

国家科技重大专项资助项目系列丛书

固定式轻水反应堆 安全分级方法

环境保护部核与辐射安全中心 / 编



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

国家科技重大

丛书

固定式轻水反应堆 安全分级方法

环境保护部核与辐射安全中心 / 编



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书是国家科技重大专项课题“CAP1400 安全审评技术及独立验证试验”(2010ZX06002-10-10)子课题 10“安全分级问题”研究成果之一。全书共 13 章,内容包括概述、定义、通用安全准则、堆芯相关系统准则、辅助系统设计准则、安全壳相关系统设计准则、燃料及仪控系统设计准则、放射性废物及其他系统设计准则、分级应用、电厂工况准则的依据、设备分级的历史背景和理论依据、机械设计准则的依据等。

本书可供核与辐射行业相关从业人员参考,也可作为高等院校核工程与核技术等相关专业本科生、研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

固定式轻水反应堆安全分级方法 / 环境保护部核与辐射安全中心编. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015. 12

ISBN 978-7-114-12716-8

I. ①固… II. ①环… III. ①轻水堆—核电厂—安全管理 IV. ①TM623.91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 001838 号

书 名: 固定式轻水反应堆安全分级方法

著 者: 环境保护部核与辐射安全中心

责任编辑: 吴燕伶

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 880×1230 1/32

印 张: 5.625

字 数: 138 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12716-8

定 价: 25.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

本书编写组人员

主 编 路 燕 乔 宁

编写人员 路 燕 乔 宁 孔 静

盛朝阳 郭银辉 孙海涛

冯 燕 贾盼盼 李海龙

张庆华

组织单位 环境保护部核与辐射安全中心

前 言

本书参考了国际上现行的核电厂部分安全分级标准所提供的安全分级方法,主要从安全分级、电厂工况和设计要求这三方面展开探讨和说明。

(1)安全分级方面。该分级方法明确了固定式核电厂中有核安全功能的所有设备和构筑物的安全分级的定义及详细要求。一种方法是依据设备对核安全的重要性及其维修、监测、检查的能力将所有设备分为三个安全等级中的一个或分为非核安全级。另外,其中也定义了分级接口准则。

(2)电厂工况方面。电厂工况的概念包括单独的过程工况、多过程工况的组合、多过程条件组合并叠加外部灾害,这些外部灾害可同时在电厂设备产生效应。发生的概率是电厂工况分类的统一基础。

(3)设计要求方面。本方法针对每个电厂工况分类下的行业规范和标准,为所有安全级和非安全级提供了一套设计要求。设计要求参考了具体的标准,并确保与其他规范和标准间有紧密联系。

本书努力达到以下目标:

- (1)为轻水反应堆核电厂建立一套一致的要求;
- (2)建立一套有纪律的、系统的方法以确定核电厂的核安全要求;
- (3)为核电厂的设计建立并描绘出一套核安全功能要求;
- (4)对核安全监管当局的常规要求以及行业规范和标准的设

计和技术要求做出响应：

(5) 提供一个框架以在核行业内将这些标准发展成附加标准；

(6) 为设计安全要求提供一个统一的基础，这些要求可能反映在规范性文档中。

独特的电厂或厂址特征可能需要考虑替代的设计概念。本书从拓展功能方面允许有这种灵活性。不过，本书引用了许多标准，其中一些标准在引用当时仍是草稿版。

任何草稿版标准中的条款都应被慎重考虑和使用。强烈建议潜在用户充分了解参考标准的当前状态，及其仍为草稿格式的主要原因。例如，标准中有争议的问题应得到确认。

本书并未限制设计者使用替代准则以确保充分的核安全。通常，一个理想的总体结果可由几个设计概念中的任何一个获得。通过适当考虑电厂内的部件和系统之间的内在联系，设计者可从几个备选方案中做出选择以满足本书的具体要求。例如，可使用 PRA 方法作为替代来评价电厂设计；不过，由于未考虑目前正在发展的安全目标，其有效性在一定程度上受到限制。

本书中的准则应被不断拓展和修改，以适应不断变化的取证要求，达到在各种行业准则和标准不断发展的情况下实现标准化，且提供适当的附加分级或解释。

全书由路燕、乔宁担任主编。其中第 1 章由孔静负责编写，第 2 章由盛朝阳负责编写，第 3 章、第 5 章由路燕负责编写，第 4 章、第 6 章由乔宁负责编写，第 7 章由郭银辉负责编写，第 8 章由孙海涛负责编写，第 9 章由冯燕负责编写，第 10 章由贾盼盼负责编写，第 11 章由李海龙负责编写，第 12 章由张庆华负责编写。

