

国外乏燃料后处理设施爆炸事故的经验教训

吕丹, 杨晓伟, 汪世军, 张春龙*, 赵善桂, 刘新华

生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082

摘要 爆炸事故是乏燃料后处理设施潜在事故的一种重要类型。为汲取国外发生的后处理设施爆炸事故的经验教训, 对国外有记载的 11 起爆炸事故的原因和后果进行了统计分析, 形成了对中国后处理设施爆炸事故的预防措施和缓解措施的经验反馈。经验反馈结果表明, 后处理设施爆炸事故预防措施设计应关注: 蒸发设备中进料 TBP 含量和酸度控制, 避免溶解设备中意外放热反应发生, 确保高放废液贮存设备冷却系统的有效性, 避免硝酸类物质在贮存设备中意外蒸干以及避免人因失误; 后处理设施爆炸事故缓解措施应关注: 包容屏障的爆炸热荷载、爆炸力学荷载以及泄爆措施设计, 高放废液应急冷却措施设计以及适宜的应急行动设计。

关键词 乏燃料后处理设施; 爆炸事故; 核燃料循环

乏燃料后处理可以实现核燃料的回收利用, 并有利于核废物的妥善处置, 是核燃料“闭式循环”不可或缺的环节之一。中国已经具备乏燃料后处理能力, 中国和法国合作建设核循环后端项目(即乏燃料后处理项目)也在稳步推进。

中国《民用核燃料循环设施安全规定》(HAF301)对乏燃料后处理设施提出的技术安全目标为: 采取一切合理可行的措施预防事故; 对设计中考虑的所有事故, 要确保事故辐射影响是可接受的, 并确保那些会导致严重辐射后果的事故发生的

可能性极低^[1]。2017年, 国际原子能机构(IAEA)发布的《核燃料循环设施安全》(SSR-4)对乏燃料后处理设施提出的安全目标为: 控制人员的辐射照射和放射性物质向环境的释放; 限制可能导致对核反应堆堆芯、核链式反应、放射源或任何其他辐射源丧失控制事件的可能性; 缓解此类事件发生的后果^[2]。2017年, 国家核安全局在《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标》中明确提出, 深入开展核燃料循环设施事故分析, 完善对临界、火灾、爆炸、泄漏等风险的预防、监控和缓

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-25

基金项目: 国家自然科学基金委员会—中国核工业集团有限公司核技术创新联合基金(U1867203)

作者简介: 吕丹, 高级工程师, 研究方向为核燃料循环设施事故安全, 电子信箱: lvdan03@126.com; 张春龙(通信作者), 高级工程师, 研究方向为核燃料循环设施安全, 电子信箱: zhchlhy@163.com

引用格式: 吕丹, 杨晓伟, 汪世军, 等. 国外乏燃料后处理设施爆炸事故的经验教训[J]. 科技导报, 2020, 38(7): 118-124; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.07.015

解措施^[3],并要求核燃料循环设施安全风险进一步得到消除^[3]。因此,作为核燃料循环设施领域的重要设施类型,乏燃料后处理设施潜在的可信事故的预防和缓解是乏燃料后处理设施核与辐射安全设计、审评、监督工作的重点之一。

1995年,国家核安全局发布了指导乏燃料后处理设施事故分析的技术文件《乏燃料后处理厂潜在事故的假设》(HAF J0051)。HAF J0051根据美国核管理委员会(NRC)法规导则3.33、埃克松核燃料回收和再循环中心初步安全分析报告等资料编写^[4],给出的大事故列表和设计基准事故列表中共包括6类爆炸事故,具体为钷蒸发浓缩器内红油(硝化磷酸三丁酯(TBP)和类似化合物)爆炸、硝酸钷槽氢爆炸、容器排气系统的碘吸附塔爆炸、处理溶剂的离子交换树脂床着火和爆炸、高放废液贮槽爆炸以及高放废液蒸发浓缩器内的红油爆炸。由此可见,爆炸事故是乏燃料后处理设施潜在事故假设的一种重要事故类型,对爆炸事故进行合理可行的预防或缓解对于保障后处理设施核与辐射安全具有重要意义。

