

核电厂消防安全和 事故应急

董希琳 著

原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

核电厂消防安全和事故应急 / 董希琳著. — 北京: 原子能出版社, 1999.1

ISBN 7-5022-1976-5

I. 核… II. 董… III. ①核电厂—消防—安全技术 ②核电厂—火灾—灭火
IV. TM623.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 01002 号

内 容 简 介

本书为介绍核电厂消防安全和事故应急的专著。著者紧密结合核电厂消防实践,总结了多年的核消防教学经验和核电厂火灾事故的教训,吸收了最新的技术和理论研究成果,融系统性、科学性和实用性为一体。全书分 6 章依次介绍与核电厂消防安全和事故应急有关的核电运行工况、辐射防护、防火管理、化学危险品管理、消防系统和消防应急等内容。

本书可供从事核电消防安全、核电厂设计、维修及运行等工程技术和管理人员,核电建筑承包商、核电消防队及公安武警消防队指战员,科研院所和高等院校从事核消防安全研究与教学的科研人员和教师,消防专业和安全工程专业的学生参考。

©原子能出版社, 1999

原子能出版社出版发行

责任编辑: 赵志军

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国人民武装警察部队学院印刷厂印刷 新华书店经销

开本: 850×1168 mm 1/32 印张 6.25 字数 159 千字

1999 年 1 月北京第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2000

定价: 15.00 元

序

随着我国四个现代化事业的发展，特别是改革开放以来我国经济的崛起以及人民生活水平的不断提高，对电力的需求量也日益增长。依靠“化石”燃料的火力发电厂分布在中国的中、北和西北部，而目前经济发展的热点在东南沿海。电力和经济发展的区域不平衡在某种程度上限制了经济的进一步快速发展。

世界面临着“化石”燃料枯竭的威胁，中国也不例外。本世纪中叶，人们试图寻找各种新的能源。和平利用原子能的主要方式是用于发电，因其具有许多优点而在世界范围内受到推崇和重视。正象作者在绪论中所述的那样，我国政府也十分重视核电事业，已作为优先发展的新能源，以缓解我国电力和运输紧张的局面，减轻“化石”燃料所造成的环境污染。

在世界范围内，随着核电厂的增多，火灾和爆炸事故次数也随之增多，核消防受到了世人的关注。特别是在1986年4月26日切尔诺贝利核电站发生大火以后，严重的后果迫使人们更深入地研究核电厂的安全问题。本书作者在核电消防实践的基础上，系统地论述了与核电厂消防安全和事故应急有关的核电运行工况（设备和系统）、辐射防护及放射性事故后果评价、核电厂防火管理、化学危险品管理及危险品事故应急方法、核电消防系统和核电厂消防应急抢险救援等专题。本书总结了多年的教学经验，理论系统；紧密结合核电厂消防实践，吸收了核电厂火灾及核安全事故的教训、核消防的最新技术和理论研究成果，突出

核电厂火灾和核事故的特殊性，强调火灾与核安全的相关性，注重核电火灾和核事故应急的实用性，即融系统性、科学性和实用性为一体。其中，“火灾与核安全的相关性”、“放射性事故后果的评估模型和应急安全区的确定”、“主变压器包络线水喷雾设计”和“制定核电厂火灾扑救预案注意事项”等内容具有独到的见解。

核电厂发生与核安全相关的火灾或放射性事故，都可能导致严重的后果。鉴于此，公安消防部队需要拓宽消防知识面，了解与消防有关的核电运行工况、辐射防护、危险品管理、消防系统、制定灭火预案的原则和核电消防应急等内容。而核电厂职业消防队、设计部门和运行管理部门以及与消防安全和核安全有关的技术及管理人员，必须掌握核电厂建设的消防安全审核、建造运行维修期间的防火管理、核电火灾应急和核事故应急的一些基本知识。

该书由对核电消防安全进行过系统研究并对此具有实践经验的科技工作者撰写，填补了我国核电消防安全教育方面的空白。这本书的出版，我想是合适的和适时的。

刘雪红*

1998年12月29日

*中国核工业总公司国际合作局副局长
江苏核电有限公司副总经理

出版说明

遵照邓小平同志“教育要面向现代化，面向世界，面向未来”的指示精神，本着“理论要解决实际问题”的宗旨，根据消防专业教学和消防部队拓宽专业知识的需要，以及核电厂消防安全工作的需要，编写了这本消防技术参考书。

