

# 压水堆核电站二回路放射性污染 控制要求研究

刘 杰, 唐邵华, 吕炜枫

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518057

**摘要:** 压水堆核电站蒸汽发生器传热管处一二次侧泄漏将导致二回路系统放射性污染, 影响向环境的气液态放射性流出物释放, 需设置泄漏率监测系统和蒸汽发生器排污系统以使二回路系统水质和向环境的放射性释放控制在可接受的范围内。通过分析二回路系统中放射性的迁移途径, 建立二回路系统源项及二回路气液态放射性流出物源项的计算模型。根据建立的计算模型和假设的二回路系统水质控制要求, 确定蒸汽发生器传热管处泄漏率设计基准, 并分析蒸汽发生器泄漏监测和蒸汽发生器排污系统的设计要求。

**关键词:** 压水堆核电站; 二回路系统; 放射性污染

**中图分类号:** TL421; TL75 **文献标志码:** A

## Study on Control Requirements of Radioactive Pollution in Secondary Cycle of PWR Nuclear Power Plants

Liu Jie, Tang Shaohua, Lyu Weifeng

China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518057, China

**Abstract:** PWR nuclear power plant steam generator tube leak will result in radioactive contamination, affecting the release of radioactive effluent to the environment. It is necessary to set the leak rate monitoring system and steam generator blowdown system for controlling the secondary cycle system water quality and the radioactive environment release within an acceptable range. By analyzing the migration path of the radioactive secondary cycle, the calculation models of secondary cycle source term and radioactive effluent are obtained. According to the calculation models and assumptions of the secondary cycle radioactive control requirements, the steam generator tube leak rate at design basis is determined, and the design requirements on leak detection system and blowdown system of the steam generator are developed.

**Key words:** PWR nuclear power plant, Secondary cycle, Radioactive contamination

### 0 引 言

在压水堆核电站运行过程中, 蒸汽发生器传热管处由于应力腐蚀影响将导致一回路向二回路的冷却剂泄漏, 导致二回路系统的放射性污染以及向环境的气液态放射性流出物释放。需设置适当的净化处理系统控制二回路系统水质在可接受的范围内, 并设置辐射监测系统监测蒸汽发生器

传热管处一回路冷却剂向二回路的泄漏率。基于放射性核素在二回路系统中迁移和向环境释放的分析, 建立了二回路系统源项和二回路系统向环境的气液态放射性释放源项的计算模型。根据建立的计算模型分析得到二回路系统水质控制要求, 确定了蒸汽发生器传热管处泄漏率设计基准, 并分析了泄漏率监测系统和蒸汽发生器排污系统

的设计要求。

## 1 源项计算模型

### 1.1 二回路系统源项模型

带放射性的一回路冷却剂经破损的蒸汽发生器传热管进入蒸汽发生器二次侧，进入二次侧的放射性核素在蒸汽发生器中均匀混合，含放射性的蒸汽经汽轮机膨胀做功后进入冷凝器。在冷凝器中，蒸汽中所有惰性气体和小部分的碘（碘的份额与汽水分配因子有关）从冷凝器真空系统向大气排放，剩余的放射性蒸汽被冷凝成液体后经过凝结水除盐器回到给水系统。

蒸汽发生器液相和气相中放射性核素浓度需考虑衰变、排污、泄漏和抽真空的综合作用。由于惰性气体、碘和碱金属在蒸汽发生器中气液分配性质的差别，在二回路系统源项计算时需分别考虑。

对于惰性气体，考虑泄漏到蒸汽发生器二次侧中的惰性气体全部进入上部蒸汽。由此计算得到蒸汽发生器液相和气相中惰性气体放射性浓度如下：

$$C_w(t) = 0 \quad (1)$$

$$C_g(t) = \frac{Q_{sg}(t) \cdot C_{rcp}}{Q_{vvp}} \quad (2)$$

对于碘和碱金属，以蒸汽发生器液相中放射性核素浓度  $C_w(t)$  为研究对象，根据其产生途径和消失途径，可建立微分方程如下：

$$\frac{dC_w(t)}{dt} = \frac{Q_{sg}(t) \cdot C_{rcp}}{M_{sg}} - \mu_i \cdot C_w(t) \quad (3)$$

$$C_g(t) = F_H \cdot C_w(t) \quad (4)$$

求解式(3)得到：

$$C_w(t) = e^{-\mu_i t} \cdot \left[ C_w(0) + \int_0^t e^{\mu_i t} \frac{Q_{sg}(t) \cdot C_{rcp}}{M_{sg}} dt \right] \quad (5)$$

