

国实验快堆系列丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

快堆主热传输系统 及辅助系统

徐 铎 主编

马子云 骆学军 编著

中国原子能出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

中国实验快堆系列丛书

快堆主热传输系统及辅助系统

徐 銖 主编

马子云 骆学军 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

快堆主热传输系统及辅助系统/马子云, 骆学军编著. —北京:
中国原子能出版社, 2011. 10
(中国实验快堆系列丛书/徐铄主编)
ISBN 978-7-5022-5347-9

I. ①快… II. ①马…②骆… III. ①快堆—热传导 IV.
①TL43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 197160 号

内 容 简 介

本书根据《中国实验快堆基础理论培训教材》中的主热传输系统教材大纲编写的。书中介绍了世界钠冷快堆主热传输系统的组成和特点, 结合中国实验快堆的实际情况, 主要介绍一回路主冷却系统、二回路主冷却系统等主热传输系统及其辅助系统的流程、原理、组成、工艺参数, 主要设备结构、尺寸、主要特点等。使读者能够全面掌握快堆主热传输系统及其辅助系统主要功能和原理。本书适合即将从事快中子反应堆工作人员基础理论培训选用, 同时也适合具有大专文化程度及以上的读者和其他感兴趣的读者阅读。

快堆主热传输系统及辅助系统

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 付 真
技术编辑 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 13.875 字 数 346 千字 插 页 1
版 次 2011 年 10 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5347-9 定 价 56.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

发行电话: 010-68452845

E-mail: atomep123@126.com

版权所有 侵权必究

总 序

为了裂变核能的可持续应用,我国的基本战略是压水堆—快堆的匹配发展。快中子堆(简称快堆)是主要以平均中子能量比压水堆的热中子高百万倍的 $0.08\sim 0.1\text{ MeV}$ 的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是,快堆核电站运行时,新产生的易裂变核燃料钚多于消耗掉的钚,即增殖比大于 1,易裂变核燃料得到增殖,因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变且天然丰度占 99.2% 以上的铀-238。快堆的乏燃料经后处理,钚返回堆内再烧,多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并无限次循环则对铀资源的利用率可从单单发展压水堆的 1% 左右提高到 60%~70%。由于利用率的提高,更贫的铀矿也值得开采,这样世界可采铀资源将增千倍。

在热中子反应堆运行时,会产生长寿命次量锕系核素(MA),其产量约为所产工业钚的 1/10。锕系核素需要衰变三四百万年才能将其放射性毒性降到天然铀的水平。但这些核素在快中子场中可以裂变成一般裂变产物,因此,可用快中子焚烧堆将它们裂变掉,获得裂变能,达到变害为利,减少地质储存的环境风险。

世界上快堆技术的发展已超过半个世纪,发展增殖快堆最适合的冷却剂是液态金属钠,这是所有快堆国家审慎选择的结果。

钠冷快堆是当前唯一现实的增殖堆,在闭式核燃料循环的支持下,可使我国核能实现长期可持续地安全供应。

钠冷快堆在我国是全新的核电工程。前核工业部 20 世纪 60 年代中后期开始组织钠冷快堆技术的基础研究,1986 年快堆技术发展纳入国家“八六三”高技术计划后,1988—1993 年进行了以实验快堆为目标的应用基础研究,1992 年 3 月国务院批准了建造 65 MW 热功率 20 MW 电功率实验快堆的目标,该堆于 2000 年开始建造。

在核工业研究生部的组织下,我们聘请了从事中国实验快堆设计及有丰富专业知识和经验的各专业专家编写了这部中国实验快堆系列丛书,包括如下 14 篇:

- 1 快堆概论
- 2 快堆物理基础
- 3 快堆热工流体力学

- 4 快堆本体及燃料操作系统
- 5 快堆主热传输系统及辅助系统
- 6 钠工艺基础
- 7 快堆蒸汽动力转换系统
- 8 快堆控制与保护
- 9 快堆电气系统与设备
- 10 快堆辐射防护
- 11 快堆材料
- 12 快堆通用机械设备
- 13 快堆安全分析
- 14 快堆运行

各篇编者多从本专业物理原理、尤其是从钠冷快堆独有的特征出发,结合中国实验快堆的设计成果深入浅出地编写成册,因此既适于大学本科毕业的主控室操纵人员培训也适于快堆高级管理人员学习快堆知识,也可供一般操作人员培训参考。

