



核电厂

运行概述

丁云峰 李永章 主 编

中国核工业集团公司 编



原子能出版社

核电厂运行概述

主 编 丁云峰 李永章

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂运行概述/丁云峰,李永章主编. —北京:
原子能出版社,2010.9
(核电厂新员工入厂培训系列教材)
ISBN 978-7-5022-5041-6

I. ①核… II. ①丁… ②李… III. ①核电厂—运行
—技术培训—教材 IV. ①TM623.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 182787 号

内 容 简 介

本书阐述了压水堆核电厂运行相关的基础知识。全书共分五章,内容包括绪论、核电厂技术规格书、核电厂正常运行、核电厂异常运行和核电厂事故等。

本书是中国核工业集团公司《核电厂新员工入厂培训系列教材》之一,也可供高等院校核反应堆工程专业的师生和从事核电工程的相关人员参考。

核电厂运行概述

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 刘 岩
技术编辑 丁怀兰 王亚翠
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 8.75 字 数 217 千字
版 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5041-6 定 价 45.00 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

中国核工业集团公司 核电培训教材编审委员会

总 编 孙 勤
副 总 编 余剑锋 叶奇蓁

编辑委员会

主 任	陈 桦				
副 主 任	程慧平	孙习康	张 涛		
委 员	马明泽	刘志勇	刘明章	李苏甲	李和香
	赵 云	邹正宇	杨树录	段光荣	顾颖宾
	商幼明	戚屯锋	缪亚民	仲卫东	周建虎

执行编委

谢 波	马寅军	叶丹萌	莫银良	高小林
吴向东	鲁忆迅	唐锡文	蔡黎勇	刘 朔
肖 武	浦胜娣	刘玉山	王海平	

编委会办公室

姜福明	朱 黎	张红军	程建秀	黄 芳
方朝霞	沈 阳	宫育锋	章 超	丁怀兰
王亚翠	陈茂松	万德华	张曰智	郭维贺

核电厂新员工基础理论培训教材

编辑部

名誉主任 王乃彦

主任 李和香

副主任 肖 武 李济民

顾问 (按姓氏拼音顺序排列)

李文埏 罗璋琳 浦胜娣 邵向业 郑福裕

编者 (按姓氏拼音顺序排列)

陈树明 丁云峰 郝老迷 李永章 刘惠枫
浦胜娣 阮於珍 苏淑娟 田传久 夏延龄
于 宏 章 超 张松梅 赵郁森 郑福裕

本册主编 丁云峰 李永章

本册校审 郑福裕

本册统审 (按姓氏拼音顺序排列)

廖江龙 朱元武

总 序

核工业作为国家高科技战略性产业,是国家安全的重要基石、重要的清洁能源供应,以及综合国力和大国地位的重要标志。

1978年以来,我国核工业第二次创业。中国核工业集团公司走出了一条以我为主发展民族核电的成功道路。在长期的核电设计、建造、运行和管理过程中,积累了丰富的实践和理论经验,在与国际同行合作过程中,实现了技术和管理与国际先进水平相接轨,取得了骄人的业绩。

中国核工业集团公司在三十多年的核电建设中,经历了起步、小批量建设、快速发展三个阶段。我国先后建成了秦山、大亚湾、田湾三大核电基地,实现了我国大陆核电“零”的突破、国产化的重大跨越、核电管理与国际接轨,走出了一条以我为主,发展民族核电的成功之路。在最近几年中,发展尤为迅猛。截至2008年底,核电运行机组11台,装机容量907.82万千瓦,全部稳定运行,态势良好。

进入新世纪,党中央、国务院和中央军委对核工业发展高度重视、极为关怀,对核工业做出了新的战略决策。胡锦涛总书记指出:“无论从促进经济社会发展看,还是从保障国家安全看,我们都必须切实把我国核事业发展好”。发展核电是优化能源结构、保障能源安全、满足经济社会发展需求的重要途径。2007年10月,国务院正式颁布了《核电中长期发展规划(2005—2020年)》。核电进入了快速、规模化、跨越式发展的新阶段。

