

核动力工程中的反应堆物理实验



陈雄月 著

中国核工业集团公司 编

中国原子能出版社

• 013044563

TL32-33
01

核动力工程中的反应堆 物理实验

陈雄月 著



TL32-33
01

中国原子能出版社



北航

C1652214

图书在版编目(CIP)数据

核动力工程中的反应堆物理实验/陈雄月著. —北京:
中国原子能出版社, 2012. 10
ISBN 978-7-5022-5696-8

I. ①核… II. ①陈… III. ①反应堆物理学—实验—
文集 IV. ①TL32-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 228536 号

内 容 简 介

本书是作者长期从事反应堆物理实验工作的成果汇编, 收录了作者在北京原子能研究所、西南反应堆工程研究设计院、中国核动力研究设计院和核动力运行研究所四个时期的共 13 篇论文, 介绍了稍浓铀轻水慢化零功率装置的建设及在其上的实验、我国第一座实验动力堆的物理启动性能研究、燃耗反应堆堆芯物理特性变化的测试等内容, 具有较高的学术价值和推广应用前景。

本书适用于核电系统广大工程技术人员, 特别是电厂技术支持处人员, 可以作为入门教材。

核动力工程中的反应堆物理实验

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 杨树录 侯茸方
技术编辑 丁怀兰
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中国画美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 8.75 字 数 217 千字
版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-5696-8 定 价 45.00 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	洪 潭	张振华	张建成	吴炳泉	戚屯锋	
	邹正宇	顾颖宾	商幼明	缪亚民	孙云根	
	葛政法	周建虎	李苏甲	杨树录	邵焕会	
	于鉴夫					

执行编委

熊晓东	莫银良	叶丹萌	王晓波	杨 克
鞠德重	鲁忆迅	唐锡文	谢先林	蔡黎勇
王海平	刘 朔	肖 武	张国华	

编委会办公室

霍颖颖	张红军	江 鸿	齐红心	章 超
丁怀兰	侯茸方	黄 芳	方朝霞	沈 阳

作者简介



陈雄月(1935—),女,祖籍浙江宁波,研究员级高工。2岁时随父母旅居上海。1953年,在上海市立敬业中学高中毕业后,考入清华大学机械系。1955年转入清华大学工程物理系,改学核物理实验专业。1958年9月毕业后分配到核工业部北京原子能研究所。1966年调入海军七一五所。1968年5月去成都西南反应堆工程研究设计院工作。1985年转武汉核动力运行研究所至今。历任大组长、实验室副主任、主任。

从1958年参加第一个铀-水零功率装置设计开始,陈雄月从事反应堆物理实验工作长达30多年,先后在6个零功率堆上工作过,并参加了我国第一个实验动力堆的物理启动和燃耗以后的堆芯物理实验和测量仪器研制,直到燃耗结束的全过程,为第一个动力堆和秦山一期核电站的堆芯设计方案最佳化提供过大量重要的实验数据。与此同时,在把零功率实验方法推向功率堆燃耗后应用方面也进行了许多开发性工作。在动力堆燃耗后堆芯上,成功地解决了大 γ 场和强中子本底场干扰影响测量的两大难题。在反应堆物理启动和后续物理启动的核安全和节省人力、物力方面,从理念上和实践上都有所突破,作出了应有的贡献。2007年获得专利一项:《确定小型压水堆无外源后续物理启动的燃耗控制点方法》。

在反应堆物理领域所写的科技总结和论文报告有30余篇,其中已发表的有10余篇。历年来有获奖成果9项,其中:

1970年获中国人民解放军海军七一五所通报嘉奖1次。

1979年获国防科委授予的集体一等奖1个,全国科学大会和四川省科学大会优秀成果奖2个,国防科委四等奖1个,三等奖1个。

1984年获核工业部颁发优秀科研成果奖四等奖2个。

2008年获中核集团科学技术进步奖三等奖1个,中国人民解放军总参谋部科学技术进步奖三等奖1个。

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

A handwritten signature in black ink, appearing to be '孙家' (Sun Jia), written in a cursive style.