我国快堆工程分三步发展,各阶段目标具有主要技术选择的一致性。本丛书针对性强,因此对新参与我国后续的示范快堆和大型高增殖快堆的设计者们也是一种实用的入门教材。

这是我国钠冷快堆首部运行操作人员的培训丛书,由于经验不足,疏漏和错误在所难免,敬请各位专家、使用者们不吝指正。

徐 练

2011年1月3日

前 言

回路一般分为开式运行回路和闭式循环运行回路,后者比前者的要求高得多。每个回路主要由工艺和设备两大部分组成。快中子增殖反应堆中的回路比压水堆等热中子反应堆中的回路更难、更复杂,其原因就是快堆的冷却剂是选用液态金属钠。在回路的设计中,应考虑钠冷却剂要用惰性气体覆盖;为使钠保持液体状态,对流动钠的管道需跟踪加热;此外,为了保证钠泵的正常运作而不受损坏,还要对液态金属钠进行特殊的净化处理;钠流动的管道随温度的变化而使热应力变化较大,故要设置结构复杂价格又贵的弹性支吊架支撑。如此等,钠冷快堆回路和系统的设计中更要调研,全面考虑进行探索,从众多方案中进行对比,从中选择最安全、可靠,又经济合理,最能满足需要的最佳方案。

本书共分为9章,除对中国实验快堆(CEFR)一、二回路主冷却系统,一、二回路钠辅助系统,专设安全设施系统及其他辅助系统介绍外,还对钠冷快中子增殖反应堆(LMFBR)热传输系统作了基本介绍,本书可用作快堆工程技术人员和快堆调试、运行人员的培训用教材。

本书的编著过程中,得到中国实验快堆工程部各职能部门、设计管理部、回路设计室、结构设计室、理论室、钠工艺室和自控室领导的多方支持,得到各系统设计负责人和设计者的大力帮助,王彬教授还为本书进行了全面的校审,对于这些支持和帮助,在此表示衷心感谢。

钠冷快堆在我国是全新的核电工程,主要是编者水平有限,书中的内容虽经多次修改和补充,遗漏和错误之处在所难免,请大家在使用过程中多批评指正。

编 者

2011年4月

目 录

第 1 章 钠冷快中子增殖反应堆热传输系统	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 LMFBR 系统配置	(1)
1.2.1 池式和回路式系统的比较	(2)
1.2.2 热交换器的结构形式	(7)
1.2.3 蒸汽循环	(7)
1.2.4 电厂控制	(8)
1.3 反应堆容器和反应堆钠池	(10)
1.3.1 反应堆容器(回路式系统)	(10)
1.3.2 反应堆钠池(池式系统)	(11)
1.4 主要设备	(13)
1.4.1 钠泵	(13)
1.4.2 中间热交换器	(15)
1.4.3 蒸汽发生器	(16)
1.5 辅助系统	(19)
1.5.1 惰性气体	(19)
1.5.2 跟踪加热	(20)
1.5.3 钠的净化	(21)
第 2 章 中国实验快堆(CEFR)热传输系统	(22)
2.1 概述	(22)
2.2 系统功能	(23)
2.2.1 热量传输	(23)
2.2.2 安全功能	(23)
2.2.3 设备冷却功能	(25)
2.3 热传输系统的完整性	(25)
2.3.1 热传输系统部件的设计	(25)
2.3.2 超压保护	(27)
2.3.3 材料	(28)
2.3.4 断裂韧性	(31)
2.4 一回路主冷却系统的热工水力系统设计	(32)
2.4.1 设计的安全限值	(32)
2.4.2 额定工况下主要参数	(32)
2.4.3 事故工况下的一回路钠循环	(34)
2.5 二回路主冷却系统的热工水力系统设计	(34)