在中国核电大发展之际,中国核工业集团公司继续以“核安全是核工业的生命线”的核安全文化理念和“透明、坦诚和开放”的企业管理心态,以推动核电又好又快又安全发展为己任,为加速培养核电发展所需的各类人才,组织核电领域专家,全面系统地对核电设计、工程建造、电站调试、生产准备和生产运营等各阶段的知识进行了梳理,构造了有逻辑性、系统性的核电知识体系,形成了覆盖核电各阶段的核电工程培训系列教材。

这套教材作为培养核电人才的重要工具,是国内目前第一套专业化、体系化、公开出版的核电人才培养系列教材,有助于开展培训工作,提高培训质量、节约培训成本,夯实核电发展基础。它集中了全集团的优势,突出高起点、实用性强,是集团化、专业化运作的又一次实践,是中国核工业 50 余年知识管理的积淀,是中国核工业 10 万人多年总结和实践经验的结晶。

21 世纪是“以人为本”的知识经济时代,拥有足够的优秀人才是企业持续发展的重要基础。中国核工业集团公司愿以这套教材为核电发展开路,为业界理论探讨、实践交流提供参考。

我们要继续以科学发展观为指导,认真贯彻落实党中央、国务院的指示精神,积极推进核电产业发展。特别是要把总结核电建设经验作为一项长期的工作来抓,不断更新和完善人才教育培训体系。

核电培训系列教材可广泛用于核电厂人员培训,也可用于核电管理者的学习工具书,对于有针对性地解决核电厂生产实践和管理问题具有重要的参考价值。

中国核工业集团公司总经理

A handwritten signature in black ink, appearing to be '孙力' (Sun Liang), written in a cursive style.

2009 年 9 月 9 日

前 言

本书是以核工业研究生部《压水堆核电厂运行》培训教材为基础,根据核电厂新员工(非操纵人员)基础理论培训的基本要求,在编写大纲、广泛听取核电厂意见的基础上编写而成的,是中国核工业集团公司核电培训教材编制规划中《核电厂新员工入厂培训系列教材》之一。现定名为《核电厂运行概述》(简称《概述》)。

《概述》主要面向非运行人员,因此对《压水堆核电厂运行》有关章节的内容进行了删减。《概述》主要取材于美国西屋公司有关压水堆核电厂培训资料,所以基本体系是以美国西屋型电厂为主,适当结合我国核电厂的有关材料。《概述》是一本概论性的教材,它介绍的压水堆核电厂运行具有普遍性。《概述》内容明确了它不是以某一特定压水堆核电厂的运行文件和实践为依据,书中所给出的数据、系统,核电厂的启动、停闭步骤不可能与某一核电厂完全吻合,而是力图给学员一个完整的概念。

核电厂运行是一门实践课,应该理论联系实际,一方面要介绍必要的知识,重要的运行文件,如核电厂技术规格书、运行规程等;另一方面,一定要通过实际操作训练,也就是说学员应该在全范围核电厂模拟机上培训,这样才能理解深刻、掌握牢固。现在课堂上讲运行,只能给学员介绍核电厂运行基本知识,勾画出核电厂运行的轮廓,使学员对核电厂运行全过程有初步了解,为以后学习打下基础。

《概述》共分五章,内容包括第一章绪论,重点介绍了核电厂运行的特点;第二章核电厂技术规格书,这是核电厂最重要的运行文件;第三章核电厂正常运行,结合正常运行规程介绍正常运行全过程;第四章核电厂异常运行,结合异常运行规程介绍部分异常运行;第五章核电厂事故,重点介绍了美国三哩岛事故后,美国西屋型压水堆核电厂的应急运行规程的特点及内容,并介绍了典型事故之一——蒸汽发生器传热管破裂。

本书在编写过程中得到了邵向业研究员、郑福裕教授的悉心指导,本书的出版得到核工业研究生部、秦山核电公司、核电秦山联营有限公司、大亚湾核电

运营管理有限责任公司以及原子能出版社等单位 and 有关同志的大力支持,编者表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中出现某些问题在所难免,敬请读者批评指正。

