

文章编号：0258-0926(2016)S1-0084-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0084

# 核反应堆退役安全监管要素研究

张洪, 张亮, 张琪彬, 徐健, 黄庆勇

国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080

**摘要:**通过分析核反应堆退役安全特征及存在的主要危害, 结合部分已退役项目取得的事故/事件教训和形成的良好实践, 提出核反应堆退役过程中的安全监管要素及相关建议, 以提升核安全监管的针对性和有效性, 促进退役工作的安全实施。

**关键词:**核反应堆; 退役; 安全监管要素; 研究

中图分类号: TL 文献标志码: A

## Study on Safety Regulatory Elements of Nuclear Reactor Decommissioning

Zhang Hong, Zhang Liang, Zhang Qibin, Xu Jian, Huang Qingyong

Nuclear Technology Support Center, State Administration for Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China

**Abstract:** Based on the analysis of the safety characteristics and the main hazards existed probably for nuclear reactor decommissioning, and the consideration of the experiences and lessons obtained from relevant accidents/incidents and good practices, safety regulatory elements have been studied and related proposals are provided, which are beneficial for improving the direction and effectiveness of nuclear safety regulatory processes, and promoting the safe implementation for the decommissioning projects of nuclear reactors.

**Key words:** Nuclear reactor, Decommissioning, Safety regulatory elements, Study

### 0 引言

核反应堆退役是一项长期复杂的系统工程, 需要采取特殊的技术和管理手段<sup>[1]</sup>。其中, 由于堆芯及相邻区域的放射性强度高且局部空间狭小, 加之系统和结构复杂, 需要采用或开发专门的技术手段; 与建造、调试和运行等阶段不同, 退役所涉及的多为非常规性工作, 安全状况会随退役进展而不断变化, 需要采取与之相适应的监督管理措施。为了提升核安全监管的针对性和有效性, 促进退役工作的安全实施, 需要全面分析核反应堆退役项目的安全特征及其可能存在的主要安全危害, 研究并掌握其安全监管要素。

### 1 核反应堆退役安全特征分析

核反应堆进入退役阶段后, 由于乏燃料卸出

和设施内其他放射性物质的移出, 放射性存量显著减少, 总体安全风险呈下降趋势。随着核与辐射风险的降低, 逐步过渡到以工业风险为主。如图 1 所示。

核反应堆退役的主要安全特征如下:

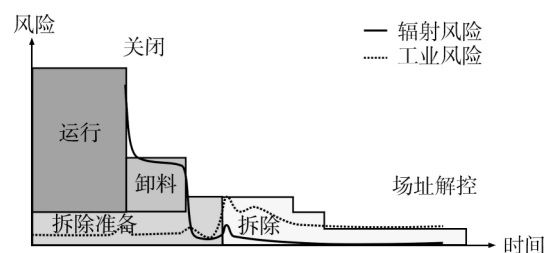


图 1 核反应堆安全风险变化趋势图

Fig. 1 Diagram of Safety Risk Changing Trend for Nuclear Reactor

收稿日期: 2015-10-10; 修回日期: 2015-12-10

作者简介: 张洪(1965—), 男, 研究员级高级工程师, 现从事核安全监管、审评及相关研究工作

(1) 存在明显的辐射安全和环境安全风险。核反应堆退役活动的实施,需要打开一些封闭系统(如压力容器、安全壳、管道、厂房等),破坏原先完整的放射性包容体系或屏障,放射性物质可能直接向工作环境和外部环境释放。即便在受控情况下,核反应堆退役活动所产生的大量放射性物项(主要是各类放射性废物)也可能对工作人员和环境造成一定的影响。

(2) 存在较大的工艺技术和工业安全风险。由于存在堆型、结构、材料等方面差异,不同核反应堆退役采用的技术、工艺及设备不同,即便是成熟的或常规的技术手段,也需要针对不同核反应堆的退役特点进行适应性开发或验证,综合考虑其安全性、有效性和经济性等。一旦工艺技术存在问题,不仅难以保证退役的顺利实施,工作人员的安全也会受到威胁。

(3) 存在较大的项目管理和安全监管难度。随着退役项目的进展,核反应堆的总体状况(包括物项的物理状态、污染状况、安全设置以及内外部环境等)会呈现动态变化。结合设施状况的不断变化,退役方案往往需要做适当调整,在变化较大的情况下(如发现新的源项),调整或变更的部分工作内容可能超出或偏离先前退役安全许可的范畴。

(4) 退役产生各类物项安全管理难度很大。核反应堆退役实施清理去污、切割解体、拆毁等环节均会产生大量不同类型的物项,需要分别管理。其中,退役产生的大量轻微污染金属材料经处理后,应实现再循环、再利用;通过设定合理的目标和采取适当的措施,既减少一次废物量,又减少二次废物量;合理设置物项暂存空间,防止分拣物项和废物的混类。

