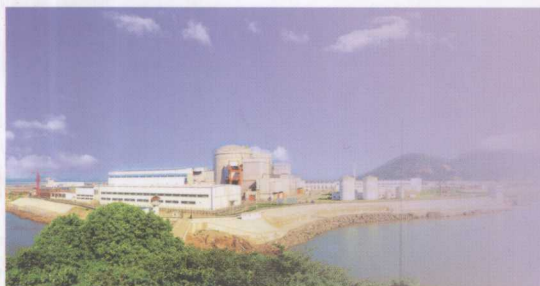




核电厂物理热工



杨兰和 主 编
戚屯锋 副主编

中国核工业集团公司 编

中国原子能出版社

核电厂物理热工

主 编 杨兰和

副主编 戚屯锋



中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核电厂物理热工/杨兰和主编. —北京:中国原子能出版社, 2012. 1

ISBN 978-7-5022-5431-5

I. ①核… II. ①杨… III. ①反应堆—热力工程
IV. ①TL33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 010076 号

内 容 简 介

本教材以 CP600 核电厂压水堆核电厂为例,系统地阐述了核电厂物理热工主要内容和方法。共分为 13 章,包括反应堆物理基础、反应堆动力学理论、反应性系数、反应性的控制、反应堆功率及其分布、堆芯裂变产物和毒物、反应堆启动与停堆、反应堆物理试验与堆芯监督(调试物理试验、启动物理试验和定期物理试验等)、反应堆热工水力、核电厂效率与热力系统性能分析、堆芯燃料管理和换料设计等相关内容。

本教材对反应堆物理热工的介绍涵盖了基础理论知识和 CP600 核电厂压水堆核电厂实际运行经验两个方面,实现了理论和实践相结合。因此,教材可作为理工科大中专院校相关专业师生和核电专业新员工的培训教材或参考用书,也可作为核电行业从事反应堆物理热工相关工作人员提高的岗位培训教材和参考资料。

核电厂物理热工

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 刘 岩

技术编辑 丁怀兰 王亚翠

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.25 字 数 384 千字

版 次 2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-5431-5 定 价 75.00 元

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

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 俞培根 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	仲卫东	刘志勇	马明泽	戚屯锋	邹正宇	
	顾颖宾	商幼明	缪亚民	赵 云	葛政法	
	周建虎	李苏甲	杨树录	李和香	段光荣	

执 行 编 委

谢 波	马寅军	王晓波	叶丹萌	莫银良
高小林	鲁忆迅	唐锡文	谢先林	蔡黎勇
修卫彬	刘 朔	肖 武	刘玉山	

编 委 会 办 公 室

姜福明	朱 黎	张红军	吴国安	程建秀
宫育锋	章 超	丁怀兰	黄 芳	戴 兵
廖昌斌	方朝霞	沈 阳	王亚翠	

《核电厂物理热工》

编 辑 部

主 编：杨兰和

副 主 编：戚屯锋

校 审：张兴田 秦建华 叶丹萌

编 写：潘泽飞 叶国栋 詹勇杰 代前进 汪聪梅

何子帅 张佑翱 项骏军 纵 骋 刘 臻

高永恒 王勇智 杨卓芳

编 辑：潘泽飞 詹勇杰 叶国栋 黄洁琳 廖兰蜀

统 审：程建秀 丁建国

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。

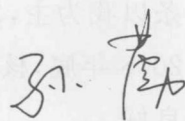
这套教材作为培养核电人才的重要工具,是国内目前第一套专业化、体系化、公开出版的核电人才培养系列教材,有助于开展培训工作,提高培训质量、节约培训成本,夯实核电发展基础。它集中了全集团的优势,突出高起点、实用性强,是集团化、专业化运作的又一次实践,是中国核工业 50 余年知识管理的积淀,是中国核工业 10 万人多年总结和实践经验的结晶。

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



2009 年 9 月 9 日

前 言

反应堆物理和反应堆热工水力知识作为从事核电厂反应堆运行和燃料管理最为重要的基础理论课程之一,对于理解和掌握核电厂反应堆运行的工作原理和反应性变化的各种物理现象,以及其特性有着非常重要的意义和作用。反应堆物理理论可以精确描述堆芯中子与各种物质原子核的相互作用过程,反应堆热工水力理论可以精确描述堆芯中的裂变核能的传热、输热过程。

