

高等教育试用教材

压水堆核电厂的运行

朱继洲 主编

濮继龙 主审

原子能出版社

北 京

前 言

本书根据高等学校核反应堆工程专业教材编审委员会于1988年8月在哈尔滨召开的教材会议的决定和审定的大纲编写,经1992年7月在北京召开的审稿会讨论修改定稿。

本书的初稿可以追溯到1982年8月由原子能出版社作为专著出版的《压水堆核电站的运行》,该书由朱继洲、俞保安编写,符德璠审定,在我国核电的起步阶段,首次系统地介绍了现代大型压水堆核电厂及其运行中的基本问题,各教学、科研、生产单位使用后反映良好,西安交通大学核能与热能工程专业选作核电厂系统与调试课程教材,中国核动力研究设计院,广东核电合营有限公司选用为核电厂基础知识培训教材。为更好地适应我国核动力事业发展的需要,核反应堆工程专业教材编委会,原核工业部教育司决定改版作为高等学校教材。

在制定本书改版编写大纲过程中,在原核工业部教育司、原子能出版社大力支持下,广泛征求意见后,编者按照教材内容要注重科学性、系统性,取材要适当反映科学技术新成就,注意更新的原则,对原书各章进行了调整、删改或增补。例如:在以一定篇幅介绍现代大型压水堆核电厂主、辅系统及其主要设备的功能、组成的基础上,分述其运行时可能产生的问题;原书偏重于压水反应堆的运行,新版中加强了对二回路主、辅系统及其运行的阐述,使读者对压水堆型核动力厂的运行有全面的了解;全面加强与突出了压水堆核电厂运行的有关内容:如压水堆核电厂标准运行状态的定义与过渡、核电厂基荷运行与调峰(跟负荷)运行及其保护图、应急计划与事故下应急运行、恒定轴向偏移下的功率运行、核电厂运行状态的监测等;还增加了三里岛核电厂、切尔诺贝利核电厂事故后的反事故措施,以及国际核事件等级表的介绍等。考虑到我国已确定采用单个环路电功率300 MW为压水堆核电设备国产化的方案和以广东大亚湾核电厂为参考电厂,本教材取材以类似广东大亚湾核电厂900-1000 MW级现代大型压水堆核电厂为主,并注意反映我国核电建设的成果和进展。

本书在介绍压水堆核电厂一、二回路主辅系统、专设安全设施及上述系统主要设备的功能、组成,运行原理的基础上,重点论述压水堆核电厂的调试启动、正常运行与维护、事故时的安全性和运行管理等方面的基本问题,内容广泛、丰富,取材新颖,包含了当前核电技术新的发展和成就。可作为高等学校核能与热能工程专业,核反应堆工程专业、核动力装置专业本科教材,也可供上述专业研究生及从事压水堆核电厂设计、设备制造与安装、调试、运行维护或管理等科技人员参考。

本书由西安交通大学朱继洲编著。周士荣及原参编者俞保安(因已调动工作)提供了部分资料。

本书承濮继龙审定。在确定改版编写大纲时,核工业总公司核电局曹关平,广东核电合营有限公司周展麟、濮继龙,清华大学郑福裕,上海核工程研究设计院陈生林,秦山核电站钱剑秋,苏州热工研究所胡必利,核动力运行研究所张禄庆对改版工作给予热情支持和鼓励,提出了很多宝贵的意见。清华大学郑福裕、张达芳,国家核安全局林诚格,核工业总公司科技司陈世齐、核电局邵向业、教育培训部贺兴章,秦山核电公司孙光弟,广东核电合营有限公司沈俊雄、濮继龙,原子能出版社柴芳蓉参加了1992年7月的北京审稿会,并提出了很多有益的修改意见。1997年列入教材出版计划,本书正式付印之前,在广东核电合营有限公司濮继龙的组织下,公司培训中心的张忆柏、邱斌、杨辉玉、苏林森、万安泰,对全书作了全面仔细校阅,纠正

了若干疏漏和不确之处。当本书出版的时候,作者谨对以上付出艰辛劳动并对作者一贯给予关怀和支持的同志们表示深切的谢意。

在本教材编写、试用过程中,还曾得到广东大亚湾核电站培训中心李振亚、刘革新等的帮助与支持,也向他们表示谢意。

本书涉及的学科领域广泛,由于作者学识水平有限,实践经验不足,书中难免有不妥之处,殷切希望使用本教材的高等学校师生及各研究、设计、生产单位的广大读者,专家学者给予批评和指正。

