

极端气候条件下核电运行的适应性与风险应对

郭伟

阳江核电有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i3.13646

[摘要] 本文围绕极端气候条件下核电运行的适应性与风险应对展开研究。首先对极端气候进行分类,分析其对核电运行的影响机制,接着从设备材料、冷却系统及安全防护系统三方面,剖析核电运行系统的适应性。通过故障树和事件树等方法识别风险,运用风险矩阵法、概率安全分析等进行评估。最后从技术、管理和政策法规三个层面来提出应对策略,研究旨在提升核电在极端气候下的安全性与可靠性。

[关键词] 极端气候; 核电运行; 适应性; 风险应对

中图分类号: TM623 文献标识码: A

Adaptation and risk response of nuclear power operation under extreme climate conditions

Wei Guo

Yangjiang Nuclear Power Co., LTD.

[Abstract] This paper focuses on the adaptability and risk response of nuclear power operation under extreme climate conditions. First, the extreme climate is classified, and the influence mechanism on nuclear power operation is analyzed. Then, the adaptability of nuclear power operation system is analyzed from three aspects of equipment materials, cooling system and safety protection system. The risk is identified by the fault tree and event tree, and the risk matrix method and probabilistic safety analysis are evaluated. Finally, the response strategies are proposed from the three aspects of technology, management and policies and regulations, and the research aims to improve the safety and reliability of nuclear power in extreme climates.

[Key words] extreme climate; nuclear power operation; adaptability; risk response

引言

全球气候变化使极端气候事件的强度和频率明显增加。核电是低碳高效的能源,其在极端气候条件下的安全运行备受关注,核电站若在极端气候中发生事故会对环境和公众安全造成严重威胁,还可能阻碍全球能源转型进程。但目前针对核电如何应对极端气候的系统性研究不足,本文分析极端气候对核电运行的影响,评估运行系统的适应性,识别和评估潜在风险并提出针对性的应对策略以提高核电在极端气候下的安全性和可靠性,为核电行业的可持续发展提供理论和实践指导。

1 极端气候条件分类及对核电运行的影响机制

1.1 极端气候条件分类

世界气象组织根据致灾因子的属性,将极端气候分为气象灾害、水文灾害和地质灾害相关极端气候。气象灾害里的暴雨,由冷暖空气强烈交汇形成,会造成城市内涝,损坏核电站的外部供电线路和通讯设备,影响正常运行;高温天气由高压系统控制,长时间高温会降低核电机组散热效率;飓风是热带海洋上生成的强烈气旋,其狂风和暴雨可能摧毁核电站户外设施。水文灾害

中洪水由流域内短时间大量降水或冰雪快速融化形成,会淹没核电站厂区,损坏电气设备和应急电源;风暴潮由强烈大气扰动引发还会冲击核电站的防波堤和冷却系统。地质灾害相关极端气候中地震因板块运动或地质构造变化产生,可能破坏核电站的基础结构;山体滑坡引发的堰塞湖,若决堤也会对下游核电站造成洪水威胁。

1.2 对核电运行的影响机制

从物理作用看,暴雨和洪水可能短时间积聚,淹没核电站厂区,使电气设备短路或故障,应急电源无法工作。洪水携带的泥沙和杂物会堵塞冷却水源取水口,威胁冷却系统安全运行。高温环境下设备散热困难,金属部件膨胀,影响设备精度和性能,甚至引发故障。飓风的强风压力可能破坏核电站建筑结构,吹落户外设备,威胁核电机组安全运行。从化学作用分析,潮湿环境会加速金属氧化,降低设备强度和耐腐蚀性能。盐雾在风暴潮期间进入设备内部会引发电化学腐蚀而导致电子元件失效,影响设备控制和监测系统。从运行角度来看,极端气候事件干扰核电站正常运行流程,比如地震发生时反应堆会自动触发紧急停堆机

制, 操作人员在复杂紧张环境下若操作不当有可能引发误操作, 从而造成严重后果。

2 核电运行系统在极端气候下的适应性分析

2.1 核电设备与材料的适应性

核电设备和材料在设计时要依据相关规范有一定的环境适应性要求, 比如反应堆压力容器是核岛关键设备使用低合金钢制造, 这种材料强度好且能承受反应堆内部高压, 韧性出色, 遭遇地震等冲击时能维持结构完整, 防止放射性物质泄漏。电缆具有一定的防水、防火、耐温, 避免在暴雨或高温等环境下损坏以保障系统正常运行。但随着极端气候事件强度和频率增加, 现有设备材料的局限性逐渐显现。高温可能使材料力学性能变差, 承载能力下降; 强降雨和高湿度环境会加速金属部件腐蚀, 缩短设备使用寿命^[1]。因此需要研发新型耐高温、耐腐蚀又耐冲击材料, 改进制造工艺, 提升设备可靠性和稳定性, 进一步满足极端气候下核电安全运行的需求。

