

# 小型模块化反应堆运行准备管理体系建设研究

张超, 王荣涛, 刘懿夫, 王泽梁

(海南核电有限公司, 海南 昌江 572733)

**摘要:** 小型模块化反应堆(以下简称“小堆”)具有工期短、体积小、模块化等优势,可在世界能源体系中发挥重要作用。国内某核电厂小堆项目作为全球首个在建陆上小型模块式商用压水堆示范工程,面临着首堆无参考、运行经验缺乏、首台套设备多、工期短要求高、成本受限、设计变更频繁、运维人员紧张等难点问题,为运行准备工作带来新的挑战。首先从战略层面、机组需要、品牌建设3个维度分析小堆运行准备管理体系建设的必要性。其次,从一个中心、三条主线、九条路径等方面阐述基于正向设计的“1-3-9-1”首个小堆运行准备管理体系的框架。最后,从体系提升、项目保障等方面介绍该体系所产生的效益。本文的研究对于核电机组运行准备工程实践具有重要参考意义。

**关键词:** 小型模块化反应堆; 运行准备; 管理体系; 系统工程; 正向设计

中图分类号: C939

文献标志码: A

文章编号: 1674-1617 (2025) 03-0440-06

## Study on the Construction of Operation Preparation Management System for Small Modular Reactor

ZHANG Chao, WANG Rongtao, LIU Yifu, WANG Zeliang

(Hainan Nuclear Power Co., Ltd., Changjiang, Hainan Prov. 572733, China)

**Abstract:** Small modular reactors (SMR) have advantages such as short construction period, small size, and modularity, and can play an important role in the world energy system. As the world's first onshore commercial small modular PWR demonstration project, a SMR project in China is facing difficulties such as no reference for the first of its kind, lack of operating experience, multiple sets of equipment for the first unit, short construction period, high requirements, limited cost, frequent design changes, and tight operation and maintenance personnel, which bring new challenges to the operation preparation work. Firstly, analyze the necessity of building a SMR operation preparation management system from three dimensions: strategic level, unit needs, and brand building. Secondly, the framework structure of the “1-3-9-1” first small reactor operation preparation management system based on forward design is elaborated from the aspects of one center, three main lines, and nine paths. Finally, the benefits of the system were introduced from the aspects of system improvement, and project support, etc. The study in this article has important reference significance for the practical application of operation preparation for nuclear power plant.

**Key words:** small modular reactor; operation preparation; management system; systems engineering; top-down design

CLC number: C939

Article character: A

Article ID: 1674-1617 (2025) 03-0440-06

## 0 前言

小型模块化反应堆(Small Modular Reactor, SMR)(以下简称“小堆”)具有建造工期短、体积小、模块化部署、安全性好、用途多等优点,越来越受到世界各国的重视和研究<sup>[1-3]</sup>。为保障国内某核电厂小堆成功建设及后续安全运行,助力打造中国小堆名片,因此有必要对首个小型模块化反应堆运行准备管理体系开展建设研

究,有利于推广应用至后续新建小堆和新型号首堆项目,促进核电高质量发展。

## 1 小堆运行准备管理体系建设必要性

### 1.1 实现中国小堆技术全球领先的战略需要

小堆项目是中核集团、中国核能电力股份有限公司重点推进的重大战略性核电项目,是海南核电有限公司(以下简称“海南核电”)承接的全球首堆示范工程重点工作任务。其因模块化和

收稿日期: 2025-03-31

作者简介: 张超(1987—),男,山东临沂人,学士,高级工程师,主要从事核电厂运行相关工作(E-mail: zhangchao02@cnpn.com.cn)。

多功能应用等特点得到国际上的广泛关注与认可<sup>[4]</sup>，目前正处于工程建设高峰期。因此，为牢固树立中国小堆技术的全球领先地位，紧紧把握小堆领跑窗口期，助力中国小堆走出去，必须系统化地建设小堆运行准备管理体系，确保项目高标准顺利建成及高质量运行生产。

