

# 三门核电首炉核燃料运输货包辐射水平监测与分析

王娟, 曹勇, 肖曙光, 宋伟力, 唐桢, 吴晓飞

浙江省辐射环境监测站浙江省辐射环境安全监测重点实验室 浙江 杭州 310012

**摘要:** 目的 三门核电有限公司是我国首座 AP1000 堆型的核电厂, 核电厂的 1 号首炉核燃料由美国西屋公司提供并负责海路运输至中国宁波北仑港。笔者对三门核电首炉核燃料运输货包剂量当量率及表面污染进行全程监测, 并对监测结果进行分析。方法 按照国家技术规范开展监测。结果 运输货包辐射水平和污染水平均低于《放射性物质安全运输规程》(GB 11806-2004) 规定的限值要求。结论 三门核电首炉核燃料运输货包防护良好。

**关键词:** 核燃料; 运输货包; 辐射水平

中图分类号: TL75<sup>+</sup>1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2015)01-045-02

DOI:10.13491/j.cnki.issn.1004-714x.2015.01.018

中核集团三门核电有限公司(以下简称“三门核电”)是我国首座 AP1000 堆型的核电厂, 其 1 号首炉核燃料由美国西屋公司提供并负责海路运输至中国宁波北仑港。燃料组件由宁波北仑港进入中国境内后, 西屋公司与三门核电办理货包交接手续, 其后由三门核电负责在国内的运输, 运输采用公路运输方式运至三门核电厂燃料组件库房, 运输委托中国远洋物流有限公司承担本次核燃料组件的公路运输任务。运输的起点为宁波北仑港口岸, 运输的终点为三门核电厂燃料厂房。

## 1 运输货包基本情况

**1.1 货包概况** 根据《三门核电燃料运输核与辐射安全报告》, 新燃料组件为易裂变核材料, 属于一类放射性物品, 新燃料组件<sup>235</sup>U 初始富集度不大于 4.8%。本次运输燃料组件共计 157 件, 分 27 个集装箱装运, 燃料组件运输采用西屋公司设计的 XL 型新燃料组件运输容器, 该运输容器已获得了美国核管会(NRC)颁发的压水堆核燃料运输容器设计许可, 设计批准号: USA/9297/AF-96。单个容器可装载一组新燃料组件, 属 AF 型货包, 货包的运输指数为 0.2, 货包等级 II 级(黄), 临界安全指数为 0.7<sup>[1]</sup>。

**1.2 燃料芯块结构** 燃料芯块为实心圆柱体, 由低富集度二氧化铀(UO<sub>2</sub>)粉未经混合、压制、烧结、磨消等工序制成小圆柱体形状, 两端为碟形。其主要化学成分为二氧化铀, 并在工艺过程中加入一定量的添加剂。三门核电 1 号机组首炉燃料组件富集度见表 1。

表 1 三门核电 1 号机组首炉燃料组件富集度

组件型号	组件数量	<sup>235</sup> U 富集度	单个组件
		(w/o <sup>235</sup> U)	金属铀含量(kg)
A-00	16	0.74	541.16
B-00	49	1.58	541.16
C-00	28	3.04	541.16
D-68-12	36	3.72	538.29
E-88-4	8	4.27	537.40
E-124	4	4.27	535.81
E-124-8	16	4.27	535.81

## 1.3 燃料组件的辐射特性

**1.3.1  $\alpha$  辐射特性** 低富集度 UO<sub>2</sub> 芯块中 U 同位素以<sup>234</sup>U、<sup>235</sup>U、<sup>238</sup>U 三种为主。在这些铀的同位素中,<sup>234</sup>U 的半衰期最短, 为  $T_{1/2} = 2.445 \times 10^5$  a, 其次是<sup>235</sup>U, 其半衰期  $T_{1/2} = 7.038 \times 10^8$  a, <sup>238</sup>U 的半衰期为  $T_{1/2} = 4.467 \times 10^9$  a。<sup>234</sup>U 几乎是纯  $\alpha$  粒子放射性物质, 其  $\alpha$  粒子的能量分别为  $E_{\alpha 1} = 4.7768$  MeV 的绝对强度为 72.5%,  $E_{\alpha 2} = 4.7241$  MeV 的绝对强度为 27.5%。<sup>234</sup>U 发生  $\alpha$  衰变时, 有少部分衰变至<sup>230</sup>Th 的激发态, 则<sup>230</sup>Th 立刻由激发态向其基态跃迁, 而发射低能  $\gamma$  射线及其内转换电子产生的 X 射线。因此, 陶瓷二氧化铀芯块的辐射特性以  $\alpha$  放射性为主, 并有少量的  $\gamma$  射线和低能 X 射线辐射,<sup>234</sup>U 对  $\alpha$  总活度的贡献始终占据主导地位。

**1.3.2  $\gamma$  辐射特性** 天然铀制造的芯块中铀的各种同位素除辐射  $\alpha$  粒子外, 还发射少量的  $\gamma$  射线和 X 射线, 其主要  $\gamma$  射线的能量均不超过 0.2 MeV。燃料芯块中的<sup>235</sup>U 和<sup>238</sup>U 发生  $\alpha$  衰变后产生的短寿命子体很快与其母体达到平衡。<sup>235</sup>U 的子体<sup>231</sup>Th 将发射  $\beta$  射线