假定蒸汽发生器一回路至二回路的泄漏率恒定即  $Q_{sg}(t) = Q_{sg}$ ，则式(5)可简化为：

$$C_w(t) = C_w(0)e^{-\mu_i t} + \frac{Q_{sg} \cdot C_{rcp}}{M_{sg} \cdot \mu_i} (1 - e^{-\mu_i t}) \quad (6)$$

式中， $C_g(t)$  为蒸汽发生器气相中核素  $i$  的放射性浓度，GBq/t； $C_w(t)$  为蒸汽发生器液相中核素  $i$  的放射性浓度，GBq/t； $Q_{sg}(t)$  为蒸汽发生器处一回路至二回路的泄漏率，t/h； $C_{rcp}$  为一回路冷却

剂中核素  $i$  的放射性浓度，GBq/t； $Q_{vvp}$  为蒸汽发生器的蒸汽流量，t/h； $\mu_i$  为核素  $i$  的等效衰变常数，包括核素自身衰变、蒸汽发生器排污、冷凝器抽气、给水泄漏的影响， $h^{-1}$ ； $M_{sg}$  为蒸汽发生器中水相质量，t； $F_H$  为蒸汽发生器中蒸汽携带因子。

### 1.2 二回路系统流出物源项模型

二回路系统流出物源项计算中分别考虑气态和液态形式的释放，气态释放主要考虑不凝气体通过冷凝器真空系统的排放，液态释放主要考虑蒸汽发生器不回收排污以及二回路给水系统泄漏。

向环境释放的惰性气体活度计算公式如下：

$$A_{noble} = \int_0^t C_g(t) \cdot Q_{vvp} \cdot F_P \cdot dt = Q_{sg} \cdot C_{rcp} \cdot F_P \cdot t \quad (7)$$

通过气态途径向环境释放的放射性碘总活度计算公式如下：

$$\begin{aligned} A_{iodine} &= \int_0^t C_g(t) \cdot Q_{vvp} \cdot F_P \cdot dt \\ &= Q_{vvp} \cdot F_P \cdot \int_0^t \left[ e^{-\mu_i t} C_w(0) + \frac{Q_{sg} \cdot C_{rcp}}{M_{sg} \cdot \mu_i} (1 - e^{-\mu_i t}) \right] dt \end{aligned} \quad (8)$$

通过液态途径向环境释放的非氙放射性核素的总活度计算公式如下：

$$A_{liquid} = \int_0^t C_w(t) \cdot F_H \cdot Q_{sec} dt + \frac{C_w(t) \cdot M_{sg} \cdot N_{sg}}{D_{F,apg}} \quad (9)$$

式中， $A_{noble}$  为每年向环境释放的惰性气体总活度，GBq/a； $F_P$  为冷凝器中放射性核素汽水分配因子； $A_{iodine}$  为每年向环境释放的气态碘总活度，GBq/a； $A_{liquid}$  为每年向环境释放的液态非氙放射性核素总活度，GBq/a； $Q_{sec}$  为二回路给水系统泄漏率，t/h； $N_{sg}$  为一年内蒸汽发生器不回收排污次数； $D_{F,apg}$  为蒸汽发生器排污系统去污因子。

## 2 蒸汽发生器传热管泄漏率设计基准

### 2.1 二回路系统放射性水平控制要求

控制蒸汽发生器传热管处一回路向二回路冷却剂泄漏目的是控制二回路系统水质以及向环境的气液态放射性释放。国内相关标准和导则中并未明确二回路水的放射性浓度限值要求，仅给出

