

# 事故树分析法研究反应堆退役中的放射性危害\*

刘自霞<sup>1</sup>, 陆春海<sup>1,2</sup>, 陈敏<sup>3</sup>, 张志程<sup>1</sup>, 郑黄婷<sup>1</sup>

(1. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059; 2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013; 3. 西南科技大学国防学院, 四川 绵阳 621010)

**摘 要:** 反应堆退役的安全性是退役活动的关键。退役中产生的放射性危害, 不仅能直接对公众造成伤害, 更可能对环境造成长久危害。采用事故树分析法对反应堆退役过程中的放射性危害进行研究探讨, 并结合实际退役案例, 对事故与导致事故发生原因之间的逻辑关系进行分析。结果表明: 引起放射性事故发生的原因较多, 既有内照射危害又有外照射危害。在分析基础上, 提出了预防及治理措施, 从而推进反应堆退役工作的顺利进行, 保障人、物及环境的安全。

**关键词:** 反应堆; 退役; 事故树分析法; 放射性危害

**中图分类号:** X913

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11731/j.issn.1673-193x.2013.08.021

## Fault tree analysis of radiological hazard during nuclear reactor decommissioning

LIU Zi-xia<sup>1</sup>, LU Chun-hai<sup>1,2</sup>, CHEN Min<sup>3</sup>, ZHANG Zhi-cheng<sup>1</sup>, ZHENG Huang-ting<sup>1</sup>

(1. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang Jiangxi 330013, China; 3. School of Nation Defense of Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China)

**Abstract:** The security of reactor decommissioning is the most important during decommissioning activity. The radioactive hazards not only directly injure public, but also do great harm to the environment for a long time. The fault tree analysis method was employed to research the radiological hazards during the reactor decommissioning. Combining with an actual decommissioning case, the logical relationship between the accidents and the cause of the accidents was analyzed and summarized. The results showed that the factors causing the radiological hazard are complicated, which include internal exposure and external exposure hazards. Based on the analysis, some prevention and treatment measures were proposed to promote the safety of reactor decommissioning, and ensure the safety of human, substance and environment.

**Key words:** nuclear reactor; decommissioning; fault tree analysis; radiological hazard

收稿日期: 2013-04-15

作者简介: 刘自霞, 硕士研究生。

\* 基金项目: 成都理工大学科研启动项目(KR1115); 核废物与环境安全国防重点学科实验室开放基金项目(10zxnk01); 放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金项目(2011RGET022); 贵州省教育厅科技项目(2011010); 国家自然科学基金项目(41273031)。

## 0 引言

核设施退役是在其使用期满或因其它原因终止服役后,为了充分考虑公众的健康与安全及环境保护而采取的行动。其中,核反应堆经过多年的营运后,不但产生了万吨级的放射性废物,而反应堆本身也成为很强的辐射源<sup>[1]</sup>。因此退役的每一步都涉及辐射安全问题。我国自1955年建立核工业体系后,经过50年的发展,现在有很多核反应堆正在和已经运行到设计寿命期,将面临退役的问题。但相关的技术和经验比较缺乏,加上管理体制不完善等诸多原因,使退役工程进展比较迟缓<sup>[2]</sup>。

为实现反应堆顺利退役,我国制定了相应的法律法规及相关标准,如:《中华人民共和国放射性污染防治法》、《反应堆退役辐射防护手册》等。2005年IAEA发布了第45号安全报告,建议我国退役安全文件的类型应包括以下六类:

- (1)最终退役计划;
- (2)安全分析报告;
- (3)环境影响评价报告;
- (4)特性调查报告;
- (5)终态辐射调查报告;
- (6)最终退役报告<sup>[3]</sup>。

目前在反应堆退役危害的分析中,通常采用风险评估法、模糊算法、优先级方法<sup>[4]</sup>等。本文运用事故树分析法对反应堆退役工作场所的放射性危害因子进行分析。事故树分析是安全系统工程的重要分析方法,被广泛用于复杂的工程系统<sup>[5]</sup>。该方法不仅能找到引起事故的直接原因,也能揭示事故发生的潜在原因及本质原因,体现了以系统工程方法研究安全问题的系统性及预测性。

## 1 反应堆退役中发生放射性危害的事故树分析

反应堆退役是放射性废物的主要来源之一,这些废物主要来自去污、切割、解体、清污等活动<sup>[6]</sup>。虽然放射性设施的退役可带来许多非放射性工业危险,不过令公众最关注的还是放射性危害<sup>[7]</sup>。

