

# 核反应堆退役的放射性特性调查

于庆宇

(北京核工程研究设计院 北京 100840)

**摘要:** 本文论述核反应堆退役放射性特性调查的目的、过程,放射性核素存量估计,调查的方法和技术,以及质量保证等问题。

**关键词:** 核设施退役;放射性特性调查

## 1 前言

放射性特性调查就是用调查信息,仪器探测,采样分析和理论计算方法确定要退役的反应堆各部分的放射性核素的分布及其活度,用于确定退役技术方案,所应采用的设备和工具,以及人员辐射屏蔽措施。放射性特性调查是核反应堆退役的一项重要工作,贯穿于退役工作的整个过程,从退役方案确定之前直到退役活动完成之后都必须有与实施退役相适应的放射性特性调查<sup>[1]</sup>。

## 2 放射性特性调查的目的

在退役设计阶段的开始,调查的目的是收集充分的信息,评价反应堆的放射性状况以及有放射性问题存在的性质和范围。随着退役设计工作的开展,调查的目的是要获得更详细的信息,以便确定退役的操作技术,去污工艺,拆除工序和所需的工具,工作人员的辐射防护措施,废物处理方案,环境保护方法,费用估计等。

## 3 放射性特性调查的过程

放射性特性调查是为了提供退役设计所需的放射性信息,需要合理的方法和步骤。调查的程序包括:研究历史资料,进行计算,现场测量,采样,分析,研究评价所得数据,计算结果与实测数据比较,最后提供放射性特性调查的可信结果。

### 3.1 收集和研究历史资料

如设备和部件制造施工文件,从中查询确定的材料成分,用于计算不可接近部分的放射性活度;运行和事故处理文件,从中查询放射性污染泄漏波及的范围和程度以及事故处理过程中人员所受到的职业照射;反应堆停运后的有关文件,从中查询放射性废物转移情况。尽可能把已知的情况整理清楚,避免不必要的重复调查工作。

### 3.2 实施各部分放射性核素存量的计算

根据所收集的材料成分、重量数据,辐照剂量情况,采用合适的先进计算机程序或其它理论方法进行计算,估计放射性核素存量。

### 3.3 进行现场测量

利用先进的测量仪器进行现场普查,绘制出放射性分区图,找出热点位置,确定要采样分析的部位。

### 3.4 采样和分析

分析耗资费时,人员还要受辐射,因此采样前必须先普查清楚,在最佳位置采尽可能少的样。但从调查角度,采样分析是最准确的方法,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。采样的缺点是破坏了设备的完整性,被采样的设备应该是准备拆除的。

### 3.5 研究和评价所获得的数据

在调查过程中,为了确定是否满足了预定的要求,应尽可能早地评价和分析数据。根据分析

结果, 及时调整调查计划, 增加补充调查内容或简化调查项目。

### 3.6 计算结果和测量数据的比较

为了确认计算的精确度, 提高以后的退役项目计算机程序的可靠程度, 要对计算结果和测量数据进行比较。不准确性可能来自对中子注量的计算的基础数据, 如材料的吸收截面、几何简化、中子源的不确定性、材料成分、采样的典型性和计算模型近似程度等因素。

## 4 放射性核素存量估计

停运后并卸出辐照燃料后的剩余放射性核素分为两类: 中子活化材料和污染的材料。

### 4.1 中子活化材料

位于接近堆芯受过中子辐照的材料, 中子活化部件对厂的放射性存量影响重大。这部分通常难于接近做直接调查, 必要时需置备远距离操作装置。调查主要是进行尽可能准确的近似。中子活化近似需要确定系统中的中子注量空间和能量分布和材料的成分和形状, 厂的运行史, 包括最终停运后的时间等。主要的活化反应可查有关资料<sup>[1]</sup>。

### 4.2 污染的材料

污染由反应堆冷却剂输送的腐蚀和侵蚀产物的活化和辐照燃料通过包壳破损泄漏出的裂变产物扩散、一回路泄漏、放射性流出物和废物处理、贮存、燃料操作事故引起。气载放射性可引起放射性物质沉积在墙壁、天花板和通风系统中。污染有两种类型, 能用简单机械方法去除的松散污染层和用强去污方法去除的固定污染。污染通常停留在设备表面, 除混凝土外不会渗透很深。在燃料破损泄漏波及处可能有裂变产物和锕系元素。

### 4.3 比较重要的随时间变化的放射性核素

停运的反应堆中存在的主要活化产物为:  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{39}\text{Ar}$ ,  $^{94}\text{Nb}$  (钢中);  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  (钢筋混凝土中) 和  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$  (石墨中)。按活度  $^{60}\text{Co}$  起支配作用。停运后 10 年内,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  是主要部分。停运 50 年剩下长寿的镍、铈、银同位素占优势, 石墨和混凝土剩下长寿的  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$  和 Eu 同位素占优势。停运 100 年后微量稀土 (Eu) 有足够的  $\gamma$  活性。停运 10 至 20 年剩余污染中存在最多的放射性核素是  $^3\text{H}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$  和  $^{137}\text{Cs}$ , 20 至 30 年后放射性核素为  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ 。

### 4.4 影响放射性核素存量的参数

不同类型的反应堆活化和污染材料的放射性核素可能有很大区别。还有许多因素影响, 主要是中子注量, 运行时间和停运后的时间。

具体的因素是: 堆型设计, 功率水平, 停运时间, 结构材料成分, 运行参数, 计划外事故等。

## 5 放射性特性调查的方法和技术

放射性特性调查的基本目的是为计划和实施退役工程提供放射性条件, 调查的方法和技术包括代表性计算, 现场测量, 采样及其分析。

### 5.1 中子活化计算

先要收集输入数据包括: 厂运行的时间—功率历程图; 中子谱和温度的一套截面数据; 核燃料的特性; 受中子辐照的部件的几何形状和重量; 最终运行后衰变时间。

一般中子迁移方法是基于一维或二维计算, 为了适应特别复杂的几何形状, 三维模型可用于达到所需的精确度。计算分为两类: 确定论方法, 用不同的数学近似处理空间和能量偏离来解迁移方程; 随机方法, 用蒙特—卡罗和其它技术。已经开发了相应的程序并已用于核工业多年。

### 5.2 现场测量

有关放射性特性调查可有三种现场测量: 剂量率测量、放射性污染测量和用谱仪对有关单个

放射性核素活度的测量。注意保证测量方法要考虑几何形状、表面条件和放射性污染的性质和范围。

### 5.3 采样和分析

精确的放射性特性调查需要从被调查的材料采样。测定采样的辐射谱并确定其构成和它们的活度，可以推导出所关注的材料的比活度。

分析通常需要使用高级设备，如高纯锗、多道分析器、 $\alpha$  谱仪或液体闪烁系统。

先用  $\gamma$  谱仪在反应堆现场分析采样，然后在厂外实验室做综合的定量放射性化学分析。单个放射性核素可以从基体中分离，然后用专门的程序测量。

## 6 放射性特性调查的质量保证

在实施放射性特性调查之前，应确定质量保证大纲，用于保证采集的信息的可靠性，验证所做的计算、测量或分析的结果的正确性。

质量保证方面的步骤有：获得可用于测量和分析的标准和法规；选择用于采集数据的统计方法；验证参与调查的人员的资格；选择可用于获取数据、记录、评价、存档的程序和规定；确定鉴定计算机程序、解释结果的规定。

### 参考文献

- [1] IAEA, Radiological Characterization of Shut Down Nuclear Reactors for Decommissioning Purposes, Technical Reports Series No.389, IAEA, Vienna, 1998.