

# 核电站某起放射性物品运输事件的计算与分析

陆顺 杨艺强 王文 易琳

阳江核电有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i2.7585

**[摘要]** 核电站的放射性物品厂内运输工作对现场工作人员及环境存在辐射照射影响。本文主要介绍了国内某核电站放射性物品厂内运输过程中引发KRT报警事件的调查与分析过程,通过计算分析来推算受影响的KRT通道在特定条件下所能接受的外照射剂量率的限值,通过建模计算核电站内以常见放射性核素为源项的放射性物品厂内运输的场景,为后续的放射性物品运输工作提供参考,并提出此类工作中的风险控制措施以减少此类事件发生的概率。

**[关键词]** 放射性物品; 厂内运输; KRT

**中图分类号:** P734.2+4 **文献标识码:** A

## Calculation and analysis of a radioactive materials transport event in a nuclear power plant

Shun Lu Yiqiang Yang Wen Wang LinYi

Yangjiang Nuclear Power Co.Ltd

**[Abstract]** The in-plant transportation of radioactive materials in nuclear power plants has radiation effects on on-site workers and the environment. This article mainly introduces the investigation and analysis process of the KRT (nuclear power plant radiation monitoring system) alarm event triggered during the in-plant transportation of radioactive materials in a domestic nuclear power plant, calculates the acceptable external exposure limit of the affected KRT channel under specific conditions through calculation and analysis, and through modeling the scene of in-plant transportation of radioactive materials with common radionuclides as the source term in a nuclear power plant is calculated to provide reference for the subsequent transportation of radioactive materials, and put forward risk control measures in such work to reduce the probability of such incidents.

**[Key words]** Radioactive materials; In-plant transportation; KRT

## 引言

国家标准GB11806-2019《放射性物品安全运输规程》中为了确保放射性物品货包在运输过程中,对公众和环境的影响是可接受的,IAEA发布了一系列的安全标准和导则,并要求在货包启运前,一方面应开展人员防护措施,另一方面还必须进行货包的辐射监测活动。但是这套标准不适用于核电站内部进行不涉及公共道路或铁路的放射性物品运输,即核电站厂内运输<sup>[1]</sup>。近些年随着厂内运输手段的不断完善,放射性物品运输导致人员受到意外照射的情况鲜有发生,但是在电站内部,因放射性物品运输导致KRT通道报警的事件却一直存在,此类事件与放射性物品厂内运输路线和运输前的评估密切相关,如运输工作人员对KRT探测器相关的认知存在盲区,可能导致在放射性物品运输工作中没有提前规划路线、缺少对探头的评估则可能导致的一系列运行事件,其结果可能会给电站带来一定的负面影响,本文就2023年某核电站一次放射性物品运输导致的KRT报警事件进行分析和计算,确认报警是因放射性物品运输导致,对KRT通道的

探测特性进行介绍,并通过建模等理论计算的方式给出电站后续放射性物品运输的建议。

## 1 厂内放射性物品运输及管理要求

在核电站内部因工作需要,放射性物品因工作需要经常在各辐射控制区之间进行运输,在核电站厂内实际运输过程中,需要对运输的放射性物品做出进一步的限值、分类、运输要求等参数以便进一步的限制。并且在出辐射控制区前需要符合以下规定:

—存在非固定表面污染的放射性物品,出控制区前必须要有完整严密的包装。

—如果放射性物品有液体流出风险,必须采取适当措施,确保无液体流出。

—按照包装表面的非固定表面污染水平和接触剂量率,张贴相对应的货包标签,并按要求填写记录表。

除了上述要求外还应在车辆的装载中,适当考虑各种放射性货包的位置,将剂量率较高的货包放在车厢的中央,以尽可能

降低车厢外表的剂量率, 电站参考国标编制内部规定进行控制, 要求货包的表面接触剂量率 $\leq 2\text{mSv/h}$ 。

## 2 事件经过

2023年11月1日上午, 运输作业班组开展放射性物品的厂内转运工作, 将ORFO过滤器从2K房间运往1K房间。上午9:40左右, ORFO过滤器完成装车, 经辐射防护人员测量, 确认符合厂内运输的相关要求, 并填写《放射性物品厂内运输登记表》后, 开始沿2KX $\rightarrow$ 2MX $\rightarrow$ 1MX $\rightarrow$ 1KX的路线(如图1中红色虚线所示RF0过滤器转运路线)运输。9:45左右, 废物转运车途经QB厂房西側道路, 其后到达1K房间边界门处, 由控制区内工作人员完成接收。当天上午ORFO过滤器转运工作完成后, 根据辐射防护人员反馈监测后台显示KRT902MA触发了一、二级报警, 通过对转运工作的复盘, 确定此次KRT902MA的报警由ORFO过滤器转运工作引发。

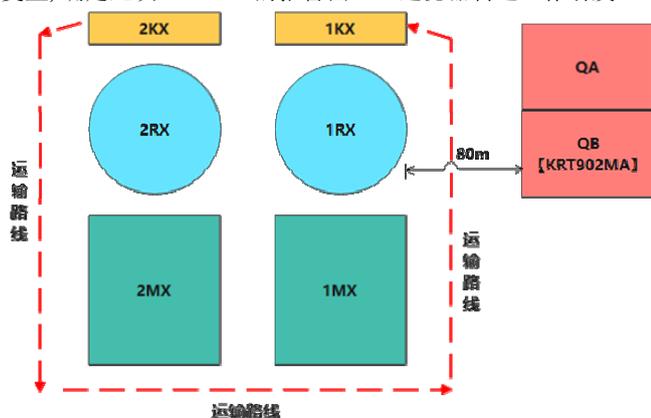


图1 ORFO运输路线图

根据此事件后续调查: ①9NX厂房北侧过道为单行道, 其允许通行方向为1KX至2KX厂房, 所以本次ORFO过滤器从2KX至1KX的转运工作只能选择路程更长、更为复杂的路线; ②运输班组知悉放射性物品转运可能导致周边设置的监测仪报警, 但不清楚放射性物品转运对厂房内KRT通道具体的影响, 故而也没有进一步核实QB等途经厂房内KRT通道的分布情况, 从而引发了报警。

## 3 KRT介绍

KRT系统是与电厂运行工况直接相关的辐射监测系统, 主要功能包括屏障完整性监测、工作场所监测、流出物监测、工艺系统监测等, 部分KRT通道监测到高放射性后可以启动相关系统设备的动作, 从而起到保护工作人员和公众的作用。

KRT902MA用于监测核电厂常规岛废液的放射性, 主要设备包括探测器、处理单元、接线箱等。KRT902MA安装在QB(常规岛废液贮存罐厂房), 采用在线监测的方式, 探测器布置在排放管线外, 在排放过程中持续对废液进行放射性监测。当KRT902MA设备故障或探测到废液放射性过高时, 会触发排放管线阀门关闭, 从而终止废液排放, 为了降低环境本底的影响, KRT902MA探测器外设置铅屏蔽, 可降低环境本底对废液监测的影响, 但即便设置有铅屏蔽来降低环境本底的影响, 核电厂仍有许多活动可能导致KRT902MA监测受到影响, 例如射线探伤、放射性物品运输

活动可能引起环境本底升高, 导致KRT902MA测量升高甚至出现误报警。KRT902MA监测输出为液体的体积活度 $\text{Bq/m}^3$ , 而表征环境本底的物理量为剂量率 $\mu\text{Gy/h}$ 。为了分析环境本底变化对KRT902MA测量的影响, 可通过理论计算得出两者之间的关系。

根据专用软件计算的结果, 对Co-58响应灵敏度为 $76.7\text{cps}/(\mu\text{Gy/h})$ 。结合上文所提到的计数率与体积活度转换因子 $6.5\text{E}-5\text{cps}/(\text{Bq/m}^3)$ , 便可以得到体积活度与环境剂量率之间的转换系数为 $1.18\text{E}6\text{Bq/m}^3/(\mu\text{Gy/h})$ , 即当环境本底每升高 $1\mu\text{Gy/h}$ , KRT902MA测量值将升高 $1.18\text{E}6\text{Bq/m}^3$ 。

