

池式研究堆回路系统总体配置分析

黄兴蓉, 庄毅, 张金山, 韩海芬, 李清, 袁履正, 衣大勇

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要: 池式研究堆的回路系统配置存在一定的共性, 对于相同的堆型, 大部分回路配置是可相互借鉴的。通过对国内外几座池式研究堆(法国 ORPHEE 堆、德国 FRM-II、韩国 HANARO 堆、中国先进研究堆(CARR))的回路总体配置情况进行比较, 分析其各自的特点, 归纳出池式研究堆回路总体配置分为 4 个部分: 与堆芯冷却相关的系统、与重水相关的系统、与池水相关的系统及辅助系统。

关键词: 池式研究堆; 回路; 配置; 共性

中图分类号: TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)S1-0350-05

Analysis of General Configuration of Pool Type Research Reactor Loop System

HUANG Xing-rong, ZHUANG Yi, ZHANG Jin-shan, HAN Hai-fen,

LI Qing, YUAN Lü-zheng, YI Dao-yong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

Abstract: The configurations of pool type research reactor loop systems possess certain commonness, and most of the loop configurations could be used for reference for the same type reactor. Through the comparison of loop configurations in several pool type research reactors (France ORPHEE Reactor, Germany FRM-II, Korea HANARO Reactor, Chinese CARR) and analysis of each characteristic, the characters of general configuration of pool type research reactor are concluded: Systems related to core cooling, systems related to reflector layer heavy water, systems of reactor pool and auxiliary systems.

Key words: pool type research reactor; loop; configuration; commonness

研究堆的类型日趋多样化, 如重水堆、轻水堆、气冷堆等。堆型不同, 回路系统的配置相差很大。重水堆有与重水及其相关的几条回路系统, 游泳池式轻水堆只有与轻水有关的几条回路。但采用轻水作冷却剂、重水作反射层的池

式研究堆, 回路系统相对较多。这种类型的反应堆回路总体配置上主要应满足: 反应堆正常运行工况下的堆芯冷却、重水冷却(反射层重水)、池水冷却; 保证反应堆运行过程中轻水和重水的水质指标符合要求; 在事故工况下堆芯

应急冷却及长期余热排出。为满足这些基本要求,池式研究堆回路必须设置与堆芯冷却相关的系统,与重水冷却、净化相关的系统及重水覆盖气体系统,与池水冷却、净化相关的系统和其它一些辅助系统等。

本文将对国内外几座池式研究堆(法国 ORPHEE 堆、德国 FRM-II、韩国 HANARO 堆、中国 CARR)的回路总体配置情况进行比较,分析其各自的特点,归纳池式研究堆回路总体配置特征。

1 4 座池式研究堆回路总体配置概况

1.1 法国 ORPHEE 堆

法国 ORPHEE 堆功率 14 MW,最大热中子注量率 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,轻水作冷却剂,重水作反射层。堆芯置于直径 4.5 m、水深 15 m 的反应堆水池中央,冷却剂从上而下流过堆芯,衰变箱位于反应堆水池底部。ORPHEE 堆主要回路流程如图 1 所示,回路系统有主回路(冷却剂流量 $810 \text{ m}^3/\text{h}$,入堆温度 $35 \text{ }^\circ\text{C}$,出堆温度 $49 \text{ }^\circ\text{C}$),二回路,重水冷却、净化系统和重水辅助系统(包括重水浓缩系统)及池水相关系统。系统配置主要特点是:1) 未单独设计应急堆芯冷却系统,而是为每台主泵配置 1 台辅助泵,在发生主泵断电事故时,由辅助泵来执行应急堆芯冷却;2) 反射层重水箱内充满重水,

无自由液面,在重水冷却系统的高位设置与系统相连接的稳压罐,这样,反射层的重水受辐照所分解的爆炸性气体氘和氧在稳压罐内从重水自由液面释放出来,氦气则以 1 L/h 的流量带走稳压罐内的爆炸性气体,各部分排放和回收的重水收集在贮存罐内,当需再次利用重水时,则采用高压氦气压入系统;3) 主回路净化与热水层循环系统合并,主换热器出口分流一部分冷却剂,经净化后,通过池水冷却系统管道进入反应堆水池底部,一部分池水又通过衰变箱顶部的开孔进入主回路,从而使主回路的流量维持一动态平衡。