20世纪50年代,俄罗斯曾发生高放废液贮罐爆炸事故,污染面积 $1.5 \times 10^4 \sim 2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,撤走2.7万人,撤出居民所受集体剂量约为 $1.3 \times 10^3 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$,留下居民所受集体剂量约为 $1.2 \times 10^3 \text{ 人} \cdot \text{Sv}$ ^[5]。按照国际核事件分级,该事故属于6级重大事故^[5],是仅次于苏联切尔诺贝利核电站事故和日本福岛核事故的严重事故。为汲取实际发生的爆炸事故的经验教训,本文对国外后处理设施爆炸事故的原因和后果进行了统计和分析,结合经验反馈情况,对中国后处理设施爆炸事故(以下简称爆炸事故)的预防或缓解措施设计提出建议。

1 国外发生的爆炸事故

截至2017年,国外共计报道了11起实际发生的爆炸事故^[6-7],根据《乏燃料后处理和相关事故景象回顾》(NUREG/CR-7232)^[6]的汇总,爆炸事故所在国家、所在设施、发生时间、事故类型和事故描述如表1所示。

表1 国外实际发生的爆炸事故汇总

序号	所在设施	年份	事故类型	事故描述
1	美国,汉福特	1953	硝化氧化反应-设备失效	事故发生在321号楼,一台进料泵在使用新鲜钷的新蒸发器的初始运行过程中发生了故障。TBP意外出现在进料中。除泵失效外,蒸发过程持续导致正常浓度和温度超标。大量红色烟雾逸出导致了爆炸
2	美国,萨凡纳	1953	硝化氧化反应-设备失效/人因失误	硝酸钷酰溶液在设施中进行批量蒸发浓缩,以从溶液中除去过量硝酸。硝酸钷酰与煤油中30%TBP溶剂接触。大约80磅TBP意外出现在进料中,导致温度升高,最终导致爆炸
3	俄罗斯,马雅克	1957	硝化氧化反应	来自乙酸盐沉淀工艺过程的含有硝酸钠和乙酸盐的高放废液储存在地下贮槽中。其中一个贮槽的冷却系统失效,贮槽内温度上升至350℃。贮槽内物质蒸干,造成相当于75 t 三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)的大规模爆炸。超过2000万Ci的放射性被释放到环境中
4	法国,阿格	1970	爆炸	石墨燃料的溶解反应温度急剧升高,导致氢气产生,进一步导致裂变产物爆炸和释放。在烟囱过滤器上记录了5900 GBq,主要是Sb-125(95%)和I-131(5%)
5	英国,温斯克	1973	火灾/爆炸	后处理容器中的放热化学反应
6	美国,萨凡纳	1975	硝化氧化反应-设备失效/人因失误	在H-Canyon外部设施,携带了未知数量有机物质的硝酸钷酰煅烧制备UO ₃ 。在爆炸之前,密集红色烟雾释放到脱硝室
7	美国,汉福特	1976	爆炸	离子交换柱发生化学反应和爆炸。在爆炸发生时,一名工人位于安装该离子交换柱的手套箱前面。这名工人被手套箱破碎的窗户玻璃弄伤,并受到Am-241污染。爆炸前曾利用该离子交换树脂捕集Am,在爆炸过程中Am分散到整个房间

表1 国外实际发生的爆炸事故汇总(续表)

序号	所在设施	年份	事故类型	事故描述
8	美国,爱达荷	1991	爆炸	1991年2月9日,爱达荷化工厂发生了小型爆炸,在溶解作业期间,一个6英寸直径的硼硅酸盐玻璃容器炸裂,该容器用以从主要是铀-钚的碎片燃料罐中回收1.9 kg高富集度、未经辐照的铀燃料。这些铀被钚、钷和其他核素沾污。溶解器设置在步入式包容罩内。在爆炸过程中,一些热的硝酸和铀溅到该区域的3名操作人员身上。他们没有受到酸或玻璃碎片的伤害,但3名操作员和1名应急响应工作人员受到 α 污染,污染程度不严重。位于故障单元旁边的第二个溶解器完好无损,其他设备没有损坏。证据表明曾发生 ϵ 相U-Zr ₃ 合金与硝酸的反应
9	俄罗斯,马雅克	1993	火灾/爆炸	含有烷烃和TBP的溶液贮罐爆炸。爆炸强度足以击倒设施两层楼板并引起火灾。该事故对后处理工艺线和建筑物均造成了损害。该事故导致了约30 TBq(810Ci)的 $\beta+\gamma$ 放射性核素、以及约6 GBq(0.162Ci)的Pu-239的释放
10	日本,东海	1997	火灾/爆炸-人因失误	后处理厂的沥青废物处理设施发生了火灾。沥青用于固化中放废液。在监测化学反应中出现失误后发生了明显的火灾。火灾没有被完全扑灭,在化学物质积累约10小时后发生了爆炸,爆炸导致设施丧失包容
11	美国,汉福特	1997	爆炸-人因失误	含有硝酸羟胺和硝酸的容器蒸发至蒸干,由此产生的爆炸摧毁了容器,并在建筑物的屋顶上炸出了一个洞

