

反应堆退役放射性源项调查技术

韩建平

(中国核工业集团公司四〇四厂, 甘肃兰州, 732850)

摘 要: 随着国内反应堆退役工程项目的开展和深入, 放射性源项调查技术越来越受到重视, 同时也成为规划、设计、实施和评价退役工程的一项最重要的内容。本文对反应堆 I 级退役施工中的辐射场测量和放射性源项调查技术进行了介绍, 也对反应堆 II 级退役中将涉及的有关放射性源项调查技术进行了探讨。

关键词: 反应堆退役; 放射性; 源项调查

反应堆退役工程放射性源项调查工作是随着我国反应堆退役工程项目的实施而逐步开展和深入的, 现已完成 I 级退役的全部工作, 正在进行 II 级退役工程施工前期准备工作。

反应堆退役放射性源项调查工作主要包含: 全面辐射场剂量普查、现场采样、样品的放射性核素测量分析、数学模型建立、放射性源项计算等方面的内容。

放射性源项调查工作是反应堆退役工程中极其重要的基础性工程, 工程规划、施工方案等需要根据工作场所和处理对象的放射性污染特性加以确定, 退役产生的放射性废物的处理处置也需要根据废物的放射性特性采取不同的方法。

辐射场测量与放射性源项调查两项工作紧密相连, 在退役期间伴随着各项退役工作的开展, 需要开展多次测量和分析工作, 并且要根据实际需要进行更深入的测量分析。

1 源项调查的主要目的

辐射场测量包括 γ 辐射场和 α 、 β 表面污染水平的测量^[1]。作业人员的个人受照剂量可根据现场剂量率和工作区的 α 、 β 污染水平来控制; 废物的包装、运输、处理、处置均与现场 γ 剂量率有着极其重要的关系, 因此辐射场测定和计算至关重要。

核素分析的主要目的是查清退役反应堆本体、工艺系统、工艺房间和周围环境所包容的放射性核素的类别, 各类放射性核素的活度。只有在此基础上, 退役工程设计和实施单位才能: 编制总体退役方案, 制定退役计划; 估算各类废物的产生量; 编制概算; 确定何时, 采用何种技术进行哪项退役作业; 确定系统、构件是否需要清洗去污及应采用何种去污技术; 确定采用何种防护技术和安全措施, 确保施工人员的辐射安全和防止对周围环境造成二次污染; 确定废物的类别、等级, 择定包装存储方式; 择定废物的处理、处置方法; 为环境评价和安全分析提供依据。

因此, 查清放射性积存量、存在形态与分布状况不仅是个复杂的技术问题, 而且也是一个重要的经济问题, 对反应堆退役的安全、质量、进程有着重要影响。

2 I 级退役放射性源项调查技术

反应堆放射性总积存量主要包括: 堆本体构件受中子照射产生的活化产物的放射性积存量; 工艺回路、工艺系统内外表面沉积的活化产物的放射性积存量; 另外对放射性总积存量有较大影

响的是运行事故使堆本体、工艺系统受到不同程度的裂变产物和铀及超铀核素的污染。因此，反应堆受污染的工艺系统比较多，这样给反应堆退役放射性核素分析的采样、制样和分析测量工作带来许多困难。

2.1 辐射场测量内容

根据反应堆自身的条件，结合退役工作的需要，应用现有的技术手段，开展辐射场测量工作，其中主要包括：

- 堆本体的 γ 辐射场测量；
- 回路系统的辐射场测量；
- 工艺运输系统的辐射场测量；
- 工艺监测系统的辐射场测量；
- 工艺房间地面、墙面的辐射场测量；
- 室外放射性污染区的辐射场测量。

2.2 放射性源项调查内容

2.2.1 放射性采样的特点

反应堆采样工作特点是系统、设备多，分布范围广，工作参数差异大，辐射场状况复杂，因此需设置较多采样点，采样工作量大；堆内的活化构件和堆外的污染构件放射性剂量高，必须采取严格有效的辐射防护措施；在窄小的深孔中，庞大的深池中采样，需要研制专门取样工具，实施远距离采样；强放密闭水池、箱、井中采样需在水屏蔽的条件下进行，对于人孔小，人、机进出难的强辐射场中采样，可在工程施工中采样；工艺回路和排风系统的设备、管道可采用拆卸构件或从管道上切割管段或管板采样。

2.2.2 采样的范围

反应堆退役废物所含放射性核素从堆本体沿着放射性气态、液态和固态废物的流动主线，污染了大部分回路、工艺系统、设备、构件，污染了工艺厂房及周围环境。据此，核素分析采样点的分布范围包括：反应堆厂房、工艺运输厂房、排风中心、热工回路系统、衰变室、冷却塔、放射性污水暂存池等工号和天然蒸发池，并可根据污染情况增设其他采样点等。

