

文章编号：0258-0926(2016)05-0135-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0135

# 地下核电厂蒸汽发生器二次侧非能动余热排出系统设计研究

赖建永<sup>1</sup>, 沈云海<sup>1</sup>, 王保平<sup>1</sup>, 余小权<sup>1</sup>, 隋海明<sup>1</sup>, 朱力<sup>1</sup>, 喻飞<sup>2</sup>

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 长江勘测规划设计研究院, 武汉, 430010

**摘要:** 地下核电厂的安全壳深埋于地下, 在地面布置大容积的高位水池, 可为蒸汽发生器 (SG) 二次侧非能动余热排出的实施提供足够的重力驱动压头。本文结合地下核电厂的设计特点, 提出了一种适用于地下核电厂的 SG 二次侧非能动余热排出系统, 并给出了系统功能要求、回路系统构成及设备主要特性和运行特点。

**关键词:** 地下核电厂; 余热排出; 非能动; 蒸汽发生器二次侧

**中图分类号:** TL424 **文献标志码:** A

## Research on Passive Residual Heat Removal System of SG Secondary Side of Underground Nuclear Power Plants

Lai Jianyong<sup>1</sup>, Shen Yunhai<sup>1</sup>, Wang Baoping<sup>1</sup>, Yu Xiaoquan<sup>1</sup>, Sui Haiming<sup>1</sup>, Zhu Li<sup>1</sup>, Yu Fei<sup>2</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, NPIC, Chengdu, 610041, China;  
2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan, 430010, China

**Abstract:** The underground nuclear power plant researched in China after FUKUSHIMA nuclear accident is a more safe and more acceptable style of nuclear power plant. The containment of underground nuclear power is buried about 180 meters underground, while the pool full of cooling water is equipped on the ground. The driving head of nature circulation of passive heat removal system of secondary side is sufficient due to the height difference of steam generator and cooling pool. The functional requirement, system components, equipment character and operating of the passive heat removal system of secondary side in underground nuclear power plant are presented in this paper.

**Key words:** Underground nuclear power plant, Heat removal, Passive, SG secondary side

### 0 引言

蒸汽发生器 (SG) 二次侧非能动余热排出系统 (PRHRS) 依靠回路中工质的密度差和位差形成的驱动力, 将反应堆余热导入最终热阱。非能动安全系统被认为是第三代核电技术的重要特征之一。目前, 非能动安全技术已经广泛应用于各国的先进反应堆设计中。

地下核电厂是福岛事故后我国有关研究机构研发的一种更安全、公众接受度更高的核电厂形式。本文结合地下核电厂的布置特点, 设计一种

适用于地下核电厂的 SG 二次侧 PRHRS, 给出了系统功能要求、回路系统构成及设备主要特性和运行特点。

### 1 地下核电厂布置特点

福岛事故表明, 全厂断电工况 (SBO) 以及全部丧失最终热阱并叠加安全停堆地震 (SSE) 发生的概率虽然很低, 但仍然存在可能性。地下核电厂的特点是将核岛涉核构筑物和物项置于地下, 可以有效防止或减少外部事件的影响, 防止

事故工况下放射性大量释放,较常规地面核电厂具有更好的安全性,有利于消除福岛事故后公众对核电的恐慌情绪。

地下核电厂充分利用我国自主设计建造的60万千瓦级核电站成熟技术,以秦山核电厂二期的反应堆及核岛系统为基础,采取将核岛涉核构筑物及物项置于地下的“阶地平埋”方案。利用地下建筑物的空间特性,在地下核电厂的设计中实现非能动余热排出功能,也是地下核电厂设计研发的重点工作之一。

在我国自主三代核电设计中,为提供足够的驱动压头,为SG二次侧PRHRS提供热阱的换热水箱设置在安全壳上部,增大了安全壳结构设计和抗震设计的难度。在地下核电厂的设计中,由于采用“阶地平埋”的布置方式,核岛系统置于距山顶平面180 m以下的山体中,在山顶设置有储存充足的应急冷却水源的高位水池。这样大的位差可为自然循环提供足够的驱动压头,有利于SG二次侧非能动余热排出的实现。