1.2 德国 FRM-II

FRM-II 主要回路流程示于图 2,FRM-II 堆功率 20 MW。回路系统主要有主回路、二回路、三回路、应急堆芯冷却系统、池水冷却系统、热水层系统、池水及主回路净化系统、重水及其相关系统和辅助系统。与其它研究堆相比,突出的特点是:1) 反应堆共设置 3 个回路,在一、三回路间增加一封闭的中间回路,即二回路,从而在主回路带放射性的冷却剂与大气间提供了一种屏蔽和隔离,用以防止放射性冷却剂因泄漏而释放到大气中;2) 应急堆芯冷却系统采用了并联的 3 台应急泵,主泵断电事故情况下,3 台应急泵同时启动,只要有 1 台应急泵启动成功,即可满足应急堆芯冷却要求。法规要求

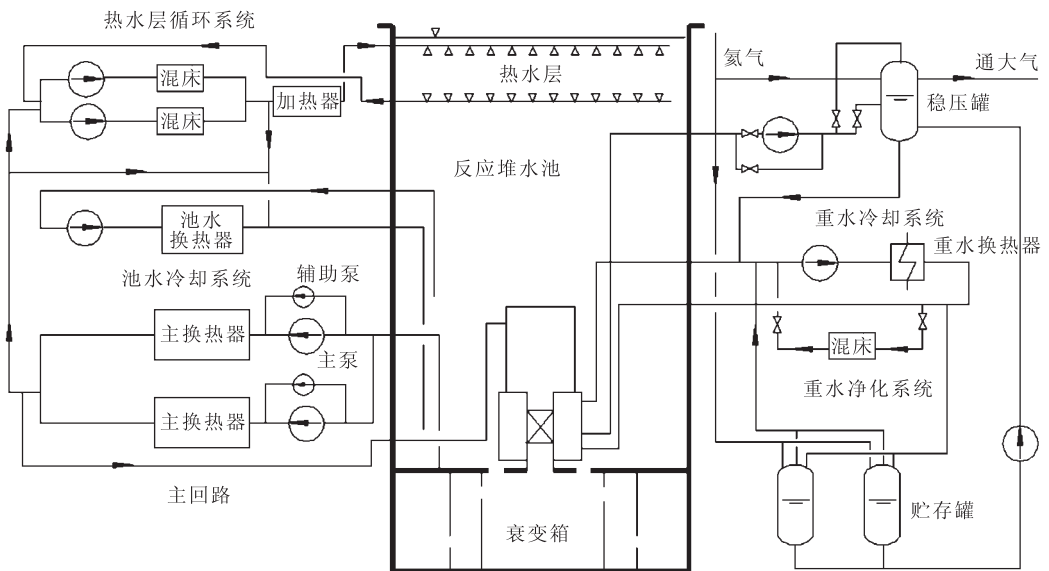


图 1 ORPHEE 堆主要回路流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ORPHEE circuits flow

