

序

作为我国反应堆工程起步重要标志的101重水研究堆，已安全运行了30年。30年来，它在堆工人才的培养方面，以及“两弹”过关，核潜艇和核电站动力堆的研究开发，放射性核素的辐照生产，核技术应用，中子散射实验等对国防、国民经济发展有重大影响的工程项目和科研领域中，作出了贡献。

遵循学习消化、掌握应用、改造创新的方针，反应堆工作人员对堆的设备、系统、操作、管理等方面进行了大量的技术改进和改造，进行了反应堆改建和更换核燃料的重大技术改造，改进了堆的性能，扩大了堆的用途并提高了经济效益。

101重水研究堆30年的经历，从一个侧面反映了我国核工业自力更生、艰苦创业的历程，反映了中华儿女有立于世界核技术之林的能力。

在庆贺101重水研究堆建堆30周年之际，写出这本书，对反应堆运行人员的培训，总结经验，提高技术水平以及作为同行的参考资料都将是有益的。

希望仍在101重水研究堆工作的同志，继续发扬艰苦奋斗、不断进取的优良作风，为四化谱写新的篇章。

马福邦

1988年6月1日

主编 朱焕南 阎童林 贾占礼 郭文琪 杨道良

编委 王维民 孙振翮 孙德仁 张文惠 杨芝凤 吴坤益

金鼎齐 春玉卿 袁水泉 夏延龄 谢自强 谢海洪

前 言

101重水研究堆(HWRR)是我国第一座反应堆,迄今已运行了30年。30年来,我国的核工业和核技术的开发应用,从无到有,发展迅速,取得了举世瞩目的成就。在此期间,101重水研究堆在我国核工业科技人才的培训方面,以及在我国核科学技术的实验研究、开发应用,堆照放射性核素生产,辐照改性和辐照研究等方面,都发挥了应有的作用。历届在101重水研究堆工作的同志,从启蒙学习重水研究堆的基本知识,到掌握重水研究堆的理论;从常规的运行、维修和管理,到以两次重大的堆芯改建为代表的技术改造、提高重水研究堆的性能和扩大综合应用能力等,都付出了艰辛的劳动,为101重水研究堆积累了经验。

多年来,新走上反应堆岗位的人员或实习人员,需要有一本比较系统全面的101重水研究堆工作人员的培训教材;广大用户需要有一本101重水研究堆的入门书;运行、维修及科研管理人员需要有一本主要性能参数比较齐全的101重水研究堆工作手册;从事反应堆设计、研究的专业人员,对101重水研究堆的经验也表现了浓厚兴趣。

为满足上述需要,在101重水研究堆运行30周年之际,我们编写了《重水研究堆》一书。希望它既能作为今后101重水研究堆工作人员的主要培训教材,也可作为101重水研究堆工作人员的工作手册;既可作为广大用户的入门指南,也可作为反应堆工

程科技人员的参考资料。各章作者是：第一章，张文惠；第二章，孙德仁；第三章，袁水泉；第四章，谢自强；第五章，郭文琪、因长有；第六章，吴坤益；第七章，刘俊江；第八章，春玉卿；第九章，朱焕南；第十章，贾占礼；第十一章，杨芝凤等；第十二章，王维民；第十三章，夏延龄等；第十四章，杨道良等；第十五章，阎童林。参加部分章节编写和讨论的还有：孙用均，朱宝珍，杨林，李玉芝，杨同华，张存贤，张淑卿，苏淑娟，郑彦巍，郝俊纪，贾智勇，黄克，谢海洪，乔东坡，刘乃荣，刘汉祯，杨如川，金华晋等。

本书由林诚格、杨钧陶、张文惠主审。

负责有关各章审查的专家有马福邦，孙振翮，李玉崧，杨学文，陈叔平，陈国舜，林芳良，孟繁淑，陶清澄，袁履正，曹宜铮，黄道立，谢兹，童天真等。

在本书编写过程中，全书主审及各章主审的专家，对本书内容提出了很多宝贵意见。原核工业部及中国原子能科学研究院的领导和有关部门，对本书的出版给予了热情支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于编写者水平有限，错误、不当、遗漏之处在所难免，希望读者指正。