KRT902MA的一、二级报警阈值分别为 $8\text{E}4$ 、 $4\text{E}5\text{Bq/m}^3$ , 当KRT902MA铅屏蔽外环境本底升高 $0.067\mu\text{Gy/h}$ 时, 有触发KRT902MA一级报警的风险, 所以当KRT902M铅屏蔽外环境本底升高至约 $0.34\mu\text{Gy/h}$ 时, 有触发KRT902MA二级报警的风险。

## 4 放射性物品运输建模计算

为了能即时评估放射性物品对探头的影响, 本次计算使用的是点源粗略计算和建模计算做比较, 建模使用的是中国辐射防护研究院的CIRPDose软件, 通过软件的建模计算分析, 模拟计算出不同核素不同距离的放射性物品对KRT通道造成的影响, 为辐射防护人员提供一个基本的输入判断。

本次事件中运输的放射性物品为ORFO(放射性热点截留的可移动装置), 依据ORFO的实际尺寸, 建立模型如图2, 将ORFO本身视为内含核电站一般常见核素Co-60或Co-58的放射性物品, 依据运输情况中的实际距离代入模型中进行计算, 结合上述分析中引发KRT报警的最低转换剂量率, 保守给出运输类似物品可接受的剂量率上限。

因目标核电站采用的是CPR1000核电技术, 各厂房的布局简图如图1, 由于KRT902MA所处QB厂房与MX厂房存在一定的距离, 当所计算剂量点到放射性物品的距离比放射性物品的线度大10倍以上时, 放射性物品就可当点源处理<sup>[2]</sup>, 通过对比放射性物品与KRT通道的距离, 本次事件中运输的放射性ORFO最大外形线度 $1500\text{mm}$ , QB与RX直线距离 $80\text{m}$ , 运输路线位于两厂房中线, 假定ORFO运输时距离QB厂房内KRT通道的最小直线距离保守按 $30\text{m}$ 计算, 这种情况下可将ORFO视为一个点源, 根据点源公式粗略计算:

$$H_{\text{探头剂量率}} = H_{\text{物品接触剂量率}} / r^2$$

式中:

$H_{\text{探头剂量率}}$ ——KRT通道屏蔽外可接受的最小剂量率(理论计算值为 $0.34\mu\text{Sv/h}$ )。

$H_{\text{物品接触剂量率}}$ ——厂内放射性物品运输的外包装的接触剂量率(单位是 $\mu\text{Sv/h}$ )。

$r$ ——放射性物品至KRT通道的距离(单位是 $\text{m}$ )。

因KRT通道可接受的最大剂量率为 $0.34\mu\text{Sv/h}$ , 则依据公式推算出ORFO的接触剂量率最大不超过 $306\mu\text{Sv/h}$ , 这是在不考虑放射性物品的核素构成及其它影响因素的粗略计算值。

在ICRPDose剂量评估软件中分别使用Co-60、Co-58建立模型<sup>[3]</sup>, 由表1中数据可知, 在距离 $30\text{m}$ 的情况下, 如果是单一核素Co-60的放射性物品, 在KRT通道处小于 $0.34\mu\text{Sv/h}$ 的报警值时,

活度大约为 $8.8\text{E}8\text{Bq}$ ,而在同等活度和距离下 $\text{Co-58}$ 在KRT通道处产生剂量率仅为 $0.12\ \mu\text{Sv/h}$ ,对比使用公式粗略计算的理论最大值 $306\ \mu\text{Sv/h}$ ,使用建模计算的 $594\ \mu\text{Sv/h}$ 较大,但考虑到 $\text{Co-60}$ 核素产生的 $\gamma$ 射线能量为 $1.173/1.333\text{Mev}$ ,在核电站常见核素中能量较高,所以辐射防护人员可根据放射性物品的源项属性结合现场实测值进一步判断,如果无法明确放射性物品的源项情况,那么按照不大于公式计算值 $306\ \mu\text{Sv/h}$ 来控制;如可明确源项的情况下,如放射性物品为全部为核素 $\text{Co-60}$ 的情况下,因厂内运输要求接触剂量率不大于 $594\ \mu\text{Sv/h}$ ,依据建模计算的结果也不会引发KRT通道的报警。

