

郑福裕 编著

压水堆核电厂 运行物理导论



原子能出版社

压水堆核电厂 运行物理导论

郑福裕 编著

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

压水堆核电厂运行物理导论/郑福裕编著. —北京:原子能出版社, 2009. 2

ISBN 978-7-5022-4445-3

I. 压… II. 郑… III. 压水型堆—核电厂—运行 IV. TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 207882 号

内 容 简 介

本书介绍了压水堆核电厂运行物理的基础知识。全书共 7 章:核电厂运行物理基础理论、反应性、反应性系数、燃耗与中毒、反应性控制、反应堆功率分布及其限制以及反应堆启动与停堆过程中的几个问题。

本书适合于从事核电厂运行及管理人员使用,特别适合于核电厂操纵员培训,也可供高等学校核工程专业师生及从事核电工程的技术人员参考。

压水堆核电厂运行物理导论

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 谭俊

责任校对 冯莲凤

责任印制 丁怀兰 刘芳燕

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 880 mm×1230 mm 1/32

字 数 223 千字

印 张 7.5

版 次 2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-4445-3

印 数 1—1000 定 价 38.00 元

版权所有 侵权必究(如有缺页、倒装,请与出版社联系调换)

网址: <http://www.aep.com.cn>

作者简介

郑福裕 清华大学教授,享受政府特殊津贴。1936 年生于山东,1953 年考入清华大学,1958 年毕业于工程物理系。曾先后担任核反应堆物理实验室主任,核反应堆工程教研室副主任,清华大学核电站模拟培训中心副主任等职,曾作为访问学者赴英美等国。1993 年起任清华大学学报(自然科学版)主编,编委会副主任委员。曾任《核动力运行研究》副主编、《核安全》编委、《中国电力百科全书核电卷·核反应堆物理与热工水力学分卷》主编等。现任核工业研究生部顾问、兼职教授等。

科研项目:“北京核电厂模拟培训中心的建立”和“核电站仿真技术”分别于 1989 和 1991 年两次获国家计委、国家科委、财政部联合嘉奖,并获 1990 年“国家核安全局科技进步奖”二等奖(部委级)。

著作除论文发表外,主要编著有《压水堆核电厂运行》(获 1999 年“全国优秀科技图书奖”暨“科技进步奖(科技著作)”三等奖)、《压水堆核电厂运行物理基础》、《核反应堆物理实验方法》、《核反应堆用材料性能资料汇编》等;主要译著有《核反应堆动力学导论》、《核动力反应堆仪表和控制系统手册》(上、下两册)等(以上均为原子能出版社出版)。其他著作还有《科技论文英文摘要编写指南》、《英文科技论文写作与编辑指南》等(为清华大学出版社出版)。

序

1938 年秋,发现铀-235 原子核在中子轰击下可发生裂变并释放出大量能量,从此人类进入了“原子能时代”。核能科技的应用经过数十年的发展至今,已是为人类生存和发展提供能源的重要组成部分之一,目前世界上核电站已有 439 座反应堆在运行,装机容量已达 3.72 亿千瓦,核电发电量约占世界总发电量的 17%,而从长远看来,核能应用经过热中子裂变堆、快中子裂变堆、聚变堆科学技术的三个阶段发展,可为人类提供持续的、久远的能源,而到了聚变堆应用阶段,聚变能更可为人类提供用之不竭“无限”的能源。核能已被人们普遍认为,是一种安全、可靠、经济、清洁、“久远”的能源,必将得到重大发展,将永远在人类能源供应中占有重要位置。

进入 21 世纪,随着我国国民经济大发展,国家繁荣昌盛,我国核电也迎来了大发展的机遇,根据我国制定的 2020 年国民经济发展规划,在“积极发展核

电”方针指引下,我国核电装机容量到 2020 年应建成 4 000 万千瓦和建 1 800 万千瓦,这相当于到 2020 年我国应建成和在建百万千瓦级核电站 60 座,任务十分艰巨。在此大好形势下,发展核电,人才是关键,尤其是急需培养大批可保证核电站安全、稳定、高效运行的高素质人才。

郑福裕教授是从 20 世纪 50 年代末起即在清华大学从事我国核能应用研究和教学的老教授,桃李遍天下,为我国核能人才的培养作出了巨大贡献。在压水堆核电站运行人才培养方面,他早年就参加了我国第一批秦山 30 万千瓦压水堆和大亚湾 90 万千瓦压水堆核电站运行人员的培训,从此数十年来不断奔波于清华、秦山、大亚湾和中核集团公司培训中心之间进行授课,培养了大批压水堆核电站操纵人员,还多次参加了操纵员执照考题审评工作,为我国核电站数十年来安全稳定有效运行做出了重大贡献。