编 者

1988年5月30日

继往开来，为我国核科学
技术作出新的贡献。

钱三强

1982年6月10日

认真总结一二核反应堆
建设运行和科研经验，
为我国核能发展做出更
大贡献！

热烈祝贺我国首座核反应
堆建堆三十週年

王淦昌

一九八六年六月

記昔日披荆斬棘

謀明朝九天攬月

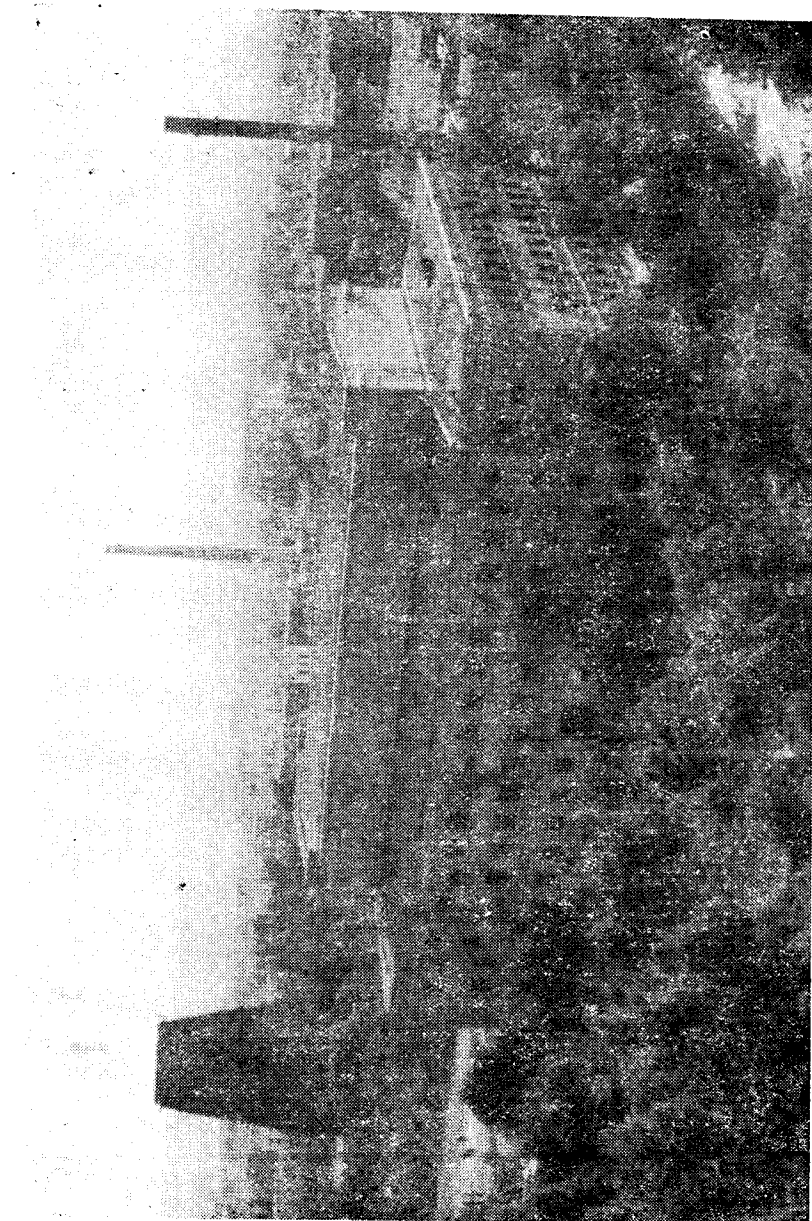
戴傳曾

一九六六年六月

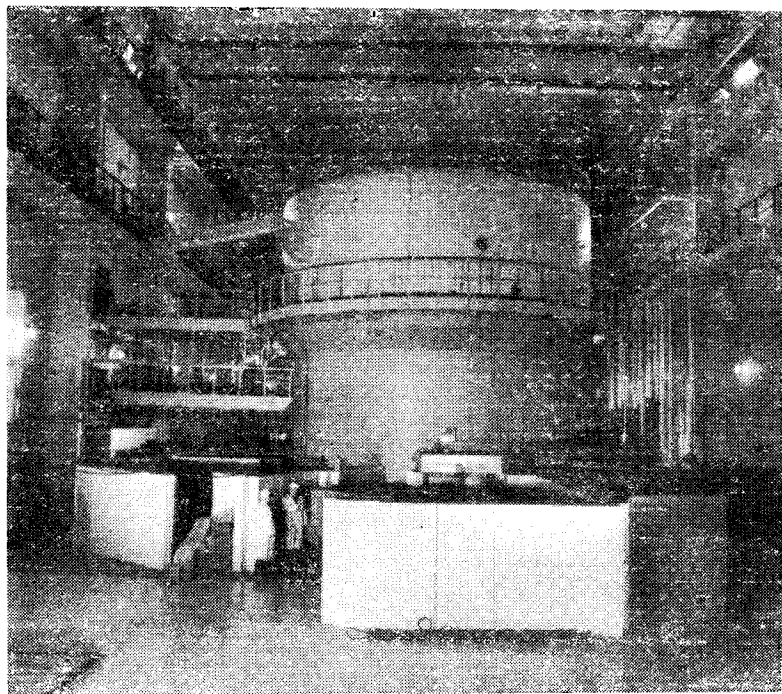
求實創新
勇攀高峰

孫祖訓

二〇一六年五月



110重水研究堆厂房外景



101重水研究堆实验大厅



陈毅在反应堆落成典礼上剪彩



周恩来、陈毅、贺龙同外宾一起参观原子能所

目 录

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 HWRR发展概况	2
第三节 HWRR的主要用途	12
参考文献	15
第二章 堆本体	17
第一节 概 述	17
第二节 堆本体主要构成与布局	17
第三节 主要部件	33
第四节 工艺运输	50
第五节 HWRR堆本体主要参数汇编	57
参考文献	63
第三章 重水系统及其他辅助系统	64
第一节 概 述	64
第二节 重水系统	68
第三节 氦气系统	92
第四节 屏冷系统	101
第五节 二次冷却水系统	104
第六节 真空系统	108
第七节 通风系统	109
第八节 HWRR重水系统及其他辅助系统主要技术参数汇编	112
参考文献	121
第四章 热工参数监测系统	122
第一节 概 述	122
第二节 热工参数设置	124
第三节 热工参数监测系统的组成	128
第四节 TF-900电子综合控制装置的应用	130

第五节 热工参数的测量方法.....	132
第六节 HWRR热工参数监测系统主要参数汇编.....	149
参考文献.....	151
第五章 控制保护系统	152
第一节 概 述.....	152
第二节 控制棒与传动机构.....	153
第三节 核功率测量系统.....	159
第四节 功率自动调节系统.....	162
第五节 自动开堆系统.....	173
