

文章编号: 0258-0926(2016)S1-0111-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0111

铀转化设施应急行动水平的制定方法

吴 静¹, 董 博¹, 马文财², 黄 婧¹

1. 国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080; 2. 中核 404 有限公司, 甘肃嘉峪关, 735100

摘要: 对铀转化设施的安全特征和潜在危险进行了分析。在调研国际原子能机构 (IAEA) 和美国能源部 (DOE) 制定应急行动水平 (EAL) 的方法以及借鉴国内外核电厂制定 EAL 的实践基础上, 结合核燃料循环设施核应急状态等级划分的准则和铀转化设施危险特征, 给出制定 EAL 的方法。

关键词: 铀转化; 应急行动水平 (EAL); 应急初始条件

中图分类号: TL213; TM623. 8 **文献标志码:** A

Methodology of Developing the Emergency Action Levels of Uranium Conversion Facility

Wu Jing¹, Dong Bo¹, Ma Wencai², Huang Jing¹

1. Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing, 100080, China; 2. The 404 Company Limited, China National Nuclear Corporation, Jiayuguan, Gansu, 735100, China

Abstract: We analyzed the safety features and potential risks of the uranium conversion plant. The analytical method of the UF₆ or HF leakage accident was presented. We gave the justification of working out the EAL (Emergency Action Level) of the uranium plant on the basis of investigations of the practice taken by International Atomic Energy Agency (IAEA) and US Department of Energy (DOE). The rules of assessing emergency states and the risk features were also considered in the research.

Key words: Uranium conversion, Emergency action level, Emergency initiating condition

0 引言

铀转化属于核燃料循环的前端工艺, 泛指铀化合物的转化过程, 包括天然铀转化、浓缩铀转化、堆后铀转化和贫化铀转化等。核工业中所指铀转化工艺一般是指 UO₂ 制备成 UF₄ (绿盐) 并再转化成 UF₆ 的生产过程。由于铀的放射性和转化过程是在强腐蚀、强氧化气氛中进行, 与其他核设施相比, 铀转化设施在事故状态下, 不仅仅要考虑放射性对人身和环境的影响, 还应考虑化学毒性对人身和环境所造成的影响。

本文以 UO₂ 采用干法制备成 UF₄ 并再转化成 UF₆ 的生产设施为例, 对一般铀转化设施的安全特征和潜在风险分析方法进行说明, 并给出核应

急状态等级划分的准则以及铀转化设施典型的应急初始条件 (ICs) 和应急行动水平 (EALs) 制定方法。

1 铀转化设施的安全特征

1.1 生产工艺

UF₄ 的干法生产主要是利用流化床、移动床、卧式搅拌床等氢氟化专用设备, 实现 UO₂ 与无水 HF 接触并反应, 制备出 UF₄。UF₄ 在流化床、火焰炉等专用氟化反应器中与 F₂ 反应; 对反应生成的气体进行分离 (凝华接收、冷凝液化), 制成符合铀同位素分离使用的 UF₆ 产品。其生产工艺主要包括电解制氟、氟化、液化等部分。

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-01-29

作者简介: 吴 静 (1968—), 女, 高级工程师, 现主要从事核安全审评工作

1.2 铀转化工艺过程特点

铀转化的主要操作对象为铀及其化合物。有别于其他核化工操作，在铀转化生产的各个阶段中，多数操作为典型的气-固相化学反应，铀及其化合物不仅具有放射性，还具有化学毒性。铀转化过程中 HF、F₂ 等物质的使用，使得铀转化设施存在很高的化学风险特征。这是由于 HF 的化学毒性和腐蚀性，F₂、UF₆ 是强氧化物质，一定量的 F 进入人体后会对骨骼、甲状腺等产生破坏性影响。因此，对于铀转化设施的核应急准备与响应，在充分考虑设施放射性后果的同时也要考虑其化学毒性。

1.3 监测手段

铀转化设施内放射性物质主要有 UO₂、UF₄、UF₆；危险化学品物质主要有 HF、F₂ 等。铀转化设施内设置有对工厂和环境安全有关的安全监测和报警系统，包括工艺监测、工作场所辐射水平、铀放射性气溶胶监测、流出物等项目进行监测以及 UF₆ 泄漏、HF、F₂ 的探测报警。铀转化设施一般对氢氟化、氟化、冷凝液化、电解制氟、废液处理的工艺参数采用分布式控制系统（DCS）控制。通过环形以太网将氢氟化、氟化、冷凝液化、电解制氟的 DCS 接入综合管理控制室。通过上述监测仪表控制系统，对设施状态进行监测，通过工艺参数和报警信号及时测量、观测或发现设施的异常工况，是制定 IC 和 EAL 的重要基础。