为了更好地指导压水堆核电厂开展反应堆物理和反应堆热工水力的相关工作,充分了解和掌握基本的核物理理论、反应堆物理、反应堆热工水力、堆芯换料设计、反应堆物理试验,以及这些方面的工作内容,特编制本教材。本教材以 CP600 核电厂物理热工岗位人员所从事工作为基础,全面介绍加压轻水型核电厂反应堆物理热工岗位所涉及反应堆物理和反应堆热工水力技术工作的基本概念和知识,同时阐述了核电厂反应堆物理、反应堆热工水力和堆芯燃料管理工作的主要原理和基本方法。正确理解和准确掌握反应堆物理和反应堆热工水力基本理论和工作方法是确保核电厂安全、稳定和经济运行的基础。

教材共分 13 章。第 1 章总体概述,介绍了核电厂物理热工相关的主要工作。第 2 章至第 9 章介绍了核电厂反应堆物理的相关知识,包括反应堆物理基础、动力学基础、反应性系数、反应性控制、反应堆功率及其分布、裂变产物的产生与中毒、反应堆启动与停堆、反应堆物理试验。第 10、11 章介绍了核电厂反应堆热工水力的相关知识,包括了反应堆热工水力基础和核电厂热力系统的效率与性能分析。最后第 12、13 章结合核电厂的工作实践,介绍了电厂燃料管理的相关知识,包括堆芯燃料管理基础知识和堆芯换料设计的相关基础知识。

本教材的编写人员主要有潘泽飞、詹勇杰、叶国栋、何子帅、汪聪梅、刘臻、张佑翱、代前进、项骏军、纵骋、高永恒等,校审人员主要有张兴田、秦建华等,并得到了核电秦山联营有限公司培训教育委员会和外部专家的指导,在此一并表示感谢!

根据核电基础理论培训要求,本教材为压水堆核电厂从事反应堆物理、热工水力和堆芯燃料管理岗位工作人员编写的、通用的基础理论培训教材。教材可作为理工科大专院校反应堆工程相关专业师生和核电厂相关专业新招收员

工的专业培训教材或参考用书,也可作为核电行业从事反应堆运行的操纵人员、反应堆物理热工相关工作的技术人员和核电厂生产管理相关工作人员等,在提高其岗位专业知识和技能等方面的培训教材和参考资料。

由于编者均为核电厂生产一线的工作人员,受自身的知识水平所限,书中难免有片面、不妥,甚至谬误之处,恳请广大读者提出宝贵意见。

编者

2011年9月

目 录

第 1 章 概 述

1.1 反应堆物理热工简介	1
1.2 CP600 核电厂物理热工工作内容	1

第 2 章 反应堆物理基础

2.1 核裂变	3
2.1.1 裂变反应	3
2.1.2 裂变产物与裂变中子	4
2.1.3 裂变能量	6
2.2 链式裂变反应	6
2.2.1 自持链式裂变反应	6
2.2.2 反应堆临界条件	7
2.2.3 反应堆内的中子循环	8
2.2.4 临界方程	10
2.3 反应堆功率	11
2.3.1 反应堆热功率	11
2.3.2 衰变热	11
2.3.3 核反应堆功率与中子注量率的关系	12
复习思考题	13

第 3 章 反应堆动力学

3.1 概述	14
3.1.1 瞬发中子	14
3.1.2 反应堆周期	17

3.1.3	缓发中子效应	18
3.1.4	反应性的定义和单位	20
3.2	点堆动力学方程	20
3.3	小反应性阶跃变化时点堆动力学方程的解	21
3.3.1	有外源时的稳定态	21
3.3.2	小反应性阶跃变化时的中子密度响应 (多组缓发中子)	23
3.3.3	倒时公式	25
3.3.4	瞬发临界	26
3.4	线性反应性引入	26
3.5	反应性测量的动力学方法	28
3.5.1	渐近周期测定	28
3.5.2	落棒法	28
3.5.3	逆动态法	29
	复习思考题	30