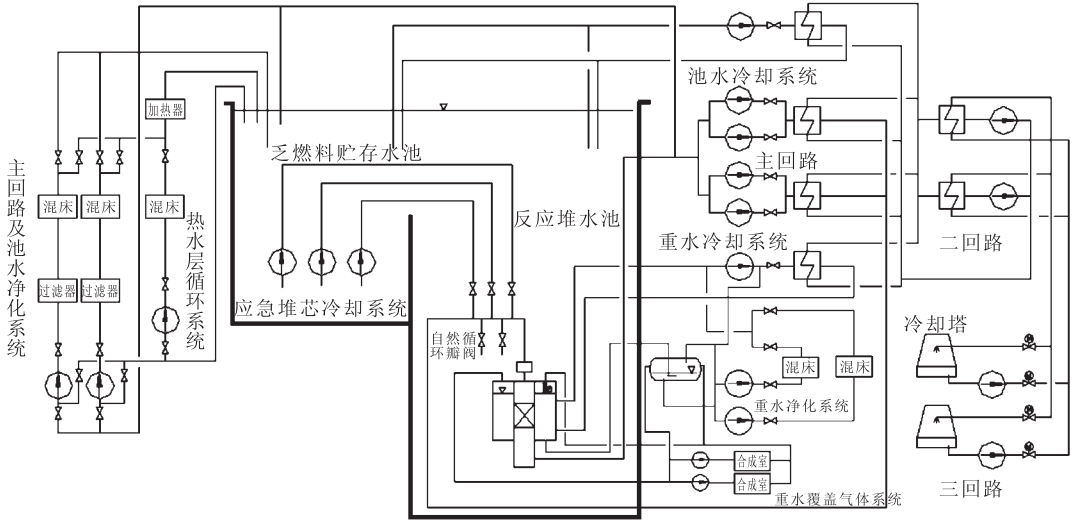


图2 FRM-II 主要回路流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FRM-II circuits flow

执行安全功能的设备应符合单一故障准则要求,FRM-II 应急泵的设置采用了 $3 \times 100\%$ 系列,完全满足多重性原则;3) 池水冷却系统具备对反应堆水池和乏燃料水池的冷却功能;4) 主回路净化与池水净化共用 1 条回路,同时在该系统的进出口管线上,均有引出管与热水层循环系统相连接,从而使该系统可作为热水层循环系统的备用,或在反应堆开堆前用来加大热水层的循环流量。

1.3 韩国 HANARO 堆

HANARO 堆主要回路系统如图 3 所示, HANARO 堆功率 30 MW,最大热中子注量率 $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,堆芯置于直径 4 m、水深 13.5 m 的反应堆水池中,与其它几个池式堆不同, HANARO 的冷却剂从下而上流过堆芯,它最大的特点是:1) 将主回路分流 10% 总流量,通过旁通管路去冷却池水,这部分流量由于主泵的抽吸,又从水池上部通过堆芯上部的导流筒进入主回路出口总管,从而避免了带放射性的水通过导流筒从水池表面逸出,同时在水池表面还设置了 1.2 m 厚的热水层,这样便大为降低了反应堆大厅空气中的放射性水平;2) 应急堆芯冷却系统采用 1 个 100 m^3 的高位贮存水箱作为水源,当反应堆水池水位降低到某一低水位时,4 个电动阀同时自动打开,通过主回路旁通管补充至堆水池,直到压力降到安装在池内主回路入堆总管上两个自然瓣阀自动开

启,从而建立起自然循环;3) 主回路净化与反应堆池水净化合并为 1 个系统,同时单独设置了乏燃料水池冷却和净化系统。

1.4 中国 CARR

CARR 设计时,在国内无成型的参考堆,主要参考了上面几座同类型的研究堆。CARR 回路系统设计几经修改,最终共设置了 18 个系统,即主回路、二回路、主回路净化系统、应急堆芯冷却系统、池水净化系统、水池充排水系统、热水层循环系统、重水冷却系统、重水排放系统、氦气系统、重水净化系统、重水浓缩系统、真空系统、去离子水制备系统及中、低放系统等。CARR 主要回路系统流程示意图示于图 4。在 18 个系统中,有 5 个为安全级系统,其余为非安全级系统。CARR 回路系统设计功能完整,运行灵活。

CARR 回路设计的主要特点是:1) 应急堆芯冷却系统在反应堆正常运行时执行池水冷却功能,LOCA 下自动切换至执行应急堆芯冷却功能,该系统仍直接从水池取水,通过主回路入堆总管将池水注入堆芯,带走堆芯余热,直至过渡到堆芯自然循环的建立, 700 m^3 池水作为应急热阱;2) 主回路净化系统、池水净化系统与热水层循环冷却系统独立设置,相互间设有连接管线,运行灵活;3) 重水冷却及其相关系统设置完整,除重水冷却系统外,设有重水排放系统(同时作为 ATWS 缓解系统的后备系统)、

