

文章编号：0258-0926(2016)S1-0099-04；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0099

研究堆放射性废液贮存设施设计中 几个安全问题的处理

王 婧, 李 涛, 徐建华, 赵昱龙

国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080

摘要：在研究堆核安全审评工作中，由于研究堆类型多样、运行方式不同，产生的放射性废液量和活度水平也不同。此外，在标准方面也没有针对研究堆放射性废液管理的适用标准，仅能参考核电厂和后处理厂的相关要求。因此，针对设计中安全问题的处理方式需要结合设施实际情况调整。通过讨论审评工作中几个较为关注的安全问题的处理情况，来探讨研究堆放射性废液贮存设施的合理安全要求。

关键词：研究堆；废液贮存；安全问题

中图分类号：TL941 **文献标志码：**A

Treatment of Safety Issues in Radioactive Liquid Waste Storage Facility Design of Research Reactors

Wang Jing, Li Tao, Xu Jianhua, Zhao Yulong

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

Abstract: In the nuclear safety evaluation of research reactors, there are differences in the amount and activity concentration of radioactive liquid waste produced by research reactors owing to the variation of their types and operation modes. Moreover, the standards available for research reactors are still lacked and relevant standards on nuclear power plants and nuclear fuel reprocessing plants can only be taken as references. Therefore, the treatment of design safety issues need to be adjusted according to specific facilities. In this paper, the proper safety requirements for research reactor liquid waste storage facilities are proposed by the discussion of several treatments of key safety problems in the evaluation.

Key words: Research reactor, Liquid waste storage, Safety problems

0 前 言

在研究堆的核安全审评工作中，针对放射性废液贮存设施的安全设计有几个关注点，如系统的安全分级和抗震类别、废液输送设备的选择、贮存槽罐的液位监测、输送过程中的连锁设置、工艺尾气的净化处理等。现将审评工作中针对上述几个安全问题的处理情况进行汇总和讨论。

1 安全分级和抗震类别

某研究堆的特排系统执行收集和暂存堆正常

运行和事故工况下产生的中、低放废液的功能。在初步设计中，该系统的相关槽罐、管道、阀门和泵等部件均定为非安全级、抗震 II 类。

根据 GB/T 17569—2013《压水堆核电厂物项分级》中的要求：放射性废物处理系统中其故障会导致放射性物质释放超过规定限值的部件应为安全 3 级；放射性废物处理系统中不属于安全级但具有放射性物质包容功能的部件应为非安全级有特殊要求[简称 NC(S)级]的物项；所有安全级物项都应纳入抗震 II 类；容纳放射性物质和防止放

射性物质外逸,但其破坏不会使厂外剂量超过正常运行限值的物项应定为抗震类。而在该标准附录 A 和附录 B 的示例中,放射性废液贮存设施相关的槽罐、管道和阀门,以及泵等部件的安全等级均为 NC(S)级、非抗震类^[1]。可见,针对放射性废液贮存设施的安全分级和抗震类别,标准的要求并不明确,需要结合具体情况进行具体分析。通过与设计者的交流和讨论,最终将中放贮槽(容积约 5 m³)及其相关管线确定为安全 3 级、抗震 I 类,其余部件的安全等级按照原设计执行。

变更的原因是通过分析可以定性判断出设备中放射性废液泄漏后可能导致厂房内气溶胶浓度上升,最终造成放射性物质释放超过规定限值。

变更后的分级准则也符合核化工承压设备分级要求。根据 EJ/T 939—2014《核燃料后处理厂建(构)筑物、系统和部件的分级准则》的要求:包容少量放射性物质或易裂变材料,且其失效会导致事故工况的物项应定为放化 2 级(相当于安全 3 级),而所有放化安全级物项均应列为 A 类抗震物项^[2]。

随着中放贮槽及其相关管线安全级别的变更,与其相连通的室外工艺管道和管沟的安全级别在原则上也需要随之调整,使其与前者保持一致。但是,由于堆运行期间中放废液产生量较小,废液在厂房内达到一定量(约 5 m³)后方才输送至其他废液处理厂房中,因此废液输送量较小,输送频率较低。考虑到上述因素后,室外工艺管道和管沟定为 NC(S)级和抗震类也能够满足安全要求。

2 废液贮存槽罐的结构设计

放射性废液贮存槽罐作为放射性物质的第一级屏障,其结构设计重点在于设备的安全性、密闭性和可去污性。

为实现上述要求,在设计中应尽量采取焊接的全封闭结构;槽罐(低放可除外)在液面以下一般不允许设置接管。高放槽罐的控制更加严格,所有设备的管子应尽量从设备顶部或液面以上的筒侧进出;直径小于 1000 mm 的槽罐应设置内径不小于 200 mm 的手孔,直径大于或等于 1000 mm 时则设置人孔;手孔和人孔应设置在上封头上,并待设备调试完毕后焊死;高、中放槽罐的下封头则采用凸形封头或带局部凹坑的带折边平封