第4章 反应性系数

4.1	反应性温度系数	31
4.2	燃料多普勒温度系数	32
4.2.1	燃料多普勒效应	32
4.2.2	空间自屏效应	33
4.2.3	燃料有效温度	34
4.2.4	多普勒系数随燃耗的变化	34
4.3	慢化剂温度系数	36
4.3.1	慢化剂温度效应	36
4.3.2	慢化剂温度对 k_{eff} 的影响	38
4.3.3	硼浓度对 α_T 的影响	39
4.3.4	慢化剂温度对 α_T 的影响	40
4.3.5	控制棒对 α_T 的影响	40
4.3.6	可燃毒物棒对 α_T 的影响	41
4.3.7	堆芯寿期与 α_T 关系	41
4.4	等温温度系数 α_{iso}	41
4.5	空泡系数	42
4.6	压力系数	42
4.7	功率系数与功率亏损	43
4.7.1	功率系数	43

4.7.2 功率亏损	43
4.8 再分布效应	45
4.8.1 寿期初的慢化剂亏损与再分布效应	45
4.8.2 寿期末的慢化剂亏损与再分布效应	46
4.8.3 轴向燃料燃耗对再分布效应的影响	47
复习思考题	48

第 5 章 反应性的控制

5.1 后备反应性分配	49
5.2 反应性控制基本原理与方法	49
5.3 控制棒	50
5.3.1 控制棒的特性	51
5.3.2 控制棒对 k_{eff} 的影响	52
5.3.3 控制棒的价值	52
5.3.4 影响控制棒价值的因素	54
5.3.5 控制棒的运行要求	55
5.4 化学补偿控制	58
5.4.1 化学补偿控制的重要性	58
5.4.2 硼酸的特性	59
5.4.3 硼酸的浓度	59
5.4.4 硼的微分价值	60
5.4.5 运行过程中的调硼	61
5.4.6 停堆时所要求的最小硼浓度	62
5.5 可燃毒物	62
5.5.1 可燃毒物及其重要性	62
5.5.2 可燃毒物对 k_{eff} 的影响	63
5.5.3 可燃毒物棒的布置	65
复习思考题	65

第 6 章 反应堆功率及其分布

6.1 理论核功率分布	67
6.2 实际反应堆核功率分布	68
6.2.1 径向功率分布	68
6.2.2 轴向功率分布	70

6.2.3 堆芯功率峰因子	71
6.3 堆芯功率分布测量系统	72
6.3.1 堆内核测系统	73
6.3.2 堆外核测仪表系统	76
6.4 堆芯功率分布监测	77
6.4.1 监测的参数	78
6.4.2 运行期间的堆芯功率分布监测	79
6.5 堆芯功率能力	79
6.5.1 Mode A 方式运行	79
6.5.2 负荷跟踪	80
6.5.3 堆芯功率能力	80
6.5.4 咬量与插入极限	81
复习思考题	82

第 7 章 裂变产物的产生与中毒

7.1 核燃料同位素的产生与消耗	83
7.2 裂变产物的毒性	84
7.2.1 氙毒(氙-135)	85
7.2.2 钐毒(钐-149)	93
7.2.3 其他毒物	95
复习思考题	96

第 8 章 反应堆启动与停堆

8.1 反应堆启动	98
8.1.1 概述	98
8.1.2 基本原理	98
8.1.3 堆芯首次临界和换料后堆芯首次临界	100
8.1.4 堆芯恢复临界	101
8.2 反应堆停堆	108
8.2.1 停堆裕度	108
8.2.2 停堆深度	109
8.2.3 最小停堆硼浓度	110
复习思考题	111