编 者
2010 年 4 月

目 录

第一章 绪 论

1.1 核电厂运行特点	1
1.1.1 压水堆核电厂与化石燃料电厂的比较	2
1.1.2 压水堆核电厂与研究堆的比较	3
1.2 核电厂工况分类	4
1.2.1 正常运行和运行瞬态	5
1.2.2 中等频度事件	5
1.2.3 稀有事件	6
1.2.4 极限事故	6
1.3 核电厂的运行文件	7
1.3.1 技术规格书	7
1.3.2 运行规程	8
复习思考题	10

第二章 核电厂技术规格书

2.1 总述	11
2.2 定义	12
2.3 安全限值	13
2.4 安全系统整定值的设定	14
2.5 运行限制条件	16
2.5.1 适用范围	16
2.5.2 反应性控制系统	17
2.5.3 功率分布限值	18
2.5.4 仪表	21
2.6 监测要求	21

2.7 设计特点	21
2.8 行政管理	22
复习思考题	22

第三章 核电厂正常运行

3.1 总述	23
3.2 核电厂加热升温	23
3.2.1 初始条件	23
3.2.2 注意事项	24
3.2.3 运行操作	25
3.3 反应堆启动至最小功率	29
3.3.1 趋近临界过程的几个问题	29
3.3.2 初始条件	34
3.3.3 注意事项	34
3.3.4 运行操作	35
3.4 功率运行	36
3.4.1 初始条件	36
3.4.2 注意事项	37
3.4.3 运行操作	38
3.4.4 运行中的负荷瞬变	41
3.5 功率运行中的两个估算——稀释率与热平衡计算	52
3.5.1 稀释率的确定	52
3.5.2 热平衡计算	53
3.6 核电厂停闭	55
3.6.1 初始条件	55
3.6.2 注意事项	55
3.6.3 运行操作	57
复习思考题	62

第四章 核电厂异常运行

4.1 总述	63
4.2 棒控系统故障	64

4.2.1	在功率运行时控制棒组连续上提	64
4.2.2	控制棒束掉落堆芯	65
4.2.3	应急加硼	68
4.3	冷却剂系统的异常变化	71
4.3.1	冷却剂系统的泄漏	71
4.3.2	反应堆冷却剂压力异常	73
4.4	仪控通道失效	76
4.4.1	一回路系统仪控通道失效	76
4.4.2	二回路系统仪控通道故障	84
4.4.3	核仪表通道失效	86
复习思考题		88

第五章 核电厂事故

5.1	总述	89
5.1.1	应急响应导则	90
5.1.2	最佳恢复导则	90
5.1.3	功能恢复导则	96
5.1.4	最佳恢复导则与功能恢复的转换关系	103
5.2	未紧急停堆的预期瞬变(ATWS)	105
5.3	蒸汽发生器传热管破裂事故(SGTR)	111
5.3.1	蒸汽发生器传热管破裂事故概述	111
5.3.2	蒸汽发生器传热管破裂事故的瞬变过程	112
5.3.3	蒸汽发生器传热管破裂事故的应急运行规程	112
5.3.4	操纵员及时干预下的蒸汽发生器传热管破裂	114
5.4	主冷却剂丧失事故(LOCA)	123
5.5	主蒸汽管道破裂事故(MSLB)	126
复习思考题		127
参考文献		128

第一章 绪 论

1.1 核电厂运行特点

核电厂运行与现代化石燃料(煤炭、石油、天然气)电厂运行基本相似,即按照电网的负荷需求调节热源的输出功率,使其与电网的负荷相平衡,生产出合格的电力。其不同之处在于前者是利用核裂变产生的能量,而后者则是利用燃烧化石燃料产生的能量。图 1-1-1 给出了压水堆核电厂简化工艺流程,图 1-1-2 给出了过热和再热化石燃料电厂简化工艺流程。