编 著

二〇〇〇年五月

目 录

第一章 绪 论	(1)
1.1 世界核电的发展	(1)
1.2 核电厂的经济性与安全性	(3)
1.2.1 核电厂的经济性	(3)
1.2.2 核电厂的安全性	(5)
1.3 核电厂运行的特点	(7)
1.4 压水堆核电厂的组成	(8)
1.5 我国核电的起步和发展前景	(9)
第二章 压水堆核电厂一回路主系统和设备	(11)
2.1 一回路主系统	(11)
2.2 压水反应堆	(13)
2.2.1 压水堆堆芯	(13)
2.2.1.1 概 述	(13)
2.2.1.2 燃料组件	(15)
2.2.1.3 控制棒组件	(18)
2.2.1.4 可燃毒物组件、阻力塞组件和中子源组件	(19)
2.2.2 下部堆内构件	(20)
2.2.3 上部堆内构件	(22)
2.2.4 压力容器	(22)
2.2.5 控制棒驱动机构	(25)
2.2.6 运行中的问题	(26)
2.2.6.1 压力容器泄漏的探测	(26)
2.2.6.2 压力—温度运行曲线	(29)
2.2.6.3 压力容器水位的监测	(31)
2.2.7 压水堆主要特性	(31)
2.3 蒸汽发生器	(33)
2.3.1 蒸汽发生器的描述	(33)
2.3.2 蒸汽发生器的运行原理	(36)
2.3.3 蒸汽发生器的运行	(36)
2.3.4 蒸汽发生器的主要参数	(38)
2.3.5 直流式蒸汽发生器	(38)
2.4 冷却剂泵(主泵)	(39)
2.4.1 冷却剂泵的描述	(40)
2.4.2 冷却剂泵的运行	(43)
2.5 稳压器	(45)
2.5.1 稳压器的描述	(45)
2.5.2 稳压器卸压箱	(49)
2.5.3 稳压器的运行	(49)

2.6 一回路的运行	(53)
2.6.1 一回路运行时参数的测量	(53)
2.6.2 松动部件的监测	(55)
2.6.2.1 松动部件声监测系统	(55)
2.6.2.2 松动部件声监测系统的投运	(56)
第三章 压水堆核电厂一回路的主要辅助系统	(57)
3.1 化学和容积控制系统	(57)
3.1.1 系统的功能	(57)
3.1.2 系统的描述	(57)
3.1.3 系统的运行	(61)
3.2 余热排出系统	(64)
3.2.1 系统的功能	(64)
3.2.2 系统的描述	(64)
3.2.3 系统的运行	(65)
3.3 设备冷却水系统	(66)
3.3.1 系统的功能	(66)
3.3.2 系统的描述	(66)
3.3.3 系统的运行	(69)
3.4 硼和水补给系统	(69)
3.4.1 系统的功能	(69)
3.4.2 系统的描述	(70)
3.4.3 系统的运行	(71)
3.5 一回路的辅助系统	(72)
第四章 压水堆核电厂二回路系统和设备	(74)
4.1 二回路热力系统	(74)
4.2 核电厂汽轮机工作原理与结构	(76)
4.2.1 汽轮机的工作原理	(76)
4.2.2 冲动式汽轮机	(76)
4.2.3 反动式汽轮机	(76)
4.2.4 轮周功率与轮周效率	(77)
4.2.5 核汽轮机典型结构	(79)
4.2.6 核电厂汽轮机的特点	(81)
4.3 主蒸汽系统	(82)
4.3.1 系统的功能	(82)
4.3.2 系统的描述	(83)
4.3.3 系统的运行	(83)
4.4 汽轮机旁路系统	(86)
4.4.1 系统的功能	(86)
4.4.2 系统的描述	(86)
4.4.3 系统的运行	(88)
4.5 汽水分离再热器系统	(89)
4.5.1 系统的功能	(89)
4.5.2 系统的描述	(89)