第9章 反应堆物理试验与堆芯监督

9.1 概述	113
9.2 启动物理试验	113
9.2.1 堆芯装料临界安全监督试验	114
9.2.2 堆芯卸料临界安全监督试验	118
9.2.3 堆芯临界试验	118
9.2.4 校验堆外核测仪表系统探测器的线性与重叠	122
9.2.5 零功率物理试验范围的确定 (即多普勒发热点寻找试验)	123
9.2.6 反应性仪的校刻试验	124
9.3 零功率物理试验	127
9.3.1 临界硼浓度测量试验	127
9.3.2 零功率下慢化剂温度系数测量试验	130
9.3.3 零功率功率分布测量	133
9.3.4 控制棒组微积分价值测量试验	135
9.3.5 最小停堆硼浓度测量	141
9.3.6 零功率模拟“弹棒”试验	141
9.4 提升功率物理试验	142
9.4.1 反应堆热功率测量	143
9.4.2 根据热平衡测量结果计算反应堆冷却剂流量	148
9.4.3 堆芯功率分布测量试验	150
9.4.4 堆外通量测量电离室刻度试验	150
9.4.5 功率系数与功率亏损测量	153
9.4.6 反应性系数测定	157
9.4.7 有功率模拟“弹棒”试验	160
9.4.8 有功率模拟“落棒”试验	160
9.4.9 落棒试验	160
9.4.10 氙振荡试验	162
9.5 堆芯日常监督与定期试验	163
9.5.1 日常堆芯监督	163
9.5.2 定期试验	164
复习思考题	165

第 10 章 反应堆热工水力基础

10.1	热工基础	167
10.2	堆内的导热过程	167
10.3	堆内的放热过程	168
10.4	堆内的辐射传热	169
10.5	堆内的输热过程	169
10.6	燃料元件的传热计算	170
10.6.1	热屏蔽的传热计算	172
10.6.2	单相流体的对流换热计算	173
10.6.3	蒸汽发生器内的传热计算	173
10.6.4	凝汽器内的传热计算	173
10.6.5	沸腾传热工况	174
10.6.6	凝结传热	176
10.7	水力学基础	176
10.7.1	单相冷却剂的流动压降	177
10.7.2	汽-水两相流动及其压降	178
10.7.3	堆芯冷却剂流量的分配	181
10.7.4	流动不稳定性	183
10.7.5	自然循环	184
	复习思考题	185

第 11 章 核电厂效率与热力系统性能分析

11.1	汽轮机组的热力循环与效率	187
11.1.1	理想蒸汽热力循环	187
11.1.2	效率	192
11.1.3	热经济指标	193
11.2	汽轮机相关概念	193
11.2.1	汽轮机的分类	193
11.2.2	汽轮机容量的定义	194
11.2.3	核电厂汽轮机的特点	195
11.2.4	CP600 核电厂汽轮机简介	195
11.3	汽轮机组热力系统	196
11.3.1	发电厂原则性热力系统的组成	196

11.3.2	CP600 核电厂常规岛原则性热力系统	196
11.4	热力系统性能分析	198
11.4.1	常规热平衡法	198
11.4.2	热偏差法	199
11.4.3	等效焓降法	199
11.4.4	循环函数法	200
11.5	机组的热性能	200
11.5.1	定义	200
11.5.2	热性能指标的要素	200
11.5.3	热性能指标的意义与局限性	201
	复习思考题	202

第 12 章 堆芯燃料管理

12.1	核燃料管理	203
12.1.1	基本物理量	203
12.1.2	核燃料管理的目标及主要任务	204
12.1.3	换料堆芯方案设计	206
12.2	堆芯监督管理	210
12.2.1	堆芯监督管理的目标和主要任务	210
12.2.2	堆芯跟踪管理(监测)	211
12.2.3	电厂燃料管理与堆芯监督规程及报告	211
12.3	燃料性能跟踪	212
12.4	运行梯形图的原理	212
12.4.1	梯形图包络线的定义和物理意义	213
12.4.2	AO 与 ΔI 的参考值区域	214
12.4.3	功率分布限制	215
12.4.4	堆芯熔化预防措施	216
12.4.5	运行梯形图的限值	219
12.5	堆芯物理限值	221
12.5.1	反应性限值	221
12.5.2	升功率速率限制	221
12.5.3	热工水力限值	222
	复习思考题	222

第 13 章 堆芯换料设计基础

13.1 堆芯装载方案的设计、审查和确定	224
13.1.1 能量需求的确定	224
13.1.2 燃料组件的选择	224
13.1.3 堆芯装载方案的设计	224
13.1.4 堆芯装载方案的审查和确定	224
13.2 燃料管理中长期规划	225
复习思考题	225
复习思考题参考答案	226