核电厂向环境的气液态放射性释放总量和浓度限值。对于电厂运行而言,过高的水质要求将降低电厂运行裕度,而过低的水质要求将导致二回路系统放射性浓度过高,不利于公众和工作人员的辐射安全。因此,需综合考虑各方面的影响,确定二回路系统水质的控制要求。

当蒸汽发生器传热管处发生一回路向二回路冷却剂泄漏时,二回路系统中放射性逐渐累积。通过蒸汽发生器排污系统将蒸汽发生器中含放射性的水向废液排放系统排放,可降低二回路系统中放射性水平。根据 GB14587—2011,废液排放系统接收废液的放射性浓度不应超过 1000 Bq/L<sup>[1]</sup>。设计中应基于该限值合理设置废液排放系统接收废液的放射性浓度控制值。同时,二回路水质控制应确保经蒸汽发生器排污系统处理后的排污水放射性浓度不超过废液排放系统的接收要求。

另外,根据 GB6249—2011,核电厂向环境释放的气液态放射性流出物总量不得超过相应的限值<sup>[2]</sup>。二回路系统向环境的流出物释放是核电厂流出物主要释放途径之一,因此,二回路系统水质控制要求还应确保考虑其他释放途径后通过二回路系统向环境的流出物释放量不超过 GB6249—S2011 中的相应限值。

## 2.2 蒸汽发生器一二次侧泄漏监测系统报警阈值设置

为保证二回路系统水质要求,电厂设置了蒸汽发生器一二次侧泄漏率监测系统,实时监测蒸汽发生器一次侧向二次侧的泄漏情况。当泄漏率超过一定限值时发出报警信号并引发后续的处理动作。蒸汽发生器一二次侧泄漏存在运行状态下泄漏和传热管破裂事故泄漏 2 种工况,泄漏率监测系统需至少设置 3 级报警以区别这 2 种工况。当触发一级报警时表明已出现蒸汽发生器传热管处泄漏,需持续关注泄漏率的变化。触发二级报警时表明蒸汽发生器传热管处泄漏率已超过运行限值,机组需停堆后撤。触发三级报警时表明已发生蒸汽发生器传热管破裂事故,机组需启动事故规程。

根据 GB11217—1989 的要求,连续测量装置最低可探测限应达到或小于运行限值的百分之一<sup>[3]</sup>。因此,蒸汽发生器一二次侧泄漏率监测系统一级报警值可设置为监测通道最低可探测限的

10 倍。蒸汽发生器一二次侧泄漏率监测系统二级报警值设置可对应蒸汽发生器一二次侧泄漏导致的二次侧放射性限值。蒸汽发生器一二次侧泄漏率监测系统三级报警值则应根据蒸汽发生器传热管破裂事故分析的结果确定。

## 2.3 蒸汽发生器排污系统流量设计

蒸汽发生器排污系统主要功能为净化蒸汽发生器二次侧系统。排污流量越大则对二回路水质的控制越好,同时也将导致成本大幅增加。加大排污流量和控制泄漏率均为二回路系统放射性污染控制的有效手段。在核电厂设计中可先确定排污流量,然后计算合理的泄漏率控制值。根据先进轻水堆设计要求文件(URD),蒸汽发生器排污流量可考虑为总蒸汽流量的 1%<sup>[4]</sup>。

## 3 CPR1000 核电厂控制要求分析

典型 CPR1000 核电厂采用 U 形管式蒸汽发生器,在循环寿期末蒸汽发生器排污水通过常规岛废液排放系统向环境排放,常规岛废液排放系统接收的废液放射性浓度控制值为 400 Bq/L。

以某典型 CPR1000 核电厂为例,相关的计算参数见表 1,该核电厂 18 个月换料一回路冷却剂源项设计值见表 2。根据第 2 节中的源项计算模型,计算得到蒸汽发生器排污水放射性浓度达到 400 Bq/L,对应的一次侧向二次侧泄漏率为 1.9 kg/h。根据该泄漏率计算得经由二回路系统向环境释放的液态非氚核素总活度为 6.67 GBq/a,情