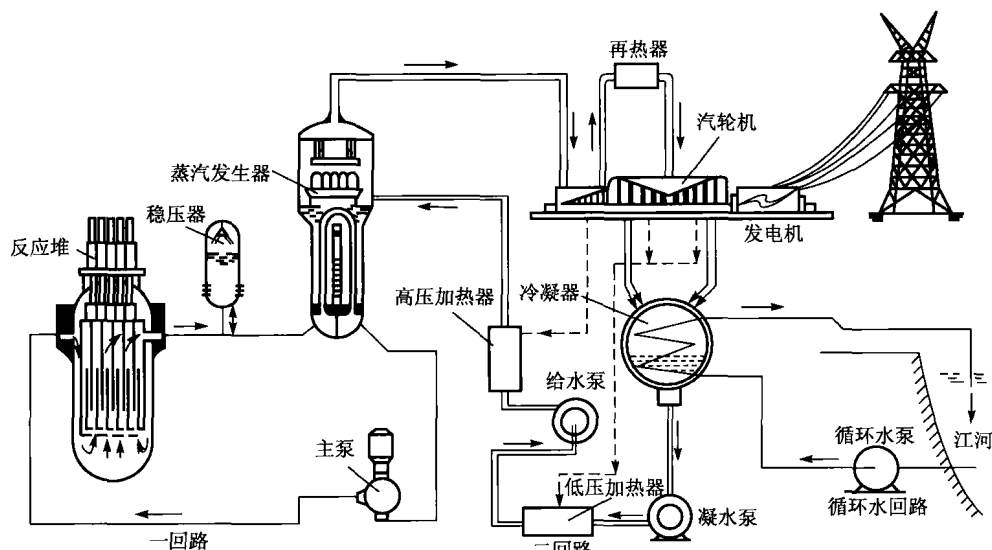


图 1-1-1 压水堆核电厂简化工艺流程

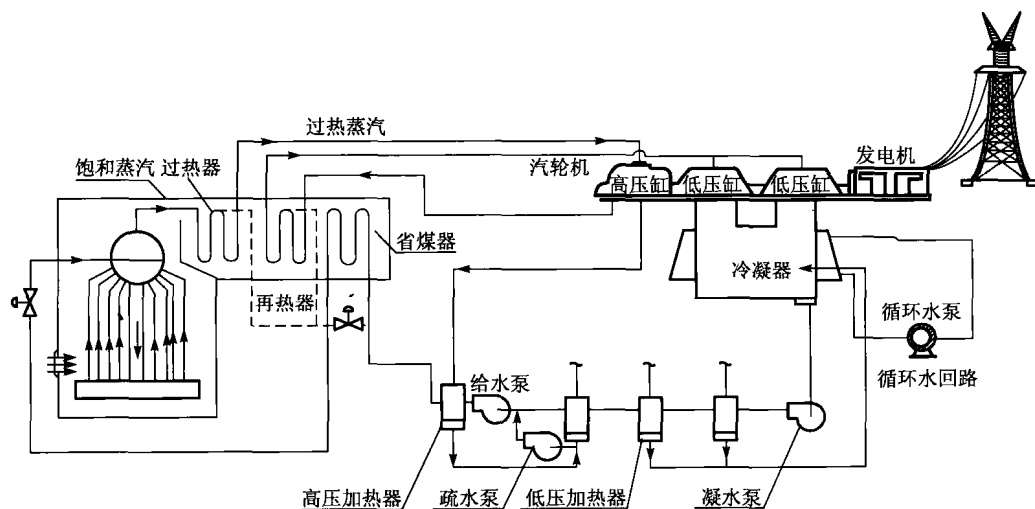


图 1-1-2 过热和再热化石燃料电厂简化工艺流程



下面简要归纳压水堆核电厂运行与化石燃料电厂、研究堆运行的特点。

1.1.1 压水堆核电厂与化石燃料电厂的比较

(1) 反应堆临界是核电厂运行特点之一

核电厂和化石燃料电厂一样,都是将热能转换成电能。化石燃料电厂是将化石燃料加入燃烧炉内,在炉膛内有足够高的温度,燃料和充足的空气条件下,使化石燃料得到燃烧,由化学反应产生的热能转换成电能。化石燃料电厂可以连续不断地向锅炉供给燃料。化石燃料电厂显然需要消耗大量的氧气和排放出大量的二氧化碳(化石燃料电厂每发1度电约产生1 kg的二氧化碳)。

