

某核设施安全关闭的辐射防护实践

刁垒, 赵宇航

中国原子能科学研究院, 北京 102413

摘要: **目的** 通过科学合理的辐射防护措施保障某核设施安全关闭工程中的辐射安全。**方法** 在该核设施安全关闭前期, 对其放射性源项进行了辐射监测, 根据监测结果对施工过程进行辐射风险分析, 设计了安全关闭的施工流程, 制定了科学合理的辐射防护方案并实施。**结果** 通过辐射监测结果可知, 该核设施主要污染核素为 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{241}Am , 建筑物、设备及工器具等的放射性表面污染面积较大且污染严重, 人员工作区域存在较高水平的 γ 辐射及放射性气溶胶; 根据监测结果对工程的辐射风险进行了安全分析, 采取了合理的施工流程和科学合理的辐射防护措施, 确保了本工程的辐射安全。**结论** 本次辐射防护工作满足了本工程的辐射防护要求, 为从事核设施退役相关工作的科研人员和管理部门提供参考。

关键词: 核设施; 辐射监测; 辐射防护

中图分类号: TL75 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2019)05-0538-05

Radiation protection during the safely shutdown of a nuclear facility

DIAO Lei, ZHAO Yuhang

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413 China

Abstract: **Objective** To reach the goal of the safe shutdown of a certain nuclear facility by scientific and reasonable and radiation protection measurements. **Methods** Before carrying out the safe shutdown work, the radioactive source term was investigated, radiation risk during the implement was analyzed according to the investigation result, the process of safe shutdown was designed, and proper radiation protection plan was formalized and implemented. **Results** According to the radiation survey of this facility, it was revealed that the major contaminated nuclides were ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{241}Am . The radioactive contamination area was relatively large and the contamination degree was severe. Besides, the gamma radiation and radioactive aerosol were relatively high in working area. The radiation risk of this program was analyzed according to the survey result. Proper work process was followed and good radiation protection was undertaken to ensure the radiation safety of this work. **Conclusion** The radiation protection work met the demand of this program, and provided reference for scientific researchers and management departments engaged in nuclear facility decommission work.

Key words: Source Item Investigation; Radiation Monitoring; Radiation Protection

某核设施为中放废液转运站, 于 1965 年建成投入使用, 1994 年停止使用, 在役服务 29 年。由于该核设施经过多年运行, 有关设备由于受到强 γ 辐射、放射性物质沉积和表面放射性污染, 已成为总放射性活度很强、放射性物质总量较大、环境辐射场分布复杂、局部环境污染较为严重的污染源; 加之设施停运后, 主工艺系统和辅助系统老化、失效情况严重; 建筑物门窗损坏致使大量灰尘进入放射性场所形成放射性的粉尘; 以上原因使该核设施存在一定安全隐患。由于现在该核设施不具备退役条件, 为消除安全隐患, 首先需要对其进行安全关闭。安全关闭的目标是转运出设施内部的

中、低放废液, 对其废物进行去污、分类、包装、收贮并暂存, 对其进行去污, 恢复通风、供电等必要的辅助系统, 增设安全监控系统, 使设施处于可控的安全关闭状态。

核设施的安全关闭是核设施退役的重要环节, 作业人员在设施内进行施工过程中有可能受到超剂量照射, 也可能造成施工现场和环境的二次放射性污染。核设施安全关闭过程中开展的辐射监测及防护工作, 主要目的是掌握不同施工阶段中环境、设备、场所及人员受照射与污染情况, 确定放射性废物的种类、数量、活度或污染水平, 并有针对性的制定科学合理的辐射防护方案, 它是核设施安全关闭工作的重要组成部分,

不仅可以保证现场作业顺利进行,保障人员、现场及环境辐射安全,也可防止因废物管理不当而造成人员意外受照等事件,并为后续的退役工作打好基础。

1 材料与方法

1.1 防护剂量管理目标值^[1] 根据本单位有关规定,结合工作人员所从事的放射性活动,推荐出本次工作人员所受年个人剂量的管理限值为 2 mSv。

设备表面污染控制水平及不锈钢等金属材料的清洁解控水平^[2]: $\alpha < 0.08 \text{ Bq/cm}^2$; $\beta < 0.8 \text{ Bq/cm}^2$ 。

人员放射性表面污染监测与验收标准控制限值见表 1。

表 1 人员监测与验收标准控制限值^[1]