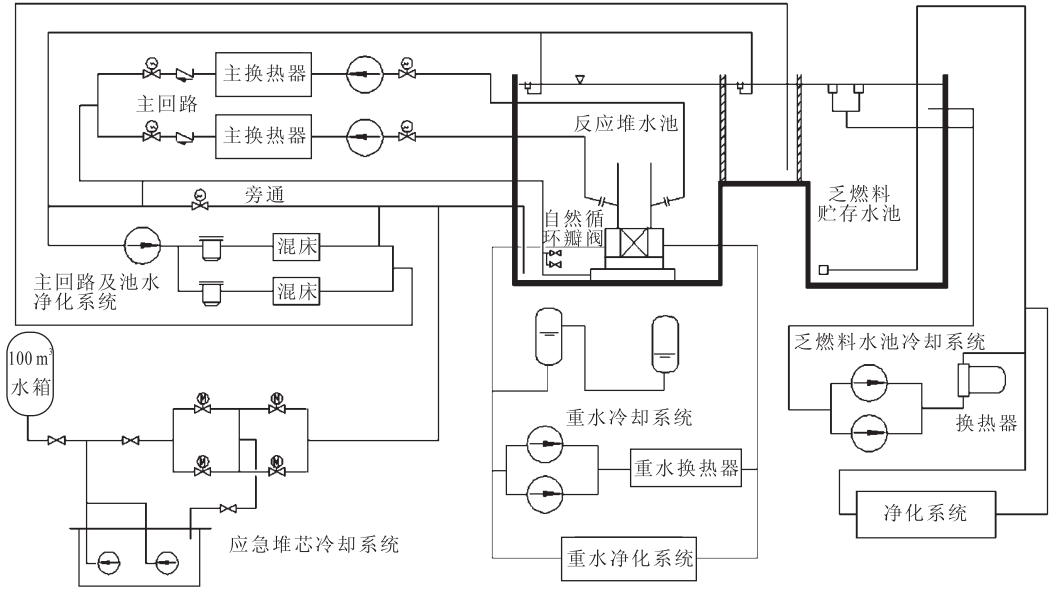


图3 HANARO堆主要回路流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of HANARO circuits flow

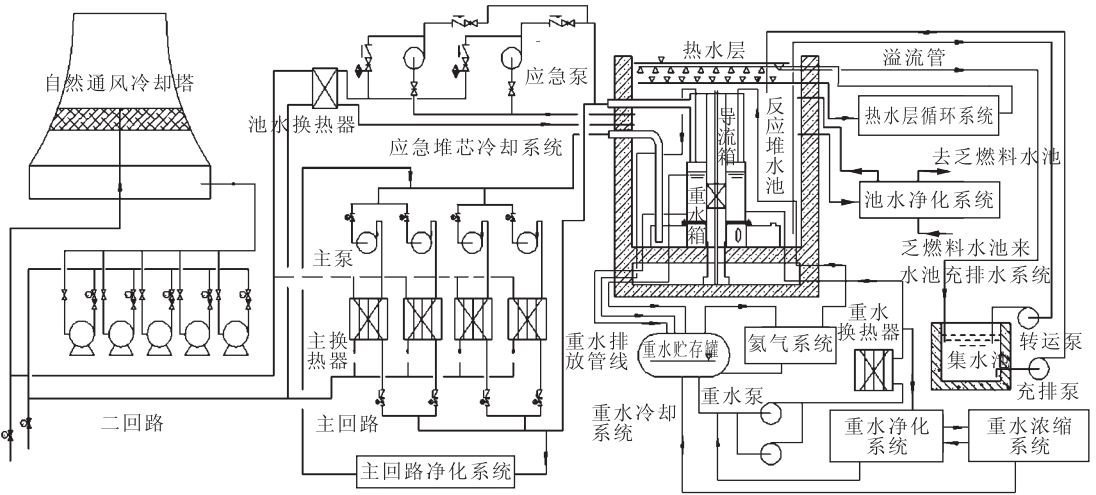


图4 CARR主要回路流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of CARR circuits flow

氦气系统、重水净化系统、重水浓缩系统、真空系统等,具有重水冷却、排放、净化、合成、收集、泄漏监测、回收、浓缩等功能。

2 4座池式研究堆回路配置比较

将上述4座池式研究堆的主要参数及主要回路设置情况归纳于表1。

从表1可看出:对于相同的堆型,系统配置具有一定的共性,许多回路设置是必不可少且可相互借鉴。设计重点是安全级的系

统,如主回路、应急堆芯冷却系统及重水系统等。而每个堆有各自的特点,所以,每条回路应根据堆的具体情况进行设计。如上述4座反应堆的应急堆芯冷却系统的设计各具特点,若反应堆水池设计容量足够大,如FRM-II和CARR,则可将池水作为事故情况下的应急热阱,因而余热排出不需二回路的投入;若反应堆池水装量不能容纳反应堆余热,则只能仍以大气作为应急热阱,因而余热排出需二回路的投入。

