UO_2 芯块研制实验室初步源项调查

杨海涛，刘小龙，潘学荣，任 萌，周显明，徐凯迪，王 特

（中国核动力研究设计院，四川 成都 610041）

摘要： 某 UO_2 芯块研制实验室计划退役，为初步掌握该实验室内放射性污染情况，对其进行了初步源项调查，调查内容包括实验室运行历史、表面污染水平、γ 辐射剂量水平、气溶胶浓度水平，以及污染面积和污染物项估算等。调查结果显示：该实验室主要污染核素为 ^{234}U、^{235}U 和 ^{238}U，放射性污染核素单一；实验室内的表面污染水平、γ 辐射剂量水平、气溶胶浓度水平较低；地面及墙面污染面积总计约 1 000 m^2；退役时需进行去污操作的设备约 300 台；内部积存各类放射性固体废物约 80 m^3。因实验室内污染物项种类繁多，各类污染物污染程度差异较大，在进行退役治理时，应将废物做好分类处理，防止交叉污染。

关键词： 退役；源项调查；放射性污染；UO_2 芯块

中图分类号： TL943 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-8063(2023)04-0064-07

DOI： 10.13426/j.cnki.yky.2023.05.02

随着科技的发展和科研任务的改变，老旧核设施难以满足现阶段的需求，且存在较多安全隐患。合理处置老旧核设施关系到生态环境安全和公众健康，成为环境保护领域亟需解决的问题之一[1-5]。源项调查工作贯穿退役治理的全过程，是安全退役的重要保障，能为核设施退役处置方案的制定、环境影响评价及退役工程实施提供合理的意见和建议[6-11]。

源项调查的基本方法主要包括历史资料收集与评估、源项调查方案设计、现场监测和取样分析、数据处理与分析、废物量估算等[12-15]，能较全面地覆盖待调查对象的各个方面。某 UO_2 芯块研制实验室计划退役，笔者对其进行了初步源项调查，该实验室内各类物项污染程度差异较大，在初步源项调查工作中需注重辐射监测的区分处理。

1 UO_2 芯块研制实验室概况

UO_2 芯块研制实验室于 20 世纪 70 年代建成并投入运行，为砖混结构，承担过各类贫铀、低富集度芯块的研制任务。在 2008 年汶川大地震中建筑物主体结构受到一定程度的破坏，随即对主体结构进行了加固与维修。随着科研和生产任务的结束，对实验室进行了封闭处理。目前实验室内通风系统、特排系统、供电系统、生产给水系统、消防设施等基本无改造再利用的价值，同时实验室内存有大量用于放射性工作的设备及放射性污染废物，存在放射性物质外泄的风险。

2 调查目的及内容

2.1 调查目的

以 UO_2 芯块研制实验室为调查对象，调查分析实验室内部设施、设备和建筑物的污染现状，气溶胶浓度水平，积存废物形式、数量，放射性污染分布等情况，初步掌握 UO_2 芯块研制实验室内的污染情况，为实验室后续处置提供参考。

2.2 调查方法和内容

初步源项调查采用的方法见图 1。

2.2.1 运行历史调查

查阅该实验室历史运行资料，对实验室承担过的科研生产工作进行调查，主要调查内容包括承担的科研生产项目、放射性物质使用数量、主要核素、是否发生过放射性物质泄漏安全生产事故等。