2009 年 9 月 9 日

序言(一)

核能的发现和利用是 20 世纪人类最重大的科学技术成就之一。核能的和平利用是人类理性的正确选择,可为解决人类生存必需的能源和改善生态环境作出重大贡献。实现核能的大规模商业应用,首先要掌握核反应堆技术,其中必须首先掌握反应堆中子物理性能,这是核能技术发展的先导和基础。

陈雄月同志是清华大学工程物理系的首届毕业生,1958 年毕业后分配到原二机部原子能科学研究所,即现在的中国原子能科学研究院,从事反应堆物理的研究工作。自此开始,她把全部精力都投入在反应堆物理的研究工作上,取得了卓有成效的成绩,为我国核能发展作出了重要贡献。

工作的第一阶段,参与反应堆物理研究初创工作的“东风一号”、“东风二号”的建设,参与了考验元件、燃料、材料工具堆建设的堆芯物理设计的多方案研究。陈雄月同志作出了重要贡献,其成果主要体现在前 3 篇论文中。

工作的第二阶段,围绕我国第一座核动力反应堆进行反应堆物理性能研究,进行物理设计方案的优化研究,设计出了堆物理性能优良的堆芯方案,为反应堆工程建设,安全启动,顺利达到满功率运行打下了基础。陈雄月同志在其中作出重要贡献,特别在反应性控制能力、中子通量密度展平、模拟机落棒法等方面,取得了一些优秀的成果,主要体现在文集中第 4~7 篇论文中。

工作的第三阶段,主要针对第一动力堆运行结束后开盖鉴定,进行的燃耗反应堆堆芯反应堆物理特性的测试。在测试中,由于是经燃耗后反应堆堆芯的变化,发生了一些新现象,遇到了一些新问题。陈雄月同志在退休之后,发挥余热,继续探索,在理论与实践的结合上,解决了测试中遇到的与燃耗堆芯相关的反应堆物理问题,作出了重要贡献,其成果有独创性,具有较高学术价值。

针对轻水反应堆模拟机落棒法反应性测量中的空间效应,陈雄月同志提出了通过计算空间畸变因子修正的方法,使测试精度大幅提高,满足了工程的需要。该方法有较高的学术价值和应用前景。

在深燃耗反应堆停堆反应性测量中遇到的强而复杂的干扰,影响到反应性测量,是反应堆物理中的世界性难题。陈雄月同志对干扰源的性质、规律进行了研究,确证自生中子源是主要的干扰,找到了堆内超铀元素自发裂变中子的

规律,从而使过去实验中发现的问题得到了定量解释,为测量中消除干扰打下了基础,其研究成果在国际会议上作了报告,并收入会议文集,有推广应用价值。

这一阶段的工作,有的一直延续到退休之后很长时间,其成果主要在后面的6篇论文中体现。

陈雄月同志长期探索研究,取得了优异的成绩。本论文集反映了她对我国反应堆物理工作的贡献,有较高的科学价值和推广应用价值,可供推广应用者和继续研究的后人参考。陈雄月同志的研究工作,有的是在简陋条件下进行的,通过创新开拓研究,取得了国外在优越条件下取得的成果;有的是在退休以后的困难条件下完成的,至今她还在继续进行研究探索,让人深受感动。她踏实、认真、勤恳,锲而不舍、积极探索的工作精神和严谨的科学作风是广大科技工作者的榜样,值得大家学习。

中国核动力学会理事
中国核动力学会核能经济专业委员会主任

温鸿钧

2011年8月

序言(二)

陈雄月同志把自己长期从事反应堆物理实验工作的成果汇编成文集出版,这对培养新一代核电人,弘扬核安全文化无疑具有积极意义。

文集中介绍的零功率装置,也是培养核电运行值班人员的重要工具。它可使学员熟悉反应堆这一特殊的能源发生设备,建立起临界、事故等重要概念。从临界到瞬发临界仅仅 1γ (元)的反应性余量差。一个好的运行人员应熟悉这些概念,以正确指导自己的工作,确保运行安全。

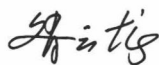
我国第一代动力堆的研究设计经验是极为宝贵的。要设计出一个性能良好的反应堆,从选择栅格水铀比,到确定控制能力,提棒方式,展平中子通量密度等,都要把安全放在首位。在陈雄月的科研工作中,自始至终贯彻了“安全第一”的思想,如物理实验的方案、方法选择都首先考虑到安全性。文集中有2篇关于中子通量密度空间效应的文章,其中一篇是关于1973年之前为解决第一代模拟机落棒法消除空间效应的机理证明。据此,就确定用落棒法作为再启动的测量方法,淘汰了费时、费力的硼中毒测大反应性的实验方法。另一篇是用空间效应的存在,说明在向临界趋近中影响计数率变化规律的机理。这些科研成果对安全运行有直接参考价值,运行人员都是应当了解和掌握的。