反应堆物理是核电站最核心的理论基础之一,它涉及核电站的核安全、核能的释放和控制等,是操纵员必须具备的基本知识。

郑福裕教授编著的《压水堆核电厂运行物理导论》,集他数十年研究教学和培训经验之大成,是在他

1995年出版的《压水堆核电厂运行物理基础》一书的基础上,结合他多年来以此作为教材从事培训教学的体会,针对压水堆核电厂运行实际和操纵人员的特点,除以定性解释运行过程中的物理现象和概念外,又增加了一些核物理基础理论和其他一些必要的适应当前时代要求的内容,而予以再版的。由此使该书更具有针对性、实用性。

我认为《压水堆核电厂运行物理导论》一书,在核电大发展需要培训大批压水堆核电厂运行操纵人员的今天,再版很及时,是一本很好的培训教材和参考书,对提高运行操纵人员的素质和核安全意识将起到重要的作用。

赵仁恺

二〇〇八年八月二十六日

再版前言

本书从第一版至今已经过去 15 个年头了。在这期间我国的核电事业发展很快,特别是进入 21 世纪后,我国核电发展又迎来了难得的机遇,形势更是大好。现在核电队伍不断在壮大,适应新形势,核电运行人员的培训必须紧紧跟上,以确保核电厂的安全运行。

本人作为核电培训第一线的教师,比较了解、熟悉核电厂培训对象。他们绝大多数都是来自非核工程专业的大学生。他们先后要进行一系列培训,最后通过取照考试才能上岗。根据多年培训的经验与操纵员考试取照的实践,我深感基础理论对他们的重要性。正是由于形势的需要,且本书已脱销多年,我才下决心在原书基础上修改再版。

这次再版的特点是:1) 充分考虑到学科体系本身的完整性,重点在第 1 章里系统地增加了基础理论的内容。2) 更紧密地结合压水堆核电厂运行,丰富了核电厂运行物理相关的一些内容,并在书后增加了一个重要附录,即《核电厂技术规格书》的介绍。3) 仍然保持原书以讲解物理概念为主的特点,尽量避免数学解析,更强调实用性。

考虑再三,认为书名改为《压水堆核电厂运行物理导论》

更适宜。本书再版仍然包括 7 章,除原来第 1 章“绪论”改名为“核电厂运行物理基础理论”,其他几章题目不变。仍然是:第 2 章“反应性”、第 3 章“反应性系数”、第 4 章“能耗与中毒”、第 5 章“反应性控制”、第 6 章“反应堆功率分布及其限制”及第 7 章“反应堆启动与停堆过程中的几个问题”。

感谢中国科学院、中国工程院赵仁恺院士为本书写序。感谢清华大学胡永明教授审阅书稿并提出宝贵建议与意见。感谢原子能出版社谭俊副编审对书稿提出许多有益的意见。

本书再版得到了核电秦山联营有限公司和核工业研究生部的大力支持与帮助,在此深表感谢。

由于本人水平有限,书中出现某些问题在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

2008 年 8 月

第一版前言

本书着重介绍压水堆核电厂运行物理的基础知识。特点是结合核电厂的运行实际,以定性介绍运行过程中的物理现象和概念为主。

全书共分7章,第1章绪论,介绍反应堆静态的一些物理概念;第2、3章介绍了反应性及反应性系数;第4章讨论了运行过程中的燃耗与中毒;第5章讨论了化学补偿、可燃毒物及控制棒三种反应性控制;第6章介绍了堆内功率分布及其限制;最后还讨论了反应堆启动与停堆过程中的有关问题。

中国核工业总公司邵向业同志仔细审阅了书稿,提出了宝贵的意见,此外,还得到了国家核安全局林诚格同志、秦山核电厂谢国梁同志的大力支持与帮助,侯凤旺同志对书稿提出了许多有益的意见,编者表示诚挚的感谢。

在编写本书过程中,参考了美国西屋公司的《核电厂操纵员培训》资料(RWR Physics and Core Control for Operators Training, Westinghouse Co., 1987)以及美国核管理委员会的关于 Shearon Harris 核电厂的技术规范(Technical Specifications of Shearon Harris Nuclear Power Plant Unit 1, by

U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1986)等国际交流资料。

由于编者水平有限,书中出现某些问题在所难免,恳切地希望读者批评指正。

编 者

1993. 12

目 录

第 1 章 核电厂运行物理基础理论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 原子核结构	(1)
1.2.1 质子与中子	(2)
1.2.2 核素与同位素	(3)
1.2.3 放射性与原子核衰变	(4)
1.2.4 原子核的结合能	(6)
1.3 中子与物质的相互作用	(9)
1.3.1 中子与原子核相互作用机理	(9)
1.3.2 中子与原子核相互作用形式	(10)
1.4 中子核反应截面和核反应率	(11)
1.4.1 中子核反应截面	(11)
1.4.2 核反应率	(12)
1.5 裂变反应	(13)
1.5.1 可裂变核素	(13)
1.5.2 裂变能	(14)
1.5.3 裂变产物	(15)