4.6 汽轮机轴封系统	(91)
4.6.1 系统的功能	(91)
4.6.2 系统的描述	(91)
4.6.3 系统的运行	(93)
第五章 压水堆核电厂二回路凝结水系统及给水系统	(94)
5.1 凝结水抽取系统	(94)
5.1.1 系统的功能	(94)
5.1.2 系统的描述	(94)
5.1.3 系统的运行	(96)
5.2 给水回热系统	(96)
5.2.1 系统的功能	(96)
5.2.2 系统的描述	(96)
5.2.3 系统的运行	(98)
5.3 给水除气器系统	(99)
5.3.1 系统的功能	(99)
5.3.2 系统的描述	(99)
5.3.3 系统的运行	(100)
5.4 主给水系统	(101)
5.4.1 系统的功能	(101)
5.4.2 系统的描述	(101)
5.4.3 系统的运行	(102)
5.5 蒸汽发生器排污系统	(103)
5.5.1 系统的功能	(103)
5.5.2 系统的描述	(103)
5.5.3 系统的运行	(104)
第六章 压水堆核电厂的专设安全设施	(106)
6.1 安全注射系统	(106)
6.1.1 系统的功能	(106)
6.1.2 高压注射管系	(106)
6.1.3 蓄压注射管系	(106)
6.1.4 低压注射管系	(107)
6.1.5 安全注射系统的运行	(108)
6.1.6 安全注射系统的试验和监测	(110)
6.2 安全壳	(111)
6.2.1 安全壳型式	(111)
6.2.2 安全壳贯穿件	(113)
6.2.3 安全壳的隔离与检验	(114)
6.2.4 安全壳的附属系统	(114)
6.3 安全壳喷淋系统	(115)
6.3.1 系统的功能	(115)
6.3.2 系统的描述	(115)
6.3.3 系统的运行	(116)
6.4 蒸汽发生器辅助给水系统	(117)

6.4.1	系统的功能	(117)
6.4.2	系统的描述	(117)
6.4.3	系统的运行	(119)
第七章	压水堆核电站的控制、保护和检测系统	(121)
7.1	压水堆堆外检测系统	(121)
7.1.1	堆外中子注量率测量	(121)
7.1.2	堆外核测系统的运行	(125)
7.1.3	堆外热工参数测量系统	(125)
7.2	压水堆堆内检测系统	(126)
7.2.1	堆内中子注量率测量	(126)
7.2.2	堆芯温度测量	(129)
7.2.3	压力容器水位测量系统	(129)
7.2.4	系统的运行	(131)
7.3	压水堆控制调节系统	(132)
7.3.1	功率调节系统	(133)
7.3.2	冷却剂平均温度调节系统	(135)
7.3.3	稳压器压力调节系统	(135)
7.3.4	稳压器水位控制系统	(136)
7.3.5	蒸汽发生器水位控制系统	(138)
7.3.6	蒸汽排放控制系统	(138)
7.4	压水堆保护系统	(138)
7.4.1	反应堆保护的目与措施	(139)
7.4.2	反应堆保护系统的设计原则	(141)
7.4.3	事故停堆线路	(142)
7.4.4	专设安全设施驱动线路	(144)
7.4.5	联锁系统	(145)
第八章	压水堆核电站汽轮机调节保护系统	(148)
8.1	汽轮机调节系统	(148)
8.1.1	系统的功能	(148)
8.1.2	系统的描述与运行	(148)
8.2	汽轮机保护系统	(149)
8.2.1	系统的功能	(149)
8.2.2	系统的描述	(149)
8.2.3	系统的运行	(151)
8.3	汽轮机润滑、顶轴和盘车系统	(152)
8.3.1	系统的功能	(152)
8.3.2	系统的描述	(152)
8.3.3	系统的运行	(152)
8.4	凝汽器真空系统	(154)
8.4.1	系统的功能	(154)
8.4.2	系统的描述	(154)
8.4.3	系统的运行	(154)
第九章	压水堆核电站发电机及其辅助系统	(156)