以压水堆为例,反应堆在运行时,堆芯周围的材

料将受到最大程度的辐照,因此其污染和活化最严重。其次是一回路系统,其污染也相当严重。在20世纪80年代末,中国核动力研究设计院对两座小型压水堆实施了退役<sup>[8]</sup>。一回路采用AP—OC—AP化学法去污,采用的切割解体技术是专门研发或引进后改造的。运用便携式仪器和实验室取样分析相结合的方法对工作场所进行辐射监测。该退役制定个人剂量目标限制为10mSv/a,实际值低于5mSv/a。在该项退役中,有不少经验值得借鉴:

(1)先进行非放或低放设备的拆除,再进行放射性设备的拆除。

(2)在放射性设备拆除前,对主要的操作工艺进行模拟操作实验。

(3)剂量高的热点先拆除,采取局部屏蔽和增设临时排风。

结合以上案例,并对反应堆系统性能进行具体分析,建立了一个用事故树描述的事故模式。把可能发生的放射性事故及其危害因子进行分析。首先进行危害识别;然后是危害评估;最后是危险控制。

### 1.1 反应堆退役工作场所的放射性危害因子

在反应堆退役活动过程中,出现的危害性事故比较复杂,通过上述案例分析及对文献的整理<sup>[5,9-11]</sup>,退役中常出现的放射性危害事故及其危害因子有:

(1)内照射:通过食入、吸入等方式摄入放射性核素;

(2)外照射:主要在去污、切割、拆卸等过程中,产生较强的外照射;

(3)其他危害:主要是临界状态、遏制亏损、潜在污染等。

### 1.2 建立事故树分析图

根据反应堆退役活动中的放射性危险因子,把反应堆退役活动中发生的放射性事故作为事故树的顶事件。根据事故树的构造原理<sup>[12]</sup>,构造如图1所示的事故树,表1为事故树中各代码的具体事件。

### 1.3 求最小割集

根据以上事故树分析图,可以得出,有3个途径导致反应堆退役中放射性事故的发生,一是内照射;二是外照射;三是其他危害。为了对放射性事故做详细分析,利用布尔代数对其进行计算,求得最小割集。

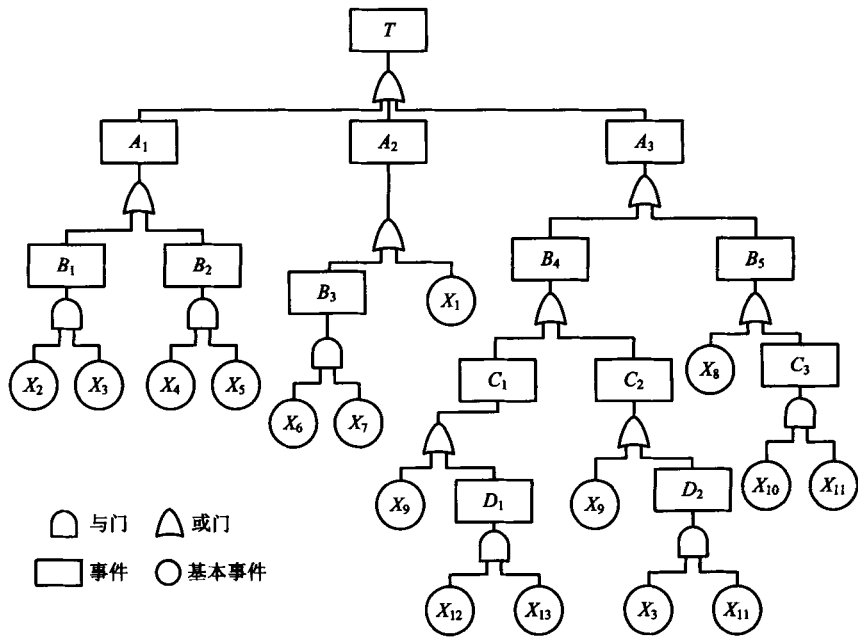


图 1 反应堆退役活动的放射性事故树图

表 1 事故树中基本事件代码

代码	事件	代码	事件	代码	事件	代码	事件
$T$	放射性事故	$B_4$	反应堆辐射	$X_1$	潜在污染	$X_8$	废物处理不当
$A_1$	内照射	$B_5$	乏燃料场辐射	$X_2$	物品被污染	$X_9$	操作不当
$A_2$	其他	$C_1$	去污中辐射	$X_3$	存放不当	$X_{10}$	标识不清
$A_3$	外照射	$C_2$	拆切中辐射	$X_4$	空间密闭	$X_{11}$	分类不清
$B_1$	食入放射性核素	$C_3$	贮存不当	$X_5$	通风不良	$X_{12}$	防护不当
$B_2$	吸入放射性核素	$D_1$	废液流出	$X_6$	放射物	$X_{13}$	设备功能失效
$B_3$	遏制亏损	$D_2$	部件丢失	$X_7$	屏蔽不当		