回顾历史上火灾给人类社会带来的危害，我们发现火灾与各种能源的利用密切相关。核能发电具有许多优点，但是也为消防提出了新的课题。因此，核电厂消防安全和事故应急值得研究。

《核电厂消防安全和事故应急》一书紧密结合核电厂消防实践，总结了多年的经验和教训，吸收了核电厂消防的最新技术和理论研究成果。力求叙述简明准确，融系统性、科学性和实用性为一体，突出核电厂火灾的特殊性，强调火灾与核安全的相关性，注重核电火灾和核事故应急的实用性。全书分六章介绍与核电厂消防安全和事故应急有关的核电运行工况、辐射防护、防火管理、化学危险品管理、消防系统和核电消防应急等内容。

在本书的编写过程中，得到了公安部消防局、武警部队学院各级领导的关怀和大亚湾核电站保健物理处周卫红、黄红、慕齐放等有关专家的大力支持，在此一并致以衷心的感谢。

由于核消防是最近二十年才发展起来的新兴的边缘学科，可参考的文献很少，加之著者的学术水平有限，书中不妥之处在所难免，恳望读者批评指正，以便修订。

著者

1998年11月

目 录

绪 论	(1)
第一章 核电原理及设备	(5)
第一节 核电运行基本原理	(5)
一、核裂变的发现	(5)
二、核能特征	(6)
三、核反应堆的分类	(8)
四、核废料及再利用	(8)
五、能量转换	(9)
第二节 核岛系统及常规岛系统	(13)
一、反应堆回路(核岛系统)	(13)
二、常规岛系统	(16)
第三节 反应堆安全保护系统及安全设计	(18)
一、反应堆安全系统	(18)
二、安全保护系统	(19)
三、核电厂的安全设计	(19)
第二章 辐射防护及放射性事故评价	(21)
第一节 核素裂变过程及辐射防护	(22)
一、核素裂变及放射性	(22)
二、辐射种类	(25)
三、辐射防护	(27)
四、放射性场所消防检查及火灾扑救注意事项	(36)
第二节 放射性事故场内外评估	(38)
一、场内放射性事故评价	(38)
二、场外放射性事故评价	(38)

三、场外放射性事故造成的照射途径评价	(47)
第三节 估算放射性事故应急安全区的高斯模式	(48)
一、建立核素污染评估模式	(49)
二、实际应用	(55)
第三章 核电防火管理	(59)
第一节 核电厂防火法规及政策	(59)
一、《HAF 0202 核安全法规: 核电厂防火》	(59)
二、消防政策	(62)
第二节 火灾风险及案例分析	(64)
一、火灾风险	(64)
二、火灾与核安全	(65)
三、核岛系统主要火灾风险	(67)
四、核电厂火灾的各种原因	(69)
五、核电典型火灾分析	(71)
第三节 核电厂火灾与核安全的相关性	(75)
一、核电厂火灾与核安全事故统计	(76)
二、核电厂火灾与安全的评价方法	(76)
三、概率风险评估模型	(77)
第四节 核电防火概述	(82)
一、核电消防的三个基本目的	(82)
二、核电消防的三个方面	(82)
三、核电厂三个阶段的消防特点	(82)
四、核电消防的重要性与核电消防文化	(83)
五、预防为主与纵深防御	(84)
第五节 核电厂防火审核和防火管理大纲	(85)
一、防火设计及核电建造阶段	(85)
二、运行及维修防火	(90)
三、厂房及防火区管理	(91)

