

非能动安全先进 压水堆核电技术

林诚格 主编 郁祖盛 副主编 欧阳予 主审

(上册)



原子能出版社

非能动安全先进 压水堆核电技术

林诚格 主 编 郁祖盛 副主编 欧阳予 主 审

(上 册)



原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

非能动安全先进压水堆核电技术(上、中、下)/林诚格主编. —北京:原子能出版社,2010.5

ISBN 978-7-5022-4887-1

I. ①非… II. 林… III. ①压水型堆—核电站—技术培训—教材 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 075113 号

非能动安全先进压水堆核电技术(上、中、下)

总编辑 杨树录

策 划 丁怀兰 刘 朔 张 琳 王 青

责任编辑 刘 朔 张 琳 王 青

责任印制 丁怀兰 潘玉玲

印 刷 保定市中画美凯印刷有限公司

出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

经 销 全国新华书店

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 91.125 字 数 1 735 千字

版 次 2010 年 5 月第 1 版 2010 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4887-1 定 价 360.00 元(上、中、下全三册)

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

序 言

本世纪以来，国家做出采用非能动第三代压水堆核电技术，推进核电自主化发展的重大决策，同时将“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站”列入《国家中长期科学与技术发展规划纲要（2006—2020）》16个重大科技专项之一，并进一步把核电纳入国家战略性新兴产业。这是我国和平利用核能和转变经济发展方式的重大举措。从此，我国核电事业步入了新的发展阶段。

国家核电技术公司，作为第三代先进核电技术的引进、消化、吸收、再创新的主体、载体和平台，承担了引进先进 AP1000 核电技术、建设世界首台 AP1000 核电机组的任务，同时正在组织实施大型先进压水堆重大专项研发和示范工程建设，肩负着推进我国三代核电自主化、标准化、系列化发展的使命。到目前为止，与国内外同行密切合作，在自主化依托项目建设、重大专项研发和关键设备及材料国产化方面取得了一系列突破，为形成中国自主品牌的核电技术奠定了基础。三年来的实践，充分证明了我国核电自主化战略决策的前瞻性和科学性。

在这个过程中，参与此项工作的资深院士和专家不断总结经验，并于 2008 年编写了《非能动安全先进核电厂 AP1000》。该书出版后，在行业内外引起了很好的反响。随着三代核电自主化战略

的实施和工程实践的深化，对非能动安全先进压水堆技术的研究和认识也不断加深，结合我国自主化依托项目的进展及最新技术成果，并广泛听取读者的意见与建议，作者对原书的内容进行了必要的更新、补充与拓展，并更名为《非能动安全先进压水堆核电技术》，希望能为行业的发展提供有益的借鉴。

在本书出版时，曾培炎同志欣然题写书名。曾培炎同志曾担任国家核电自主化协调领导小组组长，对我国核电自主化工作倾注了大量的心血，寄予了厚望，并始终在关注着这一事业的发展进程。对此我们由衷地敬佩，也倍受鼓舞。

希望本书的出版，能为加快我国核电自主化体系建设，提升核电产业的国际竞争力，使我国早日成为世界核电强国，贡献一份力量。

国家核电技术公司
董 事 长

A handwritten signature in black ink, appearing to read '曾培炎' (Zeng Peiyuan), written in a cursive style. The signature is positioned to the right of the printed name and title.