2 分析与讨论

源、事故原因、包容屏障的破坏程度以及对工作人员、公众或环境的影响进行分析和汇总(表2)。

对表1中11起爆炸事故发生的所在设备、爆炸

表2 国外实际发生的爆炸事故原因和后果统计表

事故序号	事故发生所在设备	事故爆炸源	事故原因	事故对包容屏障的破坏程度	事故对工作人员、公众或环境的影响
1	蒸发浓缩器	红油	TBP意外引入铀的蒸发浓缩器	—	—
2	蒸发浓缩器	红油	TBP引入硝酸铀酰溶液的蒸发浓缩器	—	—
3	高放废液贮槽	—	高放废液贮槽丧失冷却后,高放废液释热导致蒸干	等效于75 t TNT的爆炸威力	向环境释放 7.4×10^{16} Bq的放射性
4	溶解设备	氢气	石墨燃料溶解反应温度急剧上升,导致氢气生成	—	烟囱(排气)的过滤器捕集了 5.9×10^{12} Bq的放射性
5	贮槽	—	发生了放热化学反应	—	—
6	煅烧设备	红油	在硝酸铀酰焙烧生成三氧化铀的设备中,不明数量的有机物质意外引入	—	—
7	离子交换柱	—	—	装有该离子交换柱(用于捕集Am-241)的手套箱的玻璃破损,离子交换柱捕集的Am-241扩散到房间里	手套箱前的工作人员被破损的玻璃弄伤,且受到Am-241沾污
8	溶解设备(直径约15 cm的硼硅酸盐玻璃容器)	—	ϵ 相的U-Zr ₃ 合金与硝酸发生了反应	产生了玻璃碎片(意味着该玻璃容器有破损),相邻的溶解器完好,其他设备未受损坏	3名操作人员和1名应急响应工作人员受到 α 沾污,沾污并不显著

表2 国外实际发生的爆炸事故原因和后果统计表(续表)

事故序号	事故发生所在设备	事故爆炸源	事故原因	事故对包容屏障的破坏程度	事故对工作人员、公众或环境的影响
9	容器	红油	烷烃和TBP	损坏设施的两层楼板,并导致了火灾	释放了 3×10^{13} Bq的 $\beta+\gamma$ 放射性核素,以及 6×10^9 Bq的Pu-239
10	沥青废物设施	—	火灾未完全扑灭,持续10个小时后发生了爆炸	设施的包容屏障失效(意味着建(构)筑物受损)	—
11	贮存容器	—	硝酸羟胺和硝酸溶液蒸干	容器损坏,且建(构)筑物的房顶炸出一个洞	—

注:—表示文献NUREG/CR-7232^[6]中未描述相关内容。

2.1 爆炸事故发生的时间和位置

由表1可知,在具备一定规模后处理能力的外国国家(包括法国、英国、美国、俄罗斯、日本)中均报道过实际发生的爆炸事故。20世纪50年代、70年代、90年代分别报道过3起、4起和4起爆炸事故。因此,重视爆炸事故的预防和缓解非常必要。

从表2事故发生的所在设备看,除了HAF J0051中关注的高放废液蒸发器、高放废液贮存容器、离子交换树脂等设备外,还应重视一些非常规的发生爆炸事故的设备位点,例如第6号事故发生在煅烧设备、第4和第8号事故发生在溶解器、第11号事故发生在贮存容器。

2.2 爆炸事故原因分析和预防措施经验反馈

由表2可知,第1、2、6、9号共4起爆炸事故的爆炸源均为红油;第4号爆炸事故的爆炸源为氢气;第5、7、10共3起事故未做详细描述,无法推测事故爆炸源;其余3起事故的爆炸源虽未做详细描述,但根据事故爆炸原因,可推测爆炸源如下:高放废液释热蒸干后生成的含氮的不稳定化合物(第3号事故)、 ϵ 相的U-Zr₃合金和硝酸反应生成了含氮的不稳定化合物(第8号事故)、硝酸羟胺与硝酸蒸干后反应生成了含氮的不稳定化合物(第11号事故)。HAF J0051的事故分析要求中,也包括了红油、氢气两类爆炸源,但未涵盖其他类型的含氮不稳定化合物。