四、动火证管理.....	(94)
五、防火屏蔽的完整性	(96)
六、消防系统不可用状态控制.....	(97)
七、作业火灾风险分析	(98)
八、电气火灾及其预防	(98)
九、定期试验.....	(99)
十、定检与巡检	(100)
第六节 防火区耐火极限.....	(100)
一、防火区内的火灾持续时间.....	(100)
二、防火区内构件的耐火性	(103)
第四章 核电厂化学危险品的管理	(105)
第一节 易燃易爆化学危险品分类.....	(106)
一、易燃易爆化学危险品的定义	(106)
二、危险物品分类及编号.....	(106)
第二节 化学危险品管理.....	(111)
一、核电厂内化学危险品管理的目的	(111)
二、危险物品管理的一般原则	(111)
三、核电厂常用的危险物品	(115)
第三节 核废料管理.....	(122)
一、核电厂产生的核废料.....	(122)
二、放射性废物储存与处理	(124)
三、多重屏障	(125)
四、核废物管理的原则及政策	(125)
第五章 消防系统介绍	(127)
第一节 核电消防灭火系统	(127)
一、消防水源	(129)
二、消防水分配	(131)
三、固定灭火系统	(134)

四、移动式灭火系统与手段	(148)
五、相关通风系	(150)
第二节 火灾探测与报警系统	(152)
一、自动火灾探测与报警	(152)
二、目击者报警	(157)
第三节 核电站主变压器包络线水喷雾系统设计	(158)
一、核电站主变压器	(159)
二、主变压器水喷雾系统设计	(159)
三、包络线水喷雾设计原理	(160)
四、包络线水喷雾设计举例	(167)
五、包络线水喷雾的适应性	(168)
第六章 核电消防应急和救援	(169)
第一节 灭火组织的立足点	(169)
第二节 灭火行动的级别	(170)
一、一级干预	(170)
二、二级干预	(171)
三、三级干预	(171)
四、四级干预	(172)
第三节 火警监督点的功能和人员的责任	(172)
第四节 消防应急和事故应急	(173)
一、接警及相应的响应	(173)
二、启动应急组织的条件	(175)
三、消防及事故救援应急响应	(179)
第五节 制定核电火灾扑救预案注意事项	(184)
一、火灾与核安全的相关	(184)
二、火灾发生区域的特性危险	(185)
三、灭火力量和战术	(186)
参考文献	(188)

绪 论

目前，世界能源主要靠所谓的“化石”燃料：即煤炭、石油和天然气。但是，从“化石”燃料的蕴藏量来看不是无穷无尽的。因为随着工业化的发展和人口不断增多，以及人民生活水平的提高，对能量的需求越来越多，到 2000 年世界能源消耗将达到 1000×10^{12} MJ。已知经济上可开采的“化石”燃料储量估计为 42000×10^{12} MJ。这里经济上可开采是指燃料价格为现在的两倍。因此，按 2000 年的消费水平，这些储量只能够维持 40 多年。

虽然我国的能源消费水平比世界平均水平低，而且有较丰富的“化石”燃料储量，但是在百年以后也将面临枯竭的危险。我国的水电资源不丰富；风能受气候和地理限制，又很难成规模；地热、太阳能在技术上还不成熟，令人满意的利用太阳能的特殊方法就是通过植物栽培来实现，直接使用太阳能作动力的技术不可能在几十年内成熟，因此，太阳能短时间内也不可能成为主要能源。这种严峻的形势迫使我们必须寻求新的能源。在新能源中，由于有了可控核裂变技术，可以从少量的核燃料中获取大量的能量，使核能的工业化生产成为可能并得到迅速发展。

可作为核燃料的自然资源有两种重金属：铀和钍。这两种金属广泛地分布在地球上，构成了巨大的能源贮备。根据不完全的勘探估计，世界上作为核燃料的铀蕴藏量约为 2.5×10^7 t，钍约为 1.0×10^6 t。理论上 1 kg 可裂变的铀-235 完全裂变可释放约 8.2×10^7 MJ 的能量。然而，由于反应堆的某些技术因素，还不能将核燃料全部裂变。假设在理想的条件下，可以期望利用核燃料中的三分之一，则核能的蕴藏量十分可观，约为

$$\frac{1}{3}(2500+100)\times 10^6\times 10^3\times 8.2\times 10^7=7.1\times 10^{19}\text{ (MJ)}$$