二〇一〇年五月

编者的话

本书是国家核电技术公司继《非能动先进核电厂 AP1000》后组织编写的又一部关于非能动安全先进压水堆核电技术的专业书籍。

全书分上、中、下三册，计五篇二十四章。第一篇绪论（共五章），叙述世界和我国核电发展概况，核电厂设计的基本安全要求，核电厂的安全监管，以及 AP1000 核电技术的发展。第二篇 AP1000 反应堆（共四章），叙述 AP1000 反应堆堆芯（包括燃料组件、控制棒组件和毒物组件等）及其支承结构，核设计，热工水力设计和核测系统及特殊监测系统。第三篇 AP1000 核电厂系统与部件（共九章），叙述系统和部件的分级和鉴定，以及 AP1000 的反应堆冷却剂系统、非能动安全系统、安全壳系统、辅助系统、电气系统、蒸汽动力转换系统、仪表控制系统等。第四篇 AP1000 核电厂的调试（共两章），叙述了 AP1000 在预运行阶段、启动试验阶段和功率提升阶段的工作。第五篇 AP1000 核电厂的安全分析（共四章），叙述了 AP1000 核电厂的瞬态和设计基准事故分析、严重事故分析、试验和安全分析用计算机程序的验证以及概率安全分析。

全书反映了迄今为止最新的技术信息，适合于从事各项工作的核科技人员参阅，也可用作培训教材。各类工种的培训可选取本书中的相关章节。

全书由林诚格、郁祖盛、孙光弟、汤紫德、刘志弢、赵瑞昌等参与编写和校核，许连义、沈文权、郝东秦等分别进行审核，最后由欧阳予院士进行全书主审。

在本书编写和出版过程中，公司专家委员会主任陈肇博同志给予了具体指导；公司专家委员会办公室、办公厅等部门给予了大力支持、积极帮助；尹卫平策划、组织和协调了本书的编写和出版工作；上海核工程研究设计院严锦泉和姚伟达在编写过程中提供了协助；美国西屋公司已同意我们引用其公开发表的 AP1000 相关技术资料。编者在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，水平有限，书中定有诸多不足，恳请读者批评指正。

编者

二〇一〇年三月

目 录

上 册

第一篇 绪 论

第一章 世界核电发展概况	1
1.1 世界能源新时代的到来	1
1.2 世界核能及核电发展简史	2
1.3 世界核电技术进步历程	4
1.4 世纪之初的世界核电发展趋势	7
1.5 世界新建核电厂都选择第三代核电技术	11
第二章 我国核电发展概况	12
2.1 我国核电发展的三个阶段	12
2.1.1 起步阶段	12
2.1.2 适度发展阶段	13
2.1.3 积极发展阶段	14
2.2 核电在我国能源构成中的地位	16
2.2.1 我国能源及核电发展的主要特点	16
2.2.2 保障能源供应安全的客观要求	17
2.2.3 应对气候变化的必由之路	18
2.2.4 寻求替代能源的优先选择	20
2.2.5 具备赢得市场的经济前景	21

第三章 核电厂设计的基本安全要求	22
3.1 核电厂安全的特殊性	23
3.2 核电厂的安全目标	24
3.2.1 总的核安全目标	24
3.2.2 辐射防护目标	24
3.2.3 技术安全目标	24
3.3 核电厂总的安全要求和风险水平	24
3.3.1 核电厂总的安全要求	24
3.3.2 核电厂的风险水平	25
3.4 保证核安全的基本要素和安全文化	25
3.4.1 保证核安全的基本要素	25
3.4.2 安全文化	25
3.5 核电厂设计的主要安全要求	26
3.5.1 纵深防御要求	26
3.5.2 安全功能	28
3.5.3 辐射防护和验收准则	28
3.6 核电厂的主要设计要求	29
3.6.1 安全分级	29
3.6.2 总的设计基准	32
3.6.3 构筑物、系统和部件的可靠性设计	37
3.6.4 在役试验、维护、修理、检查和监测的措施	38
3.6.5 设备鉴定	38
3.6.6 老化	38
3.6.7 优化运行人员操作的设计	38
3.6.8 其他设计考虑	39
3.6.9 安全分析	40
附录 术语、定义	40
参考文献	42