收稿日期： 2023-05-05

第一作者简介： 杨海涛（1994—），男，四川遂宁人，硕士，助理研究员，主要从事核燃料及材料研究工作。

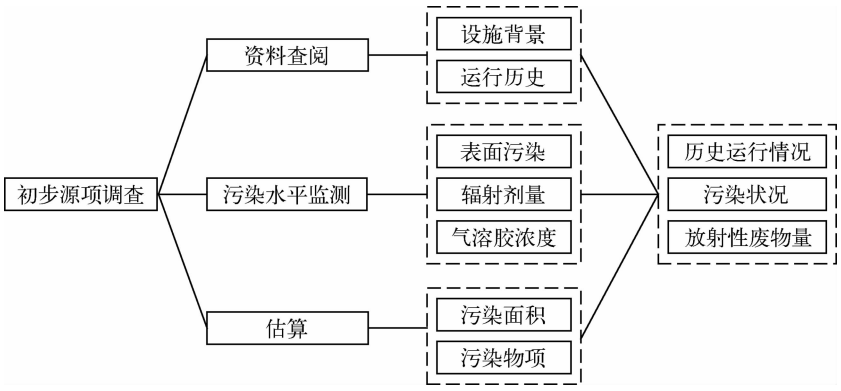


图 1　初步源项调查方法

Fig. 1　Preliminary source terms survey method

2.2.2　表面污染和 γ 辐射剂量调查

在建筑物地面和墙面进行布点，测量其表面污染和 γ 辐射剂量水平。对设施、设备外表面，根据其实际形状采用直接测量或擦拭测量。

2.2.3　取样调查

取样调查内容主要有：1）气溶胶浓度水平调查。采用固定式取样设备抽取气溶胶样品，取样结束后将样品运回，检测其气溶胶浓度。2）地面及墙面取样调查。选取典型操作间或典型区域的中心点为取样点，用铲凿凿取样品进行检测。

2.2.4　污染面积和污染物项估算

对于建筑物的污染面积和污染物项估算，主要包括与污染有关的各操作间、走廊的建筑物地面及墙面污染面积。对于操作间内的各类设施、设备的污染面积和污染物项估算，主要包括污染设施、设备的数量及污染面积等。对于积存的固体废物污染面积和污染物项估算，主要包括废物类别、废物量等数据的分类和记录。

2.2.5　估算原则

参照《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》（GB 18871—2002）、《拟开放场址土壤中剩余放射性可接受水平规定（暂行）》（HJ 53—2000）的相关规定，结合现场实际情况，制定估算原则：1）对于墙面、地面和其他污染物项，α 表面污染水平 $\geqslant$0.08 Bq/cm^2 或 β 表面污染水平 $\geqslant$0.8 Bq/cm^2 或 γ 剂量率 $\geqslant$1 μSv/h 时，界定为放射性污染物项；2）对于土壤或其他固体残留物，放射性比活度 $\geqslant 1\times10^3$ Bq/kg 时，界定为放射性污染物项。因本项目只涉及贫铀、低富集度芯块研制任务，统一按天然铀进行估算，总铀残留量 $\geqslant$40 mg/kg 即界定为放射性污染物项。

2.3　仪器设备

初步源项调查工作使用的仪器设备主要有 X-γ 剂量率仪、α/β 表面污染仪、低本底 α/β 测量仪、高纯锗 γ 能谱仪、气溶胶采样器，所有仪器均经过检定且在检定有效期内（表 1）。

表 1　初步源项调查工作使用的仪器设备

Table 1　Instruments and equipment used in preliminary source items investigation

名称	型号	厂家	检测对象	测量下限
X-γ 剂量率仪	6150AD-b/H(5/H)	美国 Automess 公司	X-γ 空气吸收剂量率	1 nSv/h
α/β 表面污染仪	CoMo 170	德国 SEA 公司	α、β 表面污染	0.01 Bq/cm^2
低本底 α/β 测量仪	MPC-9604	美国 ORTEC 公司	气溶胶中总 α、总 β	0.02 mBq/m^3
高纯锗 γ 能谱仪	GC4018	美国 Canberra 公司	固体中^{235}U、^{238}U	^{235}U：3.67 Bq/kg，^{238}U：8.26 Bq/kg
气溶胶取样器	CF901-DIG/230	美国 HI-Q 公司		

3 初步源项调查实施

3.1 表面污染及 γ 辐射剂量调查

3.1.1 操作间污染调查

对操作间地面及墙面进行巡测，对高于实验室内本底水平的区域进行表面污染水平定点测量，采用梅花形布点法或交叉间隔布点方式，合理布置尽量多的测量点，测量并记录区域内污染水平。对于地面，按照1 m×1 m 网格进行全面布点，以网格中心为测量点。对于墙面，按照 1 m 间距进行全面布点测量；在高度大于 2 m 区域，取中心点作为测量点位。对于天花板/吊顶，顶面测量点位为其中心点。

考虑到操作间内设备布置和物项堆放情况，可局部调整布点方式，点位应避开突出的设施设备或非封闭区域(门、窗、无墙面等)。

3.1.2 走廊或通道污染调查

对于走廊或通道，测量点位的起点为走廊或通道的一端。地面测量点位于地面长轴中线上，测量点间距 6 m；墙面布点选取距离地面 2 m 处为中线，测量点间距 12 m；顶面布点选在其中线上，测量点间距 12 m。

3.1.3 操作间内设施、设备污染调查

对实验室内设施设备进行直接巡测，根据 UO_2 芯块研制实验室的特点，依据历史运行情况选取典型设施和设备进行测量，测量设施和设备内、外表面污染水平和辐射水平。根据实际情况，选用直接测量、擦拭取样测量等方法。