2.5.1	设计的安全限值	(34)
2.5.2	额定工况下主要参数	(34)
2.5.3	系统的自然循环特性	(35)
2.5.4	保证系统安全的几项措施	(35)
2.6	水锤现象	(35)
2.7	启动和停堆	(36)
2.7.1	启动前的系统状态	(36)
2.7.2	冷启动到满功率的过程	(36)
2.7.3	热启动到满功率的过程	(36)
2.7.4	计划停堆	(37)
2.8	法规、标准、规范	(37)
第 3 章	一回路主冷却系统及其设备	(39)
3.1	一回路主冷却系统	(39)
3.1.1	功能	(39)
3.1.2	工艺流程和热工水力特性	(39)
3.1.3	设计参数	(47)
3.2	一回路钠循环泵	(48)
3.2.1	功能	(48)
3.2.2	设计参数	(48)
3.2.3	泵体结构	(49)
3.2.4	运行工况及设计	(53)
3.2.5	热工水力特性	(55)
3.2.6	安全评价	(55)
3.3	泵的支撑和压力管部件	(60)
3.3.1	泵的支撑	(60)
3.3.2	压力管部件	(61)
3.3.3	主泵支撑的补偿器	(61)
3.3.4	泵支撑的冷却	(61)
3.4	一回路钠循环泵的辅助系统	(61)
3.4.1	一回路钠泵润滑油冷却系统	(61)
3.4.2	一回路钠泵蒸馏水冷却系统	(64)
3.4.3	一回路钠泵空气冷却系统	(66)
3.4.4	关闭钠泵的检修密封用氩气	(67)
第 4 章	二回路主冷却系统及其设备	(68)
4.1	二回路主冷却系统	(68)
4.1.1	功能	(68)
4.1.2	工艺流程和热工水力特性的评价	(68)
4.1.3	设计参数	(69)
4.1.4	主要设备	(69)

4.2	二回路钠循环泵	(73)
4.2.1	功能	(73)
4.2.2	设计参数	(73)
4.2.3	基本结构与一回路钠循环泵的比较	(73)
4.2.4	运行工况及设计基准	(74)
4.2.5	热工水力特性	(75)
4.2.6	安全评价	(76)
4.3	二回路钠循环泵的辅助系统	(79)
4.3.1	二回路钠泵润滑油冷却系统	(79)
4.3.2	二回路钠泵蒸馏水冷却系统	(80)
4.3.3	二回路钠泵空气冷却系统	(80)
4.3.4	关闭钠泵的检修密封用氩气	(80)
4.4	中间热交换器	(80)
4.4.1	中间热交换器的结构	(80)
4.4.2	设计参数	(82)
4.4.3	热工水力特性	(82)
4.4.4	运行工况及设计基准	(83)
4.4.5	安全评价	(84)
4.5	蒸汽发生器	(86)
4.5.1	结构	(86)
4.5.2	设计参数	(88)
4.5.3	热工水力特性	(89)
4.5.4	运行工况及设计基准	(90)
4.5.5	安全评价	(91)
4.6	蒸汽发生器事故保护系统	(94)
4.6.1	系统的组成和功能	(95)
4.6.2	泄漏事故的确定	(98)
4.6.3	小泄漏信号形成	(98)
4.6.4	大泄漏信号形成	(98)
4.6.5	技术参数	(99)
4.6.6	安全评价	(99)
4.7	二回路钠冷却剂管道	(100)
4.7.1	管道系统的组成	(100)
4.7.2	设计参数	(101)
4.7.3	运行工况及设计基准	(101)
4.7.4	安全评价	(102)
4.7.5	试验和检验要求	(103)

第 5 章 一回路钠辅助系统

5.1	一回路钠充、排系统	(104)
-----	-----------------	---------

5.1.1	功能	(104)
5.1.2	系统组成和主要设备	(104)
5.1.3	电磁泵	(105)
5.1.4	工艺流程和运行工况	(112)
5.1.5	设计参数	(114)
5.1.6	安全评价	(114)
5.2	一回路钠净化系统	(115)
5.2.1	功能	(115)
5.2.2	系统组成和主要设备	(115)
5.2.3	工艺流程和运行工况	(117)
5.2.4	设计参数	(121)
5.2.5	安全评价和检验要求	(122)
5.3	一回路钠分析监测系统	(123)
5.3.1	一回路钠取样系统	(123)
5.3.2	一回路钠阻塞计支路	(125)
5.3.3	γ 光谱及铯监测系统	(126)
第 6 章	二回路钠辅助系统	(128)
6.1	钠接收和二回路钠充、排系统	(128)
6.1.1	功能	(128)
6.1.2	核级新鲜钠的接收	(128)
6.1.3	系统组成和主要设备	(129)
6.1.4	工艺流程和运行工况	(130)
6.1.5	设计参数	(132)
6.1.6	安全评价	(132)
6.2	二回路钠净化系统	(133)
6.2.1	功能	(133)
6.2.2	系统组成和主要设备	(133)
6.2.3	工艺流程和运行工况	(136)
6.2.4	设计参数	(139)
6.2.5	安全评价和检验要求	(140)
6.3	二回路钠分析监测系统	(140)
6.3.1	二回路钠取样支路	(140)
6.3.2	二回路钠阻塞计支路	(142)
第 7 章	其他运行辅助系统	(144)
7.1	概述	(144)
7.2	反应堆气体加热系统	(144)
7.2.1	功能	(144)
7.2.2	系统组成和主要设备	(145)
7.2.3	系统流程	(145)