与少量的低能  $\gamma$  射线。 $^{238}\text{U}$  子体  $^{234}\text{Th}$  再经  $\beta$  衰变到第二代子体  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{Pa}$  将发射  $\beta$  粒子和少量  $\gamma$  射线,  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  还将发射极少量的能量较高的  $\gamma$  射线  $E_\gamma = 0.765 \text{ MeV} (0.3\%)$ 、 $1.001 \text{ MeV} (0.6\%)$ 。虽然,  $^{238}\text{U}$  系二代子体  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  的  $\beta$  衰变后发射的  $\gamma$  射线能量略高, 但对  $\gamma$  和 X 射线总的辐射剂量的贡献很低。

1.3.3 中子辐射特性 燃料芯块中铀的各种同位素自发裂变还发射出中子。 $^{235}\text{U}$  的自发裂变中子产额为:  $4.58 \times 10^{-3} \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{g})$ ,  $^{235}\text{U}$  的自发裂变中子产额为:  $7.7 \times 10^{-4} \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{g})$ ,  $^{236}\text{U}$  的自发裂变中子产额为:  $5.33 \times 10^{-3} \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{g})$ ,  $^{238}\text{U}$  的自发裂变中子产额为:  $1.13 \times 10^{-2} \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{g})$ 。

单个燃料组件中所含金属铀 541 kg, 燃料组件中  $^{235}\text{U}$  富集度不大于 4.8%, 金属铀的总自发裂变中子产额为  $1.082 \times 10^{-3} \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{g})$ , 故单个燃料组件自发裂变中子发射率为  $5.85 \times 10^3 \text{ n/s}$ , 可忽略不计。

## 2 监测仪器和方法

2.1 监测仪器 FH40G 系列辐射环境监测仪和 RSS-131-ER 高压电离室; 监测仪器均通过国家计量部门检定, 并提供校准因子。

2.2 监测方法 按照《辐射环境监测技术规范》(HJ/T 61-2001)<sup>[2]</sup>、《环境地表辐射剂量测量规范》(GB/T 14583-93)<sup>[3]</sup> 和《表面污染测定——第一部分:  $\beta$  发射体(最大  $\beta$  能量大于 0.15 MeV) 和  $\alpha$  发射体》(GB/T 14056.1-2008)<sup>[4]</sup> 进行监测。

### 2.3 监测内容

#### 2.3.1 燃料组件货包

2.3.1.1  $\gamma$  剂量当量率监测(运输起点) 对每个燃料货包测量其前、中、后三个点。对于放置在集装箱靠外面四根燃料组件货包, 分别测量前、中、后三点表面、外 1 m 处、外 2 m 的  $\gamma$  剂量当量率; 对于放置在集装箱中间两根燃料组件货包, 由于条件限制, 只测量前、中、后三点表面  $\gamma$  剂量当量率。

2.3.1.2  $\gamma$  剂量当量率监测(运输终点) 燃料货包集装箱框架卸到三门核电厂燃料组件库房后, 排列较为紧密, 因此, 只对每个集装箱框架靠外面四根燃料组件货包, 分别测量其前、中、后三点表面。

2.3.1.3  $\alpha$ 、 $\beta$  表面污染 表面污染监测首先采用直

接测量方式对每个燃料组件货包  $\alpha$  表面污染进行巡测, 针对监测数据较大的点位, 用滤纸进行擦拭, 擦拭面积不小于  $300 \text{ cm}^2$ , 对  $\alpha$  表面污染进行监测。

2.3.2 运输车辆 对运输车辆车头、车尾、司机位、副驾驶位各 1 个监测点位, 测量其表面、外 1 m 处、外 2 m 处  $\gamma$  剂量当量率。

2.3.3 连续监测 在距离运输车队 2 m 远处位置, 利用高压电离室进行连续监测。运输途中, 将高压电离室分别放置在监测车中, 对货包运输全程进行连续监测。

## 3 监测结果

三门核电有限公司燃料货包在从宁波北仑港启运时, 燃料货包周围各监测点位的  $\gamma$  剂量当量率在  $0.69 \sim 21.9 \mu\text{Sv/h}$  范围内; 运输车辆周围  $\gamma$  剂量当量率在  $0.097 \sim 1.25 \mu\text{Sv/h}$  范围内; 燃料货包到达三门核电场区后, 燃料货包周围各监测点位的  $\gamma$  剂量当量率在  $0.36 \sim 11.2 \mu\text{Sv/h}$  范围内; 各燃料货包均未检出表面污染; 运输途中高压电离室连续监测结果为  $60.44 \sim 158.5 \text{ nSv/h}$ 。

监测结果表明, 本次运输货包辐射水平和污染水平平均低于《放射性物质安全运输规程》(GB 11806-2004) 规定的限值要求: 货包外包装外表面上任一点的辐射水平应不超过  $2 \text{ mSv/h}$ ; 距运输工具外表面 2 m 处的辐射水平应不超过  $0.1 \text{ mSv/h}$ ; 货包外  $\alpha$  表面污染限值为  $0.4 \text{ Bq/cm}^2$ 。

## 参考文献

- [1] 王学新, 汤荣耀, 庄大杰, 等. 三门核电燃料运输核与辐射安全报告[R].
- [2] 国家环境保护总局. HJ/T 61-2001 辐射环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2001.
- [3] 国家环境保护总局. GB/T 14583-93 环境地表辐射剂量测量规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 1993.
- [4] 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:  $\beta$  发射体(最大  $\beta$  能量大于 0.15 MeV) 和  $\alpha$  发射体[S]. 北京: 中国环境出版社, 2008.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. GB 11806-2004 放射性物质安全运输规程[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.

收稿日期: 2014-08-07 修回日期: 2014-12-06