$$\begin{aligned} T &= A_1 + A_2 + A_3 \\ &= (B_1 + B_2) + (B_3 + X_1) + (B_4 + B_5) \\ &= (X_2 \cdot X_3 + X_4 \cdot X_5) + (X_6 \cdot X_7 + X_1) + (C_1 \\ &\quad + C_2 + X_8 + C_3) \\ &= (X_2 \cdot X_3 + X_4 \cdot X_5) + (X_6 \cdot X_7 + X_1) + ((X_9 \\ &\quad + D_1) + (X_9 + D_2) + (X_8 + X_{10} \cdot X_{11})) \\ &= X_1 + X_2 \cdot X_3 + X_4 \cdot X_5 + X_6 \cdot X_7 + X_8 + X_9 + \\ &\quad X_3 \cdot X_{11} + X_{10} \cdot X_{11} + X_{12} \cdot X_{13} \end{aligned} \quad (1)$$

由(1)式可得,引起事故的最小割集有 9 个,即有 9 条路径可以导致事故的发生,分别如下:

$$\{X_1\}, \{X_2, X_3\}, \{X_4, X_5\}, \{X_6, X_7\}, \{X_8\}, \{X_9\}, \{X_3, X_{11}\}, \{X_{10}, X_{11}\}, \{X_{12}, X_{13}\}$$

#### 1.4 基本事件的结构重要度分析

若不考虑基本事件发生的难易程度,仅从事故树的结构上研究各基本事件对顶事件的影响程度称为结构重要度分析,常用计算公式为:

$$I\phi(i) = \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k \frac{1}{m_r(x_i \in E_r)} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式(2)中, $k$  为最小割集总数; $E_r$  为第  $r$  ( $r=1, 2, \dots, k$ ) 个最小割集的标记; $X_i$  为基本事件; $m_r$  为第  $r$  个最小割集  $E_r$  中含有的基本事件的个数。用式(2)可计算出上述 9 个基本事件的结构重要度系数。经计算可得结果如下:

$$I((1)) = I((3)) = I((8)) = I((9)) = I((11)) = \frac{1}{9} \quad (3)$$

$$I((2)) = I((4)) = I((5)) = I((6)) = I((7)) = I((10)) = I((12)) = I((13)) = \frac{1}{18} \quad (4)$$

由式(3)、(4)可得,基本事件结构重要度排列为:

$$I((1)) = I((3)) = I((8)) = I((9)) = I((11)) > I((2)) = I((4)) = I((5)) = I((6)) = I((7)) = I((10)) = I((12)) = I((13)) \quad (5)$$

### 1.5 结果分析

通过对事故树最小割集的计算可知,最小割集有9个,有3个最小割集仅含有1个基本事件,其它6个最小割集中有2个基本事件。所以当 $X_1, X_3, X_8, X_9$ 中任何一个基本事件发生时,都有可能引起放射性事故的发生。

由上可知,外照射和内照射均能引起事故的发生。从结构重要度式(5)来看,其中 $X_1, X_3, X_8, X_9, X_{11}$ 引起事故发生的概率大于其他因素,所以更要注意这些危害因子,以避免发生事故。

## 2 预防反应堆退役中放射性事故发生的措施

由上面求得的最小割集的分布及各基本事件的结构重要度计算分析可知,反应堆退役所涉及的危险因子较多,放射性事故发生的可能性也大。为保障安全性,须从人员和管理方面着手<sup>[13-15]</sup>,以控制事故发生。

在反应堆退役过程中,务必把人员的安全放在第一位,为了人身安全,必须要做到:

(1)在整个操作过程中,必须要有保健物理学人员在场;

(2)工作人员必须经过专业培训,熟悉反应堆的结构特点;

(3)只有许可的人员才能从事反应堆退役工作,且必须在控制区内活动;

(4)工作人员必须佩戴相应的防护设备,如工作服、个人热释光剂量计、个人报警剂量计等;

(5)工作人员工作的时间必须要有明确规定。

事故的发生往往是因为管理不当,科学有序的管理方式不仅能加速退役的进行,更能保障退役活动的安全性,在管理上应当做好以下几点:

(1)在反应堆退役过程中,必须严格遵守规章制度;

(2)对工作人员的个人信息做好登记,统一管理;