9.1 发电机	(156)
9.1.1 转子	(156)
9.1.2 定子	(156)
9.2 发电机定子线圈冷却水系统	(156)
9.2.1 系统的功能	(156)
9.2.2 系统的描述	(156)
9.2.3 系统的运行	(159)
9.3 发电机氢气供应、冷却系统	(159)
9.3.1 系统的功能	(159)
9.3.2 系统的描述	(159)
9.3.3 系统的运行	(161)
9.4 发电机励磁和电压调节系统	(161)
9.4.1 系统的功能	(161)
9.4.2 系统的描述	(161)
9.4.3 系统的运行	(163)
9.5 发电机和输电保护系统	(164)
9.5.1 系统的功能	(164)
9.5.2 系统的描述和运行	(164)
9.6 厂用电系统	(164)
9.6.1 系统概述	(164)
9.6.2 厂用电负荷分类	(165)
9.6.3 电源分类	(166)
9.6.4 供电方式	(167)
第十章 压水堆核电厂的调试启动	(168)
10.1 调试的主要阶段	(168)
10.2 预运行试验	(169)
10.2.1 管道冲洗	(169)
10.2.2 管道水压试验	(171)
10.2.3 辅助系统的调试	(171)
10.3 系统综合试验	(171)
10.3.1 冷态试验	(171)
10.3.1.1 一回路主系统水压试验	(171)
10.3.1.2 一回路主系统的冷态调试	(172)
10.3.2 热态试验	(172)
10.3.2.1 一回路系统升温升压	(172)
10.3.2.2 冷却剂系统热态性能试验	(172)
10.3.2.3 化学和容积控制系统热态性能试验	(174)
10.3.2.4 汽轮机初始转动试验	(175)
10.3.3 全系统综合试验主要试验项目	(176)
10.3.4 役前检查	(178)
10.3.5 燃料装载前的准备	(178)
10.3.5.1 装换料系统调试	(178)
10.3.5.2 安全壳耐压、泄漏率试验	(178)

10.4 装料、初始临界和低功率试验	(179)
10.4.1 燃料装载	(179)
10.4.1.1 首次装料的准备工作	(179)
10.4.1.2 装料方法	(179)
10.4.1.3 燃料装载安全准则	(181)
10.4.1.4 燃料装载时的临界监督	(181)
10.4.2 临界前试验	(182)
10.4.3 初次临界	(182)
10.4.3.1 初次临界	(182)
10.4.3.2 零功率物理试验功率水平之测定	(184)
10.4.4 低功率物理试验	(184)
10.4.4.1 控制棒价值和硼价值测定	(185)
10.4.4.2 模拟弹棒事故试验	(187)
10.4.4.3 最小停堆深度验证	(188)
10.4.4.4 功率分布测定	(188)
10.4.5 功率试验	(189)
10.4.5.1 二回路热功率测量	(190)
10.4.5.2 功率刻度试验	(192)
10.4.5.3 功率系数测定	(192)
10.4.5.4 带功率工况下慢化剂温度系数测定	(193)
10.4.5.5 蒸汽发生器水分夹带试验	(193)
10.4.5.6 中毒曲线测量	(196)
10.4.5.7 碘坑测量	(198)
10.4.5.8 负荷摆动试验	(198)
10.4.5.9 甩负荷试验	(198)
10.4.5.10 电厂满功率停闭试验	(199)
10.4.6 电厂验收试验	(200)
10.4.6.1 电厂可靠性验证	(200)
10.4.6.2 性能保证值测定	(200)
第十一章 压水堆核电厂的运行与维护	(201)
11.1 压水堆核电厂运行的一般原则	(201)
11.2 压水堆核电厂的标准运行状态	(201)
11.3 正常启动	(203)
11.3.1 初始状态——换料的冷停闭工况	(203)
11.3.2 由冷停闭状态向热备用状态过渡	(205)
11.3.3 趋近临界和临界	(207)
11.3.4 第四阶段——二回路启动	(208)
11.3.5 第五阶段——发电机并网,提升功率	(208)
11.3.6 启动过程中应注意的问题	(208)
11.3.6.1 冷却剂系统压力及升温(冷却)速率的限制	(208)
11.3.6.2 控制反应堆周期,防止发生启动事故	(209)
11.3.6.3 正确估计反应堆的次临界度	(210)
11.3.6.4 控制棒组的插入与抽出极限	(211)