(5) 需关注不同阶段(环节)之间的衔接。核反应堆退役的周期长、环节多,若各阶段(环节)之间衔接不当,容易导致安全问题。如前一阶段档案资料不全,可能导致后一阶段难以实施;阶段之间或实施过程中监护不力,不能及时发现和处理诸如因设施设备老化、系统功能缺损等带来的问题,则存在放射性污染扩散的风险。

(6) 需关注临界安全与实物保护问题。如果核反应堆卸出的乏燃料尚未安全转运,还需考虑临界安全及其伴随的辐射安全等问题。同时,由

于核反应堆退役现场大量放射性物项(也包括各类放射源)的存在,不仅要落实核材料管制相关规定要求,还要加强必要的实物保护工作,防止丢失和非法转移。

## 2 核反应堆退役存在的主要危害

核反应堆退役过程中,放射性物质包容体拆除(失去包容屏障)、放射性物质散落、被污染建(构)筑物捣毁、地下埋藏污染物挖掘、被污染管道拆除、通风系统(风管、风道、过滤器)拆卸、废液输送、固体废物装运以及人员意外闯入等,均可能带来不同程度的辐射危害和非辐射危害<sup>[2]</sup>。非辐射危害还可能导致辐射危害后果,如火灾和爆炸可能引发放射性物质的扩散和泄漏。

### 2.1 辐射危害

(1) 外照射:正常退役和异常或事故状况下,由于活化产物、污染物或其他放射性物质的存在,都可能造成直接照射。如核反应堆堆内构件拆卸过程中对工作人员的辐射照射。

(2) 内照射:工作区域内放射性核素以表面污染或气溶胶形式存在时,则可能通过吸入或食入等途径导致内照射。如处理核反应堆一回路管道,工作人员可能因接触 $\alpha$ 放射性核素导致内照射水平升高。

(3) 液态和气态放射性废物排放:因拆除和去污等退役操作,液态和气态放射性产生量可能大于运行期间,如果处理不当,可能导致这些废物向环境的意外排放。

(4) 放射性废物的混类:核反应堆退役产生大量废物,形式多样,且各具特征,如管理不当,容易造成较低水平放射性废物混入较高水平废物中,或将高于清洁解控水平的废物解控。

(5) 临界:如乏燃料仍在退役现场保存,则可能存在临界安全问题。

### 2.2 非辐射危害

(1) 爆炸和燃烧:实施热切割拆除和使用有机溶剂去污,存在爆炸和燃烧的危险。核反应堆拆除过程中产生的粉尘可能具有爆炸特性。

(2) 中毒:早期建造核反应堆使用的石棉、金属铅和多氯联苯等有毒有害物质,若使用有毒化学材料去污、热切割会产生有害烟尘。

(3) 电击:核反应堆退役作业使用的各类电源

和电器,特别是退役现场的临时电源或用电设备。

(4) 身体伤害:核反应堆退役开展的拆除、捣毁、吊运等活动,可能发生坍塌、重物砸伤、高空坠落、划伤、机械伤害等。

(5) 外部事件危害:与核反应堆场址条件相关气象、地质灾害和人为因素的危害。

### 3 核反应堆退役安全监管要素研究

#### 3.1 退役策略

合适的退役策略是实施核反应堆退役的重要前提,确定退役策略的主要依据是国家相关政策、法律法规、技术标准等。某反应堆在充分考虑场址特征、建(构)筑物和设备设施再利用性、已有退役技术与工艺、放射性废物处理与处置能力、乏燃料和大件废物运输能力以及国家财力等多方面因素的基础上,确定采用立即拆除的退役策略,事实证明是合理的。

#### 3.2 源项调查

源项调查是制定核反应堆退役方案或初步设计的重要依据,需要重点审查源项调查方案及结果。如果源项资料不全,源项调查不充分,未能全面、准确掌握相关资料和数据,则可能导致项目难以实施或存在安全隐患。如埃及研究堆(ETRR-1)技改资料丢失事件<sup>[3]</sup>和美国阿贡国家实验室实验沸水反应堆(EBWR)退役过程中的意外照射事件<sup>[4]</sup>。

#### 3.3 辐射监测

辐射监测必须贯穿核反应堆退役的全过程,保证及时发现新情况并妥善处置。为此,必须高度关注辐射监测计划的可行性,并监督该计划的执行情况。如果未制定辐射监测计划或该计划未得到严格执行,可能造成人员意外照射和环境污染等后果。如某反应堆退役过程中意外发现元件切割芯块散落物和德国卡尔斯鲁厄理工学院原型堆(KKN)堆退役过程中意外发现重水<sup>[4]</sup>。

#### 3.4 退役方案

退役方案(或初步设计)是实施核反应堆退役的基础性文件,必须基于可靠的信息和技术条件。为此,需要结合实际情况,对退役方案或设计进行全面审查。设计错误不仅会使项目难以实施或延误,还会招致危险。如德国KKN反应堆退役项目的压力管切割,因制定的方案不切合实际,首次未能成功实施<sup>[4]</sup>。退役方案也需要根据