红油爆炸事故原因一般包括有机相(TBP、煤油等稀释剂及其辐解产物)、硝酸(或重金属硝酸盐)和温度3方面要素。从表2导致事故的原因看,

第1、2、6号红油爆炸类型的事故均是因为意外引入了有机相(TBP、煤油等稀释剂及其辐解产物);而第9号红油爆炸事故主要是意外引入高浓度硝酸所致^[7]。由此可见,对于此类型爆炸事故,进料中夹带TBP含量的控制以及酸度的控制非常重要。美国能源部国防核设施委员会提出应控制TBP的量,且控制硝酸浓度低于10 mol/L^[8]。因此,除严格控制硝酸浓度外,对于可能夹带TBP的进料,应利用稀释剂(如煤油)洗涤除去TBP。

第3号爆炸事故是由于高放废液贮槽丧失冷却所致。后处理设施一般都配套建有高放废液的贮槽,用于高放废液玻璃固化之前的暂存。根据中国《高水平放射性废液贮存厂房设计规定》(GB11929-2011),高放废液贮槽内应设冷却装置,并满足百分之百的备用^[9];此外,贮槽应设置独立的应急冷却系统,在正常冷却水供应中断时,保证贮槽内的废液温度仍低于60℃^[9]。可以推测,在该起事故发生的1957年,当时设计可能未考虑备用或应急冷却用水,或者设计上考虑了,但事故当时无法投入运行。因此,要重视高放废液贮槽冷却系统有效性,在冷却系统(含冷却水源)设计的冗余度、多样性、独立性等方面做出周密安排,确保余热及时排出。

第4、8号爆炸事故均发生在溶解的工艺环节。第4号事故是因溶解温度急剧上升,造成石墨燃料与水在高温下反应生成了氢气和一氧化碳所致。第8号事故是由于 ϵ 相的U-Zr₃合金与硝酸发生了反应所致,表1中未描述该事故具体反应机理。

第4、8号事故均为溶解反应中发生了意料之外的化学反应。其中,第4号事故反映出该溶解工序对石墨燃料溶解的反应温度上升预料不足或失去控制,最终导致了氢气的生成。第8号事故反映出待溶解铀燃料的溶解化学反应机理未得到充分地考虑,最终导致了 ϵ 相U-Zr₃合金与硝酸发生了反应。由此,需要加强对溶解反应的机理研究和工艺条件控制,避免意外反应的发生。

第10号事故由于火灾未及时完全扑灭而造成,属于次生事故。对于像第10号事故中沥青废物设施这样类型的存有大量易燃物质的设施,应考虑合理的防火分区,设计充分而完备的火灾预防、探测、报警系统以及配套能力的灭火系统,避免火灾长时间持续而引发次生事故。中国《乏燃料后处理厂设计安全准则》(HAF J0050)对防火安全有原则性要求,如:应尽可能地在整个设施内,尤其是对封闭和控制放射性物质重要的部位采用非燃或阻燃材料^[9];必须设置有足够容量和能力的灭火系统^[9]。

第11号事故为贮存容器内硝酸羟胺和硝酸被蒸干后所致。尽管表1未描述该事故具体反应机理,但是可以合理推测,硝酸羟胺和硝酸蒸干后反应生成了含氮的不稳定的化合物。为了避免类似的意外蒸干,需要关注相关的预防、监测或缓解措施,如关注贮存容器液位实时监测情况、落实贮存容器的定期倒空和清洗、对容器内组分进行定期取样分析等。

此外,根据表1归纳结果,第2、6、10、11号共4起事故还涉及操作人员误操作。因此,在后处理设施各操作岗位的人员选拔、岗位培训、操作规程制定和落实管理等方面也需要格外重视。必要时,在执行操作程序方面,增加对具体操作的核实环节。

2.3 爆炸事故后果分析和缓解措施经验反馈

根据表2关于包容屏障破坏程度的统计结果,第7、8号事故损坏了第一层包容屏障,第9、10、11号事故造成了建(构)筑物的损坏。相比而言,在HAF J0051关于纠正措施的表述中,除高放废液贮槽爆炸事故外,其他爆炸事故均提到了“对设备室和设备进行去污”^[14]或类似含义的纠正措施。由纠正措施反推,HAF J0051中的大部分爆炸事故的后

