橡树岭国家实验室 SEG 开发了 3 种类型的超级压缩机以处理不同的废物^[10],这 3 类超级压缩机分别如下。

第 1 类,处理金属或金属性的固体废物。此超级压缩机具有 5 000 t 级的压力,压强 34.5 MPa。压缩机处理废物的程序是,先将经预压的金属废物桶压成薄饼,然后将薄饼再装入废物容器固定、检测、确认、封装、称重、标记、养护后送处置场处置。

第 2 类,用于处理钚污染废物和其他超铀废物(TRU)。TRU 压缩机具有 1 000 t 级的压力。

第 3 类,可移动式的压缩机。主要用于特殊场所或就地压缩处理废物。

SEG 制定的放射性废物压缩减容处理的放射性限值列于表 3。

表 3 SEG 放射性干废物压缩的放射性限值^[10]

Table 3 SEG radiological criteria for dry active waste compaction^[10]

| 放射性水平 | |
|----------------------------------|---|
| 包装体的辐射水平 | 可去除的表面污染 |
| ≤ 2 mSv/h(距包装体表面 1 m 处的剂量率) | ≤ 132 kBq/100 cm ² (对 β 、 γ 发射体) ≤ 13.2 kBq/100 cm ² (对 α 发射体) |
| 放射性核素限值 | |
| (每个包装体的放射性核素浓度不能超过下列组或单个限值) | |
| 核素 | 平均浓度 |
| 大于 5 年半衰期总放射性 (不包含下列核素) | < 37 kBq/cm ³ |
| 其他混合裂变和活化产物($Z < 84$) | ≤ 32.7 kBq/cm ³ |
| ²³² Th | < 6.5 kBq/cm ³ |
| 金属或氧化 ²³⁸ Pu | < 19.6 kBq/cm ³ |
| ²²⁶ Ra | 需专门审批 |
| TRU | ≤ 370 Bq/g |
| 含其他特殊核素的材料 ¹⁾ | 需专门审批 |

注:1) 包括含²³³U、²³⁵U 或²³³U 和²³⁵U 混合的材料

经 SEG 工程应用实践,使用超级压缩机压缩处理废物的减容因子列于表 4。

表 4 使用超级压缩机压缩处理废物的减容因子

Table 4 Volume reduction from supercompaction

| 废物材料 | 体积减少因子 | 压缩饼密度/(kg·m ⁻³) |
|-------|---------|-----------------------------|
| 金属碎废料 | 4~5 | 3 200~4 000 |
| 重混合废物 | 3.5~5 | 1 600~2 400 |
| 塑料材料 | 2~3 | 800~1 120 |
| 轻混合废物 | 2.5~3.5 | 800~1 280 |

该技术废物最小化效果是超级压缩机可达到减容比(6~10):1,每小时处理量可达 20 个桶装废物。

4.3 放射性废物焚烧处理

萨凡那河国家实验室设计建造的旋转炉式焚烧装置用于处理固体和液体放射性废物^[10]。焚烧炉的功率为 5 275 kW。初级炉腔的温度是 870 °C,二级炉腔的运行温度是 980 °C。焚烧炉二次废物是过滤器、灰烬和污染处理、操作等产生的废物。

此焚烧炉主要用来处理液态和固体放射性和有毒废物。要求焚烧处理的废物容器的表面最大剂量率不能超过 100 μ Sv/h。

该技术废物最小化效果是废物减容比可达 20:1(包括焚烧后废物的处理)。

美国能源部制定的焚烧处理放射性废物的限值列于表 5。

表 5 美国能源部制定的可燃处理的含放射性的油类和液体废物的限值^[10]

Table 5 Radiological limits

for both burnable oil and aqueous liquids^[10]

| 放射性水平 | |
|----------------------------------|---|
| 每个包装体的放射性水平 | 可去除表面污染 |
| ≤ 2 mSv/h(距包装体表面 1 m 处的剂量率) | ≤ 37 kBq/100 cm ² (对 β 、 γ 发射体) ≤ 3.7 kBq/100 cm ² (对 α 发射体) |
| 放射性核素限值 | |
| 核素 | 平均浓度 ¹⁾ |
| 总放射性(不包含下列核素) | ≤ 1.85 kBq/mL |
| ³ H | ≤ 111 Bq/mL |
| ¹⁴ C | ≤ 37 Bq/mL |
| ¹²⁹ I | ≤ 3.7 Bq/100 mL |
| ⁹⁹ Tc | ≤ 37 Bq/mL |
| ²²⁶ Ra | 需专门审批 |
| TRU | ≤ 3.7 Bq/mL |
| 含其他特殊核素的材料 ²⁾ | 需专门审批 |

注:1) 包装体内放射性平均值

2) 包括含²³³U、²³⁵U 或²³³U 和²³⁵U 混合的材料

4.4 放射性废液蒸发处理

在德国卡尔斯鲁厄国家研究中心运行有两套处理低放废水的蒸发装置,有一套处理中放废液的处理装置^[10]。

蒸发器使用强迫循环和压缩空气技术,通过逆流加热器加热的废液送入蒸发器蒸发浓缩,蒸汽靠压缩空气加热,蒸馏物(净化水)是通过逆向的热交换器排到收集罐。蒸残液被送往水泥固化处理车间水泥固化,1个标准200 L桶用80 L水泥固化120 L蒸残液。