## 2 系统设计方案

### 2.1 功能要求

2.1.1 安全功能 堆芯衰变热的排出是核安全基本要求之一。本文提出的SG二次侧PRHRS需在发生SBO且辅助给水系统汽动泵系列失效的工况下自动投入运行,执行余热排出功能,在不超过冷却剂压力边界设计条件的前提下,通过SG导出堆芯余热及反应堆冷却剂系统(RCS)各设备的储热,在72 h内将反应堆维持在安全状态。

2.1.2 排热能力 根据系统的安全功能,SG二次侧PRHRS应能够带走反应堆停堆后72 h内的堆芯衰变热。停堆后的反应堆功率的变化可用Glasstone关系式表述<sup>[1]</sup>。

### 2.2 设计方案

地下核电厂SG二次侧PRHRS的示意图见图1。每个环路的SG二次侧都设置一个非能动余热排出系列。每个系列包括应急余热排出冷却器、1台应急补水箱及必要的阀门、管道和仪表;2个系列共用位于地面的高位水池。

每个二次侧非能动余热排出系列蒸汽管线,一端与主蒸汽系统管道相连,另一端连接高位水池的换热器入口封头的接管嘴。换热器布置在高位水池底部,要求在整个运行期间,换热器都浸

泡在水中,不允许裸露。冷凝水管道连接换热器下封头接管嘴,并在管道上设置2台并联的常关隔离阀V01和V02,另一端与SG的给水管道相连。设置1台补水箱,上下游分别与蒸汽管线和冷凝水管线相连,以补偿SG二次侧PRHRS运行期间SG二次侧水位的下降。应急补水箱的注入管道上也设置有2台并联的常关隔离阀V03和V04。

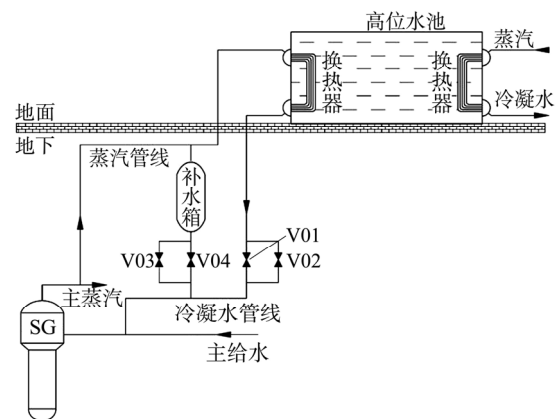


图1 地下核电厂二次侧非能动余热排出系统示意图

Fig. 1 Flow Chart of Passive Heat Removal System of Secondary Side (Underground Nuclear Power Plants)

事故工况下,SG二次侧PRHRS由自动信号自动触发V01或V02开启,同时自动触发主蒸汽隔离阀关闭,使二次侧PRHRS构成封闭回路;触发V03或V04开启,将应急补水箱中的水注入SG二次侧,以利于自然循环的建立。系统启动后,冷凝水管线中的水由于高位差的作用注入SG二次侧,在SG二次侧受一回路衰变热加热产生的蒸汽通过蒸汽管线注入换热器管侧,在换热器中热量被传递到高位水池中的水中,从而将蒸汽冷凝成水,通过冷凝水管线又返回到SG二次侧,如此形成自然循环,长期带走堆芯衰变热。

### 2.3 主要设备

2.3.1 应急余热排出冷却器 应急余热排出冷却器是SG二次侧PRHRS的关键设备之一。其功能是将来自SG的蒸汽热量传递给事故冷却水箱中的水,通过水的蒸发带出热量。应急余热排出冷却器按照0.75%FP(满功率)的热负荷进行设计。