2.2 核电冷却系统的适应性

冷却系统在核电运行中至关重要, 其主要作用是带走反应堆产生的热量来防止堆芯过热。正常运行时核电站常用海水或淡水作冷却介质, 但在极端气候条件下, 冷却系统面临很多挑战。风暴潮时大量海水携带杂物涌入就可能堵塞冷却水取水口, 影响海水冷却系统运行; 洪水灾害可能破坏淡水供应设施而导致淡水冷却系统断水。

部分核电站配备了应急冷却系统, 如福岛核电站有备用柴油发电机驱动的应急冷却泵。但福岛核事故表明, 现有应急冷却系统在严重自然灾害面前存在不足, 可能是备用电源被洪水浸泡失效或者应急冷却泵设计无法满足长时间且高强度的冷却需求。福岛核事故后, 在建和建成核电机组均对此进行了改进和完善。但在极端气候条件下, 还需考虑多种因素的影响, 增强机组应对极端的能力, 如全面完善冷却系统设计, 引入多种冷却技术, 进而确保反应堆在任何情况下都能得到有效冷却。

2.3 核电安全防护系统的适应性

核电安全防护系统由燃料芯块和包壳、反应堆冷却剂系统压力边界、安全壳等多重屏障组成, 目的是防止放射性物质泄漏, 保障公众和环境安全。这些防护屏障在设计时考虑了能承受一定程度的自然灾害, 如地震或飓风等, 但在极端气候条件下安全防护系统仍有一定的潜在风险。安全壳是最后一道重要屏障, 需要全面评估和改进其抵御外部灾害的能力。通过设计优化安全壳结构, 提高其在极端条件下的完整性。同时进一步完善安全监测系统, 借助先进传感器技术来实时持续监测安全壳内辐射水平、压力和温度等关键参数, 并用智能分析算法深入分析监测数据, 提前给出预判和预警, 为应急处理提供时间裕度; 同时一旦发现异常, 系统能及时发出警告, 为应急处理提供科学准确的依据, 进而最大程度降低事故风险^[2]。

3 极端气候条件下核电运行的风险识别与评估

3.1 风险识别

风险识别是核电运行风险管控的重要环节, 对保障核电站

安全尤为关键。在故障树分析中研究人员把堆芯熔毁这一严重事故作为顶事件, 通过逻辑推理去分析导致该事件发生的中间事件和基本事件。比如分析洪水引发的风险时发现洪水可能淹没应急电源, 使冷却泵无法工作, 最终引发堆芯熔毁。事件树分析从失去冷却剂等初始事件出发, 推演后续事件序列, 明确不同发展路径可能造成的后果。同时要分析切尔诺贝利和福岛等重大历史事故案例, 能从实践中吸取教训并明确极端气候条件下的潜在风险因素。福岛核事故表明地震和海啸可能引发多重系统故障, 人为操作在紧急情况下的应对决策, 也会对事故发展产生重大影响。

3.2 风险评估方法

风险矩阵法根据风险发生的可能性和后果的严重性, 把风险分成不同等级, 用矩阵形式直观展示风险水平, 让管理者能快速找到高风险区域以确定管控重点。概率安全分析(PSA)是量化分析方法, 通过建立系统模型来计算各个部件的故障概率, 评估其对整个系统的影响, 为风险决策提供数据支持。比如评估地震对核电站的影响时, PSA能量化分析地震导致不同设备损坏的概率以及引发的事故后果。模糊综合评价法针对风险评估中的模糊和不确定因素, 用模糊数学方法综合考虑多个影响因素。评估核电站周边环境对极端气候的敏感性时, 该方法能综合地质条件和气象因素等信息, 从而给出全面的风险评估结果^[3]。

3.3 风险评估案例分析

本案例选择某沿海核电站, 用PSA评估飓风引发的风暴潮风险。首先根据该地区的历史气象数据和地理信息来确定风暴潮可能导致海水漫灌、冷却系统受损等初始事件, 然后用概率模型分析各系统的故障概率, 结合事故序列分析去确定不同故障组合可能引发的事场景。现如今核电站堆芯熔毁概率虽在可接受范围内, 但不能放松警惕, 在此基础上还可以根据评估来发现冷却系统备用电源可靠性不足、防波堤高度不够等薄弱环节。基于评估结果也可对核电站制定针对性改进措施, 如提高备用电源的冗余度、加固防波堤, 降低风暴潮引发的核安全风险^[4]。

4 极端气候条件下核电运行的风险应对策略

4.1 技术层面的应对措施

核电行业要推进技术革新, 首先要全面改进核电设备设计, 比如采用先进的抗震设计理念, 在核电站建筑结构中加入智能阻尼器, 地震时阻尼器能吸收震动能量, 降低建筑结构所受冲击力以保障反应堆等核心设备安全。在抗风设计上要用流线型外观设计和高强度建筑材料来减少飓风对设备的作用力, 并在此基础上优化设备布局, 把关键设备放在更安全的位置, 避免被洪水或风暴潮等损坏。