在本书编写过程中，虽然经过反复斟酌和修改，但由于时间

紧迫,难免存在不足之处,诚望广大读者提出宝贵意见,以便再版时修改完善。

编者

2015年12月

目 录

第 1 章 概述	1
§ 1.1 范围	2
§ 1.2 目的	2
第 2 章 定义	5
第 3 章 通用安全准则	15
§ 3.1 通用方法	16
§ 3.2 电厂工况和电厂核安全准则	16
§ 3.3 设备分级	30
§ 3.4 工业规范和标准	45
§ 3.5 安全分析	51
第 4 章 堆芯相关系统设计准则	55
§ 4.1 堆芯和堆内构件	56
§ 4.2 反应性控制系统	59
§ 4.3 保护系统	61
§ 4.4 反应堆冷却剂系统	62
第 5 章 辅助系统设计准则	67
§ 5.1 余热排出系统	68
§ 5.2 反应堆冷却剂辅助系统	70
§ 5.3 冷却水系统	73
§ 5.4 应急堆芯冷却系统	74
第 6 章 安全壳相关系统设计准则	79
§ 6.1 内层安全壳	80
§ 6.2 二回路应急排热系统	82

固定式轻水反应堆安全分级方法

§ 6.3	安全壳辅助系统	85
§ 6.4	安全相关区域冷却系统	86
第 7 章	燃料及仪控系统设计准则	89
§ 7.1	燃料储存和操作	90
§ 7.2	电源系统	91
§ 7.3	防火系统	92
§ 7.4	控制综合体	93
第 8 章	放射性废物及其他系统设计准则	97
§ 8.1	放废处理系统	98
§ 8.2	其他构筑物	99
§ 8.3	动力转换系统	100
§ 8.4	多机组电厂	103
第 9 章	分级应用	107
第 10 章	电厂工况准则的依据	137
§ 10.1	电厂工况类别和频率范围	138
§ 10.2	电厂工况分类的剂量限值	139
§ 10.3	截止频率	143
§ 10.4	事件最大估算频率的应用	146
§ 10.5	单一故障准则的应用	147
§ 10.6	偶然重合事件	148
第 11 章	设备分级的历史背景和理论依据	151
§ 11.1	历史背景	152
§ 11.2	理论依据	153
第 12 章	机械设计准则的依据	159
参考文献	162

第 1 章 概 述

§ 1.1 范围

本书建立了固定式压水反应堆(PWR)核电厂的构筑物、系统和部件的核安全准则和功能设计要求。本书只包括影响设计条款的运行、维护和试验要求。

本书提供一种方法,即依据设备对核安全的重要性将所有设备划为三个安全等级中的一个或划为非核安全级。同时提供另一种方法,识别电厂设计中的正常运行和事件,并将之归为五种电厂工况中的一种。对每种电厂工况都应给出验收准则。

针对典型电厂的每个主要系统给出具体的设计要求。这些要求涉及其他更具体的设计标准,并意在扩大 10 CFR 50 附录 A “核电厂通用设计准则”^{[1]①}中列出的准则。

§ 1.2 目的

为了保证电厂的完整性,电厂应被设计和建造成其运行不会给公众的健康和安全带来不可预期的风险。本书通过详细介绍现有的实践来达到这个目标,这些实践与 NRC 的许可证要求、适当的行业规范及良好的工业实践相一致。本书在适当的地方参考了这些法规、规范和其他标准。

电厂设计者即使在设计阶段也有责任超越与本书中所定义的准则的一致性。除了考虑本书、NRC 规范,以及其他已出版的导则外,设计者还需确保设计基础和期望的运行特征能够被设计分析、试验验证、被已接受的设计或从相似设计中得到的经验做比较的结果所支持,且能用于实践。

①括号中的数字指本书参考文献中相应的数字。

设计时应考虑必要的可替代的或附加的准则和要求,以适应特殊的场址特征。

本书专门为 PWR 核电厂编写。PWR 电厂基于封闭循环回路,使用两路分离的流体系统,这些流体系统与两个或多个叫作蒸汽发生器的热交换器接口。这些回路称作反应堆冷却剂(或一回路)系统和动力转换(或二回路)系统。反应堆冷却剂系统包括反应堆堆芯、一个用水冷却和用水慢化的使用裂变燃料的核组件。热量被反应堆冷却剂系统从反应堆堆芯转移到动力转换系统的蒸汽发生器中。动力转换系统将热能通过汽轮发电机转换成电能。反应堆冷却剂系统和动力转换系统都有许多辅助系统支持。这些辅助系统在正常运行和事故工况下供应、服务和控制循环流体、过程和环境条件,带走不需要的副产品、分配动力及确保安全工况。另有许多构筑物被用来容纳、包含、保护和屏蔽设备和人员。一个 PWR 电厂应具有以下特征:

- (1)陶瓷固体燃料密闭于金属包壳中。
- (2)燃料和冷却剂(充当慢化剂)应有固定的几何构筑物。
- (3)堆芯和堆芯冷却剂密闭于具有高完整性的封闭物内。
- (4)堆芯和堆芯冷却剂封闭物密闭于具有高完整性的一回路安全壳屏障内。

第2章 定 义

本章定义标准中用到的术语分别如下。

能动部件(Active Component)

需要执行机械运动来完成该部件的核安全功能的部件。

能动失效(Active Failure)

除了非能动失效外,当需要时依靠机械运动来完成其预定的核安全功能的部件发生故障。

能动失效的例子包括阀门或止回阀未能移动到正确位置,或泵、风机、柴油发电机未能启动。

动力部件在其驱动源或控制系统作用内发生伪动作即被认为能动失效,除非具体的设计特征或运行限制排除了这种伪动作。例如动力阀门非预期的注能使其打开或关闭。

行政控制(Administrative Controls)

规则、命令、指令、程序、政策、实践或权威和责任的指定。

最佳估算值(Best-estimate Value)

感兴趣的随机变量的概率密度函数的平均值。当概率密度函数未知时,应基于工程判断估算该平均值。

冷停堆(Cold Shutdown)

反应堆处于次临界,且反应堆冷却剂系统平均温度低于允许主要维护的要求温度值,该要求温度值与技术规格书运行限值一致。

共模失效(Common Cause Failure)

构筑物、系统或部件基于同一现象的多种失效。

受控的停堆和冷却(Controlled Shutdown and Cooldown)

在受控的停堆和冷却中,燃料和反应堆冷却剂压力边界工况可能超过技术规格书限值,且有必要执行电厂应急程序。

偏离泡核沸腾(Departure From Nucleate Boiling, DNB)

从泡核沸腾到膜态沸腾转换的开始。

偏离泡核沸腾比(Departure Form Nucleate Boiling Ratio, DNBR)

引起偏离泡核沸腾的热流密度与给定工况下的实际热流密度之比。

设备(Equipment)

一个部件的组成部分、一个部件、部件的装配件、一个系统或至少有一项功能的构筑物。

专设安全设施(Engineered Safety Feature)

当发生事件,能源或放射性释放不能被有效限制,使得公众健康和受到威胁时,用来控制和限制能源或放射性释放的后果的核安全相关的构筑物、系统或部件。

事件(Event)

偏离正常运行的工况,如一个始发事件或一个始发事件叠加单一故障,或同时发生的组合。

裂变产物屏障(Fission Product Barriers)

燃料包壳、反应堆冷却剂压力边界、一次安全壳。

燃料包壳破损(Fuel Cladding Damage)

燃料棒包壳穿孔、过度扭曲或破裂导致裂变产物释放到反应堆冷却剂中。

热停堆(Hot Shutdown)

在PWR中,反应堆处于次临界、反应堆冷却剂系统平均温度低于允许低压余热排出系统运行所要求的温度的工况,这与运行技术规格书限值一致。

热备用(Hot Standby)

在PWR中,反应堆处于次临界、反应堆冷却剂系统平均温度高于允许低压余热排出系统运行所要求的温度的工况,这与运行技术规格书限值一致。

人因失误(Human Error)

偏离正常行为或期望行为的错误、重大错误、状况或行为,属于无意或无知犯下的,不能达到应完成或执行的结果。

始发事件(Initiating Occurrence)

一个单一事件且其后果可导致电厂或电厂局部处于偏离正常的工况。始发事件并不是本书其他地方定义的单一故障。一个始发事件可以是设备失效、人因失误、自然灾害或人为灾害。

长期(Long Term)

在单一故障准则中指系统运行时期。与其相对的短期,指需要核安全功能的时期。

(短期和长期的概念不适用于电气部件)

丧失冷却剂事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)

以超过反应堆冷却剂正常补给速率丧失反应堆冷却剂,通过安全壳内的破口或反应堆冷却剂压力边界开口,包括与反应堆冷却剂压力边界最大判定管道破口(或未经判断的最大管道的双端断裂破口)尺寸一致的破口。

人为灾害(Man-made Hazard)

在机组外由人工制造的车辆、设备、材料或构筑物可能对机组内核安全相关的构筑物、系统或部件造成潜在的破坏。

飞射物(Missile)

有动能且未被限制的质量块。

自然灾害(Natural Hazard)

可引起机组内核安全相关构筑物、系统或部件受到破坏的自然现象。

自然现象(Natural Phenomena)

机组外部非人造的环境(在核电厂设计准则中考虑的自然现象定义为自然灾害)。

不丧失核安全功能(No Loss of Nuclear Safety Function)

构筑物、系统和部件完成要求的核安全功能以适应正常运行或使特定的事件保持在合适的核安全准则范围内的能力。

非核安全级(Non-nuclear Safety, NNS)