

压水堆核电站的运行

朱继洲 俞保安 编
符德璠 审

原子能出版社

内 容 简 介

在世界范围内,核能发电事业正在迅速发展。压水堆核电站是技术上成熟、经济上有竞争能力、工业上已大规模推广的一种堆型,在已投产核电站的总容量中,压水堆占百分之五十以上。

本书系统地介绍了压水堆核电站运行的一些基本问题。全书分七章。第一章概略介绍现代大型压水堆的本体结构;第二、三章是压水堆核电站一、二回路系统和设备,控制、安保和检测系统的描述;第四、五章根据典型电站的运行经验,阐述压水堆核电站的调试启动步骤,和各种运行工况(正常启动、功率运行、停闭、维修和换料等)下的有关问题;第六章是对压水堆核电站安全性的评价及典型事故分析;第七章介绍压水堆核电站放射线的防护及放射性废气、废水和废物的处理。

本书可供高等院校核动力工程专业学生学习有关课程时使用,也可供核电站运行、建造人员和有关科技人员参考。

压水堆核电站的运行

朱继洲 俞保安 编

符德璠 审

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱)

重庆印制一厂印刷

(枇杷山后街 85 号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787\times 1092\frac{1}{32}$ ·印张 $11\frac{1}{2}$ ·字数254千字

1982年8月 第一版 1982年8月 第一次印刷

印数 0.001—1.000 ·统一书号: 15175·411

定价: 1.30元

前 言

在世界范围内核能发电事业正在迅速发展。压水堆核电站是技术上成熟、经济上有竞争能力、工业上已大规模推广的一种堆型，在已投产核电站的总容量中，压水堆占百分之五十以上。

压水堆核电站是由许多庞大的设备和复杂的系统组成的。核电站的经济性、可靠性及安全性不仅与设计、制造有关，也有赖于运行中的正确操作以及对所产生的许多物理、热工问题的正确解决。本书从总结国外大型压水堆核电站运行经验着手，对压水堆核电站运行中一些基本问题作较全面的介绍，以适应我国核动力事业发展的需要。

在我们执笔编写本书过程中，得到了电力工业部核电局、第二机械工业部七二八工程设计院等单位及兄弟院校的热情支持与帮助，很多有用的资料是他们提供的。

初稿完成后，张廉、缪鸿兴、陆曙东、杨钧陶、孙永广、曹栋兴、朱铃、王瑞馨、夏国钧、屠传经、贾斗南等同志曾审阅各章，提出了很多宝贵的意见和建议；西安交大乔宗亮、屠传经、尹邦华、牛振东等同志参加了初稿部份章节的编写，我们在此谨致谢意。

本书承符德璠同志仔细审定、在符德璠同志的热情帮助与具体指导下，本书初稿修改工作得以顺利完成。当本书出版时候，我们在此表示深切的谢意。

由于我们的学识水平有限，加之压水堆核电站运行的内容涉及面广，国内外系统论述这方面的书籍，也尚未见到，所以本书一定有不少缺点、错误和不完善的地方，欢迎读者批评指正。

编 者

一九八〇年八月

于西安交通大学

绪 论

从核裂变的发现到现在，只有四十年的历史，然而原子能工业不论在军事方面，还是民用方面，发展速度都是非常之快的。其中核电站的发展虽然在第二次世界大战期间无力顾及，战后特别是六十年代一些国家出现能源危机之后，却迅速发展起来。1942年，第一座核反应堆达到临界；五十年代中期，才有试验性核电站问世；六十年代，几个工业先进国家相继建造了若干原型核电站；而在最近十年来，核电站在技术上趋于成熟、在经济上有竞争能力，获得了迅速发展，达到了工业上大规模推广阶段。据截止一九八一年六月底的统计，全世界已建成的核电站约 257 座，装机容量达一亿五千多万千瓦，进行核能发电的共有二十二个国家和地区；尚有三百多座核电站正在建设或计划建设中，总装机容量达三亿多千瓦。预见到 2000 年，核电站装机容量将达十几亿千瓦，约占当时世界总装机容量的 45% 左右。

核电站之所以能获得迅速发展，主要是以下几方面的原因：

1. 目前，世界上所利用的主要能源是煤、石油、天然气和水力等。煤、石油和天然气是有机燃料，它们的储藏量有限。煤的蕴藏量从已探明的矿藏来估计，只够用上几百年；石油、天然气则在几十年内就有不够用的危险；水力资源也是有限的，且有地区性的限制。一座一百万千瓦的电