情况变化作适当调整,如法国Siloe反应堆退役过程中及时变更堆水池衬层拆除方案,使后续工作的开展更趋合理。

#### 3.5 退役准备

核反应堆退役工作实施前,需全面检查和落实工作条件的准备情况,新技术、新方法、新设备的应用需要事先验证,并经审查认可。对于涉及的安全重要活动,最好事先开展模拟操作,以避免因准备不足无法开展工作或引发安全事故。这方面的良好实践有德国帝国技术物理研究所的研究和测量反应堆(FMRB)退役水池池壁活化区剥除技术的选择<sup>[4]</sup>。而某核反应堆相关辅助设施退役拆除过程中,因准备不足,发生了工作人员电弧烧伤事故。

#### 3.6 检查维护

需要制定并实施必要的检查维护大纲,在核反应堆退役实施过程和阶段之间,对所有系统、结构和部件开展必要的检查和维护,避免因设施或系统老化、失效而出现安全问题。因检查维护不力导致的安全事件中,有美国布鲁克海文国家实验室石墨反应堆退役期间发生的污染扩散事件和某反应堆退役期间发生的转运站被淹事件。

#### 3.7 清理去污

对核反应堆主要设备、材料或建(构)筑物实施去污处理,降低这些物项的表面放射性污染水平,有利于退役现场作业人员辐射防护,也有利于减少废物产生量。但是,不合理的清理去污方法,不仅不能达到预定的目标(如降低废物等级或表面污染水平),还会产生大量的二次污染物,如某核反应堆退役早期实施的高压水去污操作。

#### 3.8 拆除解体

拆除解体是核反应堆退役实施阶段频度最高的活动之一,存在的辐射安全和工业安全风险较多,发生事故的几率较大,需要给予高度的重视。为此,应要求退役实施单位制定严密的工作方案,并经审查批准后实施。在历史上发生的事故/事件中,有某反应堆因切割解体技术使用不当导致工作人员中毒事件,也有比利时BR-3反应堆退役发生的人员坠落事故<sup>[4]</sup>和美国某反应堆退役过程中发生的工作人员烧灼事故<sup>[4]</sup>。

#### 3.9 废物管理

废物管理贯穿核反应堆退役的全过程,工作量大。为实现废物的安全管理和废物最小化,应

制定并严格执行放射性废物管理大纲。废物管理事件中，较为典型的是 1997~1998 年发生在美国能源部（DOE）橡树岭国家实验室（ORNL）的放射性废物失控事件<sup>[4]</sup>；在良好实践方面，有保加利亚、立陶宛和斯洛伐克等国预估 Kozloduy、Ignalina、Bohunice V1 等反应堆退役将产生的废物量和未污染钢铁等材料量<sup>[5]</sup>，也有丹麦研究堆退役废物管理的优化处理<sup>[4]</sup>。

### 3.10 场址恢复

核反应堆和相关设施及建（构）筑物拆除后，需要对原场址进行清理去污和必要的环境整治，以确保退役目标的实现。为此，不仅需要关注方案的可行性，还要关注清污和整治的效果。需要对场址进行监测和评价，并就残留的放射性物质对公众和环境的影响作出合适评价。目前，多个国家应用 DOE 阿贡实验室开发的 RESRAD 软件对退役场址残留放射性对环境的影响进行评价。

## 4 结论与建议

结合相关事故事件教训和良好实践经验，研究提出核反应堆退役 10 个方面的安全监管要素，应用于安全监管实际工作，有助于明确不同阶段的核安全监管重点，提升其针对性和有效性。同时，为提升核反应堆退役安全监管效能，提出如下建议：

（1）进一步明确核安全监管覆盖核反应堆全寿期的要求。在核反应堆设计、建造（含技术改造）、运行阶段，提出有利于将来退役的监管要求，并要求营运单位定期修订并提交退役计划。

（2）实施核反应堆退役项目的核安全日常监督。要求退役单位制定退役项目质量计划，设置必要的质量控制或安全监督点，明确相关限值（或限制）及释放条件。

（3）要求退役单位加强退役项目的应急工作，针对项目所处阶段安全特点，安排必要的应急演练。同时，加强人员培训，确保工作人员熟悉安全要求，掌握必需的安全技能。

### 参考文献：

- [1] IAEA. Decommissioning of Facilities[R]. IAEA safety standards series No.GSR part 6, IAEA, Vienna, 2014.
- [2] IAEA. Safety assessment for decommissioning[R]. IAEA safety report series No.77, IAEA, Vienna, 2013.
- [3] IAEA. Record keeping for the decommissioning of nuclear facilities: Guidelines and Experience[R]. IAEA technical report series No.411, IAEA, Vienna, 2002.
- [4] IAEA. Decommissioning of Research Reactors: Evolution, State of the Art, Open Issues[R]. IAEA technical report series No.462, IAEA, Vienna, 2006.
- [5] EBRD. EBRD managed funds in support of nuclear safety, Decommissioning of nuclear power plants and remediation of radwaste sites[R]. Work Report, EBRD, London, 2014.

（责任编辑：杨洁蕾）