(3)对废物来源、废物量、类型及其特征要分门别类作好记录;

(4)放射性废物必须标识清楚、分类明确,对其及时跟踪。对非放射性物品也要妥善安放;

(5)调查退役废物对工作人员、公众和环境的潜在影响。

## 3 总结

随着反应堆的退役,安全问题也随之产生。本文根据反应堆退役活动中事故发生的机理,运用事故树分析法对退役中的放射性危险进行辨别和评估,得出在退役过程中,放射性事故发生所涉及的因子较多,事故较复杂。文章进一步从人员及管理方面进行阐述,并根据反应堆的结构条件和放射性特点,提出了预防措施,保障人员、现场及环境的辐射安全。

## 参考文献

- [1] 罗上庚. 核设施退役中几个值得重视的问题[J]. 辐射防护, 2002, 22(3): 129-134  
LUO Shang-geng. Some noticeable issues of decommissioning of nuclear facilities[J]. Radiation Protection, 2002, 22(3): 129-134
- [2] 滕雁, 俞冀阳, 宗波, 等. 核反应堆退役初期辐射特性的探讨[J]. 核安全, 2005, (3): 34-37  
TENG Yan, YU Ji-yang, ZONG Bo, et al. Discussion of initial radiation on nuclear reactor decommissioning[J]. Nuclear Safety, 2005, 3: 34-37
- [3] 张鑫. 核设施退役安全相关文件的类型及其标准格式与内容的探讨[J]. 核标准计量与质量, 2010, (4): 9-14  
ZHANG Xin. Discussion on types and its standard format and content security related files of the decommissioning

- of nuclear facilities [J]. Nuclear standard measurement and quality, 2010, (4): 9-14
- [4] Jarjies A, Abbas M, Monken Fernandes H, Wong M, Coates R. Prioritization methodology for the decommissioning of nuclear facilities: a study case on the Iraq former nuclear complex [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 119(x): 70-78.
- [5] Purba JH, Lu J, Ruan D, Zhang G. A hybrid approach for fault tree analysis combining probabilistic method with fuzzy numbers [A]. 10th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, ICAISC 2010, June 13, 2010 - June 17, 2010. Zakopane, Poland: Springer Verlag, 2010: 194-201
- [6] 邢宏传, 周荣生, 徐济盛. 退役核设施放射性存留量估算方法研究 [J]. 核动力工程, 2005, 26(6): 544-547  
XING Hong-chun, ZHOU Reng-sheng, XU Ji-jun. Study of estimating method for residual radioactive on decommissioning nuclear establishment [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(6): 544-547
- [7] Jeong K-S, Lee K-W, Lim H-K. Risk assessment on hazards for decommissioning safety of a nuclear facility [J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(12): 1751-1762
- [8] 罗上庚, 张振涛, 张华. 核设施与辐射设施的退役 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. 193-199
- [9] Jeong K-S, Lee K-W, Jeong S-Y, Lim H-K. Estimation on probability of radiological hazards for nuclear facilities decommissioning based on fuzzy and event tree method [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(11): 2606-2611
- [10] Jeong K, Lee D, Lee K, Lim H. A qualitative identification and analysis of hazards, risks and operating procedures for a decommissioning safety assessment of a nuclear research reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2008, 35(10): 1954-1962
- [11] Jeong K-S, Lim H-K. Factor analysis on hazards for safety assessment in decommissioning workplace of nuclear facilities using a semantic differential method [J]. Annals of Nuclear Energy, 2009, 36(10): 1639-1647
- [12] 杨虹霞, 孙有仙. 事故树定性分析法在实际运用中存在的问题 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9): 203-206  
YANG Hong-xia, SUN You-xian. Problems of fault tree in analysis in practical application [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(09): 203-206
- [13] 张立生. 21 世纪铀工业所面临的某些环境问题 [J]. 世界核地质科学, 2004, 21(2): 83-86  
ZHANG Li-sheng. Some environmental challenges which the uranium production industry faces in the 21st century [J]. World Nuclear Geoscience, 2004, 21(02): 83-86
- [14] Jeong K-S, Lee K-W, Moon J-K, Jeong S-Y, Lim H-K. Quantification model for estimating the radiological risks of decommissioning processes in nuclear facilities [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38(11): 2612-2618
- [15] 任宪文. 核设施退役的环境安全 [J]. 辐射防护通讯, 2006, 26(1): 5-9  
Ren Xian-wen. Environmental safety in decommissioning of nuclear facilities [J]. Radiation Protection Bulletin, 2006, 26(1): 5-9