第六节 保护系统.....	175
第七节 安全逻辑控制电路.....	184
第八节 控制棒控制电路.....	185
第九节 HWRR控制保护系统主要参数汇编.....	190
参考文献.....	192
第六章 计算机过程监控系统	193
第一节 概 述.....	193
第二节 HWRR过程监控计算机系统.....	196
第三节 HWRR计算机实时监测系统.....	201
第四节 HWRR监控机功能的再开发.....	220
第五节 HWRR计算机过程监控系统参数汇编.....	222
参考文献.....	229
第七章 电气系统	230
第一节 概 述.....	230
第二节 供配电.....	231
第三节 主要电气设备的控制.....	241
第四节 信号系统.....	246
第五节 HWRR电气系统主要参数汇编.....	255
第八章 辐射监测及防护	258
第一节 概 述.....	258
第二节 辐射防护监测系统.....	259
第三节 辐射防护.....	272

第四节	三废管理	279
第五节	HWRR 改建中的辐射防护	282
第六节	HWRR辐射防护主要数据汇编	285
	参考文献	291
第九章	反应堆物理	292
第一节	概 述	292
第二节	少群中子扩散计算	293
第三节	各类反应性效应计算	320
第四节	燃耗与换料方案的优化	337
第五节	反应堆物理的实验测量	348
第六节	HWRR堆芯物理特性参数汇编	374
	参考文献	394
第十章	热工水力分析	396
第一节	概 述	396
第二节	稳态热工水力计算	398
第三节	最大允许功率在线分析	431
第四节	瞬态热工水力分析	437
第五节	HWRR热工水力主要参数汇编	445
	参考文献	450
第十一章	反应堆化学	452
第一节	概 述	452
第二节	重水系统的化学及屏冷系统的防腐蚀	453
第三节	重水的净化和浓缩	472
第四节	HWRR重水系统的化学去污	494
第五节	重要参数汇编	500
	参考文献	501
第十二章	HWRR调试启动	504
第一节	概 述	504
第二节	初步试验	504
第三节	启动试验	507
第四节	重水系统综合试验	509