第四章 核电厂的安全监管	42
4.1 我国核安全法规体系	42
4.2 核安全的监督管理	49
4.2.1 我国的核安全监管机构——国家核安全局	49
4.2.2 我国对核电厂的安全监督管理	49
4.2.3 美国核电厂许可证管理程序简介	53
4.2.4 中国与美国核电厂许可证管理程序的分析与比较	55
参考文献	59
第五章 AP1000 核电技术的发展	60
5.1 AP1000 的研发设计历程	60
5.2 AP1000 核电厂概述	60
5.2.1 核电厂整体描述	60
5.2.2 与其他核电厂的比较	63
5.3 AP1000 核电厂的技术成熟性	65
5.3.1 反应堆的技术成熟性	65
5.3.2 反应堆冷却剂系统的技术成熟性	65
5.3.3 非能动安全系统的技术成熟性	67
5.3.4 安全壳	69
5.4 AP1000 核电厂的安全性	69
5.4.1 AP1000 核电厂采用非能动安全系统	70
5.4.2 AP1000 核电厂具有全面、完善的预防和缓解严重事故的措施	71
5.4.3 AP1000 核电厂所达到的安全水平	71
5.5 AP1000 核电厂的经济性	72
5.6 美国核监管委员会对 AP1000 标准设计的核安全审评	75
5.6.1 安全法规	75
5.6.2 NRC 的独立计算分析和试验验证	75
5.6.3 AP1000 标准设计证书的批准	76
参考文献	76

第二篇 AP1000 反应堆

第六章 AP1000 反应堆堆芯和堆芯支承结构	77
6.1 概述	77
6.2 反应堆堆内构件	77
6.2.1 反应堆堆内构件的功能	77
6.2.2 堆内构件的结构	79
6.2.3 堆内构件的设计	85
6.2.4 堆内构件预运行流致振动试验	97
6.2.5 堆内构件振动试验和分析结果的评定	100
6.2.6 美国核监管委员会对 AP1000 原型堆内构件的审评结论	100
6.3 反应堆燃料组件	101
6.3.1 燃料材料	102
6.3.2 燃料芯块	104
6.3.3 燃料棒	104
6.3.4 燃料组件	106
6.4 堆内控制部件	111
6.4.1 控制棒组件	111
6.4.2 灰棒组件	113
6.4.3 可燃毒物组件	113
6.4.4 中子源组件	114
参考文献	116
第七章 AP1000 反应堆堆芯的核设计	116
7.1 核设计考虑的工况和安全准则	117
7.2 功率分布	119
7.2.1 概述	119
7.2.2 径向功率分布	121
7.2.3 轴向功率分布	123

7.2.4	燃料密实化引起的局部功率峰值	125
7.2.5	极限功率分布	125
7.2.6	功率分布分析的实验验证	126
7.2.7	包壳积垢引起的功率偏移	128
7.3	反应性系数	129
7.3.1	概述	129
7.3.2	燃料温度 (Doppler) 系数	130
7.3.3	慢化剂反应性系数	131
7.3.4	功率系数	133
7.3.5	再分布效应	135
7.4	反应性控制	135
7.4.1	化学补偿控制	136
7.4.2	控制棒控制	137
7.4.3	机械补偿模式	139
7.4.4	可燃毒物控制	140
7.5	氙稳定性	140
7.5.1	概述	140
7.5.2	轴向氙稳定性	141
7.5.3	径向氙稳定性	143
7.5.4	稳定性控制和保护	143
7.6	堆芯燃料管理	144
7.6.1	概述	144
7.6.2	换料周期	145
7.6.3	首次装料	146
7.6.4	平衡循环	147
7.6.5	MOX 燃料布置	148
	参考文献	149

