

核科学技术丛书

核临界安全

阮可强 等著

原子能出版社

核 临 界 安 全

阮可强 等 著

原 子 能 出 版 社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

核临界安全/阮可强等著. —北京:原子能出版社,2001.6

(核科学技术丛书)

ISBN 7-5022-2245-6

I. 核… II. 阮… III. 临界(核)-反应堆安全 IV. TL364

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 035408 号

内 容 提 要

本书总结了我国核临界安全工作的现状,根据国际核临界安全的最新进展,结合我国核工业具体情况,探索与论述核临界安全工作中所需要的基础知识、实践经验以及可能解决问题的途径。

本书主要包括:核临界安全基础知识,临界安全实验及临界数据和次临界限值,临界安全标准与管理,核燃料循环中的临界安全控制,临界事故防范,核临界安全最新技术展望等。

此书可供核科技工业、核能应用等领域中从事核临界安全与核安全的科学技术、工程设计、生产、科研人员参考,也可供从事核事业的管理人员和高等院校有关专业师生参考。

核临界安全

阮可强 等著

责任编辑:赵志军

封面设计:崔 彤 版式设计:崔 彤

责任校对:李建慧 责任印制:刘芳燕

原子能出版社出版 发行

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张:12.5 字数:319 千字

2001 年 6 月北京第一版 2001 年 6 月北京第一次印刷

印数:1—1000

定价:36.00 元(精)

《核临界安全》编审委员会

主 编:阮可强

副主编:从慧玲 李玉成

编 委:(以姓氏笔画为序)

王维善 从慧玲 刘志林 阮可强

李玉成 沈雷生 张金涛 吴德强

周济人 贺仁辅 黄锦华 嵇凤官

序

核科学技术,是一门新兴的尖端科学技术,包括核物理、核化学等基础学科以及与实现核裂变和核聚变直接相关的核资源勘查、核原料开采与加工、同位素分离、核燃料元件制造、核反应堆、乏燃料后处理、加速器、核动力和同位素与辐射技术等应用核技术。

自从1896年发现天然放射性,1934年发现人工放射性和1938年发现核裂变以来,核科学技术发展速度惊人,成果辉煌:1942年建成第一座核裂变反应堆,紧接着,于1945年美国爆炸了第一颗原子弹,1952年氢弹试验成功,1954年苏联建成了世界上第一座核电站,1959年美苏核动力船只先后下水……。目前全世界有400多座核电机组正在运行,其发电量占世界总发电量17%;非动力核技术也为人类健康、经济发展和社会进步做出巨大的贡献。

我国核科学技术,自1955年以来,经过近40年的努力,发展迅速,成绩卓著,蜚声中外。1964年10月16日,我国第一颗原子弹爆炸成功,1967年6月17日氢弹试验成功,紧接着,我国第一艘核潜艇下水,我国自行设计建造的秦山核电厂并网发电,广东大亚湾核电站建成发电,投入商业运行,受控核聚变研究取得可喜成果,同位素与辐射技术广泛应用于科学研究、医学诊断与治疗 and 工农业生产。

我国核科技事业的发展,推动和促进了整个科学技术和国民经济的发展,大大增强了我国综合国力,提高了我国的国际地位。

我国广大核科技工作者,尤其是老科学家、老专家,为我国核

科学技术和核工业,做出了突出贡献。在中国核工业总公司领导和支持下,原子能出版社在经费十分拮据的情况下,千方百计筹措资金,组织出版这套《核科学技术丛书》,总结老科学家和专家们毕生从事核科技事业所做出的贡献、经验和智慧,大力宣传推广核科学技术,纠正人们头脑中核科学技术只与核武器相联系的不正确想法,消除公众对核科技不必要的疑虑,使核科学技术在我国核工业第二次创业中发挥出巨大的力量,这是难能可贵的了不起之举。我衷心祝贺《核科学技术丛书》的出版。