11.4 过渡到功率运行	(211)
11.4.1 热备用状态和功率运行状态	(211)
11.4.2 从热备用状态到功率运行状态的过渡	(212)
11.4.3 汽轮发电机组的升速、并网和升功率	(214)
11.4.4 恒定轴向偏移时的反应堆运行	(214)
11.4.5 核电厂的带基本负荷运行或调峰运行	(218)
11.4.5.1 A 控制模式	(218)
11.4.5.2 A 模式的运行控制	(219)
11.4.5.3 G 控制模式	(220)
11.4.5.4 G 模式的运行控制	(221)
11.4.6 功率运行中的几个问题	(221)
11.4.6.1 冷却剂压力的控制	(221)
11.4.6.2 冷却剂体积的控制	(223)
11.4.6.3 冷却剂硼浓度的控制	(223)
11.4.6.4 蒸汽排放系统的控制	(224)
11.4.6.5 蒸汽发生器给水的控制	(224)
11.5 停闭	(224)
11.5.1 热停闭	(224)
11.5.2 冷停闭	(225)
11.5.3 事故停闭	(226)
11.5.4 压水堆核电厂停闭中的问题	(226)
11.5.4.1 衰变热	(227)
11.5.4.2 氙-135 的累积	(227)
11.6 卸料-装料	(229)
11.6.1 燃料管理	(229)
11.6.2 装卸料及贮存系统	(229)
11.6.3 换料方式	(230)
11.6.4 装换料操作顺序	(231)
11.6.4.1 反应堆压力容器的开启	(232)
11.6.4.2 乏燃料组件运输和取走	(233)
11.6.4.3 新燃料组件的装入	(233)
11.6.4.4 压力容器封闭	(233)
11.7 运行管理	(234)
11.7.1 堆芯的运行管理	(234)
11.7.2 燃料元件破损的检测	(234)
11.7.3 水质管理	(237)
11.7.3.1 一回路冷却剂水质	(237)
11.7.3.2 冷却剂水质的控制	(239)
11.7.4 二回路水质	(239)
11.8 定期试验与检查	(241)
11.8.1 日常维护	(241)
11.8.2 定期试验	(242)
11.8.3 蒸汽发生器传热管的检修	(245)

11.8.4 在役检查	(247)
第十二章 压水堆核电厂的异常运行和事故分析	(251)
12.1 压水堆核电厂的运行工况	(251)
12.1.1 运行工况的分类	(251)
12.1.2 事故工况下应遵守的准则	(252)
12.1.3 超设计基准事故	(253)
12.2 国际核事件等级表	(253)
12.3 反应性事故	(255)
12.3.1 现象与危险	(256)
12.3.2 原因分析	(256)
12.3.3 事故下的保护	(256)
12.3.4 启动时控制棒组件的失控抽出	(257)
12.3.5 功率运行时控制棒组件失控抽出	(259)
12.3.6 硼酸的失控稀释	(261)
12.3.7 一个控制棒组件的弹出	(263)
12.4 蒸汽发生器管子断裂事故	(264)
12.4.1 事故的描述	(264)
12.4.2 事故的起因	(265)
12.4.3 事故的风险	(265)
12.4.4 事故下的保护	(266)
12.5 蒸汽管道破裂事故	(267)
12.5.1 事故的描述	(267)
12.5.2 事故的起因	(268)
12.5.3 事故的风险	(269)
12.5.4 事故下的保护	(269)
12.6 给水管道的破裂事故	(270)
12.6.1 事故的描述	(270)
12.6.2 事故的起因	(271)
12.6.3 事故的风险	(271)
12.6.4 事故下的保护	(271)
12.7 失水事故	(272)
12.7.1 事故的描述	(272)
12.7.2 事故的起因	(276)
12.7.3 事故的风险	(276)
12.7.4 事故下的保护	(277)
12.8 事故时未能紧急停堆的预期瞬态	(277)
12.8.1 事故的描述	(277)
12.8.2 事故的后果	(279)
12.9 超设计基准事故的防止和缓解	(279)
12.9.1 事故的描述	(279)
12.9.2 事故的防止和缓解	(279)
第十三章 压水堆核电厂射线的防护及三废处理	(281)
13.1 压水堆核电厂的核辐射	(281)