站，若采用有机燃料，则每年要烧掉三百万吨的原煤，或一百五十万吨的石油。有机燃料是重要的化工原料，可以用于制造化学纤维、化肥、药品、塑料、农药和合成橡胶，与国民经济各部门的发展和人民生活水平的提高有极密切的关系，因之，从合理利用自然资源和长远发展的角度来看，开发和利用核燃料，发展核电站，提供新的能源，具有重要的意义。

2. 核电站的发电成本在逐年降低。一九七三年开始，主要工业国的核电成本与火电相当，以后随着石油调价，核电技术的逐步成熟和核电设备的标准化，核电成本已低于火电。这是由于核电站的基建投资虽然是同规模火电站的1.5—2倍，但由于核电站的燃料费便宜，所以，美、法、英、西德和加拿大等国的核电成本平均比火电低三分之一左右。一九七六年，美国由于采用核电节省了十四亿美元，相当于节省九千万吨煤或三亿二千五百万桶石油。

3. 核电站占地面积小，核燃料运输和储存方便，一座一百万千瓦电功率的烧煤电站，一年耗原煤达三百万吨以上，需要1000列火车运煤，每天还要产生上千吨的灰渣；而同容量的核电站，一年只需三十到四十吨低浓铀，只需十辆特制卡车运送。

4. 核电站的潜在危险是强放射性裂变产物对环境的污染，但是，由于科学技术的不断发展、对安全问题所给予的足够重视，现代化核电站的设计中一般都采取了严密的而且是多重性的安全保护措施，施工、制造时注意保证质量，运行时严格遵守运行限额和操作规程。从现有核电站已运行了近1200堆-年的记录来看，有的核电站已运行了二十多年，

有的运行了十年以上，还没有发生过一起人员死亡的事故，也没有一座核电站发生过大量的放射性外逸。1979年3月，美国三里岛核电站事件是最严重的一次事故，反应堆堆芯虽有严重的损坏，但是系统终究还是保住了，只有少量放射性气体扩散出去。总之核能发电是一种安全的能源。

目前，在核电站的各种堆型中，以轻水堆（压水堆和沸水堆）、石墨气冷堆和重水堆应用较广，它们都同属热中子堆；快中子增殖堆正在加紧建造实验堆或原型堆，由于它具有增殖核燃料、充分利用核燃料资源的特点，将是未来核动力的基础，是最有潜力的堆型。轻水堆核电站经过二十多年的研究、发展和改进，安全性和经济性都得到了提高，已经实现了大型化、标准化和系列化，达到了作为商业性电站大规模推广应用的阶段。据统计，在已投产的核电站总容量中，轻水堆约占83.3%（其中压水堆占51.3%，沸水堆占32%），气冷堆占8.4%，重水堆占5.4%，其余的为水冷石墨慢化堆、沸腾重水堆和高温堆。

目前，世界上大多数国家的核电站建设以发展轻水堆，特别是压水堆为主，是由于以下几个原因：

1. 轻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. 轻水堆采用低浓缩铀作燃料，铀的浓缩技术已经过关。
3. 压水堆核电站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。

压水堆核电站随着大型化、标准化和系列化，造价逐渐

4
降低，发电成本已低于常规电站；单堆功率已从90万千瓦发展到130万千瓦。

我国有着丰富的煤、石油和水力资源。但在实现四个现代化的新长征中，为了经济、合理地开发和利用能源，在加速建造火电站和水电站的同时，也必须重视核能的研究和利用。核能发电必将在我国逐步发展起来，这是毫无疑问的。

目 录

前言

绪论

第一章 压水堆.....	1
1.1 概 述	1
1.2 压 水 堆	4
1.3 燃 料 组 件	6
1.4 控制棒组件及控制棒驱动机构.....	11
1.4.1 控制棒组件	11
1.4.2 可燃毒物组件、阻力塞组件和中子源组件	13
1.4.3 控制棒驱动机构	15
1.5 压力壳	20
1.6 压水堆主要特性	24
第二章 压水堆核电站的系统和设备	27
2.1 概 述	27
2.2 一回路主 系统	30
2.3 一回路系统主要设备	35
2.3.1 蒸汽发生器	35
2.3.2 冷却剂泵	40
2.3.3 稳压器	44
2.3.4 卸压箱	46
2.4 一回路辅助系统	47
2.4.1 化学和容积控制系统	47
2.4.2 停堆冷却系统	49