单位: Bq/cm^2

表面类型	控制限值	
	α 放射性物质	β 放射性物质
地面、墙壁	0.4	4
工作服、手套、工作鞋	0.4	4
手、皮肤、工作袜	0.04	0.4

1.2 现场辐射监测 该核设施南北长 18 m,东西宽 12 m,超出地面高度高 6 m,建筑面积 462 m^2 ;建筑物局部设地下设备室,根据工艺功能分为工艺设备区、安装检修区、一般工作区和扩建区。

辐射防护人员对该核设施各房间的 γ 辐射水平^[3]、放射性表面污染水平^[4]及放射性气溶胶活度浓度进行了监测,监测过程中遵循辐射防护三原则^[1]并采取适当的防护措施,避免污染扩大并保证工作人员的辐射安全和人身安全,监测结果如下:

(1)该核设施表面污染水平及 γ 外照射水平见下

表 2。

表 2 该核设施表面污染水平及 γ 外照射水平

房间号	表面污染水平/(Bq/cm^2)		γ 外照射水平/($\mu\text{Sv/h}$)
	α	β	
(101)	< 0.04	> 40	100 ~ 980
(102)	< 0.04	> 40	95 ~ 1 200
(106)	0.04 ~ 2.4	140 ~ 810	5.0 ~ 13
(107)	0.04 ~ 24.6	16.5 ~ 824	5.0 ~ 46
(108)	< 0.04	0.4 ~ 1.3	1.0 ~ 100
(109)	0.04 ~ 35.8	100 ~ 5 890	5.0 ~ 25
(110)	0.04 ~ 0.2	0.4 ~ 22	0.15 ~ 35
(111)	< 0.04	< 0.4	0.15 ~ 1.0
(112)	< 0.04	< 0.4	0.15 ~ 1.0
(114)	< 0.04	< 0.4	0.15 ~ 1.0
(201)	0.8 ~ 2.0	169 ~ 317	10 ~ 100
(202)	0.04 ~ 1.2	204 ~ 401	10 ~ 2 000
(203)	0.04 ~ 1.0	0.4 ~ 5	1.5 ~ 20
(204)	0.04 ~ 1.0	0.4 ~ 5	1.5 ~ 15

(2)放射性气溶胶水平

该核设施内,在无人员工作的静止状态下, α 放射性气溶胶活度浓度为 $0.001 \sim 0.2 \text{ Bq/m}^3$,主要核素为²⁴¹Am; β 放射性气溶胶活度浓度为 $0.14 \sim 4.6 \text{ Bq/m}^3$,主要核素为¹³⁷Cs、⁹⁰Sr。

1.3 施工过程的辐射防护

1.3.1 安全关闭施工流程 安全关闭施工流程的设计和制定必须充分考虑到施工环境放射性和水平较高的特点。为了安全、可靠、有效地施工,在施工前必须进行模拟实验和人员培训。通过模拟实验和培训,使得工作人员能正确的使用防护用品、防护设备,能进行熟练操作以缩短工作时间,减少受照剂量。安全关闭施工流程图如图 1 所示。