技术废物最小化效果是蒸发处理技术的浓缩因子为10,去污因子为 10^3 ,每个低放废液蒸发器的处理能力是 $4\text{ m}^3/\text{h}$ 。

4.5 节能技术用于低水平放射性废水处理

核设施运行必将产生大量低放废水和极低放废水,太阳能加热空气载带处理排放低放废水技术是内陆核设施运行优先采用的处理技术之一。韩国在汉城南大田市原子能研究所内建了处理装置^[14],其原理是利用太阳能热量,使废水缓慢蒸发,并依靠空气流动(机械鼓风)将汽化后的水蒸气随时混入空气中排向大气。处理能力为 $3\,000\text{ m}^3/\text{a}$,最大蒸发量为 $1.5\text{ m}^3/\text{h}$ 。

该技术废物最小化效果是,总净化系数 $DF>10^5$ (蒸发净化系数 $>10^3$,大气稀释倍数约为 10^2);废水浓缩倍数100倍。

4.6 放射性污染土壤处理技术

在洛斯阿拉莫斯国家实验室,开发了放射性污染土壤恢复系统(SGS/CVL),该系统包括两个功能:1)去除污染土壤中的放射性成分,通过传送和探测器系统将污染土壤从非污染土壤中分拣出;2)能够将放射性核素从污染土壤中滤除^[15]。

在洛斯阿拉莫斯国家实验室,采用SGS/CVL系统处理了大量污染土壤,废物减容约达10:1。

4.7 不同去污技术的应用

文献[16]认为,适用于核设施退役去污的多种技术已取得了重大进展,大多技术已实现了工业化应用。表6列出了这些技术的应用范围及其废物最小化效果。

1)电抛光去污技术在德国核研究中心的应用^[17]

通过该方法将退役反应堆内的设备和材料去污后最大限度再循环利用。主要装置为充

表6 去污技术

Table 6 Techniques of decontamination

| 待去污物项 | 物项状态 | 适用去污方法 | 废物最小化效果 |
|---------|------|--|--|
| 管道系统、设备 | 拆卸前 | 化学去污 机械去污 | 拆卸前去污,降低职业照射;可再循环利用设备去污的第1步,减少一次和二次放射性废物 |
| | 拆卸后 | 电抛光 化学浸渍 喷砂 超声波 乳胶涂层 | 拆卸后去污,污染金属再循环利用,减少放射性废物 |
| 水池/水槽 | | 液力喷射 喷砂 可剥离层 | 可大幅减少放射性废物处置量 |
| 混凝土表面 | | 机械法 粗琢 刮削 打凿和破碎 热应力法 微波辐射 火焰切割 | 构筑物去污,减少放射性混凝土废物,设施构筑物再利用 |

6 000 A(最大)电流的去污池,在去污池中加入草酸可使设备和材料中的⁶⁰Co等核素酸化后以离子形式沉淀下来而达到去污效果,这种方法的二次废物产生最小。

该技术的去污因子达到 50 000,在德国核研究中心将反应堆一回路系统(泵,管道等)约 95%的废物被去污,60%物料解控,33%~35%通过熔炼处理后再循环利用。

2) 英国原子能署(AEA)开发使用的面向社会服务的主要去污技术^[10]

(1) 水力喷射去污技术。装置的喷射压力达到 396 MPa,流量只有 10 L/min。AEA 去污服务部应用此项技术成功地对核燃料容器污染、反应堆回路、废物包装桶表面污染去污。

(2) 电化学去污技术。AEA 研发的电化学去污装置可在低电流密度、室温下通过电解的方法对污染物料进行表面去污,特别是能够实现复杂结构污染物料的去污。该技术对不锈钢等污染物料实现了高效去污,已作为 AEA 的常规去污技术。

(3) 泡沫去污、喷雾去污技术。该技术已成功应用于反应堆蒸发器去污、运输容器的表面污染、热室等深度去污。

3) 美国爱达荷国家实验室开发的湿法喷砂研磨去污技术^[18]

该技术具有去污因子高,砂砾可循环使用、去污深度可控、可遥控操作等特点。

废物最小化效果:可有效去除各种涂敷和固定放射性污染物,使污染物料实现再利用或解控,采用湿法循环去污技术二次废物产生量少。爱达荷实验室得出的一定条件下不同研磨剂的去污因子列于表 7。

表 7 不同研磨去污剂去污因子测量值
Table 7 Decontamination factor measurements
for various abrasives

| 研磨去污剂 | 实测去污因子 | |
|-------|-----------|---------|
| | 现场 | 实验室 |
| 氧化硼 | 3~6 | 4 |
| 磁性材料 | 50~200 | >6 |
| 铝 | 250~4 000 | 200~300 |