核电厂则是利用在反应堆内原子核裂变产生热能转换成电能。反应堆只有在临界下,才能实现自持链式反应。为了能维持反应堆内核燃料的链式裂变反应,并能持续较长的时间,反应堆内的核燃料装载量必须一次性装入大于反应堆临界所需的量,以克服冷态至热态、功率亏损、平衡氙毒、燃料消耗以及裂变产物积累等所引起的反应性损失,使反应堆能在较长的期限(堆芯寿期)内实现链式反应。在反应堆堆芯寿期末,堆芯内所装的核燃料并非全部燃尽,而是所剩的核燃料在克服功率亏损、氙毒等因素引起的反应性损失后,反应堆不再能维持设计所规定的满功率或一定功率长期连续运行,也即在维持一定功率下,反应堆不能在较长的时间内维持临界,因此核电厂必须定期停堆换料。反应堆达到临界才能工作,这是核电厂与化石燃料电厂明显不同之处。

(2) 核电厂反应堆内产生和积累了大量的放射性物质

反应堆在核裂变过程中,在放出大量能量的同时,还产生放射性裂变碎片和释放出中子。一座电功率为1 000 MW核电厂的反应堆内约积累放射性物质 $6 \times 10^{10} \sim 7 \times 10^{10}$ GBq。正是由于核电厂有大量放射性物质的存在,才使得核电厂的辐射安全问题成为设计者、建造者和营运者首先关注的问题。这些放射性物质绝大部分被燃料元件的包壳所包容,因此,在核电厂正常运行期间,如果能保持燃料元件包壳的完整性,从燃料中向环境释放大量放射性物质的情况就不可能发生,也就不会对周围环境造成任何危害。保持燃料包壳的完整性主要依赖于对燃料的充分冷却,为此,最重要的是要保持反应堆冷却剂系统压力边界的完整性,这既可防止冷却剂流失,也可避免引起冷却效率降低。在防止放射性物质释放方面,完整的压力边界和安全壳又是燃料元件包壳的补充措施,因而,使事故概率及其后果减到最小。

核电厂正常运行中,还会产生气、液、固态放射性废物,由于采取了必要措施,可以满足国家标准的要求,也只有在符合国家标准的情况下才允许排放。

中子和射线对反应堆内部构件及其他材料的活化,使核电厂一回路及其辅助系统,不论在核电厂运行或停闭期间,都会有较强的放射性,这是核电厂显著的特点之一。

(3) 相当可观的剩余释热

堆芯剩余释热是指反应堆停堆后堆芯内的释热。它由两部分组成:一部分是剩余裂变发热;另一部分是衰变热。停堆后反应堆内相应于剩余释热的功率被称为剩余功率。

剩余裂变发热 停堆后,剩余中子继续引起裂变,从而导致反应堆继续发热。剩余中子包括瞬发中子和缓发中子。瞬发中子贡献部分通常随时间衰减得非常快,缓发中子部分起主要作用。

衰变热 衰变热包括裂变产物和中子俘获反应产物的放射性衰变释放出的热量。

从上述讨论可知,在反应堆停闭后,堆芯不能立即停止冷却或快速将反应堆冷却到要求的温度以下,而是必须继续冷却一定的时间,这也正是为什么在反应堆冷却剂泵电机轴上设有一大的惯性飞轮的缘故。在核电厂停堆换料期间,也不能停止冷却,否则会因衰变热引起冷却剂沸腾甚至燃料元件过热而被烧毁。为此,核电厂不仅设有反应堆冷却剂系统,而且设有余热排出系统。