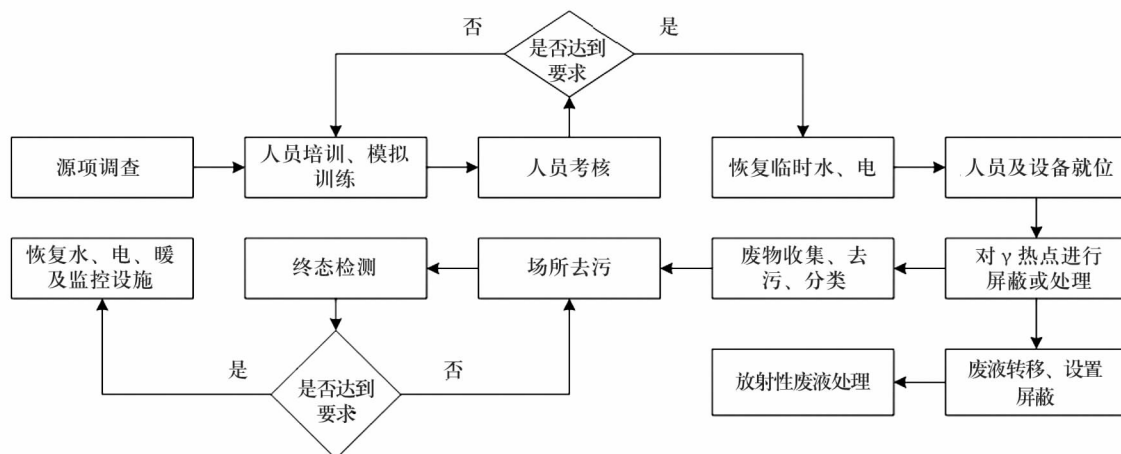


图 1 安全关闭施工流程图

1.3.2 辐射风险分析 该工程安全关闭过程中,辐射危害主要源于放射性固体废物的收集、去污及分

类^[3],工作场所的去污,放射性废液的转移,施工过程中人为扰动致使放射性气溶胶升高等。同时,在对固

体废物的简易整备、运输过程中,可能发生废物桶跌落、碰撞和废物撒漏等事故。

(1)外照射风险。施工过程中,“ γ 热点”是工作人员外照射剂量的主要来源。同时,如果现场辐射检测设备突然失灵,工作人员也可能进入剂量率水平较高的放射性场所而受到过量照射。由表 2 可知,本次施工过程中的“ γ 热点”为:101 扬液器室(100 ~ 980 $\mu\text{Sv/h}$)、102 扬液器室(95 ~ 1 000 $\mu\text{Sv/h}$)及 202 房间中放废液贮存罐表面(2 ~ 3 mSv/h)。

(2)内照射风险。施工过程中,人为扰动使得松散污染物再悬浮形成放射性气溶胶;老旧设施的拆除过程中,不可避免使用的切割装置等施工工具,将造成老旧设施局部温度升高,致使气溶胶浓度增大,这都将造成人员吸入的内照射;施工过程工况条件复杂,可能发生过滤器堵塞或失效,导致放射性气溶胶浓度升高。

(3)放射性表面沾污风险。施工过程中,工作人员需要对放射性废物进行收集、去污、分类、包装以及对放射性废液进行转移,这些操作过程均容易造成周围环境污染及人体表面沾污,需要做好相应的防范措施。

1.3.3 辐射防护措施 该核设施安全关闭过程中的辐射防护主要包括工程辐射防护和个人辐射防护两个方面。

(1)采取的工程辐射防护措施:①本次施工之前,

首先恢复了该核设施的排风系统和临时供电,对已经无法恢复排风的房间设置了临时局域排风系统;②根据该核设施各个区域的表面污染水平对其进行进一步的分区控制,进行清理时先选择好人流、物流通道,由污染较轻的区域向污染较重的区域依次清理,避免了施工过程中各区域之间的重复、交叉污染;③根据辐射风险分析可知,本次施工过程中的“ γ 热点”为 101 房间(扬液器室)(100 ~ 980 $\mu\text{Sv/h}$)、102 房间(扬液器室)(95 ~ 1 000 $\mu\text{Sv/h}$)及 202 房间的中放废液贮存罐表面(2 ~ 3 mSv/h),为降低其对周围辐射场的影响,先将其中的放射性废液进行了转移、妥善安置,从放射源项上降低该区域的辐射水平。

(2)采取的个人辐射防护措施。外照射防护采取的主要措施有:①做好模拟操作训练以增加熟练程度,必要时工作人员多人轮岗,缩短操作时间;②使用长柄器械或使用 BROKK 机械人进行操作;③在 γ 较强区域进行操作时,工作人员需穿铅衣并设置局部屏蔽装置。放射性表面污染防治采取的主要措施是严格按照要求佩戴防护服、口罩、手套、鞋套等防护器具,按要求严格进行辐射检测,发现沾污情况及时去污。

减少人员所受内照射剂量,加强对放射性气溶胶的防护,本次施工过程中对不同的施工条件下放射性气溶胶进行取样并分析,得出本次施工过程中,不同的施工条件对放射性气溶胶活度浓度的影响。不同施工条件下放射性气溶胶监测结果见表 3。

表 3 不同施工条件下放射性气溶胶监测结果

序号	取样总量 / m^3	放射性气溶胶活度浓度/(Bq/m^3)		备注
		α 测量结果	β 测量结果	
1	4	8.04	2.02×10^1	未开启排风,未采取湿法操作
2	4	2.02	1.49×10^1	未开启排风,未采取湿法操作
3	4	1.79×10^1	1.96×10^2	开启排风,未采取湿法操作
4	4	1.95×10^1	2.28×10^1	开启排风,未采取湿法操作
5	4	5.97×10^{-1}	6.8	开启排风,仅工作前喷洒水雾
6	4	1.23×10^{-1}	1.15×10^1	开启排风,仅工作前喷洒水雾
7	4	7.92×10^{-1}	2.75×10^1	开启排风,仅工作前喷洒水雾
8	4	1.86×10^{-1}	1.24×10^1	开启排风,仅工作前喷洒水雾
9	4	6.08×10^{-2}	1.78	开启排风,整个过程湿法操作
10	4	1.66×10^{-2}	7.71×10^{-1}	开启排风,整个过程湿法操作
11	4	1.84×10^{-2}	4.76×10^{-1}	开启排风,整个过程湿法操作
12	4	7.37×10^{-3}	4.05×10^{-1}	开启排风,整个过程湿法操作