文集中《关于深燃耗堆芯的反应性测量》等5篇文章,是反映动力堆燃耗后工作的成果,内容包括从消除强 γ 场干扰的组合计数管的研制,到消除强中子本底干扰的互相关技术的开发,这些研究课题在当时都是属于赶超世界先进水平的科研项目。

《在小燃耗堆芯应用 Origen-2 程序计算中子源强度的程序生效工作》一文是陈雄月同志近几年完成的工作。这是把国外新计算程序,移植应用到中、低燃耗堆芯计算的新成果。其内容不但对核电站技术支持人员有参考价值,对乏燃料开发应用人员和运输管理人员也有借鉴作用。它对核电长远发展应用是有意义的。

我相信,文集的出版一定会受到核电系统科技工作者的欢迎。

原广东核电合营公司总经理



2011年8月

序言(三)

人类社会能够生活和发展的必要条件之一,是一定要有足够的能源来满足生活和生产的要求。为了争夺地球上有限的有机燃料能源,许多国家曾发动过残酷的战争。各国开发新能源的实践表明,核电已是可以大规模商业运用的首选新能源。因此,反应堆事业是对国家的经济建设和国防安全作用极其重大的事业。为了最佳化地发展这一事业,必须充分了解、掌握反应堆的物理性能,所以,反应堆物理是发展核能的基础学科之一。

我国从20世纪50年代后半期开始,在当时的二机部原子能研究所中子物理研究室,成立了由朱光亚先生领导的反应堆物理研究组。组员主要由刚毕业的大学生组成,在苏联专家指导下完成了所内重水实验反应堆的物理启动工作,初步学习了实验堆物理的基本知识、接着所内把研究组扩大为研究室,建造了研究实验堆物理的主要设施“东风一号”零功率堆,来进一步夯实研究人员的基本知识提高实验技能和运行管理能力。美国和苏联在早期堆物理研究工作中,由于缺乏经验,曾多次发生过意外临界事故,造成人员伤亡的悲剧,我国没有发生过类似事故。

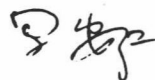
我国堆物理的下一步工作,是研究设计用于考验大型新堆用的燃料元件和材料的工具堆。当时,使用的理论计算模型尚未达到完善阶段。计算主要靠电动和手摇计算机来完成,实验肯定设计方案的意义重大,因此,建立了“东风二号”零功率堆,来模拟研究工具堆的物理性能,做了三百多个方案的实验,才选出了最佳化设计意见。有关报告被列入国家重大科技成果档案保存。“东风二号”的建造,和在其上所做的铀水栅参数测量两篇报告,由于不涉及具体的工程方案,后来,以原子能所的名义在我国《原子能》期刊上发表,这两篇报告收入了本文集。

原子能研究所内接着建造了“东风三号”零功率堆,来模拟研究我国第一座潜艇用动力堆,反应堆研究室后来又开展了快中子堆的前期研究工作,筹建快中子零功率堆。动力堆的建设,使国内研究堆物理的单位增加,对高功率堆物理性能的研究也随之展开。但十年动乱使我国的各项事业受到重大打击,反应堆物理研究工作也不例外。十年动乱结束后,有关专家多次建议发展核电事

业,但是,由于计划经济体制没有迅速改变和部门矛盾引起内耗等原因,1982年国务院成立核电领导小组,来领导国家核电发展工作,我国核电才实现了真正起步。本世纪初积极发展核电列入国家政策,国务院提出了到2020年建成4000万千瓦核电机组的规划。目前,我国在建核电站规模位列世界各国第一,国内堆物理工作者在国家核电迅速发展的这一新阶段有了广阔的用武之地。这是很令人高兴的事。

陈雄月同志是我国开展堆物理研究工作之初就参与工作,至今还在继续研究的少数专家之一。她一直孜孜不倦,勤勤恳恳地以认真严谨的工作态度从事研究,成绩优异,她的文集反映出她对我国堆物理研究工作的贡献,文集的出版对我国年轻一代堆物理工作者掌握有关知识将有很大帮助。

原国务院核电办公室副主任



2010年5月

序言(四)