第八章 反应堆系统热工水力设计

8.1	热工水力设计考虑的工况和安全准则	150
-----	------------------------	-----

8.1.1	概述	150
8.1.2	设计准则	152
8.2	偏离泡核沸腾设计准则	153
8.2.1	概述	153
8.2.2	DNB 技术	155
8.2.3	DNBR 因子	156
8.2.4	混合（搅混）技术	157
8.2.5	热管因子	158
8.2.6	棒弯曲对 DNBR 的影响	161
8.3	修正的热设计程序	161
8.4	燃料温度设计基准	162
8.4.1	燃料温度设计基准	162
8.4.2	燃料与包壳温度	162
8.5	堆芯流量设计基准	164
8.5.1	堆芯流量设计	164
8.5.2	堆芯水力设计	165
8.5.3	堆芯压降和水力载荷	166
8.5.4	反应堆冷却剂泵惰转时堆芯流量	168
8.6	水力稳定性设计基准	169
8.7	功率分布对堆芯传热的影响	173
8.8	热工水力设计的分析方法	174
8.8.1	堆芯分析	174
8.8.2	稳态分析	175
8.8.3	瞬态分析	175
8.8.4	不确定性分析	175
	参考文献	176

第九章 AP1000 核测系统和特殊监测系统 176

9.1	堆内仪表系统	177
9.1.1	功能描述	177

9.1.2 堆内仪表系统的组成	177
9.2 堆外仪表系统	179
9.3 堆芯监测和运行支持系统	181
9.4 数字式金属撞击监测系统	181
9.4.1 系统概述	181
9.4.2 系统组成	183
9.5 吊篮振动监测系统	186
9.5.1 系统概述	186
9.5.2 系统组成	187
9.6 反应堆冷却剂泵监测系统	189
9.6.1 系统概述	189
9.6.2 系统组成	189
参考文献	190

第三篇 AP1000 核电厂系统和设备

第十章 核安全部件与设备的安全要求	191
10.1 核安全部件与设备与常规机械产品在设计、制造活动及其质量 控制与监督管理方面的基本差别	191
10.2 核安全部件与设备的基本核安全要求	192
10.2.1 基本概念	192
10.2.2 基本核安全要求	193
10.3 核安全部件与设备的结构完整性	193
10.3.1 基本概念	193
10.3.2 核电厂状态和系统运行工况	194
10.3.3 核安全部件与设备的设计载荷、使用载荷和试验载荷	195
10.3.4 核安全部件与设备的设计限值、使用限值和试验限值	196
10.3.5 应力分析	202
10.3.6 核安全部件与设备的设计步骤	211

10.4 核安全部件与设备的功能能力和可运行性的验证和评定	213
10.4.1 核安全设备的抗震鉴定与动力学鉴定	213
10.4.2 机械设备的的环境鉴定	232
10.5 核安全部件和设备性能的可验证性	235
10.5.1 所需遵循的法规与标准	235
10.5.2 设计阶段可验证性的考虑	237
10.5.3 制造阶段的检验与试验要求	238
10.5.4 运行阶段	239
参考文献	239

第十一章 AP1000 反应堆冷却剂系统 240

11.1 反应堆冷却剂系统概述	240
11.1.1 简介	240
11.1.2 AP1000 核电厂反应堆冷却剂系统的功能和设计基准	246
11.1.3 AP1000 反应堆冷却剂系统的主要设备	251
11.1.4 AP1000 反应堆冷却剂系统的主要参数	253
11.1.5 AP1000 反应堆冷却剂系统的高位排气	253
11.2 反应堆冷却剂系统压力边界的结构完整性	255
11.2.1 法规与标准的相符性	255
11.2.2 工况与载荷	259
11.2.3 分析所使用的计算机程序	261
11.2.4 载荷组合、设计瞬态和应力限值	262
11.2.5 超压保护	267
11.2.6 AP1000 反应堆压力边界泄漏探测	271
11.2.7 AP1000 反应堆冷却剂系统压力边界材料	274
11.2.8 在役检查和试验	285
11.2.9 对假想管道破裂动力效应的防护和“先漏后破”评价程序	287
11.3 反应堆压力容器和一体化顶盖组件	310
11.3.1 反应堆压力容器	310
11.3.2 一体化顶盖组件	337