由表 3 可以看出,开启排风、未采取湿法操作情况下的放射性气溶胶活度浓度要明显大于其它施工状态下气溶胶的水平,这主要是由于排风状态下气流流动加上人员操作时的气流扰动使得沉积在建筑物、设备表面上的气溶胶再悬浮造成的;开启排风、整个

过程湿法操作情况下的放射性气溶胶活度浓度最低,要明显小于其它施工状态下气溶胶的水平,说明该条件下设施内的气溶胶得到了明显的压制;由此可以看出,施工过程中要降低气溶胶的水平,不但需要通风条件,还要特别注意对气溶胶的压制,尤其是对于老

旧的、灰尘较大的核设施。

本次施工过程中采取的内照射防护措施主要有：

①确保通风情况下,对工作区域及操作对象喷洒水雾,以减少放射性气溶胶产生;②对设备的拆除过程中主要采用液压钳、BROKK 机械人进行冷切割以减少放射性气溶胶产生;③工作人员佩戴相应防护器具,如高效过滤口罩、呼吸面罩、气衣等。

2 结果

2.1 个人剂量监测与估算 个人剂量监测主要包括外照射监测和内照射监测。

2.1.1 外照射剂量监测 采用佩带 OSL 个人剂量计的方法对工作人员进行外照射监测。工作开始前给工作人员发放 OSL 个人剂量计,工作结束后收回,定期对收回的个人剂量计进行测量,获得每位工作人员所受外照射剂量,本工程外照射个人剂量监测结果见表 4。

表 4 外照射个人剂量监测结果

工作人员编号	光子辐射个人剂量当量 深部 $H_p(10)$ (mSv)
1	0.74
2	0.95
3	0.28
4	1.13
5	0.60
6	0.24
7	0.23
8	0.79
9	0.23

2.1.2 内照射剂量监测与估算 人员施工过程中,在该核设施内设置放射性气溶胶连续监测仪,随时查看气溶胶浓度水平,浓度存在异常时及时撤离工作人员并查找原因、解决问题;同时,采用便携式气溶胶取样器对人员工作区域进行定期取样,并对样品进行分析,以得到更为准确的放射性气溶胶活度浓度值,以便于对人员所受内照射剂量进行估算。内照射估算以实际监测的放射性气溶胶的数据为主,其工作人员年摄入量最大值可用以下公式:

$$Q_{\text{摄入}} = A_0 \times V \times K \times T \times D \quad (1)$$

式中, $Q_{\text{摄入}}$:工作人员放射性气溶胶年摄入量; A_0 :密封工作间(气帐)内放射性气溶胶活度浓度; V :成人的呼吸速率,保守值取 $1 \text{ m}^3/\text{h}$; K :高效过滤口罩的泄漏率,10% (保守估计); T :每天施工时间,取 8 h; D :年施工天数。

为保守估计,假设施工过程中放射性气溶胶产生速率与通风使得放射性气溶胶浓度降低速率处于平衡状态。根据本次源项调查结果,气溶胶中主要 α 核素为 ^{241}Am ,因其属于极毒组核素,出于偏保守估计,取其所占份额为 100%;气溶胶中主要 β 核素为 ^{90}Sr (约占 50%)、 ^{137}Cs (约占 50%)。根据表 3 中放射性气溶胶监测结果可知,在通风、全程湿法操作条件下,气溶胶活度浓度平均值为: ^{241}Am , $1.84 \times 10^{-2} \text{ Bq}/\text{m}^3$; ^{90}Sr , $4.29 \times 10^{-1} \text{ Bq}/\text{m}^3$; ^{137}Cs , $4.29 \times 10^{-1} \text{ Bq}/\text{m}^3$;人员工作天数为 80 d,则根据公式(1)可得施工过程中工作人员对应核素的年摄入量,见表 5:

表 5 施工过程中工作人员的核素年摄入量

核素	年摄入量/(Bq/a)
^{90}Sr	27.46
^{137}Cs	27.46
^{241}Am	1.14

根据《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》,工作人员对污染核素气溶胶的单位摄入量所致的待积有效剂量见表 6,乘以相应核素摄入量,可得正常施工过程中工作人员最大个人有效剂量,见表 7。

表 6 工作人员吸入单位摄入量所致的待积有效剂量 $e(g)_{5\mu\text{m}}$ 转换因子^[1-5]