3.2 测量布点实例

实际布点时，需将房间的 6 个面展开，形成 1 个平面，放射性普查布点位置见图 2。

3.3 样品采集

采样对象按类别划分为气溶胶样品、地面样品和墙面样品，样品采集情况见表 2。

3.3.1 气溶胶样品采集

将气溶胶采样器放置于待取样区域内，取样头长度约为 1.5 m，空抽 5 min 后进行样品采集，控制取样流量为 500 L/min、取样时间为 1 000 min。

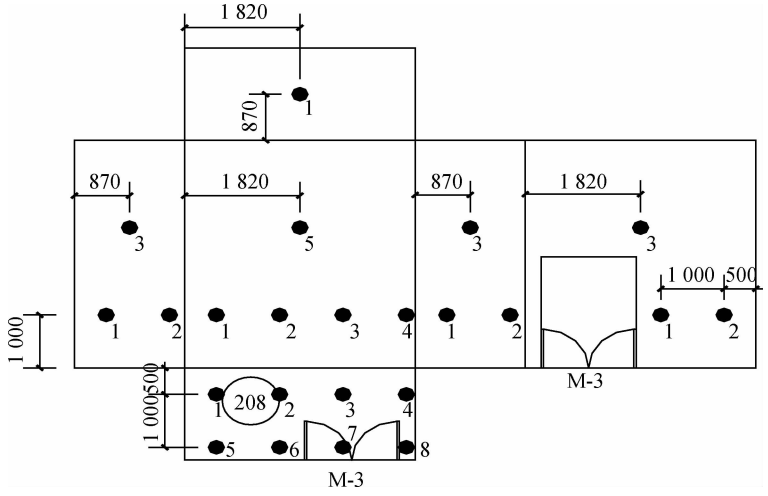


图 2 放射性普查布点位置

Fig. 2 Location of radioactive survey

表 2 样品采集情况

Table 2 Situation of sample collection

样品名称	材质	取样位置	取样深度
气溶胶样品 01～09	滤纸	走廊、粉末制备间、芯块制备间、芯块磨削间、芯块烧结间、分析检测间、废液处理间、分解煅烧间、通风机房	
墙面样品 01～09	水泥	走廊、粉末制备间、芯块制备间、芯块磨削间、芯块烧结间、分析检测间、废液处理间、分解煅烧间、通风机房	10 mm
地面样品 01～09	水磨石	走廊、粉末制备间、芯块制备间、芯块磨削间、芯块烧结间、分析检测间、废液处理间、分解煅烧间、通风机房	10 mm
地面样品 10	水磨石	粉末制备间	15 mm

3.3.2　地面样品采集

地面样品采集步骤：1）在取样点处画出100～400 cm^2 的取样面；2）将取样面周围的尘土及杂物清理干净，在取样面四周铺 2 层干净的白纸，底层白纸用胶带纸粘贴固定；如果取样点上有尘土，则将其一并收入取样袋中；3）用铲凿凿取样品，首次取样深度为 10 mm。

3.3.3　墙面取样

墙面取样步骤：1）在取样点处画出 100～400 cm^2 的取样面，将取样面下方的浮灰及疏松部分除去，面积以接样袋粘贴方便为准；2）在取样面正下方粘贴一定面积的干净白纸，随后在白纸上粘贴干净接样袋，备用；3）用铲凿凿取样品，首次取样深度为 10 mm；4）如果墙壁表面有涂层，仔细刮取墙壁表面涂层即可，所取样品要全部收集在样品袋内。

3.4　污染物项调查

对实验室内所有物项进行清点、测量、记录，统计污染设备数量。依据 2.2.5 中的估算原则，对 α 表面污染水平≥0.08 Bq/cm^2 或 β 表面污染水平≥0.8 Bq/cm^2 或 γ 剂量率≥1 μSv/h 的物项，按放射性污染物项统计。

4　初步源项调查结果

4.1　实验室运行情况

该实验室在运行期间，主要进行核燃料及材料的科学研究和小批量生产，未发生任何放射性物质泄漏安全生产事故，实验室内主要污染核素为^{234}U、^{235}U 和^{238}U，污染核素单一。

4.2　表面污染及 γ 辐射剂量水平

表面污染及 γ 辐射剂量测量结果见表 3。该实验室内表面污染及 γ 辐射剂量水平总体较低，测量结果中最大值分布在各操作间的手套箱室内壁、过滤器、阀及连接管道内壁等处。