11.4	蒸汽发生器	342
11.4.1	AP1000 Delta-125 型蒸汽发生器概述	342
11.4.2	设计基础	342
11.4.3	结构描述及设计特征	345
11.4.4	设计评估	347
11.4.5	蒸汽发生器材料	350
11.4.6	蒸汽发生器制造检验要求和在役检查	354
11.4.7	屏蔽电机泵与蒸汽发生器直接连接的几个技术问题	359
11.5	稳压器	362
11.5.1	稳压器的功能	362
11.5.2	设计基准	363
11.5.3	AP1000 稳压器的结构与特点	364
11.5.4	功能实施	366
11.5.5	试验和检验	368
11.5.6	运行	368
11.6	反应堆冷却剂泵	370
11.6.1	设计基准	370
11.6.2	AP1000 屏蔽电机泵的设计与结构	371
11.6.3	AP1000 屏蔽电机泵的主要部件	374
11.6.4	屏蔽电机泵的运行	378
11.6.5	设计评价	379
11.6.6	试验和检验	383
11.7	反应堆冷却剂系统管道	387
11.7.1	设计基准	387
11.7.2	设计描述	388
11.8	控制棒驱动系统	399
11.8.1	控制棒驱动机构	399
11.8.2	控制棒驱动机构的动作	403
11.8.3	控制棒驱动系统的设计规范	406
11.8.4	控制棒和驱动系统结构材料	410

11.8.5	控制棒驱动机构性能保证大纲	412
11.9	正常余热排出系统	412
11.9.1	设计基准和功能	413
11.9.2	系统描述	416
11.9.3	设备描述	425
11.9.4	系统运行	427
11.9.5	检查和试验要求	430
11.9.6	仪表要求	431
	参考文献	431

中 册

第十二章	AP1000 的非能动堆芯冷却系统	433
12.1	概述	433
12.2	设计基准	435
12.2.1	安全设计基准	435
12.2.2	功率运行设计基准	437
12.3	系统描述	438
12.3.1	非能动余热排出系统	438
12.3.2	非能动安全注入系统	441
12.3.3	自动降压系统	447
12.3.4	安全壳 pH 控制	452
12.3.5	非能动堆芯冷却系统的启动	452
12.4	设备描述	453
12.4.1	堆芯补水箱	453
12.4.2	安注箱	455
12.4.3	安全壳内置换料水箱	455
12.4.4	pH 调节篮	457
12.4.5	非能动余热排出热交换器	457
12.4.6	安全壳内置换料水箱和安全壳再循环滤网	459

12.4.7	低压差开启止回阀·····	466
12.4.8	安注箱止回阀·····	468
12.4.9	爆破阀·····	468
12.5	试验验证与检查·····	469
12.6	非能动堆芯冷却系统的启动与运行·····	471
12.6.1	正常运行·····	473
12.6.2	事故后运行·····	474
	参考文献·····	481

第十三章 AP1000 的安全壳和安全壳系统 ····· 482

13.1	安全壳·····	482
13.1.1	概述·····	482
13.1.2	钢制安全壳容器·····	483
13.1.3	安全壳屏蔽构筑物·····	488
13.1.4	安全壳内部结构·····	489
13.2	非能动安全壳冷却系统·····	497
13.2.1	材料与涂层·····	497
13.2.2	系统功能·····	506
13.2.3	设备描述·····	509
13.2.4	系统运行·····	513
13.3	PCS 的分析和试验验证 ·····	515
13.4	安全壳完整性的安全分析·····	519
13.4.1	概述·····	519
13.4.2	设计基准事故下安全壳完整性分析·····	520
13.4.3	严重事故下安全壳完整性分析·····	536
13.4.4	试验与检查·····	544
13.4.5	安全壳仪表·····	545
13.5	安全壳隔离系统·····	545
13.5.1	系统功能·····	545
13.5.2	设备描述·····	546