2.2.3 采样点布置

采样点的布置有其规范和要求^[2]，反应堆退役工程中的采样应重点考虑：

在堆本体（石墨砌体、石墨套管、工艺管、铝块、控制棒、挤水棒、游离室屏蔽套筒和砂层管廊）、一回路、三回路、调回路、箱回路、工艺运输系统、水力输送系统、工艺排风系统、放射性污水排放系统、湿度信号系统、流量信号系统、严密性检查系统、主工艺厂房工艺房间、主要设备、构件及室外的放射性污染区的布点采样。

2.2.4 采样工具

采样机具是保证采样质量、采样进度和减少作业人员受照剂量的重要环节^[4]。为了适应不同条件下，不同材质构件上采集多种所需样品的要求，研制了以下采样工具：

- 深水池底泥沙取样工具，用于工艺水池水下取泥沙样；
- 不同水层中水样取样器，用于水质分析取样；
- 锈垢取样器，用于池壁、管道内壁取锈垢样；
- 砂层管廊深层砂取样器，用于砂廊不同层深取砂样；
- 石墨孔道壁面取样器，用于获取孔道壁面粉状样；

- 石墨砌体深孔侧壁柱状样取样器，用于从石墨孔道侧壁不同层深处取柱状石墨样；
- 各种快速便携式平面取样机，用于池壁、池底、地面、墙面等平面取样；
- 水下泥沙分层取样器，用于特种下水沉积泥沙分层取样。

2.2.5 采样的具体要求和方法

反应堆采集的样品大体上分为两大类，即在堆内经中子照射被活化的样品和堆外各系统被放射性核素污染的样品。

2.2.5.1 为了确保采集样品的质量和样品的代表性，采样工作必须严格按采样方案的要求和采样计划的安排，依据规定的采样程序实施。

2.2.5.2 对堆内活化的构件大体上可以分为以下几种情况取样：

① 堆内金属大构件、石墨砌体和导向管等无法取出的构件，采用专门取样工具，在堆内指定的孔道和部位采样，采样量一般要求在 10g~20g 左右。

② 可从堆内拔出的构件（如工艺管、石墨套管、控制棒、挤水棒、游离室屏蔽套筒、弹簧卡头、铝托、联接管、防护套圈等构件），通常使用专用的吊具，按照确定的孔道号先将整根构件从堆内取出，然后沿程进行剂量测量，再拆解或分段锯成短管或直接在指定部位锯、锉粉状样。

③ 从堆内卸出或已拔出做过分割包装的构件（如铝块、挤水棒、游离室屏蔽套筒等），现已无法查明构件的确切辐照条件，只能按辐照剂量的测量结果，分成大、中、小剂量组，从中随机采样，分成几组，各自制成混样。

2.2.5.3 对堆本体外各系统（一回路、三回路、调回路、箱回路、工艺运输系统、污水排放系统、工艺排风系统、湿度信号系统、流量信号系统、严密性检查系统等）的放射性污染构件、管道和设备大体上分成以下五种情况采样：

① 在系统中无法拆卸而又必须在此部位采样的管道或设备，在现场相关部位进行过 γ 剂量率和 β 污染水平测量并确定采样点后用等离子切割机具切割成管段或管板块。一般面积大于 300cm²，然后将采下的管段或板块制成粉状样。

② 采样点选在法兰连接构件（如水泵叶轮、泵进出管口、逆止阀板等）处，可在拆卸后，取出构件采表面样，并可在管口内壁采表面样。

③ 对于数量大尺寸小的管子（如主热脉冲管、流量信号脉冲管、湿度信号脉冲管等）采用现场测量 γ 剂量率、 β 污染水平后，按剂量大小分组采样。

④ 对于活底桶、手动分类台料盘等大剂量设备分别采用切削样块，然后刮取粉状样和直接用平面机采样的方法，采样深度以露出金属基体 20 μ m~50 μ m 为止。

⑤ 对于不宜搬离现场的构件（如上、下防护盖板、工艺管头、事故处理工具杆、铝块分类机支架等）采取就地制取表面粉状样，测算其取样面积。

2.2.5.4 房间地面、墙面、水池壁面、E 结构空间地面、壁面采样可采取以下措施：

① 对于碳钢或不锈钢覆面的地面和墙面，采用平面采样机，每次可采集 70cm²（10g 左右）的粉状样，采样深度在 20 μ m~50 μ m。对于水泥砂浆地面、墙面采样面积 300cm²，采样深度 1mm~3mm。

② 对于塑料地面，按划定的面积割取塑料板块，然后制成粉样。

2.2.6 采样和核素分析结果

1991 年~1999 年期间，工厂先后分五批从堆本体沿着放射性气态、液态和固体废物这个流动主线布点采样，总共采集用于放射性核素全分析（ α 、 β 、 γ/β 核素）的各类样品 312 个。并制成各类核素分析样品，对样品进行了放射性核素全分析，取得了大量的有工程应用价值的分析