4.3　取样分析结果

4.3.1　气溶胶取样检测

走廊和各操作间的气溶胶取样检测结果见表 4。可以看出，该实验室内走廊和各操作间气溶胶样品的总 α 和总 β 活度浓度均处于较低水平，其中芯块烧结间和分解煅烧间的气溶胶样品总 α 和总 β 活度浓度高于其他区域。

表 3　表面污染及 γ 辐射剂量测量结果

Table 3　Measurement results of surface pollution and γ radiation dose

操作间名称	γ 剂量率/(μSv/h)		α 表面污染/(Bq/cm^2)		β 表面污染/(Bq/cm^2)	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
走廊	0.20	5.37	0.04	1.08	0.47	8.98
粉末制备间	0.22	3.76	0.15	2.21	0.57	28.40
芯块制备间	0.48	1.16	0.13	0.34	0.88	1.88
芯块磨削间	0.26	1.48	0.68	1.91	0.71	23.32
芯块烧结间	0.16	0.29	0.05	0.07	0.34	0.51
分析检测间	0.15	0.24	0.08	1.47	0.48	8.97
废液处理间	0.17	0.21	0.09	0.15	0.35	0.51
分解煅烧间	0.17	0.25	0.06	2.18	0.54	19.19
通风机房	0.37	2.38	0.04	0.07	0.41	0.69

表 4　气溶胶取样检测结果

Table 4　Aerosol concentration test results

样品名称	取样位置	总 α 活度浓度/(mBq/m^3)	总 β 活度浓度/(mBq/m^3)
气溶胶样品 01	走廊-1	0.218	2.19
气溶胶样品 02	粉末制备间	0.192	2.25
气溶胶样品 03	芯块制备间	0.165	2.02
气溶胶样品 04	芯块磨削间	0.192	2.25
气溶胶样品 05	芯块烧结间	0.473	3.73
气溶胶样品 06	分析检测间	0.158	1.68
气溶胶样品 07	废液处理间	0.186	2.03
气溶胶样品 08	分解煅烧间	0.501	4.79
气溶胶样品 09	通风机房	0.202	2.42

4.3.2 墙面和地面样品总铀检测

走廊和各操作间墙面和地面样品总铀检测结果见表 5～表 6。可以看出，该实验室污染区域主要集中在承担粉末制备、废液处理、芯块烧结的相关操作间，承担分析检测的操作间总铀浓度较低。对于固体样品，依据 2.2.5 中的估算原则，当总铀残留质量分数≥40 mg/kg，即界定为放射性污染物质。粉末制备间取样深度为 10 mm 的地面样品总铀残留质量分数为 47.28 mg/kg，为放射性污染物质；剩余样品总铀残留质量分数均小于40 mg/kg。粉末制备间增大取样深度至 15 mm 时，样品中总铀残留质量分数下降至 19.65 mg/kg。

表 5 墙面样品总铀检测结果

Table 5 Total uranium test results for wall samples

样品名称	取样位置	取样深度/mm	样品性状	总 U 残留质量分数/(mg/kg)
墙面样品 01	走廊	10	灰白色固体	4.55
墙面样品 02	粉末制备间	10	灰白色固体	5.19
墙面样品 03	芯块制备间	10	灰白色固体	5.41
墙面样品 04	芯块磨削间	10	灰白色固体	4.03
墙面样品 05	芯块烧结间	10	灰白色固体	4.22
墙面样品 06	分析检测间	10	灰白色固体	4.32
墙面样品 07	废液处理间	10	灰白色固体	2.62
墙面样品 08	分解煅烧间	10	灰白色固体	4.28
墙面样品 09	通风机房	10	灰白色固体	3.56

表 6 地面样品总铀检测结果

Table 6 Total uranium test results for floor samples

样品名称	取样位置	取样深度/mm	样品性状	总 U 残留质量分数/(mg/kg)
地面样品 01	走廊	10	灰白色固体	13.20
地面样品 02	粉末制备间	10	灰白色固体	47.28
地面样品 03	芯块制备间	10	灰白色固体	22.46
地面样品 04	芯块磨削间	10	灰白色固体	20.81
地面样品 05	芯块烧结间	10	灰白色固体	11.15
地面样品 06	分析检测间	10	灰白色固体	7.92
地面样品 07	废液处理间	10	灰白色固体	27.14
地面样品 08	分解煅烧间	10	灰白色固体	10.42
地面样品 09	通风机房	10	灰白色固体	6.68
地面样品 10	粉末制备间	15	灰白色固体	19.65