王淦昌

1994年9月19日

前 言

我国核临界安全是随着我国核燃料工业生产,以及当前核电新兴产业的发展而发展的。四十多年来,为适应核工程建设与发展的需要,保障放射性工作人员和公众的安全,在核临界安全做了大量有效的工作,取得了很大的成绩。为了进一步加强核临界安全工作,适应核燃料循环工业生产需要,促进核电站可持续发展,保障核临界安全,很有必要认真总结四十多年来我国核临界安全科学研究成果和实践经验,运用现代核安全知识,研究我国核临界安全技术与行政管理的实际问题,创立符合我国国情的核临界安全技术与管理工作的,不断提高核临界安全工作效率和水平。

为此目的,我们邀请了十多位多年从事核临界安全研究、生产和管理工作,具有一定理论与实践经验的专业人员编写了这本核临界安全专著。参加本书编写工作的人员,除主编、副主编外,参加编写的有:阮可强、李玉成(前言、绪论);阮可强、黄锦华(第一章);贺仁辅(第二章);王维善(第三章);嵇凤官(第四章);李玉成、张金涛(第五章);王维善、李玉成(第六章,其中周济人——第二节;王维善——第三节;刘志林——第四节;吴德强——第五节;王维善——第六节);王维善、沈雷生、李玉成(第七、八章)。本书的编写出版还得到中国核工业集团公司领导及其安防部等单位的关怀与支持,在此一并致谢。

期望这部专著,能对核临界安全工作水平的提高起积极的作用。并有助于整个核工业安全管理工作。本书的编写,仅是一次初步的尝试,难免有不足之处,希望广大读者对本书批评指正。

编 者

2000年5月

目 录

绪论	(1)
第一章 核临界安全的一些基础知识	(12)
第一节 中子链式反应及临界	(12)
第二节 临界条件	(13)
第三节 密度效应	(17)
第四节 稀释效应	(20)
第五节 慢化效应	(21)
第六节 几何形状	(25)
第七节 反射效应	(29)
第八节 中子毒物	(31)
第二章 临界安全实验	(35)
第一节 次临界倍增实验	(35)
一、引言	(35)
二、次临界倍增实验的基本概念与理论基础	(37)
三、次临界系统的中子倍增	(53)
四、中子倍增测量实验与向临界逼近	(60)
五、次临界中子倍增测量模拟实验	(67)
六、次临界就地测量实验	(70)
第二节 临界实验	(71)
一、概述	(71)
二、临界实验的原理与方法	(73)
三、临界实验装置	(77)
第三节 瞬发中子衰减常数的实验测量	(80)
一、基本原理	(80)
二、测量瞬发中子衰减常数的 Rossi- α 实验	(90)
三、测量瞬发中子衰减常数的 Feynman 方法	(98)
四、测量瞬发中子衰减常数的 Babala 方法	(108)

五、用脉冲中子源方法测量瞬发中子衰减常数·····	(112)
六、用随机脉冲中子源方法测量瞬发中子衰减常数·····	(124)
参考文献·····	(127)
第三章 临界数据和次临界限值 ·····	(130)
第一节 概述·····	(130)
一、临界数据·····	(130)
二、次临界限值·····	(133)
第二节 单参数次临界限值·····	(133)
一、水慢化系统·····	(133)
二、金属单元·····	(135)
三、氧化物单元·····	(136)
第三节 多参数次临界限值·····	(137)
一、水溶液和金属-水混合物·····	(137)
二、低富集铀系统·····	(141)
三、 ^{240}Pu , ^{241}Pu 含量不同的 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 溶液·····	(146)
四、 ^{235}U - H_2O -C 混合物·····	(147)
五、Pu-U 混合物·····	(149)
第四节 特殊几何·····	(156)
一、环柱容器·····	(156)
二、管道交接·····	(158)
第五节 次临界限值的放宽·····	(161)
一、密度效应·····	(161)
二、活性区稀释效应·····	(162)
三、中子吸收剂·····	(162)
第六节 影响单体限值的意外因素·····	(164)
第七节 混凝土反射层·····	(168)
第八节 多体·····	(169)
参考文献·····	(171)
第四章 临界安全标准 ·····	(173)
第一节 概述·····	(173)