头;若有几个管子都要求能插到设备最低位置时,则应首先保证让溶液出口管和废液出口管接近最低位置。

在某研究堆放射性贮存槽罐设计中,其低放贮槽和中放贮槽均设有多个,相同放射性水平的槽罐之间采用底部连接的方式相通,所有废液进口均接在其中一个槽罐上,废液经由底部连通管均匀贮存在其他槽罐中,液位监测仅针对其中一个贮槽。这种设计并不能完全满足安全要求,主要体现在中放水平槽罐的底部设置了接管,以及接收废液的槽罐之间不能实现切换。

经过与设计者的沟通交流,在设计上进行了较大更改。首先,取消了中放废液槽罐的底部连通设计,所有接管均设在槽罐顶部;其次,废液进料方式也进行了更改,在相同放射性水平槽罐间设置进料干管,可通过阀门控制切换,真正实现了槽罐间的独立运行。

3 废液输送设备的选择

针对放射性废液输送设备通常选择没有运动件的静态设备,如蒸汽喷射器、空气提升器、真空泵、压缩空气喷射器和扬液器等。这些设备结构简单、操作方便,运行期间能够实现免维修保养,同时由于没有运动部件,不会产生泄漏问题,满足中放甚至高放废液的输送要求。

在研究堆放射性废液贮存设施中,废液的放射性水平大部分为低放,一小部分为中放,一般情况下不会产生高放废液,因此应根据运行环境、介质特点和输送功率要求来选择输送设备。

蒸汽喷射器是应用较广的一种静态废液输送设备^[3],多用于后处理设施中的大型废液贮罐的倒料以及设备室地坑内废液倒出。蒸汽喷射器几乎不需要维护保养,设备尺寸小,排出流量稳定且可调,且由于蒸汽被废液冷凝,因此不会增加废气产生量。但该装置也存在如下问题:如蒸汽冷凝后会增加废液量,由于吸入口与底部留有空隙,无法实现排空,以及可能因蒸汽冷凝后形成负压,发生虹吸导致放射性废液倒吸入蒸汽管线而污染蒸汽系统。在核安全审评工作中,曾就废液倒吸问题与设计者进行交流和讨论,最终的解决方式是每次使用蒸汽喷射器输送完废液后,用压缩空气或生产上水对管线进行吹扫或冲洗,并在蒸汽管线上设有单向阀和手动阀门,防止虹吸

现象的发生。

扬液器也是应用较多的静态输送设备之一，可以替代机械泵进行液体的计量输送^[4]。

在某研究堆放射性废液贮存设施的设计中，将扬液器既作为废液收集和暂存的贮槽，又作为废液输送的设备。这样的设计简化了放射性废液输送流程，也减少了工艺设备，但是仍然存在一些问题。根据扬液器的工作原理，在工作时需要关闭除压缩空气管道阀门和出料阀以外的全部阀门，并且要求相关阀门和设备开孔处具备一定承压性能。扬液器运行过程中压力变化较大（从负压到 0.5 MPa），对阀门和开孔处的密封性要求较高，需要进行专门的设计；此外，设计中废液通过自流的方式收集到扬液器中，相关阀门是常开状态，且除该阀门外，扬液器本身需要很多穿地阀门，增加了检修工作量，且一旦出现操作失误或阀门内漏，料液会被压入吹气仪表管或其他管道中，造成放射性污染。在核安全审评中，上述问题的解决措施只能通过加强设备巡检、严格规范操作程序等管理手段来避免。

此外，在输送低放或弱放废液时，可以选用机械泵一类的带转动部件的设备，但应尽量实现远距离维修，或借助专用工具对泵芯等易损件实现快速间接检修和更换，同时必须能够实现无泄漏的密封要求，并满足一定的屏蔽层厚度要求。

4 废液液位监测和连锁设置

放射性废液贮存设施的液位监测十分关键，对安全操作的意义很大。目前应用较为广泛的中低放废液液位监测仪表类型包括吹气液位计、静压液位变送器、导波雷达液位计、磁浮筒液位变送器等。

吹气液位计无可动部件，除吹气管外，仪表其余部分无需与被测介质接触，使用寿命长；全机械结构，密封性能好，故障率低；依靠稳流控制器使吹气流量稳定，测量精度高。但该装置对压缩空气质量要求高，水、油等杂质含量超标后会造成气路堵塞，产生虚假信号。可通过将压缩空气管内灌酸液进行疏通。

静压液位变送器也是基于所测液体静压与该液体高度成正比的原理，采用扩散硅或陶瓷敏感元件的压阻效应，将静压转变成电信号，再经过温度补偿和线性校正后输出。其传感器部分可直