## 1.2 保障机组安全可靠经济运行的必然要求

该小堆作为全球首堆，存在首堆无参考、运行经验缺乏、首台套设备多、工期短要求高、成本受限、设计变更频繁、运维人员紧张等难点问题。因此，有必要提前谋划，进行小堆运行准备的体系提升，提高运行准备工作质量，推进全面标准化流程化，填补小堆运行准备领域经验空白，保障小堆机组建成后安全可靠经济运行<sup>[5]</sup>。

## 1.3 打造首个示范小堆卓越品牌的迫切需求

为切实增强企业核心竞争力，实现高质量发展目标，有必要以创新为引领，基于正向设计理念，提出首个“1-3-9-1”小堆运行准备管理体系<sup>[6]</sup>，提高科学管理效能，推进轻量化集约化精准化，实现降本增效目标，助力打造中国核电科技创新拳头产品，领跑小堆发展赛道，助推卓越首堆品牌建设。

# 2 小堆运行准备管理体系建设研究

## 2.1 基于正向设计，构建“1-3-9-1”运行准备管理体系

### 2.1.1 战略引领发展方向，明确运行准备原则思路

明确运行准备“高标准高质量”“有计划分步骤”“有管控重落实”“分层次突重点”的四项工作原则，坚持目标导向、问题导向、结果导向的工作思路<sup>[7]</sup>，确保小堆在人员、物资、技术等方面的运行准备工作得到全面落实。

### 2.1.2 利用正向设计理念，自上而下开展顶层设计

根据系统工程 V 模型<sup>[8-9]</sup>，如图 1 所示，用自上而下的正向设计分析方法，从小堆的设计特点和运行准备的首要需求出发，系统开展任务分析，以运行准备为中心目标，提出人才培养、物力准备、技术创新三条主线，拓展出九条路径，覆盖人员配置、技能培养、后勤保障、程序编制、厂房管理、物资准备、文件准备、设计优化、协同合作等体系内容，以“卓越绩效”指标

体系为评估手段，首次建立一套适用于小堆的“1-3-9-1”运行准备管理体系<sup>[10]</sup>，促进小堆运行准备的最优配置，使得运行准备工作全面完整、精准高效。

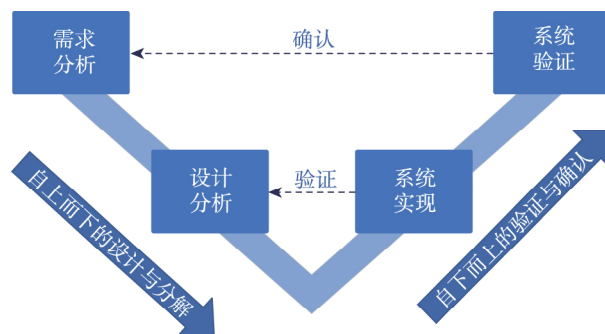


图 1 系统工程 V 模型

Fig. 1 The system engineering V-model

图 2 为小堆“1-3-9-1”运行准备管理体系示意图。其中，体系的顶层任务即“屋顶”，是系统全面完成运行准备任务，全力保障小堆机组顺利商业运行，并以四项工作原则为管控约束指标。体系的核心内容即“屋主体结构”，是“中心目标—三条主线—九大路径—卓越绩效”形成的自上而下分解和自下而上验证相结合的“1-3-9-1”全流程闭环管理链条。体系的保障机制即“屋柱和地基”，主要包括以“小堆攻坚指挥部+小堆生产准备委员会”为核心的双重组织机构管理和“正向设计为主、对标提升为辅”的双重文化理念建设，并以全面化制度和多样化工具助力体系提质增效。体系的各有机部分相互作用、相互配合、相互协作，推动实现整体目标。

### 2.1.3 关注实施应用反馈，引领运行准备高效实现

以项目抓落实，通过系列良好工作实践，不断推动运行准备管理抓实抓细；以反馈促改进，通过卓越绩效评价体系，持续提升运行准备管理效率质量，做到集约、精准、增效、创新，保障全球首个示范小堆重大工程建设，助推战略目标的实现。