表 1 4座池式研究堆的主要参数及主要回路设置

Table 1 Main parameters and main circuits configurations of four pool research reactors

类别	法国 ORPHEE 堆	德国 FRM-II	韩国 HANARO 堆	中国 CARR
堆型	池内水罐式	池内水罐式	水池式	池内水罐式
堆功率, MW	14	20	30	60
最大热中子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	3×10^{14}	8×10^{14}	5×10^{14}	8×10^{14}
水池容量, m^3	—	~700	~340	~700
主回路流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	~810	~1 080	~3 000, 分流 10%	~2 400
应急堆芯冷却系统	2 台辅助泵	3 台应急泵 主泵断电事故同时启动	100 m^3 高位水箱 兼有池水补水功能	2 台应急泵随堆运行 兼有池水冷却功能
重水冷却系统	独立设置	独立设置	独立设置	独立设置
重水净化系统	独立设置	独立设置	独立设置	独立设置
池水冷却系统	独立设置	独立设置	由主回路分流 10% 流量	与应急堆芯冷却系统共用
池水净化系统	独立设置	与主回路净化共用	与主回路净化共用	兼有乏燃料池水净化
主回路净化	与热水层循环系统共用	与池水净化系统共用	与池水净化系统共用	独立设置
热水层循环系统	热水层厚度 3 m, 温差 5 $^{\circ}\text{C}$ 兼有主回路净化功能	热水层厚度 4 m 温差 7~8 $^{\circ}\text{C}$	热水层厚度 1.2 m 温差 10~12 $^{\circ}\text{C}$	热水层厚度 3 m 温差 5 $^{\circ}\text{C}$
乏燃料水池冷却及 净化系统	与池水共用	与池水共用	独立设置	与池水共用
重水覆盖气体系统	氦气载体 无重水合成回收功能	氦气作载体 有重水合成回收功能	空气载体	氦气作载体 有重水合成回收功能
三回路	无	有	无	无

3 总结

通过对以上 4 座池式研究堆的分析可得出,采用轻水作冷却剂、重水作反射层的池式研究堆回路总体配置特征为:反应堆回路系统总体上分为 4 个部分,即与堆芯冷却相关的系统、与重水相关的系统、与池水相关的系统及辅助系统。

3.1 与堆芯冷却相关的系统

1) 主回路一般与池水有一定的混流(这部分流量约占主回路总流量的 1%~10%);2) 应急堆芯冷却系统或以池水作应急热阱或以大气作应急热阱,均设置自然循环瓣阀作为余热排出的通道;3) 主回路净化系统可独立设置或与其它净化系统共用,如池水净化、热水层循环系统共用。

3.2 与重水相关的系统

1) 重水冷却系统设置变化不大,若重水箱内充满重水,则系统采用闭式强迫循环,若重水箱内有气腔空间,则系统采用开式溢流循环;2) 重水净化系统一般由重水冷却系统分流一

部分经净化后返回重水泵入口的方式设置;3) 重水覆盖气体系统一般以氦气作载体,具有重水合成回收的功能,或以氮气作载体,无重水合成回收的功能;4) 重水排放系统若作为第 2 停堆系统,应对重水排放时间作相应要求;5) 重水浓缩系统一般必要时独立设置;6) 真空系统(为重水系统服务)与重水系统的接口可设置为固定式或移动式。

3.3 与池水相关的系统

这部分系统的设置有两种方式,即各系统独立设置和冷却与净化设计为 1 个系统。有时也可堆水池与乏燃料水池的冷却和净化系统单独设置,其中,堆水池净化系统或独立设置或与主回路净化系统共用。热水层循环系统一般独立设置,有时兼有主回路净化功能。

3.4 辅助系统

辅助系统的配置较为固定,一般应配置二回路、三回路(必要时)、中放系统、低放系统、去离子水制备系统、压缩空气系统等。