

Research on the construction and optimization strategy of nuclear power construction safety management system

Zhao Chen

CNNP zheneng Energy Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang, 315700, China

Abstract

under the background of “double carbon” goal and accelerated construction of new energy system, nuclear power, as a stable, efficient and low-carbon base load energy, its safety has always been the core issue of engineering construction and social governance. Compared with conventional energy projects, nuclear power construction is characterized by highly complex technical system, long construction period, many participants and high coupling degree of risk types. Failure of safety management in any link may lead to systemic risks. Therefore, this paper takes the whole cycle of nuclear power construction as the research object, systematically combs the stage characteristics and risk evolution law of nuclear power project safety management, and based on the analysis of the deficiencies of the existing safety management system, puts forward the construction framework of the whole cycle safety management system with risk orientation, responsibility closed-loop and digital support as the core, and further puts forward targeted optimization strategies from the aspects of system mechanism, technical support and organizational support, in order to provide theoretical reference and practical guidance for the modernization of nuclear power project safety governance ability.

Keywords

Nuclear power construction; Full life cycle; Safety management system; Risk Management

核电建设全周期安全管理体系构建与优化策略研究

陈钊

中核浙能能源有限公司, 中国·, 浙江 宁波 315700

摘要

在“双碳”目标与新型能源体系加快构建的背景下, 核电作为稳定、高效、低碳的基荷能源, 其安全性始终是工程建设与社会治理的核心议题。相较于常规能源工程, 核电建设具有技术体系高度复杂、建设周期长、参与主体多、风险类型耦合度高等显著特征, 任何环节的安全管理失效都可能引发系统性风险。因此本文以核电建设全周期为研究对象, 系统梳理核电工程安全管理的阶段特征与风险演化规律, 在分析现有安全管理体系不足的基础上, 提出以风险导向、责任闭环和数字化支撑为核心的全周期安全管理体系构建框架, 并进一步从制度机制、技术支撑与组织保障等层面提出针对性的优化策略, 以期核电工程安全治理能力现代化提供理论参考与实践指引。

关键词

核电建设; 全生命周期; 安全管理体系; 风险控制

1 引言

核电工程安全具有高度的公共性、系统性与敏感性, 其安全管理不仅关系到工程建设质量与进度, 更直接影响公众安全、生态环境与社会稳定。随着我国核电建设规模持续扩大, 新建机组在选址条件、堆型结构、施工工艺及供应链组织等方面不断呈现出复杂化与多样化趋势, 传统以阶段分割、经验管理为主的安全管理模式逐渐暴露出适应性不足的问题。在此背景下, 引入全生命周期管理理念, 将安全管理作为一项系统工程加以统筹, 已成为核电工程管理的重要发

展方向^[1]。

2 核电建设全周期安全管理的内涵与阶段特征

2.1 核电建设全周期安全管理的内涵界定

核电建设全周期安全管理是指以核安全和工程本质安全为核心目标, 将安全管理要求系统嵌入核电项目从前期策划、工程设计、施工建设到调试运行及竣工移交全过程的管理活动。与传统以施工现场为中心的阶段性安全管理不同, 全周期安全管理强调安全风险的前移识别与源头控制, 注重安全目标在不同阶段之间的连续性和一致性。其核心在于通过制度、技术与组织协同, 将安全管理由单一环节管控转变为全过程系统治理, 从而避免风险在阶段转换过程中被弱化或遗漏。

【作者简介】陈钊(1991—), 男, 中国陕西安康人, 本科, 工程师, 从事核电建设、安全管理、核电研究。

从管理属性看,全周期安全管理不仅关注人员伤亡与施工安全,更将核安全、质量与安全运行纳入统一框架,体现出高度的系统性和综合性。在核电工程高度复杂、专业高度分化的条件下,全周期安全管理通过明确各阶段安全控制重点与责任主体,构建覆盖决策、设计与实施全过程的安全控制链条,实现对安全风险的动态管控和持续改进。

2.2 核电建设安全管理的阶段特征与风险演化

核电建设不同阶段在技术活动、管理重点和风险形态方面具有显著差异,安全管理必须针对阶段特征实施差异化控制。前期策划与立项阶段以安全目标设定和风险源头控制为主,厂址选择、堆型方案和总体安全原则一旦确定,将对后续工程安全形成长期约束,具有明显的战略性特征。设计阶段是安全要求向工程实体转化的关键环节,系统设计的完