接投入液体中，安装使用方便，无可动部件，可靠性高、稳定性好，测量精度高。

在采用扬液器作为废液收集和暂存贮罐时，上述 2 种液位测量装置用于液位测量可能存在问题。因为扬液器工作压力大，导致液体静压出现变化，而上述 2 类仪表均是利用液体静压与液体液位成正比的原理来测量液位，所以只适用于常压设备的液位测量，而不适用于像扬液器这种压力设备的测量。此类问题在设计中需要设计者进行重新考虑，选用更为适宜的仪表类型。

导波雷达液位计是通过时域反射原理，根据雷达遇到被测介质表面反射回到脉冲发射装置的传播时间，经计算得出液位高度。这种测量方式不受介质变化、温度变化及蒸汽、粉尘、泡沫等的影响。这种液位仪在安装和调试期间发生过问题，主要是因为雷达波在到达液面之前被槽罐内的其他部件所阻挡，无法反应真实液位，后续通过加长导波管进行整改达到使用要求。超声液位计与该仪表的原理和存在的问题相似。

上述液位仪表均可以设置高液位和低液位报警值，并将信号传至控制室，便于控制废液的倒料和出料操作。此外，除上述连续监测仪表及其液位报警功能外，为进一步确保防止“冒槽事故”的发生，槽罐内一般还设有高高液位报警功能，通过机械式或磁感应的方式进行液位检查和报警。

在审评工作中，针对槽罐间的倒料活动，为进一步降低人因事故，要求设置液位信号连锁功能：当接收槽罐到达高液位时，连锁关闭转出槽罐出料动力供应气动阀或接收槽罐进料口气动阀；当转出槽罐达到低液位时，连锁关闭出料动力供应进气阀和出料口气动阀。在放射性废液输送环节，连锁功能的设置比较关键，是除液位监测和报警之外的又一道安全保证。审评过程中，一般要求有条件的设施，尤其是涉及大槽向小槽的环节，均要求加装连锁功能；若确实条件不允许，则应通过加强行政管理措施，在严格执行操作规程等方面进行弥补。

5 工艺尾气的净化处理

放射性废液暂存槽罐内会产生一定量的呼吸排气（放射性废液槽罐内需要保持负压，这部分排气称为槽罐的呼吸排气）；这些气体需要按照工艺尾气的处理流程进行净化后方可排放至环

境。一般的净化处理流程包括捕集器、预热器和2级空气过滤器。捕集器用来捕集呼吸排气中含有的水蒸汽,降低尾气中水分的比例,捕集液可以返回原贮罐或其他收集槽罐内;预热器利用蒸汽将气体加热至90℃,降低尾气中的湿度,以保护过滤器不被湿气封堵导致过滤效率下降;过滤器一般需要2级,前1级为初效或中效过滤器,后1级为高效过滤器,可以除去气体中绝大部分的粉尘和气溶胶。上述流程完成后,尾气必须输送至烟囱等设施进行高架排放。

在某研究堆的设计中,放射性废液暂存槽的尾气直接与房间连通,呼吸排气先逸出至房间内,再通过房间的通排风系统排放至环境中。该设计无法满足辐射防护安全要求。因为工艺尾气中气溶胶和裂变气体的含量较高,显著高于房间气氛中的含量,将造成房间内不必要的放射性污染,一旦出现排风串流现象,将可能导致放射性物质通过排风管线向其他房间的扩散,对人员也会产生额外的照射剂量。

最终的解决方案是将中放废液暂存罐的呼排气体接入一个由捕集器、预热器和过滤器组成的小型净化装置;该净化装置安放在房间内,净化后的气体再接入房间通排风管道内,排至烟囱后排放至环境。而针对低放废液暂存罐,由于房间空间限制,只能直接接入房间通排风管道内,排

至烟囱后排放至环境。变更后的方案虽然并不完全符合工艺尾气净化要求,但已经在现有条件基础上有所改善,避免了可能发生的显著的污染扩散问题。

6 结 论

(1) 应结合各研究堆放放射性废液产生的具体特征和实际运行情况,确定设备和部件的安全分级和抗震等级。

(2) 应根据料液性质、输送特点选取适宜的废液输送设备,并根据各设备的特点采取相应的安全措施。

(3) 应尽可能优化液位监测和报警设计方案,并在适当环节设置液位和阀门连锁功能,通过设计提高设施本质安全度。

参考文献:

- [1] GB/T 17569—2013. 压水堆核电厂物项分级[S]. 2013.
- [2] EJ/T 939—2014. 核燃料后处理厂建(构)筑物、系统和部件的分级准则[S]. 2014.
- [3] 李鑫, 秦永泉, 徐云起, 等. 后处理中试厂放射性流体输送设备应用总结[J]. 核科学与工程, 2013, 33(2): 196-197.
- [4] 郑津洋, 陈志平. 特殊压力容器[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997: 185-188.

(责任编辑: 马 蓉)