表1 放射性物品运输中不同距离下的剂量率水平(单位  $\mu\text{Sv/h}$ )

剂量率 核素	30m (KRT位置)	20m	接触	对应活度 (Bq)
$^{58}\text{Co}$	0.12	0.27	594	$8.8\text{E}8$
$^{60}\text{Co}$	0.33	0.76	1665	$8.8\text{E}8$

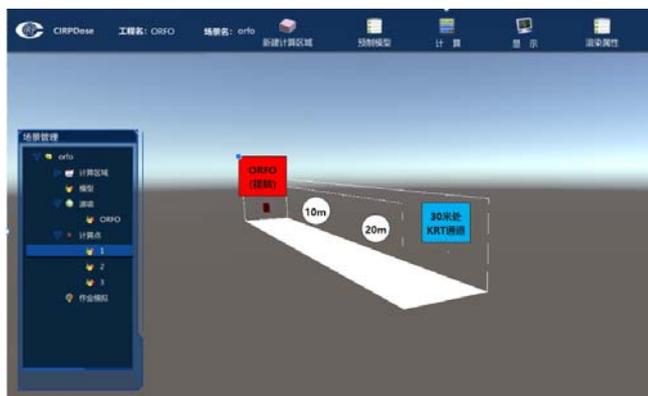


图2 辐射防护人员CIRPDose软件模拟ORFO运输过程辐射水平的计算模型

## 5 结语

综上所述,依据本次事件的时效点,在正式的放射性物品运输前,应首先将相关信息如:运输时间、运输单位、运输路线及运输路线附近的辐射监测设备、物品的名称、数量、外包装沾

污程度、接触剂量率等逐一记录,辐射防护人员对上述关键信息进行复核,并确认相关要求符合电厂内部规定,同时为了避免引发KRT报警的情况,除满足上述条件外,还需要特别关注以下几点:

第一、放射性物品的厂内运输作业人员需要知悉厂内KRT探测器的报警及分布等相关信息;

第二、运输负责专业和辐射防护人员在放射性物品厂内运输开始前,对运输路线进行共同确认和审核,辐射防护人员在路线确定过程中为运输作业班组提供必要的专业信息补充和风险提示;

第三、辐射防护人员需要针对不同的运输物品和运输路线建立起配套的评估流程,估算模型需要够保守以确保运输过程中不引发KRT报警;

第四、放射性物品运输引发KRT报警仅仅是针对某一个类型通道或某一次运输情况,梳理厂内的放射性物品场内运输清单,确定常用运输路线及对应路线的受影响KRT探头分布,对所有涉及放射性运输相关专业人员进行专业培训、类似事件的反馈点纳入各专业的经验反馈体系中。

只有严格按照电站程序规定同时加强对人员的培训和经验反馈,规范人员在放射性运输作业中的行为规范,结合有效且保守的评估流程,形成长效机制实现厂内放射性物品运输的辐射安全,才能将此类工作对人员及对环境的影响降至最低。

## [参考文献]

[1]李晓范,杜颖,李恺.放射性物品运输分类方法及其在工程实践中的应用[C]//中国核学会.中国核科学技术进展报告(第四卷)——中国核学会2015年学术年会论文集第10册(核安全分卷).中国原子能出版社,2015:8.

[2]李星洪.辐射防护基础[M].北京.原子能出版社,1992.

[3]杨立群.基于CAD的核设施退役环境建模与剂量评估方法研究[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2021.

## 作者简介:

陆顺(1985—),男,汉族,广东省汕尾市人,本科,阳江核电有限公司,工程师,研究方向:核电辐射防护。