(4) 核电厂系统、设备复杂

一座大型核电厂约有 250 个系统,其中又分完全与质量和核安全相关系统,部分与质量和核安全相关系统以及与质量相关和无关系统等。设备中仅阀门就约有 40 000 只左右(美国西屋公司设计的现役核电站),而相同规模的化石燃料电厂则只有 4 000 只左右,且多为手动;核电厂正常运行瞬变比化石燃料电厂要快得多,因而使得操纵人员驾驭核电厂顺利渡过瞬变更困难;压水堆核电厂反应堆冷却剂系统含有硼,频繁的负荷变化势必造成繁杂的操作和废水量增加;核电厂投资比化石燃料电厂高,而单位电价中核燃料所占比例又远比化石燃料低。因此,目前的核电厂多为带基本负荷即按满功率运行。随着机组容量增大和电网内核电机组的增多,带基本负荷已不能满足一些电网要求,因而根据电网需求,也有一些核电机组,设计成按 3-12-3-6 或 2-12-2-8 的方式运行(即用 3 h 将核电厂功率从 50% 提升到 100%,以 100% 功率运行 12 h,然后用 3 h 将核电厂功率降到 50%,以 50% 功率运行 6 h。其他类同)。

(5) 使用饱和蒸汽

绝大多数核电厂使用饱和蒸汽,而现代化石燃料电厂使用过热蒸汽。由于饱和蒸汽的热焓比过热蒸汽低,因而相同规模的核电厂使用的蒸汽管道、汽轮机、调节阀门等的尺寸都比较大,其运行特点也有所不同。

1.1.2 压水堆核电厂与研究堆的比较

(1) 研究堆的特点

① 运行时堆功率的恒值调节

由于这种类型的热能不被利用,因此从功率调节的意义来说它没有负荷。堆内的辐照材料器件与试验装置对反应堆来说没有反馈,是稳定功率运行的。所以,研究堆的功率调节比核电厂简单得多,改变功率后重新稳定也快得多(铀氢锆脉冲堆除外)。

② 系统简单、运行操作方便

由于大多数研究堆规模小、系统数量少且简单,并在低温低压下运行,功率低又不带外部负荷,所以,反应堆的启动、停闭操作简单方便。

③ 堆功率的不固定以及反应性的经常变化

研究堆主要用于试验研究或兼用于同位素辐照等,所以运行功率要兼顾诸方面的要求。一般情况下,试验研究要求堆功率开得尽量低,运行时间尽量短,只要满足要求即可。研究堆总是间断性运行的,所以其中某些反应性变化例如毒性呈现一种周期性变化。“碘坑”中启动,对研究堆来说是常见的。对多用途的研究堆在一个开堆周期中,要经常向堆芯取放辐照件,每次都会引起反应性的变化。对于一些反应性变化较大的操作,是在停堆时进行的。



(2) 压水堆核电厂与研究堆运行的不同之处

① 压水堆核电厂运行有汽轮机快速降负荷功能,而研究堆没有快速降负荷功能。

由于核电厂不仅有核岛(主要包括一回路)部分,还包括一个完整的常规岛(主要包括二回路)部分,系统多而复杂,从冷停堆到热态零功率,需要经过比较长时间的加热升温过程(包括在稳压器内建立汽腔)。因此,在核电厂运行中,不希望且尽量避免紧急停堆,既保证了反应堆安全,又能提供合格的电力。核电厂的反应堆保护系统还设计成,一旦运行到接近危及安全运行工况的指示信号,该系统除了触发警告信号以外,还能防止自动提升控制棒(停棒),同时触发汽轮机快速降负荷,从而使反应堆的功率下降。这样就避免和尽量减少不必要的停堆次数,缓解了保证反应堆安全与减少核电厂停堆的矛盾。

在压水堆核电厂中,一回路和二回路均可以引起汽轮机快速降负荷。一回路引起汽轮机快速降负荷有两种情况:一种发生在超温 ΔT 值比其事故保护停堆值低 3% 时;另一种是发生在超功率 ΔT 值比其事故保护停堆值低 3% 时。二回路引起的汽轮机快速降负荷在此不再介绍。