5 总结与建议

总结上述内容,可看出欧美等发达国家已建立了一整套的放射性废物最小化的方法和技术。借鉴国外先进经验,应尽快研究解决制约我国放射性废物最小化、有效实施和确保核工业可持续健康发展的措施和技术,尽快使放射性废物最小化的方法和技术标准化、规范化是当前的重要任务之一。

我国政府已制定和颁布了《循环经济法》,要求废物最小化工作贯穿于各行各业的实际工作中。为了在我国切实实现放射性废物的最小化,当前应当重点从以下几个方面加强工作。

1) 全员废物最小化意识的培养。如果没有全员的积极参与,未在员工中建立起废物最小化的强烈意识,废物最小化很难实现。废物管理的改进有赖于提高全体员工的安全文化素养,工艺系统和设备的安全运行以减少事故发生和废物产生、负责地进行废物合理分类是最小化管理的第一步,可是让每个员工都养成良好的习惯绝非易事。

2) 通过对“规范、限值”等的研究,解决在我国实施废物最小化管理的软件条件,借鉴发达国家的先进经验,构建废物最小化的管理体系。研究可提供政府管理决策的废物最小化的规范,研究解决废物最小化要求的各种限值条件(如排放限值、再循环限值等)。

3) 开展“程序、信息化、专家系统”的研究工作,提出科学合理的、能够符合最优化要求的放射性废物最小化管理各个环节和不同阶段的管理程序,并建立符合现代管理要求的信息化控制管理技术以及评价系统和决策系统。

4) 放射性去污等废物最小化专用技术的研究必须加强。如尽快开展针对我国核工业特点的不同类型的放射性废液的贮存设施、大罐的去污解体技术、大量低水平放射性污染土壤的去污处理技术等一些切实能大量减少放射性废物产生的实际需要的急用技术,满足核设施退役等废物最小化工作的需要。

5) 放射性测量在放射性废物最小化管理的各环节尤为重要,只有已知一种或一件物料是否被某种放射性核素污染及其污染水平,以及经处理后剩余的放射性后才能做到科学管理。因此,在执行废物最小化活动中,必须规范

不同场所、不同设施类型,废物流不同阶段的放射性废物的测量技术。

参考文献:

- [1] Department of energy's waste minimization program, P. 6. DOR/IG-0298[R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 1991.
- [2] IAEA. Minimization of radioactive waste from nuclear power plants and the back end of the nuclear fuel cycle, IAEA Technical Report Series No. 377[R]. Vienna: IAEA, 1995.
- [3] IAEA. The principles of radioactive waste management, IAEA Safety Series No. 111-F[R]. Vienna: IAEA, 1995.
- [4] IAEA. Recycle and reuse of materials and components from waste streams of nuclear fuel cycle facilities, IAEA-TECDOC-1130 [R]. Vienna: IAEA, 1999.
- [5] General environmental protection program, DOE Order 5400.1[R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 1988.
- [6] Annual waste minimization summary report calendar year 2008, DOE/NV/25946-656 [R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 2009.
- [7] 1997 annual report on waste generation and waste minimization progress as required by DOE Order 5400. 1, Hanford Site, DOE/RL-98-32 [R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 1998.
- [8] Hanford site annual dangerous waste report, DOE/RL-94-10[R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 1993.
- [9] Hanford site waste minimization and pollution prevention awareness program plan, DOE/RL-91-31[R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 1998.
- [10] BOING L E, COFFEY M J. Waste minimization handbook; Volume 1, ANL/D&D/TM-96/1 [R]. USA: Argonne National Laboratory, 1995.
- [11] 罗上庚. 法国的放射性废物管理活动[J]. 辐射防护通讯, 2002, 22(5): 38-41.
LUO Shanggen. Information on management of radioactive waste in France[J]. Radiation Protection Bulletin, 2002, 22(5): 38-41(in Chinese).
- [12] 黄来喜, 何文新, 陈德淦, 等. 大亚湾核电站放射性固体废物管理[J]. 辐射防护, 2004, 24(3): 211-226.
HUANG Laixi, HE Wenxin, CHEN Degan, et al. Solid radioactive waste management in Daya Bay Nuclear Power Station[J]. Radiation Protection, 2004, 24(3): 211-226(in Chinese).
- [13] IAEA. Methods for the minimization of radioactive waste from decontamination and decommissioning of nuclear facilities, IAEA-TECDOC-41 [R]. Vienna: IAEA, 2001.
- [14] 废水空气携带排放站可行性研究报告[R]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2002.
- [15] VOIT S L, BOERIGTER S T. An analysis of radioactive waste minimization efforts at Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-150 [R]. USA: Los Alamos National Laboratory, 1997.
- [16] State of the technology for decontamination and dismantling of nuclear facilities, Technical Reports Series No. 395[R]. Vienna: IAEA, 1999.
- [17] BOSSE H. Separation of metals by melting[M]. Krefeld, Germany: [s. n.], 1993.
- [18] FEGUSON R L. Liquid abrasive grit blasting literature search and decontamination scoping tests report, WINCO-1163[R]. Idaho: Westinghouse Idaho Nuclear Company, Inc. , 1993.