7.2.4 设计参数	(147)
7.3 氩气系统	(147)
7.3.1 氩气接收系统	(147)
7.3.2 一次氩气分配系统	(150)
7.3.3 二次氩气分配系统	(152)
7.3.4 CAPX 的氩气系统	(154)
7.4 一次氩气吹扫与衰变系统	(155)
7.4.1 功能	(155)
7.4.2 系统组成和主要设备	(156)
7.4.3 工艺流程	(156)
7.4.4 设计参数	(156)
7.5 真空系统	(158)
7.6 乏燃料组件清洗系统	(160)
7.6.1 功能	(160)
7.6.2 系统组成和主要设备	(160)
7.6.3 工作原理及流程	(160)
7.6.4 清洗容器	(161)
7.6.5 安全评价	(163)
7.7 设备清洗系统	(164)
7.7.1 功能	(164)
7.7.2 系统组成和主要设备	(164)
7.7.3 工作原理及流程	(165)
7.8 部件和结构的冷却系统	(167)
7.8.1 主容器冷却通道	(167)
7.8.2 泵支撑冷却通道	(167)
7.8.3 堆内电离室冷却通道	(167)
7.9 蒸汽发生器卸压系统	(168)
7.10 燃料破损检测系统	(168)
7.10.1 覆盖气体监测系统	(168)
7.10.2 缓发中子监测系统	(169)
7.10.3 堆内破损燃料定位探测系统	(169)
7.10.4 燃料破损监测仪表控制系统	(169)
7.10.5 乏燃料破损监测系统	(170)
7.10.6 设计的安全保障措施	(170)
7.11 最终热阱	(170)
第 8 章 专设安全设施系统	(171)
8.1 事故余热排出系统	(171)
8.1.1 设计依据	(173)
8.1.2 系统设计	(174)

8.1.3	性能评价	(181)
8.1.4	试验和检验	(183)
8.1.5	对仪表装置的要求	(184)
8.1.6	材料	(185)
8.2	反应堆容器超压保护系统	(186)
8.2.1	设计依据	(186)
8.2.2	系统设计	(186)
8.2.3	性能评价	(191)
8.2.4	试验和检验	(194)
8.2.5	对仪表装置的要求	(194)
8.2.6	材料	(195)
第 9 章	反应堆冷却剂容积控制、钠阀及过程检测	(197)
9.1	反应堆冷却剂容积控制	(197)
9.1.1	冷却剂容积控制	(197)
9.1.2	放射性钠的净化	(197)
9.2	钠阀	(198)
9.2.1	功能	(198)
9.2.2	类型和接口条件	(199)
9.2.3	运行工况及设计准则	(200)
9.2.4	安全评价	(204)
9.2.5	试验和检验要求	(205)
9.3	一回路过程检测系统	(206)
9.3.1	功能	(206)
9.3.2	安全分级	(206)
9.3.3	说明与分析	(206)
9.4	二回路过程检测系统	(207)
9.4.1	功能	(207)
9.4.2	安全分析	(207)
9.4.3	说明与分析	(207)
参考文献		(209)
后记		(210)

第 1 章 钠冷快中子增殖反应堆热传输系统

1.1 概 述

世界上第一个快中子反应堆是美国克莱门汀堆(Clementine)反应堆,它于 1946 年建在美国的洛斯·阿拉莫斯(Los-Alamos)。1951 年 12 月 20 日,由美国阿贡(Argonne)国立实验室设计的实验快中子增殖反应堆 EBR-1 成为世界上第一座生产电力的核电厂,它验证了快中子增殖反应堆的概念,同时让人们看到了核能够作为长期、可靠的新能源的美好前景。

钠冷快中子增殖反应堆距今已有 50 多年的发展历史,其间共建造了 20 多座规模不同的快中子反应堆,它具有较好的固有安全性和可靠性,是未来能够替代热中子反应堆的现实堆型,是满足人类长期能源需要的重要途径之一。