2 主要事故及后果分析方法

表 1 列出了铀转化设施主要事故类型和探测手段。铀转化设施 UF₆ 和 HF 的大量泄漏所造成的后果最大^[1-2]。对于天然铀转化设施设计基准，UF₆ 事故最大泄漏量取值为 40 kg^[3]，同时考虑了铀转化设施 HF 泄漏的化学风险。为便于确定事故影响范围，制定 EAL，采取重气体模式分别计算了 UF₆ 泄漏对距离泄漏点不同距离地点所造成的有效剂量（CEDE）（图 1）。

由于 UF₆ 蒸气比重较大，在大气中迅速沉降。一个典型数据是：在温度 25℃、相对湿度为 50%、风速为 2 m/s 时，40 kg 的 UF₆ 在地面排放模式下进入大气后仅能到达距离释放点下风方向 685 m 远。故采取重气体模式计算。

由图 1 可见，UF₆ 泄漏主要的辐射危害在泄漏点附近，随着距离增加迅速减小。对于 UF₆ 的

表 1 铀转化设施事故序列

Table 1 Accident Sequence of Uranium Conversion Plant

部位	事故类型	事故原因	测量、观察或报警手段	缓解措施
HF 蒸发罐	HF 泄漏	管道、阀门泄漏、罐体化学腐蚀	观察压力表、温度计、液面计；利用嗅觉探测；氨水试漏	闭阀门；撤离、抢救人员；消漏处理
氟化厂房	UF ₆ 泄漏	炉体蚀穿管道泄露	观察压力、温度；泄漏报警；利用视觉探测；气溶胶监测	闭阀门；撤离、抢救人员；消漏处理
冷凝液化厂房	UF ₆ 泄漏	容器爆裂管道泄漏	同上	闭阀门；撤离、抢救人员；消漏处理
废液回收厂房	液氨泄漏	管道泄漏	观察压力、温度；利用嗅觉探测；氨浓度监测	关闭阀门；撤离、抢救人员
电解制氟厂房	H ₂ 着火爆炸	H ₂ 泄漏	气监测报警；火灾探测	应急响应；善后处理
	F ₂ 着火爆炸	F ₂ 泄漏	气监测报警；火灾探测	应急响应；善后处理
UF ₆ 成品库	运输容器破裂	称重、装车坠落	视觉发现	止操作；紧急堵漏

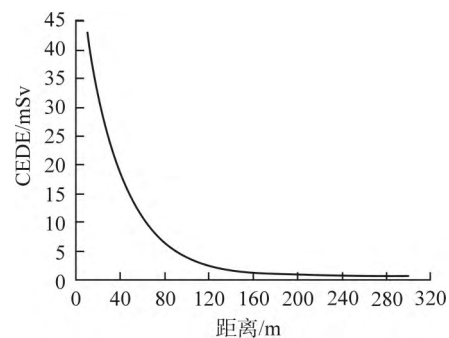


图 1 40 kg UF₆ 大气释放造成的 CEDE

Fig. 1 CEDE Caused by Air Release of 40 kg UF₆

泄漏，由于 UF₆ 的迅速沉降，在确定的辐射影响下，影响范围的大小与释放量并不成简单的线性关系。在制定 EAL 时，根据文献[2][4][5]，对于天然铀，更重要的还应考虑铀的化学毒性；在放射性防护行动标准（PAC）还未达到时，其浓度可能已经超过公众铀急性吸入限值的水平。因此，在估算 UF₆ 泄漏事故辐射后果的同时，也应考虑铀的化学毒性，以合理制定 EAL。

与 UF₆ 的重气体扩散模式不同，HF 的密度与

空气相似，厂房包容率低，且在 UF₆ 泄漏处理淋洗过程及 UF₆ 扩散过程中会不断产生。故 HF 的影响距离要远于 UF₆ 的影响距离。

依据美国应急管理办公室、美国环境保护署 (EPA) 与应急响应机构 (ERD)、美国国家海洋大气局 (NOAA) 联合发布的通用大气污染物扩散计算程序 ALOHA5.4.2 的计算模式，在忽略 HF 与水蒸气反应的条件下，40 kg UF₆ 泄漏产生的 HF 在距离泄漏点 1 km 远处仍可达到非放射性防护行动标准 (ERPG-2) 的水平。