一、 标准的一般特征·····	(174)
二、 我国核临界安全标准的制定原则·····	(176)
三、 我国核临界安全标准的制定程序·····	(179)
四、 我国核临界安全标准的构成·····	(181)
第二节 通用标准·····	(184)
一、 行政管理实施要求·····	(185)
二、 双偶然事件原则·····	(186)
三、 几何控制·····	(187)
四、 用中子吸收体进行控制·····	(188)
五、 次临界限值·····	(189)
六、 计算方法的验证·····	(190)
第三节 专用标准·····	(190)
一、 就地测量·····	(191)
二、 易裂变材料贮存·····	(192)
三、 管道交接·····	(192)
四、 铀-钍混合物·····	(193)
五、 轻水堆燃料的堆外操作、贮存和运输·····	(193)
六、 固态中子吸收体的应用·····	(194)
七、 人员培训·····	(195)
八、 核临界事故的报警、剂量测定与后果评价·····	(195)
第四节 对新标准的需求·····	(197)
第五节 指南与手册·····	(198)
参考文献·····	(199)
第五章 临界安全管理·····	(203)
第一节 引言·····	(203)
第二节 我国核安全与辐射安全管理体制机构·····	(203)
一、 核工业核安全与辐射安全主管机构·····	(204)
二、 国家核安全监管机构·····	(207)
第三节 核安全与辐射安全管理原则和要求·····	(208)
一、 安全目标·····	(208)
二、 基本安全管理原则·····	(208)

第四节	核临界安全审管要求	(210)
一、	临界安全原则	(210)
二、	临界安全责任	(211)
三、	临界安全审管要求	(212)
第五节	核临界安全法规标准实际应用	(214)
一、	核临界安全法规和标准的特性	(214)
二、	核临界安全法规和标准在设计中应用	(216)
三、	核临界安全法规和标准在运行中应用	(217)
四、	实践经验的反馈和核临界安全法规标准的修订与发展	(217)
参考文献	(218)
第六章	核燃料循环中的临界安全控制	(219)
第一节	概述	(219)
第二节	铀富集厂的核临界安全控制	(219)
一、	气体扩散厂的工艺流程简介和核临界安全问题的特点	(220)
二、	气体扩散厂的核临界安全要害部位	(221)
三、	气体扩散厂核临界控制的基本原则和方法	(224)
四、	某气体扩散厂核临界安全行政管理经验	(228)
第三节	氧化物核燃料加工厂的核临界安全控制	(229)
一、	UO ₂ 燃料组件制造工艺	(229)
二、	ADU 法和 AUC 法的工艺流程	(231)
三、	UO ₂ 组件制造过程的临界控制	(231)
四、	与燃料元件制造有关的临界事故	(236)
参考文献	(238)
第四节	金属燃料加工的核临界安全控制	(239)
一、	概述	(239)
二、	金属燃料加工工艺流程简介	(239)
三、	金属燃料加工中的临界安全控制	(242)
四、	产品贮存、运输中的临界安全控制	(250)
五、	废物管理中的临界安全控制	(251)

参考文献	(252)
第五节 乏燃料后处理厂的核临界安全控制	(253)
一、 引言	(253)
二、 后处理厂核临界控制的基本原则与措施	(253)
三、 生产堆核燃料后处理厂的临界控制	(256)
四、 动力堆核燃料后处理厂的临界控制	(264)
参考文献	(282)
第六节 乏燃料贮存	(284)
一、 乏燃料的产生和管理	(284)
二、 乏燃料的贮存方式	(284)
三、 乏燃料贮存的临界安全问题	(285)
参考文献	(287)
第七章 临界事故	(289)
第一节 概述	(289)
第二节 国外核工厂的临界事故	(290)
一、 美、英的几起临界事故	(290)
二、 前苏联的几起临界事故	(319)
第三节 我国的核临界安全违章事件	(328)
一、 事件简介	(328)
二、 小结	(336)
第四节 经验教训	(337)
第五节 临界事故后果的防御	(338)
一、 潜在临界事故的放射学后果评估	(338)
二、 临界报警系统	(344)
三、 应急响应准备	(345)
四、 事后处理	(346)
第六节 反应堆严重事故堆芯熔化后的临界安全问题	(347)
一、 切尔诺贝利核电站事故	(347)
二、 防止切尔诺贝利核电站再次发生临界事故	(348)
参考文献	(349)
第八章 临界安全技术展望	(351)