表 1 某典型 CPR1000 核电厂计算参数  
Table 1 Parameters of a Typical CPR1000 Plant

参数	数值
蒸汽发生器的蒸汽总流量/t·h <sup>-1</sup>	5808
3 台蒸汽发生器的排污流量/t·h <sup>-1</sup>	50
3 台蒸汽发生器中水的质量/t	3×47.7
冷凝器中汽水分配因子	惰性气体:1;碘:1.0×10 <sup>-4</sup>
二回路系统给水泄漏率/t·h <sup>-1</sup>	22
蒸汽发生器排污系统去污因子	惰性气体:1,其他:10
全年满功率运行时间/h	8760

表 2 一回路冷却剂源项设计值  
Table 2 Design Source Term of Reactor Coolant

核素类型	设计值/GBq·t <sup>-1</sup>
惰性气体	1240
<sup>131</sup> I 当量	37
其他裂变产物	73.7
活化腐蚀产物	0.35

表 3 二回路水质控制值敏感性分析结果  
Table 3 Sensitivity Analysis of Second Loop Quality

二回路水质控制 值/ $\text{Bq} \cdot \text{L}^{-1}$	泄漏率控制值 / $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$	惰性气体释放/ $\text{TBq} \cdot \text{a}^{-1}$	占国标限 值比例/%	气态碘释放/ $\text{GBq} \cdot \text{a}^{-1}$	占国标限 值比例/%	液态非氚核素释放 / $\text{GBq} \cdot \text{a}^{-1}$	占国标限 值比例/%
400	1.9	20.6	5.15	0.16	1.23	6.67	20.0
600	2.8	30.3	7.58	0.24	1.82	9.83	29.4
800	3.8	41.1	10.2	0.33	2.47	13.3	40.0
1000	4.7	50.9	12.7	0.41	3.05	16.5	49.5

性气体为 20.6 TBq/a, 气态碘为 0.16 GBq/a, 分别占 GB6249—2011 限值的 20.01%、5.15% 和 1.23%, 满足 GB6249—2011 要求。

为了监测蒸汽发生器一二次侧泄漏, 压水堆核电站设置了蒸汽发生器排污水放射性监测通道。其二级报警阈值可设置为 400 Bq/L, 该值等于常规岛废液排放系统可接受的运行限值。相应的监测通道最低可探测限应达到或小于 4 Bq/L; 因此, 其一级报警阈值可设置为 40 Bq/L。三级报警阈值设置与相关事故分析不展开具体分析。CPR1000 核电站蒸汽发生器排污水放射性监测通道报警阈值设置满足以上要求。

不同二回路水质控制要求下计算得到的蒸汽发生器传热管处一回路向二回路的冷却剂泄漏率控制值见表 3。表 3 还给出了不同二回路水质控制值条件下二回路气液态放射性年释放总量及相应国标 GB6249—2011 中限值的占比。由表 3 可知, 泄漏率控制值和二回路系统气液态放射性流出物释放量基本随着二回路水质控制值线性变化。

#### 4 结论与展望

建立了压水堆核电站二回路系统放射性控制

相关系列问题的分析方法和计算模型, 解决了压水堆核电站设计中蒸汽发生器传热管处泄漏率控制值确定、泄漏率监测系统报警阈值设置、蒸汽发生器排污系统流量设置等问题。

以典型 CPR1000 机组为例开展计算分析, 结果表明: 该分析方法和计算模型可应用于压水堆核电站设计中蒸汽发生器传热管处泄漏率控制值确定、泄漏率监测系统报警阈值设置、蒸汽发生器排污系统流量设置等问题的研究。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部. GB14587-2011 核电站放射性液态流出物排放技术要求[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [2] 环境保护部. GB6249-2011 核动力厂环境辐射防护规定[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [3] 国家环境保护局. GB11217-1989 核设施流出物监测的一般规定[S]. 北京: 原子能出版社, 1989.
- [4] Electric Power Research Institute. Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document[S]. California: Electric Power Research Institute, Inc.1993.

(责任编辑: 杨洁蕾)