13.1.1	安全壳内辐射源	(281)
13.1.2	安全壳外辐射源	(281)
13.2	核电厂核辐射的防护	(282)
13.2.1	各类核辐射的不同效应	(282)
13.2.2	辐射防护的目的和原则	(282)
13.2.3	年剂量当量限值	(282)
13.2.4	正常运行期间的核辐射防护	(284)
13.2.5	事故时的核辐射防护	(285)
13.2.5.1	事故工况下的辐射源	(285)
13.2.5.2	事故的防护	(286)
13.3	核电厂的屏蔽	(286)
13.4	核电厂放射性废物的处理	(288)
13.4.1	硼的回收	(288)
13.4.1.1	硼回收系统的工作原理	(288)
13.4.1.2	硼回收系统的运行	(290)
13.4.2	放射性废气的处理	(290)
13.4.2.1	废气的来源	(290)
13.4.2.2	含氢废气的处理	(291)
13.4.2.3	含氧废气的处理	(291)
13.4.3	放射性废液的处理	(293)
13.4.3.1	放射性废液的来源	(293)
13.4.3.2	废液处理系统的描述	(293)
13.4.4	放射性固体废物的处理	(294)
13.4.4.1	放射性固体废物的来源与种类	(294)
13.4.4.2	放射性固体废物的处理	(295)
13.5	压水堆核电厂对环境的影响	(297)
13.5.1	正常运行时核电厂对环境的影响	(297)
13.5.2	事故时核电厂对环境的影响	(297)
第十四章	压水堆核电厂安全运行和管理	(300)
14.1	核电厂的安全审评和安全监督	(300)
14.2	运行限值和条件	(301)
14.3	正常运行规程	(303)
14.4	事故处理规程	(304)
14.5	核电厂安全状态的监测——安全参数显示系统	(304)
14.6	应急计划和准备	(306)
14.7	运行的质量保证	(307)
14.8	核电厂的组织机构	(308)
14.9	核电厂运行人员的资格和培训	(309)
14.9.1	核电厂运行人员的作用	(309)
14.9.2	运行人员的资格	(311)
14.9.3	运行人员的培训	(311)
14.9.4	运行人员的管理:考核与授权	(312)
参考文献		(314)

附录一 主要符号表 (315)

附录二 单位换算表 (317)

附录三 压水堆核电厂系统、设备名称(中、英、法) (319)

第一章 绪 论

1.1 世界核电的发展

从核裂变发现到现在,只有 50 多年的历史,然而核能工业不论在军事方面,还是民用方面,发展速度都是非常快的。其中,核电的开发和利用,虽然在第二次世界大战期间无力顾及,战后特别是 60 年代一些国家出现能源危机之后,却迅速发展起来。1942 年,第一座反应堆达到临界,1954 年,前苏联奥布宁斯克 5000 kW 试验核电厂建成。在 20 世纪,世界核电的发展大致经历了三个时期:

50 年代到 60 年代。美国、前苏联、英国、法国等几个工业先进国家,致力于各种类型反应堆的研究、试验,探索各种建堆方案,建造了若干种原型核电厂;

60 年代到 70 年代中期。美国从 60 年代中期起,除大力发展本国核电外,开始向欧洲、日本及一些发展中国家输出核电技术;法国遵循压水堆标准化技术路线,以及由于政府的重视和大力支持,发展迅速,到 1980 年,跃居世界核发电量第二的国家;前苏联、原联邦德国、日本、加拿大、比利时、瑞典等国也相继发展和建造了本国的核电厂。

进入 80 年代以后,世界核电发展的步伐明显变缓,1979 年发生的三里岛事故和 1986 年发生的切尔诺贝利事故,对若干国家的核能政策产生了一些影响,然而,这些影响主要是促进各国更加注重于核电的安全管理,更加注重于核电的经济竞争力。核电的发展仍然是肯定的。世界各国中,日本、俄罗斯,以及一些发展中国家(或地区)仍在推行其颇有活力的核能计划。日本目前约有 53 座核电厂在运行,核发电量份额已达到 36%(1986 年为 24.7%),核电机组平均容量因子高达 73.4%,日本计划在 21 世纪 30 年代,将核发电量提高四倍,达到 137 GW,以提供约 58% 的电力需要。俄罗斯在切尔诺贝利事故后仍坚持其核电发展计划,计划在本世纪末使其核发电量比例达到 30%。由于资金和技术等方面的困难,发展中国家或地区的核电机组较少,而且集中于少数国家和地区。随着这些国家和地区(特别是亚洲、太平洋地区)经济的飞速发展,不少发展中国家已对开发利用核能表现出极大兴趣。

我国是一个多种能源资源都很丰富的国家,但是一次能源资源的地域分配很不均匀,因而我国政府制定了适当发展核能的政策。到 1999 年为止,我国已有两个核电厂投入商业运行(不包括台湾地区),秦山核电站(1 座压水堆,300 MW)在浙江省,大亚湾核电站(2 座压水堆,2×984 MW)在广东省深圳市,在建核电厂四个;台湾地区有 6 个核电厂在运行,2 个核电厂在建,截止 1999 年底,核发电量 36.9TW·h 占总发电量 25.32%。

近年来,根据世界各国经济建设和社会发展形势预测,由于能源资源缺乏和温室效应使全球变暖的威胁,加上核动力所具有的有益于环境保护的明显优势,将导致核动力工业的复兴。核能作为先进能源的一种,必将在满足未来能源的需求中,起重要的作用。