陈雄月同志是我国核物理实验专业首批毕业生,于1958年分配到原二机部原子能研究所,并有幸参加我国自行研制的零功率反应堆“东风一号”和“东风二号”的建造和试验工作。论文的第1~3篇就是这两个铀水零功率装置的建造和在我国首次进行反应堆物理试验的总结,从而开创了我国反应堆物理实验的先河。

第4~7篇是她从事我国第一个核动力反应堆研制期间公开发表的论文。

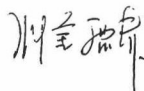
从第8篇《在强 γ 场和强本底中子场中的次临界反应性测量技术》论文中可以看出她能跟随电子技术的发展,将其工作拓宽到改进测量仪器方面,对物理试验和测量仪器改进有着重要的指导意义。

第9~13篇是她在武汉核动力运行研究所期间发表的论文。从论文内容可以看出,她的工作范围又扩大到核电厂的环境和核电厂建设的翻译合同管理工作(这两篇未收入本文集)。论文也反映出她不但在反应堆物理试验中善于技术总结,即使从事管理时也非常重视总结。陈雄月同志这种从事任何工作都表现出的踏实和认真的精神是值得当今核科技工作者认真学习的。特别值得提及的是第9篇《关于深燃耗堆芯的反应性测量》一文,虽然是从近三十年前实验性PWR反应堆深燃耗条件下测量的数据,但后来利用计算机进行处理,对燃耗后的堆芯反应性测量具有指导意义,曾在国际会议上进行了报告并被收入在会议论文集中。

陈雄月同志亲历诸多反应堆堆芯物理实验和总结,在某种程度上可以说,这些论文是我国反应堆物理试验的历史回顾。陈雄月同志能在非常简陋的条件下,认真踏实、不断开拓实验技术并进行总结,她是我们科技工作者中的典范。

该论文集可以作为学习和了解反应堆物理实验非常好的参考资料。

中国工程院院士
原七一九所所长



2010年12月

自序

核反应堆物理实验是一门新兴学科,它所涵盖的知识面很广,涉及核物理、核材料、核化学及无线电电子学和计算技术等诸多学科。

然而,早在1955年清华大学创办工程物理系时,国内有关核反应堆物理的教科书仅有S. Glasstone等编著的《原子核反应堆理论纲要》。1970年,我国第一座压水堆型实验动力堆启动并达到满功率运行之后,原子能出版社不失时机地筹措编书计划。该社责任编辑李治国同志为编写《原子核反应堆物理实验》一书,曾先后两次专程来成都洽谈组稿。由于当时科研工作繁忙,无暇写作,因此,把出书任务给耽搁了。此后,我一直希望能写一本总结国内科研成果的参考书,加以弥补。这便是我选编本文集的初始动机。

近年来在工作中深感:由于核工业专业分工过细,加上核能应用的保密限制,妨碍了交叉学科间成果的交流与推广。例如:乏燃料中有中子发射,很多搞运输的人早在六七十年代就知道了,但不知道这些中子是哪种核素产生的,数量是多少,半衰期是多长。直到1980年前后,国外才公布了“少数同位素(MA)”产额的计算程序。又如: ^{238}U 有自发裂变现象,大家已知道是苏联科学家Petrzhak和Flerov于1940年发现的。然而,在1998年纽约长岛核科学技术物理会议上公布的123种同位素的自发裂变参数,仍然鲜为人知。1944年,在回旋加速器上用 α 粒子照射 ^{239}Pu 获得了Cm同位素,而 ^{244}Cm 的半衰期长为18.1 a的数据,则是1968年才公布的。七十年代出版的教科书还不可能写入这些新知识,这促使我写一本包含新知识的书,把上世纪在核物理、核化学和计算技术领域的新成果,推向反应堆工程及环境保护方面,使大家开阔思路,提高运行安全,避免浪费人力、物力。传播这类新知识,形成了选编本文集的第二个动机。

入选本文集的文章都是科研实践经验的总结,均已公开发表过。文集也是我国第一代动力堆开发的历史记录。

我从事反应堆物理实验工作30余年,参加了第一代动力堆研制和运行中的物理实验工作,一直到模式堆燃耗末全过程。在成都工作的16年,是我一生中事业机遇最好的时期。当时我国并不富裕,为了国防需要,国家把大量资金投