以 2000 年的消费水平，可使用很长时间。另一方面，获取同样的能量，核燃料的基础价格比燃煤价格低。由此可见，在很长一段时间内世人可使用廉价的核能源。

核能包括核裂变和核聚变两种方式释放的能量，目前已成熟地发展了采用核裂变反应堆的核电厂，而核聚变反应堆还在研究阶段。聚变能源是未来取之不竭的能源。本书仅述及核裂变反应堆核电厂的消防安全和事故应急问题。

随着中国四个现代化事业的发展，特别是改革开放以来经济的快速发展以及人民生活水平的不断提高，对电力的需求也日益增长。依靠“化石”燃料的火力发电厂分布在中国的中、北和西北部，而经济发展的热点在东南沿海。电力和经济发展的区域不平衡在某种程度上限制了经济的进一步快速发展。

同许多发达国家一样，我国政府也十分重视核能发电，早在 80 年代初期就决定优先发展核电事业，以便缓解我国电力和运输紧张的局面，减轻环境污染的压力。世界上许多工业发达的国家都把核电作为新的能源，投入大量资金进行开发。法国已有 60 多座核电厂，核能发电量占总发电量的 75% 以上。

我国目前正在运行的核电厂有两座三个反应堆，即中国核工业总公司自行设计和建造的秦山一期核电工程（装机容量 300 MW）和大亚湾核电一期工程（装机容量 2×900 MW）。核能发电量占发电总量的 1% 左右。继秦山和大亚湾一期核电工程之后，二期工程已经破土动工，其规模均比一期还大。目前正在兴建的连云港核电站，引进俄罗斯技术，装机容量为 2×600 MW。在“九五”计划中，核电的装机容量为 6600 MW。预计到 2010 年，中国的核能发电量占发电总量的 6% 以上。可以看到，我国的核电前景十分乐观。

截至目前的统计资料表明,采用压水堆的核电厂占全世界核电总容量的 60% 以上。压水堆核电厂的运行年负荷率在各种堆型中也是最高的,平均达 66%,最高达 86.6%。我国政府已经决定采用压水堆的技术路线,在设备制造的国产化方面也是围绕这一条技术路线配套的。例如,广东大亚湾核电站选用了当今世界上积累经验最多、运行安全记录良好的压水堆型。

核能发电受到世界上绝大多数国家的高度重视,这是因为发展核电事业是和平利用原子能的最佳途径,而且具有如下优点:

①发展核电可以充分利用我国的铀和钍资源。我国有比较丰富的铀和钍资源,与化石燃料相比,可以维持更长时间对能源的需求。

②我国的核工业具有一定的规模,已经具有生产核电厂所用的核燃料组件的能力,而且可以自行设计和建造核电厂。

③核电的成本低。

④核能发电的热效率高。一方面,煤炭的燃烧效率远低于核燃料的“燃烧”效率;另一方面,1 kg 铀-235 裂变所释放的裂变能相当于 2700 t 煤炭燃料所放出的热量。

⑤核能发电的核燃料运输量比煤炭发电的运输量小得多,而且废渣少,不排放污染大气的灰尘和二氧化碳。因此有利于缓解运输紧张局面和保护环境。

⑥核废料的再利用不仅可获取超铀元素,而且还可为快中子反应堆提供所需的核燃料钚-239。

核电成为新能源的发展方向已成定局。我们也看到,随着世界上核电厂的日益增多,火灾和放射性污染事故也随之增多。近年来核电安全和消防逐渐为世人所瞩目。国际原子能机构及其成员国十分重视核电消防工作。

我国是一个人口大国,在核电厂附近总是有许多居民,我国的人均耕地少。核电厂发生与核安全相关的火灾或放射性事故,都可

能导致严重的后果。为实现 2010 年经济和社会发展的宏伟目标，就必须依照 1998 年 4 月 29 日第九届全国人民代表大会常务委员会第二次会议通过，并于 1998 年 9 月 1 日开始实施的《中华人民共和国消防法》对核电厂进行管理和监督，确保我国核电厂安全运行。