4.4 污染面积和污染物项估算

4.4.1 建筑物污染面积估算

依据 2.2.5 中的估算原则，当墙面、地面的 α 表面污染水平≥0.08 Bq/cm^2 或 β 表面污染水平≥0.8 Bq/cm^2 或 γ 剂量率≥1 μSv/h 时，即为污染区域。经过对建筑物污染水平监测，地面污染面积约 650 m^2，墙面污染面积约 350 m^2，总计约 1 000 m^2。

4.4.2 污染设备估算

实验室内沾污设备总计约 300 台(套)，主要涉及各型手套箱、通风柜、加热炉、过滤器、反应釜、贮槽、泵类设备、烘箱、煅烧炉、筛分机、压机等。在进行退役治理时，需进行去污、切割、整理整备，以达到装箱贮存或外运熔炼的处置条件。

4.4.3 其他固废估算

实验室内的放射性固体废物主要为铀污染的低放固体废物，体积约 80 m^3，主要物项包括废旧细纱手套、口罩、工作服、乳胶手套、套袖、围裙、工作鞋、工作帽、污染建筑材料等，固体废物的 α 表面污染水平≤2.0 Bq/cm^2、平均 γ 辐射剂量率约为 0.58 μSv/h。

4.5　废物管理

按照废物最小化原则，在退役过程中，应对各类废物进行分类收集、分类包装，不同废物采取不同的处置方式。通过限制放射性废物的交叉污染和扩散，实现退役过程中的废物最小化[16-17]。

对于固体废物，首先对其进行放射性检测，判断其是否为放射性固体废物，然后区分金属制品与非金属制品，大件金属废物经切割后与小件金属废物一同整备；金属废物和非金属废物按不同的去向分类处置。对于液体废物，则在现场进行分类包装，有机废液送废液处理设施暂存，非有机废液送废液处理设施处理。对于建(构)筑物，测量其是否存在放射性污染，非污染部分直接拆除，污染部分去污合格后拆除，剥离废物经放射性检测后，按检测结果装袋送不同处置点。本项目退役过程中废物管理流程见图 3。

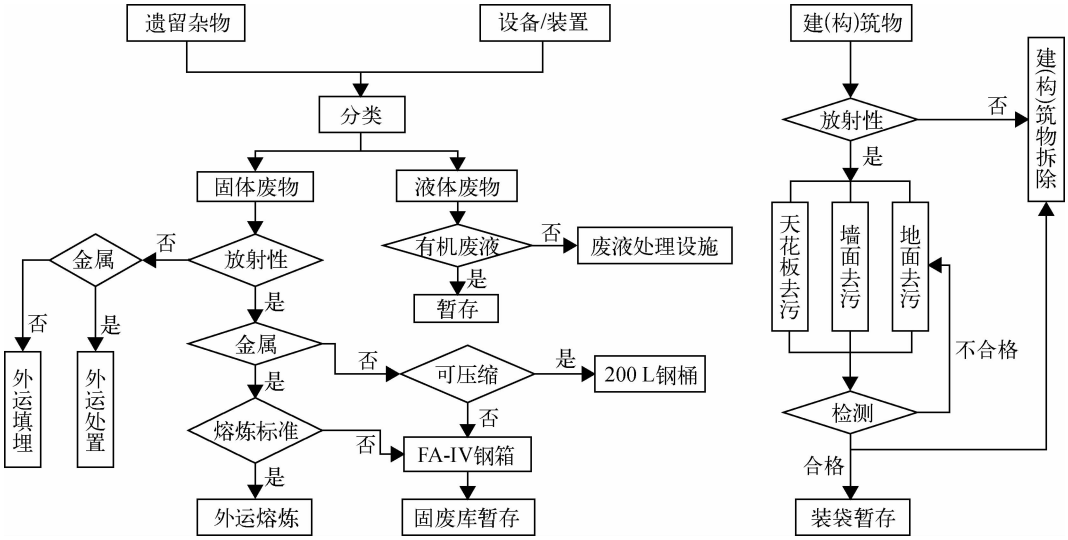


图 3　废物管理流程示意图

Fig. 3　Schematic diagram of waste management process

5　结论

该实验室主要污染核素为^{234}U、^{235}U 和^{238}U，放射性污染核素单一；实验室内气溶胶浓度均处于较低水平，其中分解煅烧间气溶胶样品浓度最高，总 α 和总 β 活度浓度分别为 0.501 mBq/m^3 和 4.79 mBq/m^3；总体放射性污染水平较低，污染区域集中在手套箱室内壁、过滤器、阀及连接管道内壁等位置；建筑物地面及墙面污染面积总计约 1 000 m^2，需进行去污处理的污染设备约 300 台，实验室内放射性固体废物约 80 m^3。