2.4.3	安全注入系统	52
2.4.4	压水堆安全壳和喷淋系统	54
2.4.4.1	压水堆安全壳	54
2.4.4.2	安全壳喷淋系统	56
2.4.5	其他辅助系统	58
2.5	二回路系统及 设备	58
2.5.1	系统简介	58
2.5.2	主要设备	61
2.5.2.1	汽轮机	61
2.5.2.2	发电机	65
2.5.2.3	冷凝器	65
2.6	电源系统及厂用电 设备	66
2.6.1	电源系统	66
2.6.2	交流电源	67
2.6.3	直流电源	68
2.6.4	柴油发电机组	68
第三章 压水堆核电站的控制、安全保护和检测		
	系统	70
3.1	概 述	70
3.2	压水堆控制调节 系统	70
3.2.1	压水堆功率调节系统	72
3.2.2	稳压器控制系统	74
3.2.2.1	压力控 制 系 统	74
3.2.2.2	稳压器水位 控 制 系 统	74
3.2.3	蒸汽发生器水位控制系统	75
3.2.4	蒸汽排放控制系统	75
3.3	压水堆安全保 护 系 统	76
3.4	压水堆堆外 检 测 系 统	79

3.5 压水堆堆芯检测系统	82
3.6 放射性监视系统	87
3.6.1 工艺过程放射性辐射的监测	87
3.6.2 区域放射性辐射监测	87
3.7 计算机设备	88
3.7.1 运行数据的处理	89
3.7.2 监视、报警及异常诊断	89
3.7.3 闭环控制	90
第四章 压水堆核电站的调试启动	91
4.1 概述	91
4.2 初步试验	94
4.2.1 系统清洗	94
4.2.2 水压试验	95
4.2.3 辅助系统的调试	95
4.3 全系统综合试验	96
4.3.1 冷态试验	96
4.3.1.1 一回路主系统水压试验	96
4.3.1.2 一回路主系统的冷态调试	97
4.3.2 热态试验	98
4.3.2.1 一回路系统升温升压	98
4.3.2.2 冷却剂系统热态性能试验	100
4.3.2.3 化学和容积控制系统热态性能试验	103
4.3.2.4 汽轮机初始转动试验	104
4.3.3 主要试验项目	107
4.3.4 役前检查	112
4.3.5 燃料装载前的准备	112
4.3.5.1 装换料系统调试	112
4.3.5.2 安全壳耐压、泄漏率试验	112

4.4 启动试验	115
4.4.1 燃料装载	115
4.4.1.1 首次装料的准备工作	115
4.4.1.2 装料方法	115
4.4.1.3 安全准则	118
4.4.1.4 临界监督	118
4.4.2 临界前试验	120
4.4.2.1 控制棒落棒时间测量	120
4.4.2.2 流量下滑试验	124
4.4.3 初次临界试验	126
4.4.3.1 初次临界	126
4.4.3.2 注意的问题	130
4.4.3.3 零功率物理试验功率水平之测定	132
4.4.3.4 反应性测量	132
4.4.3.5 末点硼浓度测定	140
4.4.4 低功率物理试验	141
4.4.4.1 控制棒价值和硼价值测定	142
4.4.4.2 模拟弹棒事故试验	146
4.4.4.3 最小停堆深度验证	148
4.4.4.4 慢化剂温度系数的测定	149
4.4.4.5 功率分布测定	152
4.4.5 功率提升	155
4.4.5.1 二回路热功率测量	155
4.4.5.2 功率刻度试验	160
4.4.5.3 功率系数测定	161
4.4.5.4 带功率工况下慢化剂温度系数测定	163
4.4.5.5 蒸汽发生器水份夹带试验	163
4.4.5.6 中毒曲线测量	167
4.4.5.7 碘坑测量	170

4.4.5.8 负荷摆动试验	171
4.4.5.9 甩负荷试验	172
4.4.5.10 电站满功率停闭试验	173
4.4.6 电站验收试验	175
4.4.6.1 电站可靠性验证	175
4.4.6.2 性能保证值测定	176
第五章 压水堆核电站的运行	178
5.1 概述	178
5.2 压水堆核电站的正常启动	180
5.2.1 初始状态——换料的冷停闭工况	180
5.2.2 第一阶段——一回路充水和排气	181
5.2.3 第二阶段——稳压器投入运行	182
5.2.4 第三阶段——一回路升温升压至工作温度与压力、 启动反应堆达临界	183
5.2.4.1 升温升压	183
5.2.4.2 趋向临界	186
5.2.5 第四阶段——二回路启动	188
5.2.6 第五阶段——发电机并入电网, 提升功率	188
5.2.7 启动过程中应注意的问题	190
5.2.7.1 冷却剂系统压力以及系统升温 and 冷却速率 的限制	190
5.2.7.2 控制反应堆周期, 防止发生启动事故	192
5.2.7.3 正确估计反应堆的次临界度	192
5.2.7.4 控制棒组件的插入与抽出极限	194
5.3 功率运行	196
5.3.1 带功率运行	196
5.3.2 降功率运行	198
5.3.2.1 低功率工况	198