《中华人民共和国消防法》第一章总则第四条规定：“国务院公安部门对全国的消防工作实施监督管理，县级以上地方各级人民政府公安机关对本行政区内的消防工作实施监督管理，并由本级人民政府公安机关消防机构负责实施。军事设施、矿井地下部分、核电厂的消防工作，由其主管单位监督管理”。本条规定的释义为“核电厂的消防工作由其主管单位监督管理是新增加的规定，主要考虑核电厂有较强的专业技术特殊性，由其主管单位进行消防监督管理更符合实际，更有利于加强核电厂的消防工作”。《法规》第二十七条第三款规定：“公安消防队除保证完成本法规定的火灾扑救工作外，还应当参加其它灾害或者事故的抢险救援工作。”以及第三十四条规定：“公安消防队参加火灾以外的其它灾害或者事故的抢险救援工作，在有关地方人民政府的统一指挥下实施”。这两条规定隐含了公安消防机构有扑救核电厂火灾、处理化学危险品泄漏事故、核安全事故以及抢险救援的责任和义务。

鉴此，公安消防部队需要拓宽消防知识面，了解与消防有关的核电运行工况、辐射防护、危险品管理、消防系统、制定灭火预案的原则和核电消防应急等内容。而核电厂职业消防队、设计部门和运行管理部门以及消防安全和核安全有关的技术及管理人员，必须掌握核电厂建筑消防安全审核、建造运行维修期间的防火管理、核电火灾应急和核事故应急的一些基本知识。

《核电厂消防安全和事故应急》主要介绍核电厂防火的基本知识和核电厂火灾、事故抢险救援等方面的基本知识。

第一章 核电原理及设备

重点掌握下述几个方面：

- ①掌握核电厂运行的基本原理，了解将核能转化为电能的工艺过程和主要设备；
- ①将核电厂与燃煤电厂相比较，了解核电厂工艺特点、火灾特点及核消防的特殊性。

第一节 核电运行基本原理

一、核裂变的发现

1939年德国人哈恩（Hahn）和施特拉斯曼（Strassmann）发现了核素裂变现象，即由中子“轰击”铀产生的反应。使用裂变一词，类似于一个生物活细胞分成两个新细胞的裂变，同样在核裂变时，通常一个原子的核产生两个其它的核。

以后，李斯·曼特纳（Lise Meitner）和费利希（Frish）预言核裂变在理论上应伴随着能量的大量释放，他们还计算了所释放能量的大致数量级。同年，费利希和约里奥（Joliot）通过不同的实验方法证实了裂变实际上是能量释放源，而且测出了释放能量的近似值，同时还发现这个裂变反应还发射出几个中子。

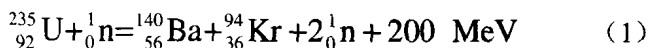
从此以后，裂变的链式反应得以实现，并发现了以铀为原料产生能量的方法。

意大利学者费米于1942年在芝加哥成功地实现了自持链式裂变反应。此后，核爆炸和反应堆都证实了核反应能够从实验室阶段走向现实的工业生产。

二、核能特征

核能就是通过核裂变或核聚变反应释放出来的能量。本章仅论述核裂变产生的核能。

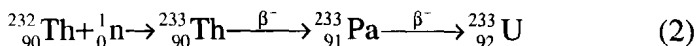
核裂变反应就是一个重原子核吸收了一个中子后分裂成为两个轻原子核的过程。例如，铀-235 在一个中子轰击下，裂变成为钡-140 和氪-94，并释放出 2~3 个中子（平均 2.43 个中子）和大量的能量（200 MeV）：



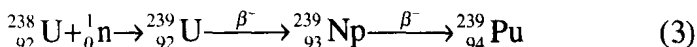
新产生的中子又继续引起更多的重原子核裂变，这样，重核裂变过程就可以继续发展下去，形成“链反应”（chain reaction），从而不断地释放出大量的能量。裂变产生的轻原子核可以是各种不同的核素，称为裂变碎片（fission fragments）或裂变产物。

容易发生裂变的重原子核就是核燃料，只有三种同位素的原子核可以在热中子的轰击下产生裂变，它们是铀-233、铀-235 和钚-239，其中只有铀-235 在自然界中存在，而铀-233 和钚-239 只能通过其它的核反应过程获得。后两种称之为人工核燃料。