果和影响均未考虑对建(构)筑物的损坏。

根据《核燃料后处理设施安全要求(试行)》,后处理设施应设置三道静态包容^[11]。一般而言,第一层静态包容为设备或管道,第二层为设备室或手套箱,第三层为建(构)筑物。在第7、8号事故中,第一层包容屏障损坏,一定程度上起到了泄爆的作用;其他的包容屏障预计仍然完好,仍然履行着放射性的包容功能。在第9、10、11号事故中,最外层的包容屏障(建(构)筑物)损坏,这3起事故突破了放射性向外环境和公众释放的最后一道防线,可能造成更为严重的放射性后果和经济损失。因此,为减轻爆炸事故的危害,有必要在可能发生爆炸事故的第一层包容屏障(设备本体)或第二层包容屏障(设备室或手套箱)设计时应考虑相应爆炸事故的热荷载和力学荷载,必要时设置合理的泄爆措施,尽可能地避免对第三层包容屏障(建(构)筑物)造成损坏。

在表2关于事故影响的统计结果中,第3号高放废液贮槽丧失冷却造成高放废液被自身衰变热蒸干后发生的爆炸事故后果相对最为严重,该事故爆炸威力等效于75 t TNT,爆炸后共计向外环境释放了 7.4×10^{16} Bq的放射性物质。根据HAF J0051关于此类型事故的后果表述,“如无排放,则液体自热可将水和酸蒸干,所形成的固体的自热,除产生烟气和气溶胶外,固体本身可能熔化,破坏包容屏障”^[14]。因此,应格外重视高放废液贮槽爆炸事故缓解措施的合理设计,在该类型事故情景假设和后果计算时,考虑高放废液自身衰变热对事故发展进程的影响,设置合理的应急冷却措施。

此外,根据表2关于事故对工作人员、公众或环境影响的统计结果,第3、4、9号事故记载了向外环境的放射性超标排放,第7、8号事故对现场工作人员造成了放射性沾污。对于第3、4、9号事故,视污染范围大小,有必要启动场区应急或场外应急行动,及时撤离相关扩散烟羽区公众,对放射性气态流出物走向和污染情况进行监控,适宜时开展去污行动。对于第7、8号事故,视污染范围大小,启动厂房应急或场区应急,对工作人员进行妥善转移和救治,对污染现场进行封闭、去污和修缮。

其中,在后处理设施爆炸事故的应急行动水平设定方面,除考虑“流出物排放异常”或“辐射监测异常”两项初始条件外,若爆炸事故导致第一层包容屏障(设备本体)或第二层包容屏障(设备室或手套箱)破坏,但未造成第三层包容屏障(建(构)筑物)破坏,可考虑设置为厂房应急或场区应急;若爆炸事故造成第三层包容屏障(建(构)筑物)破坏,可考虑设置为场区应急或场外应急。

《乏燃料后处理和相关事故景象回顾》(NUREG/CR-7232)^[6]中未对事故的化学危害后果进行说明。根据表2中的“事故原因”“事故对包容屏障的破坏程度”以及“事故对工作人员、公众或环境的影响”的统计情况,第3、8、11号事故均生成了含氮的不稳定化合物,且均造成了向外环境的释放,可以推测,第3、8、11号事故均有可能造成含氮物质的散布和化学危害。因此,在爆炸事故的缓解措施方面,有必要针对相应的化学危害(或化学毒性)合理设置应急行动。

3 中国后处理设施爆炸事故的预防和缓解措施

中国后处理设施爆炸事故的分析依据《乏燃料后处理厂潜在事故的假设》(HAF J0051)开展,考虑的爆炸事故类型主要集中在蒸发(浓缩)器红油爆炸和高放废液贮槽氢气爆炸两类。

蒸发器红油爆炸的预防措施主要包括防止人因错误;料液经煤油洗涤去除料液夹带的TBP;硝酸浓度控制在10 mol/L以下;确保足够的通风供应等。高放废液贮槽氢气爆炸的预防措施主要包括防止人因错误;向贮槽内补充空气,稀释氢气浓度,及时排出氢气;贮槽内不设置机械转动设备和电器设备,防止产生火花。