表 1-1 给出截止 1999 年底世界主要国家和地区的核电情况。全世界共有 31 个国家和地区拥有 436 座运行中的核电厂,总装机容量为 351 GW,世界核发电量已占总发电量的 17% 以

上,其中,法国、立陶宛的核发电份额已达到或接近 75%,美国仍然是世界上运行核电厂数目最多(约 104 座)和核电装机容量最大(接近 100 GW)的国家。

表 1-1 世界核电现状
(截止 1999 年底)

国家或地区	运行中的反应堆		在建中的反应堆		1999 年核发电量		截止 1999 年底总的运行经验	
	机组	MW	机组	MW	TW·h	占总发电量%	年	月
阿根廷	2	935	1	692	6.59	9.04	42	7
亚美尼亚	1	376			2.08	36.36	32	3
比利时	7	5712			46.6	57.74	163	7
巴西	1	626	1	1229	3.98	1.32	17	9
保加利亚	6	3538			14.53	47.12	107	2
加拿大	14	9998			70.4*	12.7*	419	2
中国**	3	2167	7	5420	14.1	1.15	20	5
捷克	4	1648	2	1824	13.36	20.77	54	8
芬兰	4	2656			22.07	33.05	83	4
法国	59	63103			375	75	1110	2
德国	20	22282			160.4	31.21	590	7
匈牙利	4	1729			14.1	38.3	58	2
印度	11	1897	3	606	11.45	2.65	169	2
伊朗			2	2111				
日本	53	43691	4	4525	306.9*	36*	909	8
韩国	16	12990	4	3820	97.82	42.84	153	1
立陶宛	2	2370			9.86	73.11	28	6
墨西哥	2	1308			9.56	4.98	15	11
荷兰	1	449			3.4	4.02	55	0
巴基斯坦	1	125	1	300	0.69	1.2	28	6
罗马尼亚	1	650	1	650	4.81	10.69	36	
俄罗斯	29	19843	4	3375	110.91	14.41	642	6
南非	2	1842			13.47	7.41*	30	3
斯洛伐克	6	2408	2	776	13.12	47.02	79	0
斯洛文尼亚	1	632			4.49	36.23*	18	3
西班牙	9	7470			56.47	30.99	183	2
瑞典	11	9432			70.1	46.8	267	2
瑞士	5	3079			23.52	36.03	123	10
英国	35	12968			91.19	28.87	1203	4
乌克兰	16	13765	4	3800	67.35	43.77	238	1
美国	104	97145			719.4*	19.54*	2455	8
总计	436	351718	38	31718	2394.63		9414	3

* 表示估计值

** 台湾地区有 6 座机组在运行,5144 MW,1999 年底核发电量为 36.9TW·h,占总发电量 25.32%;2 座机组在建(2×1350MW)

取自《国外核信息》45 期(总 1053 期)
2000 年 3 月 13 日

表 1-2 给出核电厂各种堆型发电份额的比较

表 1-2 世界核电厂各种堆型的发电份额

堆型	占总核发电比例%
压水堆	58.4
沸水堆	21.6
石墨轻水堆	3.3
气冷堆	7.9
重水堆	6.8
快堆	1.0
其它	1.0

从表 1-2 可以看出,世界上大多数国家的核电厂建设压水堆占了多数,我国已建成的秦山核电站,广东大亚湾核电站和计划中的核电设备国产化也选择压水堆型,是由于以下几个原因:

1. 压水堆以轻水作慢化剂及冷却剂,反应堆体积小,建设周期短,造价较低。

2. 压水堆采用低富集度铀作燃料,铀的浓缩技术已经过关。

3. 压水堆核电厂有放射性的一回路系统与二回路系统相分开,放射性冷却剂不会进入二回路而污染汽轮机,运行、维护方便;需要处理的放射性废气、废水、废物量较少。

为了进一步提高核电厂的安全可靠性,目前压水堆核电厂设计中,不断增加安全设施,导致系统过于复杂化,从而造成经济规模过大,投资过高与建设周期过长等一系列弱点。当前,各国正致力于改进堆型和新一代反应堆的开发,其中,先进压水堆(APWR)和先进沸水堆(ABWR)的研究已在美、日之间开展数年,希望在现有轻水堆基础上发展为发电成本更低,安全可靠性更高的核电厂。瑞典提出了过程固有安全反应堆(PIUS)的概念设计。核燃料的经济利用和实现增殖是开发新一代动力堆的主要目标,法国、瑞典、日本、加拿大以及我国都正在积极开展高温气冷堆、钠冷快中子增殖堆等先进堆型的开发研究。