测量结果，为反应堆放射性总积存量的计算提供了技术依据。

核素分析结果表明，这些样品中含有 α 、 β 、 γ 核素和只发射X射线的 ^{55}Fe 。主要测出的核素有：

α 核素： ^{239}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{243}Cm 、 ^{244}Cm 和 ^{238}U 等；

β 核素： ^{90}Sr 、 ^{63}Ni 、 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl 和发射X射线的 ^{55}Fe ；

γ 核素： ^{137}Cs 、 ^{60}Co 、 ^{65}Zn 、 ^{106}Rh 、 ^{125}Sb 、 ^{144}Ce 、 ^{134}Cs 、 ^{152}Eu 、 ^{154}Eu 、 ^{155}Eu 。

3 II级退役源项调查内容和要求

反应堆II级退役源项调查的主要目的是在I级退役放射性源项调查的基础上进一步查清堆内各系统的局部污染状况，为反应堆II级退役确定施工方案，为局部拆除工作现场实施和拆除放射性废物的处理处置提供技术依据^[3]。

3.1 II级退役源项调查内容

反应堆II级退役源项调查主要涉及以下几方面的内容：

- ① 查询反应堆基建阶段的设计、竣工资料，包括施工过程的工程变更和修改文件，查清被调查材料的牌号、重量、化学成分等，用于详细计算放射性核素存量；
- ② 查询反应堆运行阶段的正常运行、测量、事故及其处理的资料，查清运行时和事故时的放射性测量数据、污染性质及其影响程度和范围，用于确定特性调查的重点和范围；
- ③ 查询反应堆停堆后，从退役前期工作到I级退役完成期间的资料，查清已经完成了的废物清理、设备去污、放射性废物处理等活动，用于确定II级退役的初始条件；
- ④ 对各部分放射性核素存量进行计算，研究确定适用的数学模型，确定计算方案，进行计算；
- ⑤ 实施现场测量，确定就地测量的方案和计划，包括测量的位置、内容、测量设备等，进行就地测量；
- ⑥ 进行现场采样和分析，在查询以往信息、就地测量的基础上，制定现场采样和分析方案及计划；
- ⑦ 研究和评价所获得的数据，确定进一步的放射性特性调查的内容和计划，为工程设计、施工提供最终放射性特性调查结果。

3.2 II级退役放射性特性调查的要求

- ① 放射性特性调查要求尽量收集和利用历史资料。对不可接近部分的放射性核素存量采用计算确定，计算中力求采用先进的计算程序和方法，并收集类似反应堆的数据作比较；
- ② 对可接近部分先采用现场测量技术，用先进的测量仪器进行扫描普查，以确定需要的调查重点，必要时做采样分析；
- ③ 采样分析耗资费时，工作人员还要受辐照，因此采样前需先普查清楚，在最佳位置采尽可能少的样品。从放射性特性调查角度，采样分析是特性调查最准确的方法，可以在实验室仔细测量分析，确切查清放射性核素的种类和活度，因此要进行优化；
- ④ 采样有可能破坏设备的完整性，实施前应认真测量、分析研究；
- ⑤ 现场使用的仪器应能保证测量要求；
- ⑥ 现场测量、分析人员必须具有专业理论知识或经过专门的技术培训；
- ⑦ 必须建立严格的文件档案管理体系；

- ⑧ 放射性特性调查工作要逐步进行，要在前一步工作的基础上决定下一步实际调查工作；
- ⑨ 反应堆Ⅱ级退役的放射性取样、分析方法应在Ⅰ级退役取样方法的基础上采用更先进、更合理、更可靠的方法。

3.3 放射性特性调查的范围

放射性特性调查的范围为反应堆Ⅱ级退役工程设计的所有物项（厂房、工艺系统、放射性废物和相关污染区等）和厂外环境等。反应堆在Ⅰ级退期间已完成有代表性部位的采样、分析，Ⅱ级退役要求在此基础上全面深入地进行定性和定量的放射性特性调查。

4 结语

放射性特性调查是反应堆退役工程的一项重要活动，贯穿于退役过程的始终，应根据反应堆退役工程设计、施工的实际需要统一考虑、安排，并且随着人们对退役工程实践的逐步深入和环境保护的实际要求而不断提高和完善。可以说退役工程的开展源于放射性特性调查，终止于放射性特性调查。因此它对退役工程施工的安全、质量、进程和经济性具有决定性的影响作用。

参 考 文 献

- [1] 李德平，潘自强. 辐射防护手册[M]. 北京：原子能出版社，1990. 167～178.
- [2] Q/BHJ04-0201-2001 反应堆退役采样规范.