两类爆炸事故的缓解措施类似,主要包括:及时疏散厂房内无关工作人员,根据事故后果及时确定是否需要启动场区和场外应急;设备室和设备(即蒸发器、贮槽)设计尽量大的泄爆空间和强度;加强厂房通风;向设备室内喷入适当的水量,冷却残留料液;妥善转移残留料液;设备室及设备去污。

4 结论

基于国外发生的11起爆炸事故,对中国乏燃料后处理设施爆炸事故的预防措施形成如下经验反馈。

- 1) 红油类型爆炸事故应关注进料TBP含量控制和酸度控制。
- 2) 溶解环节爆炸事故应加强反应机理研究和工艺条件控制,避免意外放热反应发生。
- 3) 确保高放废液贮槽冷却系统有效性。
- 4) 关注含硝酸类物质的贮存容器液位、组分浓度等实时情况,避免蒸干。
- 5) 加强后处理设施操作人员岗位管理,避免人因失误。

基于国外发生的11起爆炸事故,对中国乏燃料后处理设施爆炸事故的缓解措施形成如下经验反馈。

- 1) 在第一层包容屏障(设备本体)或第二层包容屏障(设备室或手套箱)设计时,应考虑相应爆炸事故的热荷载和力学荷载,必要时设置合理的泄爆措施。
- 2) 考虑高放废液自身衰变热对事故发展进程的影响,设置合理的应急冷却措施。
- 3) 必要时,根据应急预案采取相应的应急行动,最大限度地保障爆炸事故情况下环境、公众和工作人员的安全,免受不必要的辐射危害或化学危害。

参考文献(References)

- [1] 国家核安全局. HAF301-1993 民用核燃料循环设施安全规定[S]//国家核安全局. 中华人民共和国核与辐射安全法规汇编[G]. 北京: 法律出版社, 2014: 303-311.
- [2] International Atomic Energy Agency. Safety of nuclear fuel cycle facilities[S]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2017.
- [3] 国家核安全局. 核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025年远景目标[EB/OL]. [2019-10-17]. http://nnsa.mee.gov.cn/qmgjanjyr/zywj/201704/t20170414_411587.html.
- [4] 国家核安全局. HAF J0051 乏燃料后处理厂潜在事故的假设[S]. 北京: 国家核安全局, 1995.

- [5] 罗上庚. 放射性废物处理与处置[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 129-130.
- [6] Bixler N E, Gelbard F, Louis D L Y, et al. NUREG/CR-7232 Review of spent fuel reprocessing and associated accident phenomena[R]. Washington, D C: United States Nuclear Regulatory Commission, 2017.
- [7] Andreev G, Antipin Y, Bennett B, et al. 托木斯克后处理厂的放射事故[R]. 吴德强, 译. 维也纳: 国际原子能机构, 1998.
- [8] Randall N R, David M G, William Y, et al. DNFSB/TECH-33 control of red oil explosions in defense nuclear facilities[R]. Washington D C: Defense Nuclear Facilities Safety Board, 2003.
- [9] 李思凡, 卢涛, 陈勇, 等. GB 11929—2011 高水平放射性废液贮存厂房设计规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [10] 国家核安全局. HAF J0050 乏燃料后处理厂设计安全准则[S]. 北京: 国家核安全局, 1995.
- [11] 生态环境部. 核燃料后处理设施安全要求(试行)[S]. 北京: 生态环境部, 2018.

Experience and lessons learned from explosion accidents in foreign spent fuel reprocessing facilities

LYU Dan, YANG Xiaowei, WANG Shijun, ZHANG Chunlong*, ZHAO Shangui, LIU Xinhua

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China

Abstract Causes and consequences of the 11 recorded explosion accidents in foreign countries are summarized and analyzed, and experience feedbacks of preventive measures and mitigation measures for explosion accidents in reprocessing facilities in China are thus formed. In particulars, for the preventive measures for explosion accidents in reprocessing facilities, one should pay attention to controlling TBP content and acidity in the evaporation equipment, avoiding accidental exothermic reactions in the dissolution equipment, ensuring the effectiveness of the cooling system of the high-level waste liquid storage equipment, avoiding nitric acid substances accidental evaporation to dryness in storage equipment, and avoiding human error as well. For mitigation measures one should focus on the design of containment barriers for explosive thermal loads, explosive mechanical loads, explosion relief measures, the design of emergency cooling measures for high-level waste liquid and the design of appropriate emergency action as well.

Keywords spent fuel reprocessing facility; explosion accident; nuclear fuel cycle ●



(责任编辑 傅雪)