核素	类别	$e(g)_{5\mu\text{m}}$ (Sv/Bq)
^{90}Sr	S	7.7×10^{-8}
^{137}Cs	F	6.7×10^{-9}
^{241}Am	M	2.7×10^{-5}

注:类别 F、M 和 S 分别表示肺快速、中速和慢速吸收,本表主要按偏保守情况选择各个参数来进行估算。

表 7 施工过程中工作人员最大个人有效内照射剂量

核素	H (Sv/a)
^{90}Sr	2.1×10^{-6}
^{137}Cs	1.8×10^{-7}
^{241}Am	3.1×10^{-5}
合计	3.3×10^{-5}

由表 7 可见,正常施工过程中工作人员受到的最大个人有效内照射剂量为 $3.3 \times 10^{-2} \text{ mSv}$ 。综合 2.1.1、2.1.2 两种情况,工作人员受到的最大个人有效剂量为 1.16 mSv,低于本项工作所定的个人剂量管理限值。

2.2 外环境监测 该核设施安全关闭过程中,对其周围环境的 γ 剂量率^[3]、表面污染^[4]以及放射性气溶胶进行了监测^[6]。

(1)该核设施周围 γ 剂量率监测结果

由表 8 结果可以看出,该核设施周围环境 γ 剂量率普遍偏高,经现场监测分析知,该核设施东北面、东面 γ 剂量率偏高主要是受室外通风管及该核设施东侧堆放的放射性废物桶的贯穿辐射的影响,该核设施南面、西南面 γ 剂量率偏高主要是受室外通风管的影响,该核设施西面、西北面及北面 γ 辐射水平均低于我院外环境管理限值($0.15 \mu\text{Sv/h}$)。

表 8 该核设施周围环境剂量率监测结果

测量位置	γ 剂量率/ $(\mu\text{Sv/h})$
设施东面 1 m	0.15 ~ 0.35
设施东南面 1 m	0.15 ~ 0.30
设施南面 1 m	0.15 ~ 0.35
设施西南面 1 m	0.15 ~ 0.35
设施西面 1 m	0.10 ~ 0.14
设施西北面 1 m	0.10 ~ 0.13
设施北面 1 m	0.10 ~ 0.12
设施东北面 1 m	0.10 ~ 0.25

(2) 该核设施周围环境表面污染监测结果

该核设施安全关闭期间,对其门口及周边环境进行了放射性表面污染监测,经监测未发现由于安全关闭施工过程造成的放射性表面污染。

(3) 该核设施周围环境放射性气溶胶监测结果

该核设施安全关闭期间,采用空气取样法对其周围环境进行了气溶胶监测,结果表明安全关闭前该核设施周围环境的 α 放射性气溶胶浓度均值为 $1.6 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$, β 放射性气溶胶浓度均值为 $4.3 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$;安全关闭过程中该核设施周围环境的 α 放射性气溶胶浓度均值为 $6.6 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$, β 放射性气溶胶浓度均值为 $4.1 \times 10^{-3} \text{Bq/m}^3$;监测结果表明本次安全关闭工程未对该核设施周围环境的放射性气溶胶造成明显影响。

3 讨论

通过本次辐射监测、辐射防护工作可知,该核设施主要污染核素为 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{241}Am ,建筑物、设备及工器具等的放射性表面污染面积较大且污染严重,人员工作区域存在较高水平的 γ 辐射及放射性气溶胶;通过对工程施工作业的辐射风险分析,制定了合理的施工流程,并采取了科学合理的、切实可行的辐射防护措施,确保了本工程的辐射安全,整个施工过程人员所受的最大个人有效剂量为 1.16mSv ,未超过个人剂量管理限值 2mSv ,本工程未对设施周边环境产生明显影响,满足了本工程的辐射防护要求;本次辐射防护工作可为后续该类核设施的安全关闭工作提供了良好借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17567—2009 核设施的钢铁、铝、镍和铜再循环、再利用的清洁解控水平[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [3] 中国核工业总公司. EJ 381—1989 电离辐射工作场所监测的一般规定[S]. 1989.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14056. 1—2008 表面污染测定第一部分 β 发射体($E_{\beta\text{max}} > 0.15 \text{MeV}$)和 α 发射体[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 154—2006 两种粒度放射性气溶胶年摄入量限值[S]. 北京:人民卫生出版社,2006.
- [6] 卢正永. 放射性气溶胶监测与内照射剂量估算[J]. 辐射防护通讯,1993,13(3):48-53.

收稿日期:2019-04-21