第一节 燃耗信用制问题	(351)
一、 燃耗信用制	(351)
二、 燃耗信用制中的燃耗测量	(366)
三、 国外燃耗测量装置介绍	(369)
四、 开展燃耗信用制工作的必要性	(374)
第二节 我国临界安全技术工作展望	(376)
参考文献	(379)

绪 论^①

核临界安全是核科技工业的特殊安全问题。天然铀经过同位素浓缩变成富集铀,或者经过反应堆内中子照射产生钚,在以后的所有加工、使用的过程中,就紧密地伴随着临界问题。富集铀、钚等核燃料随工艺流程的进程走到哪里,就把临界安全问题带到哪里。可见临界安全问题在核科技工业中涉及面之广,影响之大。世界上所有从事核活动的国家,无一不对临界安全问题予以特殊的重视,投入人力、物力,配置很强的科技力量来确保核工业生产和科研工作中不出临界事故。它是整个核燃料循环中,与工艺(化学、物理、冶金)处于同等重要地位的重大技术问题。在有些核燃料工艺中,例如乏燃料后处理,临界安全直接影响到工艺的决策。

我国从第一批核燃料工厂建造、启动阶段开始,就十分重视临界安全工作。当时面临外国专家撤退,留下“半生不熟”的局面,得完全靠自己的力量,把这批工厂的临界安全问题解决得有十分把握,确保启动运行万无一失。

当时,领导高度重视临界安全,采取了强有力的措施,组织了最强的反应堆物理方面的科研力量,对铀同位素扩散分离与金属冶炼加工两个工厂,进行临界安全设计计算与分析(当时还没有可供做实验用的核燃料,所以实验验证无从谈起)。研究所的科研人员与工厂第一线的技术人员组织在一起,在老专家的带领下,进行攻关。在此基础上,对工艺流程的每一单元,制定了安全操作量,并写出了临界安全规范。正式投产前,并到现场进行实地安全分析与检查。

^①本绪论及各章节均是作者在1999年5月前撰写的。

在完成第一批核燃料工厂的临界安全工作、保证工厂安全启动后,领导不失时机,在已形成的科研力量及已积累的技术知识与经验的基础上,组成了主管部门——临界安全小组,为以后的临界安全工作落实了组织。从那时起,临界安全小组一直存在并延续到目前。在完成核燃料生产和项目任务研制试验的临界安全工作的过程中,十分重视人员培训,强调人员选择和任命程序要保证临界安全人员在专业技能和文化程度具有资格,在从业上岗之前,都要进行人员培训及再培训。因此,无论是研究所,设计院还是工厂,都成长了一批临界安全专业的业务骨干,在以后的科研、设计与管理工作中,发挥了重要作用。

在第一批核燃料厂临界安全工作基础上,总结经验,逐渐形成并建立了稳定的主管部门临界安全审查制度。在以后的核工厂的建设中,在设计阶段,要对设计进行临界安全审查;在工厂投产前,结合现场实际,再进行一次临界安全审查。这种安全审查制度,在其基本方面,一直存在并延续到目前。同时,在工厂运行中,建立了有效的临界安全管理制度。安全审查与安全管理制度,对保证临界安全起了重要作用。

领导的真正重视,对保证临界安全是关键性的。坚持“安全第一”的原则,要求做到万无一失,甚至把保证临界安全提高到特殊任务的高度。将这样的思想认识和原则付诸实践,无疑对做好临界安全工作起关键作用。在第一批核燃料工厂投产前夕,当时的刘杰部长在检查临界安全工作时指出,绝对不能出现“跃进号”的情况。“跃进号”是我国成功建造的第一艘万吨轮,建成后第一次出航就在公海上发生触礁沉船事故,引起全国震惊、世界关注。“跃进号”事故正好是此前不久发生的。)领导以此告诫,核燃料工厂启动要绝对保证临界安全,决不能第一次投料就出事故。凡是经历当时的过程的人,印象都是很深的。