整性、冗余配置合理性及安全边界清晰程度,直接决定核电工程的先天安全水平。

施工阶段则是安全风险集中显现的时期,高风险作业频繁、工序交叉复杂,多参建单位并行作业使管理难度显著增加,安全管理重点转向施工行为控制与现场风险管控。进入调试与试运行阶段,工程系统由静态建成转向动态运行,设备联动、系统验证及人员操作不当可能引发新的安全隐患。竣工验收与移交阶段虽然工程建设基本完成,但资料完整性、安全经验反馈及运行衔接质量仍对后续核电站安全运行产生重要影响。为进一步厘清核电建设不同阶段安全风险特征及其管理关注重点,现对全周期各阶段的安全管理特征进行归纳,如表1所示。

表1 核电建设全周期不同阶段的安全风险特征与管理重点

建设阶段	主要技术活动特征	典型安全风险表现	安全管理关注重点
前期策划与立项阶段	厂址论证、堆型比选、总体方案确定	风险识别不足、安全目标设定偏低、法规符合性缺失	风险源头控制、安全目标前置、安全可行性与合规性论证
工程设计阶段	系统设计、结构设计、设备选型	设计缺陷隐蔽、系统接口不协调、安全裕度不足	安全理念工程化转化、系统安全分析、设计审查与验证
施工建设阶段	土建施工、设备安装、工序交叉作业	高危作业集中、行为失控、分包管理风险	施工行为管控、关键工序控制、现场风险动态管理
调试与试运行阶段	系统联调、功能验证、人员操作	系统耦合失效、操作失误、人机接口风险	程序化操作控制、试运行安全评估、操作能力验证
竣工验收与移交阶段	工程验收、资料移交、运行衔接	安全信息断层、经验反馈不足	资料完整性管理、安全经验反馈、运行安全衔接

3 核电建设全周期安全风险特征与管理问题分析

3.1 核电建设安全风险的系统耦合特征

核电建设安全风险并非孤立存在,而是由技术系统复杂性、组织管理多层级性以及外部环境不确定性共同作用形成的系统性风险。从工程属性看,核电项目涉及核岛、常规岛及配套设施等多个高度耦合的子系统,任何单一环节的设计缺陷或施工偏差,都可能通过系统关联被放大并向其他阶段传导。同时伴随着新堆型应用、关键设备国产化率提升以及新施工工艺的引入,技术不确定性在一定程度上增加了安全风险识别与控制的难度^[2]。

在管理层面,核电建设通常采用多参建主体协同模式,业主、设计单位、施工总包及多级分包单位并行参与,安全管理责任链条较长,若缺乏统一的安全标准和有效的信息共享机制,极易形成管理断层。而不同阶段的安全管理目标和关注重点存在差异,若阶段衔接不畅,前期风险控制成果可能在后续实施中被弱化甚至失效,导致风险在全周期内累积演化。

3.2 现行核电建设安全管理中存在的突出问题

从实践情况看,当前核电建设安全管理仍以阶段性管控为主,全周期协同不足的问题较为突出。一方面,安全管

理制度在不同阶段之间存在断裂现象,前期策划与设计阶段形成的安全要求未能充分转化为施工阶段的具体控制措施,导致“制度在前、执行在后”的脱节问题。另一方面,安全管理更多依赖经验判断与事后整改,对风险的动态识别和趋势分析能力不足,难以适应核电工程高复杂度、高安全要求的现实需求。

此外,在多参建主体环境下,安全责任界面划分不够清晰^[3],部分安全管理工作存在重复或空缺现象,影响管理效率。安全投入与工期、成本目标之间的协调机制尚不完善,在工程进度压力下,安全管理易被边缘化。可见现行安全管理模式在系统性、前瞻性和协同性方面仍存在不足,亟需通过全周期安全管理体系的重构与优化,实现由被动控制向主动治理的转变。

4 核电建设全周期安全管理体系的构建逻辑与关键要素

4.1 基于全生命周期视角的安全管理体系总体构建逻辑

针对核电建设安全风险跨阶段传导、责任界面复杂以及管理要素高度耦合等现实特征,构建全周期安全管理体系必须突破传统以施工阶段为中心的管理范式,从系统工程与全生命周期管理(Life Cycle Management, LCM)视角出发,