第五节 功率提升试验.....	512
第十三章 反应堆运行	514
第一节 概 述.....	514
第二节 运行安全.....	514
第三节 运行分析.....	520
第四节 典型事件.....	525
第五节 HWRR主要运行参数汇编.....	531
参考文献.....	533
第十四章 技术改进和综合利用.....	534
第一节 概 述.....	534
第二节 HWRR的改建.....	535
第三节 改用二氧化铀燃料元件.....	540
第四节 重水泵轴承材料的改进.....	542
第五节 二次水的加药阻垢.....	545
第六节 旋臂吊车系统的改进.....	548
第七节 浅燃耗燃料组件的回堆再用.....	550
第八节 冷中子源装置.....	554
第九节 中子活化分析.....	557
第十节 燃料元件辐照回路.....	559
第十一节 水平孔道试验研究工作.....	566
第十二节 单晶硅中子掺杂.....	569
第十三节 放射性核素辐照生产.....	571
参考文献.....	575
第十五章 技术管理	576
第一节 概 述.....	576
第二节 组织体制和岗位责任.....	576
第三节 规程制度.....	579
第四节 运行计划管理.....	585
第五节 燃料元件的使用和管理.....	586
第六节 运行分析.....	587
第七节 管理现代化初步.....	589
参考文献.....	590

第一章 绪 论

第一节 引 言

101重水研究堆（代号HWRR），是我国第一座反应堆。1958年6月13日首次达到临界，同年9月23日，由陈毅副总理剪彩后，开始提升功率运行。至今已安全运行30年。30年来，这座反应堆为发展我国核科学技术，特别是对我国原子弹、氢弹爆炸成功，核潜艇下水，放射性核素生产，以及培养核科技人才，做出了贡献。

30年间，从世界范围来说，研究堆技术得到了很大的发展。一方面是设计建造满足某种特殊需要、性能更先进的反应堆（但70年代以后，新建的研究堆明显减少）；另一方面是，对已经建成的为数众多的反应堆，不断扩大利用，使其充分发挥作用。为此，围绕着提高反应堆中子通量密度、降低堆燃料的富集度、发展堆内辐照技术，以及扩大应用等重大技术课题，很多国家都开展了研究，并取得了很好的效果。不少反应堆经过挖潜、改进，改善了堆的性能，提高了中子通量密度。以高浓铀为燃料的不少研究堆，改用了或计划改用低浓铀燃料。反应堆辐照技术，包括辐照装置的设计、辐照过程中的测试、观察及中间检验技术，日益完备。研究堆辐照生产的放射性核素，已成为国民经济发展和人民生活中不可缺少的一部分。随着物理实验仪器和设备的改进、自动化程度的提高，研究堆在物理研究中的作用，愈来愈显得重要^[1-10]。

HWRR的发展，初期得到了苏联的帮助。不久，这种关系即

中断了。从60年代初至70年代末这个时期内，我国是在没有外援的情况下，独立自主发展的。回顾30年的历史可以看出，HWRR的技术进步与发展，是和世界上的研究堆技术发展总规律相一致的，但又从我国的实际情况出发，具有自己的特色。

在30年安全运行实践中，从反应堆物理、热工特性研究、设备维修改进、辐射监测和防护，到反应堆运行管理、反应堆利用，以及人才培养等许多方面，都进行了大量的工作，并取得了宝贵的经验。认真总结这些经验，并把它反馈给我国的核工业系统，以促进我国反应堆工程技术的发展，这就是我们编写这本书的目的。

第二节 HWRR发展概况

HWRR是多用途反应堆。原设计堆芯为水罐式结构，以含2% ^{235}U 的金属铀为燃料，重水做慢化剂和冷却剂，石墨做反射层。反应堆额定功率为7 MW，加强功率为10 MW，最大热中子通量密度为 $1.2 \times 10^{14} \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。它具有单位功率热中子通量密度高，辐照空间大， γ 射线本底低等优点，适合于热中子物理实验和生产放射性核素。由于使用重水做慢化剂和冷却剂，所以对堆芯及一次水系统密封要求严格，并且增设了庞大的氮气系统，因而与轻水研究堆相比，运行维修比较复杂。

HWRR的发展历史，大致可以分为三个阶段。从1958年起至1978年止，为第一阶段，以吸收、消化、改进和安全运行为主要任务。1979年至1982年，为第二阶段，即反应堆改建阶段。1982年以后，为反应堆改建以后继续安全运行，深化应用的第三阶段。