5.3.2.2 热备用工况	199
5.3.2.3 完全甩负荷工况	199
5.3.3 功率运行中的几个问题	200
5.3.3.1 冷却剂压力的控制	200
5.3.3.2 冷却剂体积的控制	202
5.3.3.3 冷却剂硼浓度的控制	203
5.3.3.4 蒸汽排放系统的控制	204
5.3.3.5 蒸汽发生器给水的控制	205
5.4 压水堆核电站的停闭	206
5.4.1 热停闭	206
5.4.2 冷停闭	207
5.4.3 事故停闭	209
5.4.4 压水堆核电站停闭中的问题	209
5.4.4.1 衰变热	211
5.4.4.2 氙-135 的累积	212
5.5 压水堆核电站的换料	215
5.5.1 装换料及储存系统	215
5.5.2 换料方式	217
5.5.3 装换料操作顺序	221
5.5.3.1 反应堆压力壳的开启	221
5.5.3.2 废燃料组件运输和取走	222
5.5.3.3 新燃料组件的安装	222
5.5.3.4 压力壳关闭	223
5.5.3.5 废燃料组件的封装	224
5.6 压水堆核电站的运行管理与定期检修	224
5.6.1 运行管理	224
5.6.1.1 堆芯的运行管理	224
5.6.1.2 燃料元件破损的检测	226
5.6.1.3 水质管理	230

5.6.1.3.1 一回路冷却剂水质	231
5.6.1.3.2 冷却剂水质的控制	235
5.6.1.3.3 二回路水质	236
5.6.2 定期检修	238
5.6.2.1 日常检查	238
5.6.2.2 定期检查	238
5.6.2.3 蒸汽发生器传热管的检修	242
5.6.2.4 在役检查	245
第六章 压水堆核电站的安全分析	251
6.1 核电站的安全性	251
6.1.1 安全性的含义	251
6.1.2 多道屏障	252
6.1.3 纵深防御	253
6.1.4 单项故障准则	254
6.2 压水堆核电站事故分类及危险性估计	255
6.2.1 运行工况和事故的分类	255
6.2.2 事故危险性分析	257
6.2.2.1 “事件树”方法	259
6.2.2.2 “故障树”方法	260
6.3 控制棒组件失控抽出(又称提棒事故)	262
6.3.1 启动时控制棒组件失控抽出	262
6.3.1.1 事故的描述	262
6.3.1.2 分析的方法	263
6.3.1.3 结果与讨论	266
6.3.2 功率运行时控制棒组件失控抽出	267
6.3.2.1 事故的描述	267
6.3.2.2 分析的方法	268
6.3.2.3 结果与讨论	269

6.4 失去正常给水	273
6.4.1 事故的描述	273
6.4.2 分析的方法	275
6.4.3 结果与讨论	275
6.5 全厂断电事故	277
6.5.1 事故的描述	277
6.5.2 分析的方法	279
6.5.3 结果与讨论	279
6.6 蒸汽发生器管子断裂事故	280
6.6.1 事故的描述	280
6.6.2 分析的方法	283
6.6.3 结果与讨论	283
6.7 二回路蒸汽管道破裂事故	286
6.7.1 事故的描述	286
6.7.2 分析的方法	289
6.7.3 结果与讨论	290
6.8 失水事故	293
6.8.1 事故的描述	294
6.8.2 分析的方法	297
6.8.3 结果与讨论	298
6.8.4 失水事故的几率分析	305
6.9 其他事故	307
第七章 压水堆核电站射线的防护及三废处理	312
7.1 压水堆核电站的核辐射	312
7.1.1 安全壳内辐射源	312
7.1.2 安全壳外的辐射源	313
7.2 核电站核辐射的防护	313
7.2.1 各类核辐射的不同效应	313

7.2.2	辐射剂量的单位	315
7.2.3	最大容许剂量当量值	315
7.2.4	核辐射的防护	319
7.3	核电站的屏蔽	321
7.4	核电站放射性废物的处理	323
7.4.1	放射性废气的处理	324
7.4.1.1	废气的来源	324
7.4.1.2	高放无氧废气的处理	326
7.4.1.3	放射性厂房排风和低放废气的处理	327
7.4.2	放射性废水的处理	328
7.4.2.1	废水的来源	328
7.4.2.2	含氟废水处理系统	329
7.4.2.3	不含氟废水处理系统	329
7.4.2.4	废水处理的方法及浓缩废液的固化处理	329
7.4.3	放射性固体废物的处理	331
7.4.3.1	放射性固体废物的种类、数量和放射性水平	331
7.4.3.2	固体废物的处理	332
7.4.3.3	固体废物的最终处置	332
7.5	压水堆核电站对环境的影响	333
附录 1	压水堆核电站运行常用缩写名词	338
附录 2	单位换算表	350