当反应堆保护系统接到汽轮机快速降负荷信号时,汽轮机将以 200%FP/min 的负荷变化率快速降负荷,持续 1.5 s(即下降了 5%FP),等待 28.5 s 后,如果信号依然存在,则再次快速降负荷 5%FP,直至信号消失为止。

② 载硼运行是压水堆核电厂运行的一个重要特点,一般研究堆都不采用硼溶液来控制反应堆。

载硼运行可以带来很多好处,首先通过载硼运行可以控制较大的反应性,满足反应堆长时间运行的需求,如燃耗、裂变产物的积累等;其次通过硼浓度的调节,可以使反应堆内的控制棒仅留下调节棒组,有利于通量分布的改善,提高了运行的安全性和经济性;通过载硼运行,可以减少控制棒的数目,减少了压力容器顶部的开孔数目,提高了压力的安全性;当反应堆停闭后,为了保证有足够的停堆深度,避免反应堆重返临界,可以通过注硼的方式来实现。

当然,载硼运行也会带来一些问题,首先增加了系统的复杂性,由于载硼运行使压水堆核电厂设置了一个内容庞大的一回路辅助系统,即化学和容积控制系统,增加了核电厂运行的复杂性;其次,硼浓度过高可能会导致慢化剂温度系数为正值,这对核电厂运行安全是十分不利的,为保证核电厂的安全运行,必须保证慢化剂温度系数为负值,因此,在核电厂运行技术规格书中有明确要求,临界时慢化剂中的硼浓度不能超过规定值(一般为 1 300~1 400 ppm^①),同时规定了最低临界温度;硼浓度的调节是一个较为缓慢的过程,可以跟踪负荷的缓慢变化,对于快速的负荷变化,则需要控制棒来调节,在硼浓度的调节过程中必然也会增加废物量。

1.2 核电厂工况分类

在压水堆核电厂最终安全分析报告中的第 15 章事故分析中,通常包括几种瞬态和事故分析。所分析的事件分为四类,即工况 I——正常运行和运行瞬态、工况 II——中等频度事

^① ppm=10⁻⁶。

件、工况Ⅲ——稀有事件、工况Ⅳ——极限事故,下面依次对其进行讨论。

1.2.1 正常运行和运行瞬态

正常运行是指在核电厂功率运行、燃料更换、维修过程中频繁发生的事件。

典型的事件有:

(1) 稳态和停堆运行

- 功率运行满功率
- 启动或热备用
- 热停堆
- 换料停堆

(2) 带有允许偏差运行

核电厂在连续运行期间,可能发生超出设计定值但仍处于核电厂技术规格书允许范围的各种偏差,如:

- 某些系统或部件不能工作
- 燃料元件包壳有缺陷
- 反应堆冷却剂中的放射性活度偏高(主要是由裂变产物、腐蚀产物、氡等引起的)
- 蒸汽发生器有泄漏,但没有达到技术规范允许的最大值
- 技术规格书中允许在运行过程中做的试验

(3) 运行试验

- 核电厂升温和降温
- 负荷阶跃变化
- 负荷线性变化
- 甩负荷

1.2.2 中等频度事件

这类事件在最坏的情况下,会使反应堆紧急停堆,但核电厂能很快恢复运行,不会扩展并引起更严重的事件,如燃料元件棒损坏或反应堆冷却剂系统超压等。下列事件属于此类事件:

- 引起给水温度下降的给水系统失灵
- 引起给水流量增加的给水系统失灵
- 二回路蒸汽流量过度增加
- 主蒸汽系统事故卸压
- 外部负荷丧失
- 汽轮机跳闸
- 主蒸汽隔离阀意外关闭
- 凝汽器真空丧失及其他导致汽轮机跳闸的事件
- 核电厂辅助设备非应急交流电源丧失
- 正常给水流量丧失
- 反应堆冷却剂强迫流量部分丧失