快堆可以增殖核燃料,同以水为冷却剂的压水堆相比,对铀资源的利用率可以从 1%~2% 提高到 60%~70%。发展快堆核电厂,不仅能使现有可开发的铀资源得到充分的利用,而且能使品位较低的铀矿具有开采价值,因此,裂变能源将几乎成为人类不会耗竭的能源之一。另一方面,热堆核电厂中产生的大部分长寿命放射性核素,可在快堆中通过裂变反应转换成短寿命的裂变产物,从而大大减轻了人类利用裂变核能的后顾之忧。快堆的固有安全性,对环境和公众不会造成危害等的优点,使得快堆的发展一直受到国际关注。经济发达的国家,都将快堆作为第二代核电站的主要堆型,积极开展对快堆的实验研究,并且已经不断取得进展。

我国快堆研究工作开始于 20 世纪 60 年代,经过 40 多年的努力,现已进入实验快堆的工程设计和建造阶段,快堆的技术队伍正在不断扩大。中国实验快堆(CEFR)的设计和建造,在我国核工业发展的历史上必将写下不朽的一页。

建造快中子增殖堆的基本目的是生产电能。要达此目的就必须把核裂变的能量传输给蒸汽系统,以推动汽轮发电机。本章介绍液态金属快增殖堆(LMFBR)堆芯外面的系统,这些系统也是发电所必不可少的。讨论重点是热传输系统,并把注意力集中在 LMFBR 所特有的设计问题上。

1.2 LMFBR 系统配置

LMFBR 的热传输系统由一次钠系统、二次钠系统和蒸汽系统组成。二次钠系统是液态金属冷却的反应堆所特有的。采用二次钠系统是为了防止一次系统中的放射性钠(主要是半衰期为 15 h 的 ^{24}Na)与蒸汽发生器中的水接触。钠系统的主要部件包括:反应堆容器或钠池,一次泵,中间热交换器(IHX),二次泵和蒸汽发生器。

1.2.1 池式和回路式系统的比较

现在采用的一次系统有两种类型：池式系统和回路式系统。在池式系统中，整个一次系统，即反应堆、一次泵和中间热交换器都放置在反应堆钠池内。在回路式系统中，一次泵和中间热交换器放置于反应堆容器外面的一些工艺室中，相互之间有管道连接。回路式和池式设计的热传输系统概略地表示在图 1-1 和图 1-2 中；而表 1-1 则列举了各个原型堆或示范堆电厂设计所选择的一次系统的类型以及热传输系统的主要设计参数。从表 1-1 可以看出：采用池式系统的只有美国 EBR—Ⅱ 试验堆；而其余的反应堆，包括 FFTF、BOR—60、Rapsodie、JOYO、KNK—Ⅱ、Fermi、Dounreay、FBTR 和 PEC 等堆，都采用了回路式系统。