由于领导重视,科技投入,坚持安全审查制度,生产实行严格

的安全管理,我国核科技工业运作 40 多年来,在临界安全方面,保持了较好的安全记录。在核燃料循环的工业系统中,没有因临界事故伤亡过一个人,也没有损坏过一台设备。这是我国主管部门及其单位付出了代价而换取的结果,也是开展核临界安全工作业业绩显著的标志,我们应该坚持努力,力争把这个好的记录长久保持下去。

解决临界安全问题的基础是临界实验数据。但由于核科技工业中遇到的系统种类多种多样:有铀有钚,有溶液有固体,有单体有多体。有的系统实验模拟相当困难。所以发展反应堆理论,用理论计算方法解决临界安全问题,成为常用的手段。一些理论计算方法及其所用的核参数,在经过相关的临界实验数据验证,知其偏差范围后,被用于临界安全设计计算,解决工程实际问题,是典型的途径。未经相关的临界实验数据验证的理论计算方法,是不宜用于计算工程实际问题的。在解决国内早期的核燃料工厂的临界安全问题时,当时还没有可供实验用的核燃料,当然无从谈起自己的临界实验,所以只能凭能找到的国际上当时已发表的临界实验数据,以及国外发表的在实验数据的基础上总结出来的一些临界安全规范限值,再加上发展自己的理论方法和计算机程序,来解工程问题。可想而知,在这样的条件下,是受到很多限制的。为了有把握地保证临界安全,安全裕量势必要大一些。随着核科技工业的发展,有了自己的可供实验用的核燃料,为做临界实验提供了物质条件,随着工程发展的需要,开始针对一些具体项目,进行了少数单体或多体的临界或次临界实验。这些少数的临界实验数据,对解决工程实际问题,满足国家项目任务的需要,都起了重要的作用。鉴于 20 世纪 60 年代的后期,接近实现的建立临界实验室的计划,由于众所周知的原因,后来被冲掉了。所以我们自己的临界实验数据是很少的。随着国际上的解密,发表的临界实验数据的增多,加上我们自己的少量的实验数据,这些都为以后的核燃

料工厂的临界安全设计提供了有利的条件。

实验数据的不足,以及利用国外临界安全规范限值、应用半经验方法,对解决早期的核工程项目的临界安全问题,虽然受到很多局限,矛盾尚不十分突出。因为这些早期项目基本是军用项目,要求绝对保证安全,对经济性要求还不十分严厉。但是随着核科技工业的发展,特别是随着军转民,民用核电的发展,经济性要求与安全性要求已处于同样的重要地位。所以,同样的工艺设备,要求提高产出率;同样体积的空间,要求存放更多的核燃料;同样规模的厂房,要求提高产量等等,已是客观的需要,这给临界安全提出了挑战和许多新的课题。为解决在保证安全的同时提高经济性的要求,发展更好的堆物理模型,提高计算方法的精确度,研制更先进的计算程序和采用精度更好的核数据,这些都是必要的,都是有利于挖掘潜力的。但是更重要的是要有必要的临界实验数据,来验证这些先进的计算手段的适用性,没有这种验证,随便用于工程设计计算,是有隐患的,是不允许的。

经济性问题不仅在民用核电发展中是重要因素,即使军用核工厂,到后期也提出了提高经济性的要求。例如,国内第二个乏燃料后处理工厂正式设计任务要求:在厂的规模、设备尺寸与第一个乏燃料后处理厂基本相同的条件下,产量要求提高百分之几十。这为当时第二个后处理厂的临界安全设计,提出了难题。整个工艺流程的“瓶颈”部位,即影响全流程产量的卡关工艺单元是沉淀。为了提高沉淀处理量,满足新的设计要求,几经攻关,也没有解决问题,最后还是下决心对沉淀反应器进行模拟临界实验。工程设计进度要求紧迫,不可能建新实验室,就在原子能所的反应堆物理实验室原来的水堆零功率实验装置的基础上,进行改装,建立了溶液临界实验装置,在短时期内取得了实验数据,解决了设计问题。像这类比较特殊的模拟临界实验数据,从国际文献上是很难得到的。从这个实际例子也说明,拥有自己的实验手段的必要性。民