对安全目标、管理机制与技术支撑进行一体化设计。该体系以核安全目标为最高约束条件，通过将安全管理要求嵌入项目决策、工程设计、施工组织与调试验证等关键管理节点，实现安全控制由“事后响应”向“前端嵌入”的根本转变。

在总体逻辑上，全周期安全管理体系强调风险导向（Risk-Informed Approach）与分级防御（Defense in Depth）原则的协同应用，通过系统性风险识别、安全裕度分析及关键安全功能分解，将抽象的安全目标转化为可执行、可考核的工程管理要求。同时，通过构建跨阶段的安全管理接口机制，确保前一阶段形成的安全假设、安全参数与控制边界能够在后续阶段得到持续验证和有效继承，从而避免安全控制在阶段切换过程中发生衰减或失真^[4]。

4.2 核电建设全周期安全管理体系的核心构成要素

从体系构成看，核电建设全周期安全管理应由目标体系、责任体系、过程控制体系与技术支撑体系等关键要素协同构成。其中，安全目标体系是全周期安全管理的逻辑起点，需要在满足核安全法规和设计基准事故分析要求的基础上，

形成分阶段、分专业的安全控制指标，并通过层级分解实现目标传导。

责任体系是保障体系有效运行的组织基础，应以业主为核心，明确设计、施工、监理及设备供应等主体在不同阶段的安全责任边界，构建权责清晰、接口明确的安全责任链条。过程控制体系则聚焦于风险评估、设计审查、施工安全条件确认、关键工序旁站监督及调试验证等核心环节，通过标准化流程与程序化控制实现安全要求的刚性落实。技术支撑体系作为体系运行的重要保障，应综合运用 BIM、数字化建造平台与安全信息管理系统，实现安全数据的集成管理、风险状态的动态感知与决策支持能力的持续提升。通过上述要素的系统集成，可形成结构稳定、运行高效的核电建设全周期安全管理体系。为了进一步明确核电建设全周期安全管理体系在不同阶段的实施重点及其管理抓手，现从阶段划分、核心风险与关键控制措施等维度对体系要素进行归纳总结，如表 2 所示。

表 2 核电建设全周期安全管理体系的阶段要素与控制重点

建设阶段	主要安全风险特征	核心管理要素	关键安全控制措施
前期策划与立项阶段	厂址适宜性不确定、堆型选择风险、法规符合性不足	安全目标体系、风险识别机制	厂址安全评价、方案比选论证、法规符合性审查、安全目标前置设定
工程设计阶段	设计缺陷隐蔽性强、安全裕度不足、接口失配	风险导向设计、分级防御原则	系统安全分析、设计审查与验证、关键安全功能分解与冗余配置
施工建设阶段	高危作业密集、工序交叉复杂、分包管理风险	责任体系、过程控制体系	施工风险分级管控、关键工序旁站监督、安全条件确认与行为管控
调试与试运行阶段	系统联调风险、操作失误、人机接口不匹配	程序化控制、运行验证机制	系统功能验证、操作规程审查、试运行安全评估
竣工验收与移交阶段	安全信息断层、经验反馈不足	闭环管理、知识传递机制	资料完整性审查、安全经验反馈、运行安全衔接确认

5 结语

核电建设安全管理是一项高度复杂的系统工程^[5]，其有效性取决于是否能够从全生命周期视角进行整体谋划与持续优化。本文通过对核电建设全周期安全管理内涵、风险特征及体系构建逻辑的系统分析，提出了以风险导向和责任闭环为核心的管理体系框架，并从多维度给出了具有现实针对性的优化策略。

参考文献

[1] 黄喜华,蔡振,高小龙,等.以“三观两力”引领核安全文化建设——防城港核安全文化推进工作室建设实践[J].绿

叶,2024,(12):25-31.

[2] 马广超.核电工程建设中的核安全促进策略[J].绿叶,2024,(10):50-53.
 [3] 美核管会提前完成首台非轻水堆核电机组建设许可初步安全评估[J].辐射防护,2025,45(2):174-174.
 [4] 刘亮燕.中哈核电建设安全风险评价研究[D].:武汉科技大学,2023.DOI:10.27380/d.cnki.gwkju.2023.000904.
 [5] 赵蕾.基于本质安全理论的核电建设项目安全管理研究[J].中国高科技,2024,(13):68-70.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2024.13.20.