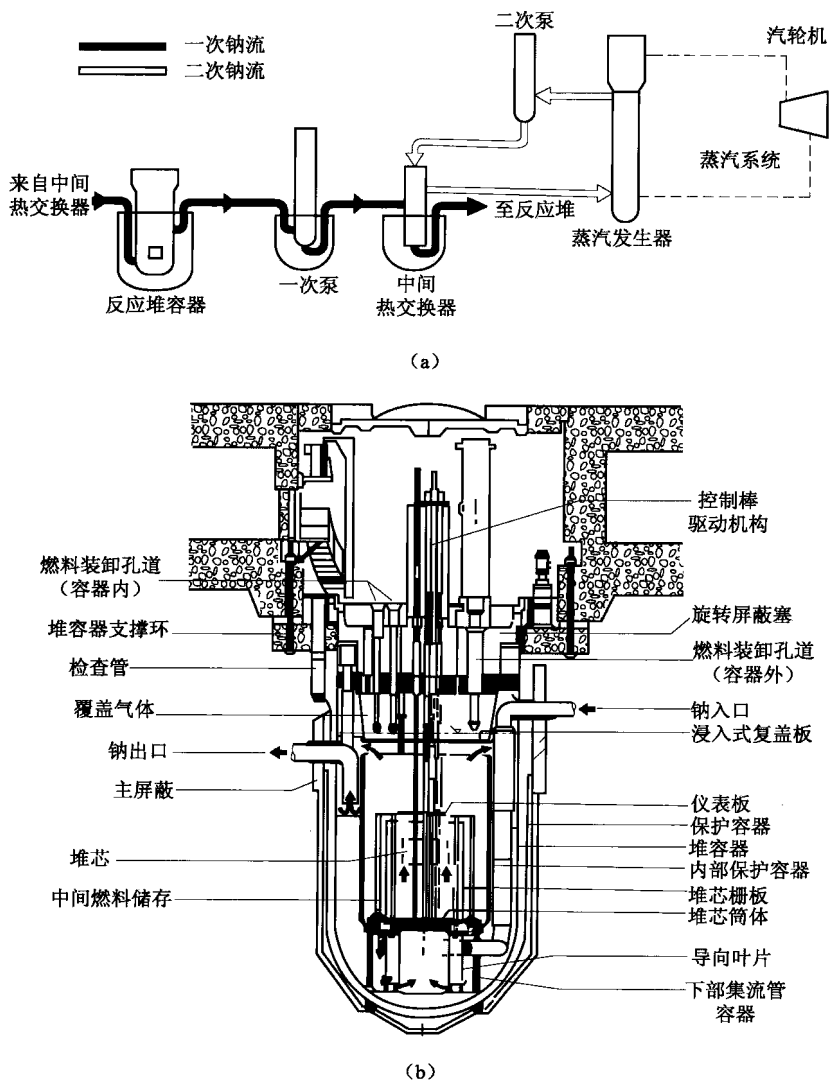


图 1-1 回路式系统(SNR—300)的反应堆容器

(a) 回路式设计的系统流程图；(b) 回路式设计相对应的堆容器

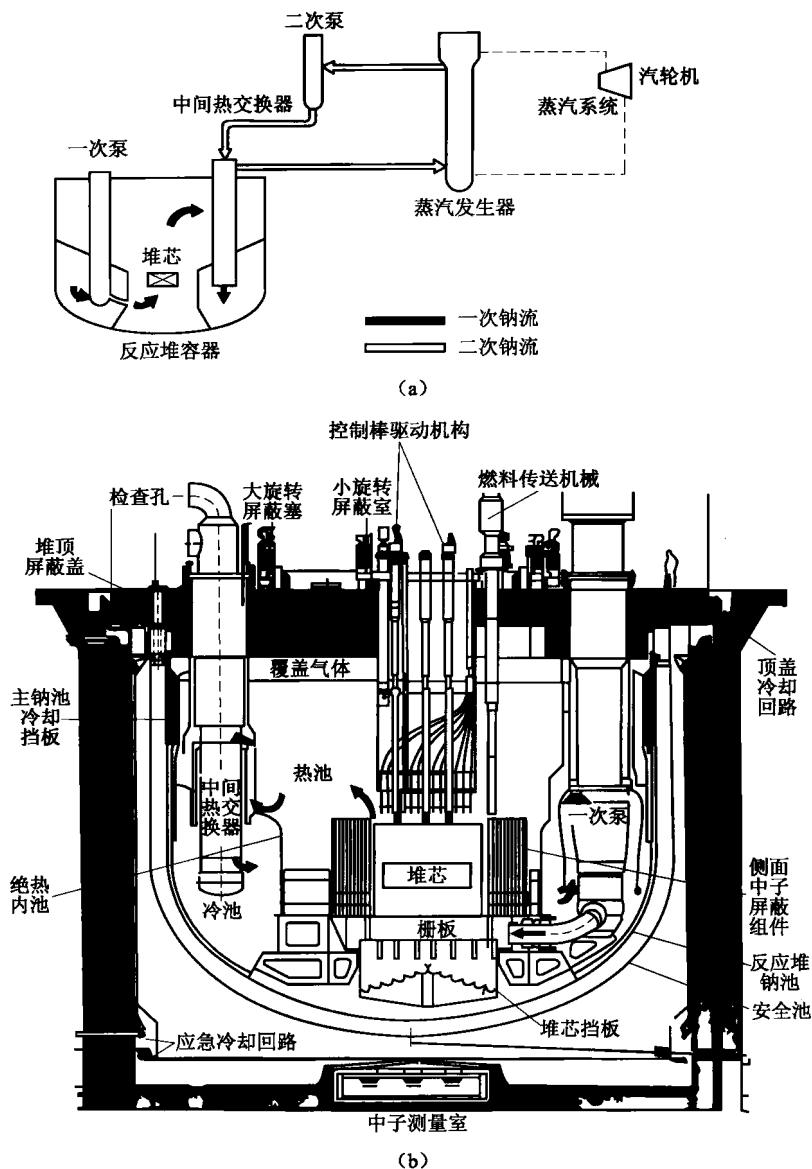


图 1-2 池式系统(Super Phenix)的反应堆钠池

(a) 池式设计的回路流程图;(b) 池式设计的回路相对应的堆容器

“回路”这个术语指的是反应堆和蒸汽轮机之间热传输系统内的一系列部件。每一回路可以独立运行,而与热传输系统中的其他回路无关。在快增殖堆回路系统中,每一条回路分别包括 1 台一次泵、1 台二次泵、1 台或多台中间热交换器和蒸汽发生器。对于池式系统,“回路”这个术语指的是中间热交换器和二次钠系统;一次泵的数目和回路的数目没有必要相同,尽管它们的数目常常设计为一样。大部分商用规模的示范电厂都有 4 条回路;较小的原型电厂一般只有 3 条回路。不过,在图 1-1 和图 1-2 中只表示出了一条回路。池式的“超凤凰”(SuperPhenix)堆有 4 条回路,4 台一次泵。图 1-3 是“超凤凰”堆的平面布置图。图

表 1-1 大型快增殖堆的主要设计参数

	BN-350 (苏联)	Phenix (法国)	PER (英国)	SUR-300 (德国)	MONJU (日本)	CRBRP (美国)	BN-360 (苏联)	Super Phenix (法国)	CDFR (英国)	SNR-2 (德国)	BN-1600 (苏联)
额定电功率/MW	350(等效)	250	250	327	280	375	600	1 200	1 320	1 300	1 600
热功率/MW	1 000	568	600	770	714	975	1 470	3 000	3 230	3 420	4 200
系统	回路式	池式	池式	回路式	回路式	回路式	池式	池式	池式	回路式	池式
回路数目	6	3	3	3	3	3	3	4	6	4	4
一次泵定位	冷段	冷池	冷池	热段	冷段	热段	冷池	冷池	冷池	热段	冷池
每个回路的 IHX 数目	2	2	2	3	1	1	2	2	2	2	1
IHX 的温度/℃											