入我们的研究工作,落棒法模拟机试制费用是10万元,这在当时可是一笔不菲的开支。在“文化大革命”期间,由于有“特别公函”的保护,我们能安心去完成任务。许多仪器厂已经停工停产,却只留下为我们工程要求的一个项目,而且加班加点工作,准时交货。因此,我们也以最大热情去完成研究工作。如模拟机落棒法,我们在完全搞清空间效应问题后,把零功率用仪器推向功率堆运行中使用,在以后的多次再启动中都应用了。这比美国核协会标准 ANSI/ANS 19.6.1—2005 文件中规定的,把棒插入法 DRWN 方法引入 PWR 再启动中“成为可接受方法”并且“取消了必须测量微分硼价值”要提早30年,而且我们对空间效应的影响了解得更全面。1997年,我利用计算机终于完成了消除了超铀元素等自发裂变对中子测量影响时,美国2000年的 PHYSOR—2000 文献中还在讨论噪声分析法比常规法测温度系数差2~5倍问题。这一切都说明这方面工作成果都是可以在核电站应用的。

核反应堆的建造和运行是一个涉及多种技术的综合性行业。同样,一个大型反应堆上的物理实验,必须各方面通力配合,才能确保安全、顺利地完。我们很幸运有一个好的大环境,还有一批事业心很强的领导和同事,我们的工作成果是在多次失败后取得的,6次失败的实验经验把我们引向1980年的实验圆满完成之路。

当年核一院院长周圣洋和总工程师赵仁恺鼓励我们不怕困难,勇往直前。周圣洋院长说:“做总比不做好,哪怕失败了也是成功的”。所谓“失败是成功之母”,在这些实验中体现得很具体,真切。我特别要感谢支持我们工作的各方领导和同事们,以及奋不顾身工作的工人同志。大堆运行人员和零功率装置上运行人员都曾为实验作过贡献。在文集目录中补充了部分相关工作人员的名单,遗漏是难免的,请批评指正。

“我们正在做我们的前人所未有做过的极其光荣伟大的事业,我们的目的要达到,我们的目的一定能够达到。”在选编文集过程中,我的老上级罗安仁总工大力支持,为我作序;武汉核动力运行研究所老所长陈祖泽同志也热心支持,他推荐武汉七一九所原所长张金麟院士写了一篇序言。

反应堆不但给人类提供大量能源,它还是产生大量新元素的源头,它将给人类带来更多新知识、新材料,让这个世界变得更美好。

陈雄月

2012年9月

目 录

绪 论	(1)
-----	-------

一、1958—1968 在北京原子能研究所

1 DF-1 铀水零功率装置	罗安仁 曾乃工 陈雄月 等(7)
2 DF-2 铀水零功率装置	罗安仁 罗璋琳 肖勳泽 等(16)
3 在 DF-2 铀水零功率装置上所作的反应堆物理静态参数测量	罗安仁 陈雄月 陈西善 等(22)

二、1968—1973 在西南反应堆工程研究院

4 稍加浓铀-水栅内可溶毒物钆和硼反应性当量的对比研究	陈雄月 陈绍能(41)
5 铀水栅上硼溶液微分、积分价值测量及控制棒效率对比	陈雄月 钱纪生(47)
6 在轻水堆上用模拟机落棒法测量反应性时一种消除空间效应的方法 ——第一型模拟机	陈雄月(55)
7 压水堆物理启动中提棒外推临界的曲线发散现象及其成因机制	陈雄月(62)

三、1973—1983 在中国核动力研究设计院

8 在强 γ 场和强本底中子场中的次临界反应性测量技术 ——组合式中子计数管和小型超低频互相关频谱分析仪介绍	陈雄月 韩承慈 夏应军 等(69)
9 关于深燃耗堆芯的反应性测量	陈雄月(76)

10 Measurement of reactivity of high burnup reactor core
..... CHEN Xiong-yue, XIA Ying-jun, HAN Cheng-ci, et al(82)

11 高燃耗堆芯反应性测量的干扰源研究..... 陈雄月 吕大军 邱希春 等(95)

四、1984—2008 在核动力运行研究所

12 反应堆核测系统源区监测用新型涂硼组合计数管的研制..... 陈雄月(107)

13 在小燃耗堆芯应用 Origen-2 程序计算中子源强度的程序确认工作
..... 陈雄月 高贵翔 刘振华 等(113)