1.5.4 裂变中子	(16)
1.6 中子慢化	(17)
1.7 中子扩散	(19)
1.8 链式反应	(22)
1.9 反应堆临界	(23)
1.9.1 增殖因数	(24)
1.9.2 临界计算与临界方程	(25)
1.9.3 中子通量密度分布	(27)
1.9.4 栅格的非均匀效应	(29)
1.10 中子通量密度与核反应堆功率	(30)
第2章 反应性	(33)
2.1 概述	(33)
2.2 反应性	(33)
2.2.1 定义	(33)
2.2.2 剩余反应性	(35)
2.2.3 停堆反应性	(36)
2.2.4 一次允许释放的反应性	(37)
2.2.5 测量方法	(38)
2.3 点堆动力学方程	(38)
2.3.1 不考虑缓发中子的点堆动态方程	(38)
2.3.2 考虑缓发中子的点堆动态方程	(40)
2.3.3 阶跃扰动时点堆模型动态方程的解	(41)
2.4 反应堆周期	(42)
2.4.1 定义	(42)
2.4.2 反应堆倍周期	(43)
2.4.3 次临界周期	(44)

2.4.4 反应堆周期测量	(45)
2.4.5 瞬发临界概念	(48)
2.5 启动率	(49)
第3章 反应性系数	(52)
3.1 概述	(52)
3.2 温度系数	(52)
3.2.1 燃料温度(Doppler)系数	(53)
3.2.2 慢化剂温度系数	(59)
3.3 空泡系数	(71)
3.4 压力系数	(72)
3.5 功率系数与功率亏损	(72)
3.5.1 Doppler 功率亏损	(73)
3.5.2 慢化剂功率亏损	(74)
3.5.3 总功率系数与总功率亏损	(78)
3.6 再分布效应	(80)
3.6.1 BOL 的慢化剂亏损和再分布	(80)
3.6.2 EOL 的慢化剂亏损和再分布	(84)
3.6.3 EOL 轴向燃耗对再分布的影响	(84)
第4章 燃耗与中毒	(88)
4.1 概述	(88)
4.2 核燃料同位素的产生与消耗	(89)
4.3 裂变产物的毒性	(91)
4.3.1 毒性与反应性	(91)
4.3.2 氙毒(^{135}Xe)	(94)
4.3.3 钐毒(^{149}Sm)	(107)
4.3.4 其他毒物	(110)

4.4 堆芯寿期、燃耗、核燃料转换与换料	(112)
4.4.1 堆芯寿期	(112)
4.4.2 燃耗	(113)
4.4.3 核燃料转换	(114)
4.4.4 换料	(117)
第5章 反应性控制	(121)
5.1 概述	(121)
5.2 化学补偿控制	(122)
5.2.1 化学补偿毒物的重要性	(122)
5.2.2 硼的特性	(122)
5.2.3 一回路冷却剂中的硼酸浓度	(123)
5.2.4 硼微分价值	(124)
5.2.5 硼的稀释与硼化	(126)
5.3 可燃毒物控制	(128)
5.3.1 可燃毒物的重要性	(128)
5.3.2 均匀可燃毒物下的 k_{eff}	(128)
5.3.3 可燃毒物棒及其自屏效应	(129)
5.3.4 堆内可燃毒物棒的布置	(130)
5.4 控制棒	(132)
5.4.1 控制棒及其重要性	(132)
5.4.2 控制棒特性	(135)
5.4.3 控制棒对 k_{eff} 的影响	(137)
5.4.4 控制棒价值	(138)
5.4.5 控制棒的运行要求	(143)
第6章 反应堆功率分布及其限制	(148)
6.1 概述	(148)

6.2	反应堆功率分布	(149)
6.2.1	理论分析	(149)
6.2.2	实际测量	(151)
6.3	反应堆功率分布限制	(155)
6.3.1	峰功率限制	(155)
6.3.2	峰值因子	(155)
6.4	轴向功率分布	(157)
6.4.1	轴向功率偏差与轴向(功率)偏移	(159)
6.4.2	轴向功率偏差的运行限制条件	(161)
6.4.3	轴向功率偏差的确定	(164)
6.4.4	常轴向(功率)偏移的运行	(165)
6.5	径向功率分布	(171)
6.5.1	功率水平对径向功率分布的影响	(171)
6.5.2	氙对径向功率分布的影响	(173)
6.5.3	控制棒对径向功率分布的影响	(173)
6.5.4	象限功率倾斜比	(174)
6.5.5	象限功率倾斜比的运行限制条件	(175)
第7章	反应堆启动与停堆过程中的几个问题	(178)
7.1	概述	(178)
7.2	反应堆启动过程中的几个问题	(178)
7.2.1	趋近临界的基本原理	(178)
7.2.2	临界条件的估算	(182)
7.2.3	中子源	(186)
7.2.4	最低临界温度	(188)
7.2.5	临界点的选取	(189)
7.2.6	正常启动到临界过程中的注意点	(190)

7.2.7 启动过程中的异常现象	(192)
7.3 停堆过程中的几个问题	(193)
7.3.1 停堆深度(SDM)	(193)
7.3.2 停堆深度的运行限制条件	(193)
7.3.3 停堆深度的确定	(195)
7.3.4 停堆过程中的异常现象	(203)
参考文献.....	(206)
附录 核电厂技术规格书.....	(207)