3 编制铀转化设施 EAL 的依据

3.1 应急状态等级的判定准则

应急状态等级划分为应急待命、厂房应急、场区应急和场外应急^[6]。结合国内铀转化设施一般特点，根据上述 UF₆ 泄漏事故分析后果，铀转化设施应急状态等级一般可划分为：应急待命、厂房应急、场区应急，但在处于加热状态的数吨级 UF₆ 热罐破裂时，应考虑进入场外应急。

根据对国际原子能机构 (IAEA)、美国能源部 (DOE) 制定 EAL 方法和国内所给出的核电厂、研究堆及其他核设施 EAL 的研究分析，认为参照美国 DOE 标准所给出的核燃料循环设施应急状态分级准则更为适合^[7]，主要原因如下：

(1) IAEA 标准中所述相对原则，不便于直接引用。

(2) 相关核电厂的 EAL 描述虽然比较详细，但很多方面不适合应用于核燃料循环设施。

(3) 美国 EAL 的相关规定，所针对的对象与铀转化设施类型相似，并且有量化的准则，便于参照执行。

对于应急状态划分准则的设施边界定义为：距离释放点半径为 100 m 的周界；但是，在 100 m 半径内有实体栅栏或围墙时，厂房围墙为设施边界，一般是指核设施所在的边界。场区边界一般是指具有确定的边界，由核设施营运单位有效控制的核设施所在区域^[6]。

对于危险物质，应急状态划分准则采用美国 NUREG6410^[8] 中非放射性防护行动标准 ERPG-2。UF₆ 的 ERPG-2 值为 15 mg/m³，HF 的 ERPG-2 值为 20 ppm。

3.1.1 应急待命 基本特征和准则：某些设备故障、内部或外部人为事件（如设施的实体保护应

爆炸物或骚乱而受到威胁或破坏）或严重的自然灾害（洪水、地震、龙卷风等）均可导致应急待命状态。

对于铀转化设施，当厂房和环境安全监测异常，发出报警信号时，安保事件、有感地震等自然灾害均可导致应急待命等级。

3.1.2 厂房应急 基本特征和准则：评价表明，辐射危害仅限于场区的局部区域（如某些厂房内），未扩大到整个场区，更不会对场外构成威胁。

放射性准则：设施发生事故所造成的放射性后果满足下列条件之一时，即进入厂房应急：设施边界内距事故释放点 30 m 处人员所受剂量大于或等于 PAC，也可认为是紧急防护行动干预水平^[7]，即 10 mSv；设施边界处人员所受剂量 10%PAC 且 < 1PAC，即 1 mSv 且 < 10 mSv。

危险化学物质准则：设施发生事故所造成的危险化学后果满足下列条件之一时，即进入厂房应急：距事故释放点 30 m 处人员所受的化学危害 ERPG-2；设施边界处人员所受的化学危害 > 10%ERPG-2 且 < ERPG-2。

3.1.3 场区应急 基本特征和准则：评价表明，辐射危害仅限于场区内及场区边界附近，不会对场外构成威胁。

放射性准则：事故造成设施边界处或超越设施边界处的人员所受剂量 PAC，即 10 mSv，且场区边界处人员所受剂量 10 mSv。

危险化学物质准则：事故造成设施边界处或超越设施边界处的人员所受的化学危害大于 ERPG-2，且场址边界处人员所受的化学危害低于 ERPG-2。

3.1.4 场外应急 基本特征和准则：评价表明，辐射危害已经或预期会对场外地区构成威胁。

放射性准则：场址边界处或超越场址边界以外的地方，事故造成人员所受剂量 10 mSv。

危险化学物质准则：场址边界处或超越场址边界以外的地方，事故造成人员所受的化学危害大于或等于 ERPG-2。

3.2 IC 和 EAL 的定义

我国尚未颁布指导制定核燃料循环设施应急状态分级的 IC 和 EAL 的标准或导则。在编制 IC 和 EAL 时，参考了美国对核燃料循环设施和轻水堆制定的准则 (NUMARC/NESP-007)^[9]，并借

鉴国内核电站的成功经验。所采用 IC 和 EAL 的定义在本质上与 NUMARC/NESP-007 中所给出的定义相同,但文字表述上结合核燃料循环设施的特点作了少许调整。