天然铀中只含有很少量的易裂变铀（铀-235，约占 0.7%），其余大量的主要是铀的另一种同位素铀-238。铀-238 和另一种核素钍-232 在俘获中子后也可以转变为易裂变的物质（核素）。例如：钍-232 在吸收中子以后经过两次衰变生成为易裂变的铀-233：



铀-238 在吸收中子以后经过两次衰变生成易裂变的钚-239：



因此, 钍-232 和铀-238 又称为“可转换材料”(convertible materials)。由于俘获中子的核反应能够使非易裂变的物质转变成成为易裂变的物质, 因而大大增加了能够利用的核能资源。

铀-235 每次裂变所释放出来的能量约为 200 MeV, 按照 1 MeV $= 1.6 \times 10^{-13}$ J 来计算, 可得出 1 g 铀-235 裂变所释放出来的能量为:

$$\frac{6.025 \times 10^{23}}{235} \times 200 \times 1.6 \times 10^{-13} \times 10^{-6} = 82000 \text{ (MJ)}$$

即为 22780 kW·h, 它相当于 2700 kg 标准煤燃烧时释放出来的总能量。换句话说, 如果反应堆的热功率为 1000 MW, 则每天需要的 1 kg 的铀-235 进行裂变。此外, 考虑到铀-235 的原子核是以裂变和辐射俘获两种方式消耗的, 对于铀-235 的热裂变来说, 包括辐射俘获(不发生裂变)的消耗以后, 每产生 1000 MW 的热功率, 则每天需要消耗 1.22 kg 的铀-235, 或需要铀-235 含量为 3.1% 的核燃料 39.4 kg。

核裂变的链式反应可以在很短的时间内发生很多次, 因而释放出巨大的能量。如果不加以控制, 就会造成惊人的破坏力。如果采用某些措施, 在核裂变的过程中, 使上一代轰击到原子核上的中子数目和下一代轰击到原子核上的数目基本相等, 也就是达到了一个临界状态, 这时由于核裂变所释放的核能基本稳定, 因而使这些核能可以得到充分地利用。控制这种链式反应的设备通常称为“核反应堆”(nuclear reactor), 它是利用核能的主要装置。

核反应堆有下列几种主要功能:

- ① 有效地控制核素裂变过程(即控制核素裂变的条件), 使裂变反应能够持续稳定地进行;
- ② 引出核裂变所释放的热能, 用来发电, 供热, 或作其它动

力（如核动力航空母舰、核潜艇等）；

③ 将一些非易裂变的物质（例如钍-232 和铀-238）转变为易裂变的物质（例如铀-233 和钚-239），即产生新的核燃料；

④ 生产放射性同位素（用于农业、医疗和工程等）；

⑤ 进行中子的其他应用和科学研究。

三、核反应堆的分类

核反应堆的种类很多，分类方式也很多。

按慢化剂的材料可分为：石墨堆、轻水堆和重水堆。

按冷却剂的材料可分为：水冷堆、气冷堆、有机液冷堆和钠冷堆。

按热工状态可分为沸水堆、压水堆。

按堆中中子能量可分为热中子堆、中速中子堆和快中子堆。

按运行方式可分为脉冲堆，稳态堆。

按反应器结构可分为高压壳式堆、低压壳式堆、高压管式堆、游泳池堆等。

通常是按用途分为动力堆、生产堆和研究性反应堆。常见的动力堆堆型有压水堆、沸水堆、重水堆、高温气冷堆和快中子增殖堆；生产堆堆型有石墨堆和重水堆；研究性反应堆堆型有游泳池堆、石墨堆和高通量堆等。

四、核废料及再利用

核反应堆使用过的核燃料称为乏燃料，这些乏燃料中有未燃完的铀-235 和铀-238，经过转换生成的新燃料钚-239 和多种可以再利用的同位素。为了从乏燃料中回收铀和钚，需要进行再处理，并得到镎、镅等超铀元素和其他有用的放射性同位素。对于乏燃料的后处理一般包括冷却、首端处理和化学分离三个基本阶段。目前，化学分离最常用的方法是溶剂萃取法。

在目前广泛采用的热中子反应堆中，除了将核裂变时释放的热能用于发电以外，还不断地产生新的易裂变物质钚-239 和少量的钚