该实验室污染核素单一、污染水平较低；但污染面积大、积存污染物项种类繁杂。在进行退役治理时，建议采用技术成熟、施工简单的治理方案，将废物做好分类处理，避免交叉污染。

参考文献：

[1]　郭喜良，孙庆红，谷存礼. 核设施退役源项调查会议——IAEA 专家报告内容简介[J]. 辐射防护，2005，25(1)：62-64.

[2]　冯硕，董湘龙，姚勇，等. 某硬岩型铀矿退役治理源项调查[J]. 世界核地质科学，2019，36(4)：229-231+246.

[3]　潘英杰，李玉成，薛建新，等. 我国铀矿冶设施退役治理现状及对策[J]. 辐射防护，2009，29(3)：167-171+198.

[4]　王尔奇，张天祝，徐广震，等. 我国核设施退役和放射性废物治理现状[J]. 铀矿冶，2013，32(3)：158-160+164.

[5]　廖燕庆，卢德雄，彭崇，等. 广西某铀矿山退役治理后环境放射性调查与分析[J]. 辐射防护，2017，37(1)：62-66+72.

[6] 岳维宏,刘春秀,李政水,等.北京城市放射性废物库的源项调查[J].辐射防护,2002,22(3):163-169.
[7] 魏广芝,赵良仁,徐乐昌,等.某稀土冶炼厂放射性污染源项调查[J].铀矿冶,2012,31(3):146-151.
[8] 魏广芝,徐乐昌,张学礼,等.某射线仪器厂放射源室源项调查[J].铀矿冶,2014,33(1):46-50.
[9] 彭道锋,刘庆成.铀尾矿库退役后的污染源项调查方法[J].世界核地质科学,2010,27(4):224-228.
[10] 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+139.
[11] 黄治俭,滕慧洁.核设施退役过程中辐射测量的一般问题[J].辐射防护,1996,16(2):103-108.
[12] 王绍林,文富平,邵明刚,等.关于 NORM 开发利用设施退役源项调查方法的探讨[J].辐射防护,2013,33(5):261-268+279.
[13] 邵明刚,李春阳,文富平,等.放射性废物库退役源项的调查[J].核安全,2018,17(4):30-36.
[14] 李伟阳.关于铀矿冶退役治理工程中源项调查的改进建议[J].铀矿冶,2015,34(3):205-207+212.
[15] 梁家玮,吴冬,王剑,等.硬岩铀矿山退役治理项目前期工作若干问题的探讨[J].铀矿冶,2018,37(2):135-141.
[16] 张学礼,徐乐昌,魏广芝,等.铀矿冶放射性固体废物最小化[J].铀矿冶,2010,29(4):204-209.
[17] 刘晓超,宋立权.铀矿冶废物最小化管理体系研究[J].铀矿冶,2012,31(4):197-201.

Preliminary Source Terms Survey for a UO_2 Pellet Development Laboratory

YANG Haitao, LIU Xiaolong, PAN Xuerong, REN Meng, ZHOU Xianming, XU Kaidi, WANG Te
(Nuclear Power Institute of China, CNNC, Chengdu 610041, China)

Abstract: A UO_2 pellet development laboratory is planning to be decommissioned, in order to know the radioactive contamination inside the laboratory, a preliminary source terms survey was carried out, including the operation history, surface pollution level, γ radiation dose level, aerosol concentration level investigation, as well as the contaminated area and pollutant items estimation. The results show that the main contamination nuclides are ^{234}U, ^{235}U and ^{238}U, the radioactive contamination nuclides are single. The surface contamination level and the γ radiation dose and the aerosol concentration in the radioactivity laboratory is low. The contaminated area of the ground and wall of the experimental building is about 1 000 m^2, about 300 units of equipment need to be decontaminated, and the temporary storage of radioactive solid waste is about 80 m^3. Due to a wide variety of pollutants, and the pollution degree of various pollutants varies greatly, the solid waste should be classified during decommissioning treatment to prevent cross-contamination of various pollutants.

Key words: decommission; source terms survey; radioactive contamination; UO_2 pellet