1.2 核电厂的经济性与安全性

1.2.1 核电厂的经济性

世界核电的发展,已节约了大量的能源。据美国一位能源分析专家利用计算机模型对世界电力供应情况逐年分析的结果表明,自 1973 年到 1987 年,由于利用核能就节约了 117 亿桶石油,4200 亿 m^3 天然气和 15 亿 t 的煤,合计价值为 4940 亿美元,现在全世界由于核电厂的运行每天可取代 600 万桶石油,核电发展对环境保护也起着巨大的作用,由于核电厂几乎不排出与环境问题有关的二氧化碳、二氧化硫及氮氧化物等,它对控制温室效应和酸雨现象及维持生态平衡已作出了贡献。如果把世界上现有核电都用煤电替代的话,仅 1990 年 1 年就得多释放 17 亿 t 的二氧化碳,2500 万 t 二氧化硫和 120 万 t 的二氧化氮。

核能发电不仅在资源上和环境上有优势,在经济上也是有竞争力的。核电一开始最基本的吸引力在于同燃煤、燃油和燃气电厂相比其燃料费用较低。据经济合作与发展组织(OECD)对其成员国的估计,把铀的加工、浓缩并制造成燃料元件的费用考虑在内,核电厂的总燃料费用也大约只是燃煤电厂燃料费用的三分之一,是燃气联合循环发电厂的四分之一到五分之一。

应该指出的是,由于过去十年内化石燃料价格的下跌,已经使得核电的早期成本优势受到影响。核电将来的竞争能力,将取决于煤电可能增加的额外费用。因为,化石燃料电厂的实际成本应该加上为达到减少二氧化硫和温室效应气体的排放目标而增加的费用。据 OECD 预计,在目前的法规体系下,核电仍然可保持对化石燃料电厂的经济竞争能力,除了可直接获得低价化石燃料的地区(如澳大利亚,其燃煤电厂靠近矿区和主要人口居住中心)。

最近的 OECD 比较研究显示,若贴现率按 5% 计,13 个国家中有 7 个国家认为核电将是 2010 年投运的基本负荷容量电站的首选,见下表。若贴现率按 10% 计,只有在法国、俄罗斯和中国,核电仍会优于煤电。

一项 1997 年的欧洲电力工业研究,比较了 2005 年投运的用于基本负荷的核电站、燃煤电站和燃气电站的发电成本,见表 1-3。若贴现率按 5% 计,核电的发电成本(主要是法国和西班牙)是 3.46UScents/kW·h,比除了低价燃气发电方案外的所有其它电价要便宜。若贴现率按 10% 计,核电的发电成本是 5.07UScents/kW·h,比除了高价燃气发电方案外的所有其它电价要贵。

表 1-3 2005-2010 年的发电成本预测比较(单位:UScents/kW·h)

国家	核电	燃煤	燃气
法国	3.22	4.64	4.74
俄罗斯	2.69	4.63	3.54
日本	5.75	5.58	7.91
韩国	3.07	3.44	4.25
西班牙	4.10	4.22	4.79
美国	3.33	2.48	2.33-2.71
加拿大	2.47-2.96	2.92	3.00
中国	2.54-3.08	3.18	—

核电的一个重要方面是它与一个国家的国际收支平衡情况的关系。正如上面所提到的,核电厂与化石燃料电厂相比建设资金需求要大得多,而化石燃料电厂的燃料费用相对来说要高得多。因此对于某些国家,比如日本或法国,就存在着是进口大量的燃料(发展煤电)还是在本国花大量资金(发展核电)这两者之间的选择,要做这种选择很大程度上取决于本国外汇储备基础,而不是简单地考虑发电成本。

在这种情况下,发展核电对于刺激本国工业有很大的影响,同时可减少长期从国外进口燃料。例如,在日本,新的燃煤电厂与核电厂(燃料是成本相对较低的铀)相比,燃煤电厂的生存要受制于进口燃料价格的上涨,因而在外汇储备量消耗上将遭到更严峻的挑战。

核电的另一个特点是有较高的负荷因子,负荷因子是电厂经济性能的一个很好度量,尽可能连续地运行不仅出自经济方面的需要,也是技术上的需求,核电厂能有相对较高的负荷因子说明核电技术已经成熟。

表 1-4 是部分国家核电负荷因子值。