3.2.1 IC 预先确定的用于决定核设施发生或可能发生核应急而应当进入某一等级应急状态的所有初始条件,称之为 IC。

(1) IC 是超出技术规格书限值的参数值或征兆,如主控制室发现立式炉压力、温度异常;也是某个事件或现象,如龙卷风、火灾;也可以是包容危险物质屏障的失效,如 UF₆ 贮罐泄漏。

概括地说,IC 可以是“基于事件的”、“基于征兆的”或“基于事件及征兆的”。基于危险物质屏障的 IC,则属于基于事件及征兆 IC 中特别重要的一类。

(2) 某个 IC 既是制定其所对应 EAL 的基点,也是对所对应 EAL 的概括性表达。

IC 本身通常就具有一定程度的可观测性和(或)可操作性;或者本身虽不直接具有可观测性和(或)可操作性,但可以由其所对应的 EAL 使其具有可观测性和(或)可操作性。

(3) 如果 IC 本身就具有较好的可观测性和(或)可操作性,则可直接作为 EAL。由此可见,某个 IC 既是制定其所对应 EAL 的基点,也是对所对应 EAL 的概括性表达。

3.2.2 EAL 对应于某一应急状态下的某个 IC,对指定核设施所确定的可衡量的某个参数的阈值或可界定的状态,称之为 EAL。

3.3 铀转化设施 EAL 制定方法

铀转化设施 EAL,则是指用于识别和判定导致设施处于某一等级,紧急状态的事件(事故)或事件(事故)发展程度的那些可观察事件、可观测参数阈值或可观察的特定状态。例如:某个仪表的读数、某个设备状态的指示、场内或场外某个可测量的参数值、某个可观察到的离散事件、分析计算结果、应急运行规程的启用和其他指示进入指定应急状态等级的情况(如果这些情况发生的话)。

EAL 当然也是“基于事件的”、“基于征兆的”或“基于事件及征兆的”,但还必须是“可观察的和可操作的”。参照我国核电厂并借鉴国外的作法^[10-11],将 IC 和 EAL 分别以 4 个表的形

式给出了 A 类(异常辐射水平/放射性流出物异常)、F 类[危险物质安全屏障降级(管道和容器的失效)]、S 类(系统故障)和 H 类(影响设施安全的灾害和意外事件)4 个识别类型。

判定铀转化设施应急状态等级的依据是根据事先制定铀转化设施 IC 和 EAL。而制定 IC 和 EAL 的前提是对设施进行危险分析,核心是根据监测和报警仪表,及时发现、识别和确定事件的特征,并根据铀化设施危险分析来确定。在事故情况下,根据不同的 EAL 判定应急状态等级。

4 结束语

EAL 是判定应急状态等级的重要准则,与一般核燃料循环设施相比,铀转化设施要特别考虑其化学风险。在制定 EAL 时,首先应进行设施的危险分析,采用矩阵表的形式,给出导致各种应急等级的 IC,并通过文字或量化的可观测、测量指标进一步列出每条 IC 所相应的 EAL。

参考文献:

- [1] 栗万仁,魏刚,姚守忠. 铀转化工艺学[M]. 中国: 原子能出版社, 2012.
- [2] U.S. Department of Energy. Guide of good practices for occupational Radiological protection in uranium facilities [M]. DOE-STD-1136-2-9, 2009.
- [3] GB/T51013-2014. 铀转化设施设计规范[S].
- [4] 吴德强. 铀吸入的防护标准及其应用中的某些问题[J]. 辐射防护, 2013,1: 3-5.
- [5] International Atomic Energy Agency. Safety of Conversion facilities and uranium enrichment facilities[R]. Specific Safety Guide No. SSG-5. IAEA, 2010.
- [6] HAD002/07—2010. 核燃料循环设施营运单位的应急准备和应急响应[S].
- [7] 制定应急行动水平方法研究报告[R]. 北京: 国防科工局核技术支持中心, 2012.
- [8] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Nuclear fuel cycle facility accident analysis handbook[R]. NUREG/CR-6410,1998.
- [9] Methodology for Development of Emergency Action Levels[R]. NUMARC/NESP-007, Draft Final Rev. 3, NEI 97-03, 1998, 10.
- [10] International Atomic Energy Agency. Significant incidents in nuclear fuel cycle facilities[R]. IAEA-TEDOC-867, 1996.
- [11] Bailiff G, Bolling J D. OAK RIDGE Y-12 Plant emergency action level(EAL) process [R]. U.S. Department of Energy, EMPO-559, REV. 2, 2000. 8.

(责任编辑: 刘 君)