在冷却技术方面要探索新型冷却方式, 风冷技术可作为海水或淡水冷却的补充, 用高效散热片和智能风扇系统, 在传统冷却水源受限时散发反应堆产生的热量。非能动冷却系统利用自然力, 如重力、温差等, 无需外部能源驱动, 紧急情况下自动启动, 进而保障反应堆冷却^[5]。

此外还可以借助物联网或大数据等技术来建立更完善的安全监测系统,在关键设备和区域安装大量高精度传感器,实时采集温度、压力和辐射水平等参数,通过数据分析模型去及时发现潜在安全隐患,提前预警,以便能够为运维人员争取处理时间。

4.2 管理层面的应对策略

在极端气候对核电运行带来严峻挑战的背景下管理层面的有效举措对提升核电安全性与可靠性发挥着关键作用,可从完善应急预案、强化人员培训和搭建信息共享机制三个方面着手。

首先,完善应急预案是管理工作的重点。应急预案应明确不同极端气候场景下,各部门和各岗位的具体职责和行动流程。以应对暴雨引发的洪水灾害为例,明确抢险救援部门负责对可能被淹没区域的设备进行紧急防护和转移;运行部门负责调整反应堆运行状态,确保安全停堆;后勤保障部门负责提供物资支持和人员生活保障。同时也要定期组织实战演练,模拟各种极端气候情况,让员工熟悉应急流程,进而提高协同配合能力。

其次,人员培训也很重要。通过开展专业课程来邀请行业专家分享经验,用虚拟现实(VR)和增强现实(AR)等技术进行模拟操作训练,让操作人员在面对极端气候引发的复杂故障时,能迅速又准确地做出判断并采取有效处理措施。

最后,及时准确的信息是有效应对极端气候的重要前提。核电企业应与气象部门建立实时数据对接系统来获取未来72小时内的极端气候预报信息,包括降雨量、风速、气温等关键数据。与水利部门共享水文数据,实时掌握江河湖泊的水位变化情况。基于这些信息核电企业提前制定防范措施,如在洪水来临前对设备进行加固并转移重要物资;在高温预警发布后提前调整冷却系统运行参数,确保设备正常运行,最大程度降低极端气候带来的风险。

4.3 政策与法规保障

政府在核电安全保障中起关键作用,在政策法规方面要不断完善核电安全法规标准。结合最新的气候变化研究成果和核电运行实际情况,明确核电站在设计、建设和运行等阶段应对极端气候的具体要求。比如提高核电站防洪、抗震和抗风等设计标准,要求新建核电站具备更强的抵御极端气候能力,对现有核电站定期评估和改造并使其符合最新标准。在此基础上还要加大研发投入,设立专项科研基金,鼓励核电企业与科研机构以及

高校开展产学研合作。同时支持研发新型材料、先进技术和创新管理模式,进一步提高核电应对极端气候的技术水平和管理能力。

除此之外要建立跨部门的应急救援协调机制,保证在发生重大核事故时能迅速整合消防、医疗及环保等各方资源,形成高效的应急响应体系。明确各部门在应急救援中的职责和任务以加强沟通协调,提高应急救援效率和效果,最大程度减少事故造成的损失和影响,进而保障公众安全 and 环境健康。

5 结语

极端气候对核电运行的冲击不容小觑,对其影响机制的分析、运行系统适应性的评估以及风险的识别与应对是筑牢核电安全防线的关键环节。通过上述系统性工作,我们得以提升核电在极端气候下的安全性与可靠性。展望未来,气候变化的不确定性持续增加,这要求我们时刻保持警惕并持续跟踪气候变化的新动态。在技术上要加大研发投入,推动设备和冷却技术创新;在管理上要优化应急预案,提升人员应对极端状况的能力;在政策法规上还要进一步健全标准体系,加强监管力度。只有通过技术、管理和政策法规等多层面的协同优化,才能让核电行业在极端气候的挑战下稳健前行,为全球能源转型和可持续发展提供稳定且清洁的能源保障,在应对气候变化的时代征程中发挥重要作用。

[参考文献]

- [1]谢天.浅析核电设备陆运风险评价指标体系[J].东方电气评论,2024,38(04):78-82.
- [2]曾博文,林子祯,辛鸿基.核电设备管理领域知识管理系统的构建探究[J].中国新通信,2024,26(05):65-67+70.
- [3]雷新凯,贾江水.核电设备制造质量的管理和监督[J].现代制造技术与装备,2019,(01):220+224.
- [4]李彪.关于核电厂二次系统安全防护体系构建综述研究[J].设备监理,2020,(03):61-62.
- [5]李海涛,刘迎.核电厂外通门防护设计准则研究[J].产业与科技论坛,2020,19(13):47-48.

作者简介:

郭伟(1986—),男,汉族,浙江湖州人,工程师,大学本科,研究方向:核电运行。