反应堆出口	500	560	550	546	529	535	550	545	540	540	550
反应堆入口	300	400	400	377	397	388	377	395	370	390	350
二次出口	450	527	540	528	505	502	520	525	510	510	505
二次入口				335	325	344		345	335	340	310
蒸汽发生器	整体式: 卡 口管蒸发器, U 形管 过热器	模块式: S 形 管	分离式: U 形管	分离式: 2-直 排管, 1-螺旋 盘管	分离式: 螺 旋盘管	分离式: 曲 棍形管	分离式: 直 管	整体式: 螺 旋盘管	整体式: 螺 旋盘管	整体式: 螺 旋盘管或直 管	

续表

	BN-350 (苏联)	Phenix (法国)	PER (英国)	SUR-300 (德国)	MONJU (日本)	CRBRP (美国)	BN-360 (苏联)	Super Phenix (法国)	CDFR (英国)	SNR-2 (德国)	BN-1600 (苏联)
蒸汽循环	再循环式	一次通过式 (本森)	再循 环式	一次通过式 (沙泽尔)	一次通过式 (本森)	再循环式	一次通过式 (本森)	一次通过式 (本森)	一次通过式	一次通过式	
每个回路部件数目											
整体式蒸汽发生器	—	—	—	—	—	—	—	1	—	2	
分离式蒸汽发生器	2	12	1	3	1	2	1	—	—	—	
分离式过热器	1	12	1	3	1	1	1	—	—	—	
蒸汽包	0	1	1	0	0	1	—	—	—	—	
汽水分离器	—	1	—	1	1	—	1	—	—	—	
再热器	0	12	1	0	0	0	1	0	—	—	
汽轮机											
入口压力/MPa	4.9	16.3	12.8	16.0	12.5	10.0	14.2	18.4	16.0	16.5	14.0
入口温度/℃	435	510	513	495	483	482	505	490	490	495	500
台数/电功率/MWe	1	1	1/250	1	1	1/434	K-200-130	2/600	2/660	1/1 300	2/800
类型	K-100-45	凝汽式	串联复式	凝汽式	串联复式	串联复式		凝汽式	串联复式	单轴式	