PRHRS换热器为“C”型单管程式热交换器。通过一组“C”型传热管与上、下管板相连,上、下管板分别与进、出口封头焊接组成一次侧进、

出口管箱组件。通过位于每排传热管之间的抗振条为管束提供支撑,抗振条两端与壳侧框架相连。支承框架通过外伸法兰与管板连接,并与位于隔间顶部和底部的支座相连,为设备提供支承。

2.3.2 高位水池 高位水池布置在地面,其内部充满与大气相通的冷却水,SG 二次侧 PRHRS 投入后,事故冷却水箱内的水作为系统的最终热阱(水箱内水的蒸发),通过 SG 带走堆芯余热和 RCS 各设备的储热。水池容积的设计应保证 SG 二次侧 PRHRS 能够连续运行 72 h 而不会导致应急余热排出冷却器裸露。高位水池位于地面,设置成 2 个容积相等、相互连通的隔间。

2.3.3 应急补水箱 应急补水箱主要功能是用在 SG 二次侧 PRHRS 运行期间向 SG 二次侧注水。其容积设计的基准为:能够补充主蒸汽隔离阀关闭前损失的蒸汽量、事故初期由大气旁路阀释放的蒸汽量以及二次侧 PRHRS 运行期间由于 SG 二次侧水密度变化引起的水体积减小。

## 2.4 主要性能参数

根据地下核电厂 SG 二次侧 PRHRS 的功能要求和系统配置,该系统的主要性能参数见表 1。

表 1 SG 二次侧 PRHRS 主要性能参数  
Table 1 Main Design Parameters of PRHRS

参数名称	参数值
设计压力/MPa	8.6
设计温度/	316
每个系列热负荷/%FP	0.75
运行时间/h	72
应急补水箱容积/m <sup>3</sup>	36

## 2.5 启动信号

SG 二次侧 PRHRS 仅在本文第 1 章所述事故工况下投入运行,其他工况系统处于备用。SG 二次侧 PRHRS 的自动信号由表征 SBO 同时丧失辅助给水,或丧失全部给水的信号叠加构成。可表述为: 辅助给水启动信号; 全部 SG 给水流量低; 全部 SG 水位达到极低定值。

## 3 提高 SG 二次侧 PRHRS 可靠性的措施

SG 二次侧 PRHRS 能够正常投入运行的必备条件是在核电厂遭遇严重极端事故导致全厂失电的工况下,启动信号能够顺利触发冷凝水管道隔离阀和应急补水箱注水管道隔离阀开启。这些动作的实现是系统启动的关键,为保证系统的可靠运行,设计中采取以下措施:

(1) 在冷凝水管道并联设置 2 台隔离阀 V01 和 V02,阀门的动力及控制回路均分别由 2 列实体隔离的电源供电,以保证在需要时至少有 1 列能够开启。

(2) 隔离阀 V01、V02、V03、V04 的动力电源为可靠电源(长期蓄电池)提供可靠电源。

(3) PRHRS 备用期间监测地面高位水池的水温,在温度超过定值后采取降温措施,以保证最终热阱具有足够的排热能力。

(4) 地面高位水池设置临时补水接口,一旦水位过低,但此时要求 SG 二次侧 PRHRS 继续运行,可为系统补充冷却水,保证系统的长期运行。

## 4 结束语

结合地下核电厂“阶地平埋”的布置特点,利用设置在山顶储存有充足应急冷却水源的高位水池,提出了地下核电厂 SG 二次侧 PRHRS 的设计方案。详细描述了地下核电厂 SG 二次侧 PRHRS 的系统配置、关键设备特点、主要性能参数和启动信号的设计,并在设计方案的基础上提出了提高 SG 二次侧 PRHRS 可靠性的措施。SG 二次侧 PRHRS 的设计将“非能动余热排出”的设计理念成功应用到地下核电厂的研发设计中,符合地下核电厂研发的总体需求,丰富了地下核电厂的事故缓解与预防措施,提高了地下核电厂整体的安全性。

参考文献:

[1] 余冀阳,贾宝山.反应堆热工水力学[M].北京:清华大学出版社,2003.

(责任编辑:刘君)