## 2.2 锚定一个中心，准确整体把握运行准备本质内容

运行准备的总体目标是，建立一套完善的小堆运行管理体系，为机组装料后的安全、稳定、经济运行打下坚实的基础<sup>[11]</sup>，可进一步划分为组织目标、人员目标、文件目标、物资目标、技术目标、绩效目标。

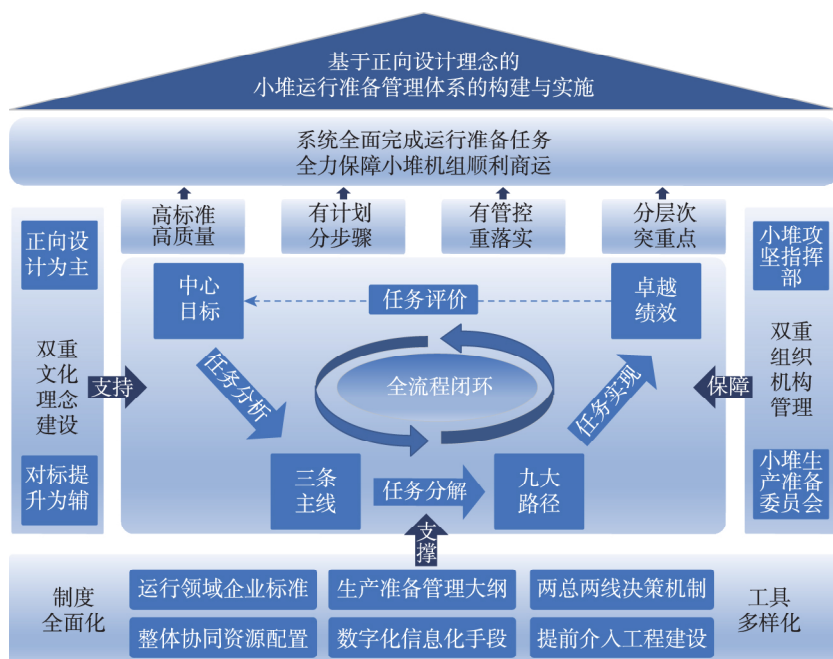


图2 小堆“1-3-9-1”运行准备管理体系

Fig. 2 The “1-3-9-1” operation preparation management system

### 2.3 聚焦三条主线，系统全面创新布局运行准备工作

凝练五类目标，创新性提出“人才、物力、技术”三条主线，准确把握小堆运行准备方向，进而实现运行准备工作的精准管控。

#### 2.3.1 强化人才核心，充分激发运行准备人员活力潜力

拓展运行架构搭建、人员岗位培训、考操人员保障、小堆现场考试等精细化制度，逐步配置运行人员，保持队伍精减高效，并制定运行职业发展规划，构建合理人才梯队，形成新老搭配、朝气蓬勃的局面。

#### 2.3.2 筑牢物力基础，周全细致筹备运行准备各项资源

拓展管理程序编制、建安跟踪与提前介入、生产物资配备、移交接管等标准化流程，建立有效的管理调度体系，为运行值班、机组冷热试、商业运行等活动提供符合要求的配套支持，确保安全生产得到有效控制。

#### 2.3.3 深耕技术研究，不断探索运行准备设计创新优化

拓展技术文件编审、线上协同平台、线下交流渠道等立体化举措，填补小堆技术文件空白，全面开展小堆设计审查，与协作单位开展技术攻关，大力推动设计创新优化，增强小堆竞争力。

### 2.4 走好九条路径，以高标准践行运行准备走深走实

九大路径作为体系建设的具体落实创新举措，使得小堆运行准备管理理念成为有根之木、有源之水，具有极高的现实意义。

#### 2.4.1 科学配置技术人员，搭建“三横四纵”运行架构

“三横”即三层级，通过处室—科组—一个人的上下贯通，实现战略目标有效分解和穿透至各岗位具体工作项。“四纵”即运行人员、技术人员、支持人员、管理人员四类人员，调动人员积极性。充分发挥小堆小型化特点，实现人员精简，进而降低人力成本。

#### 2.4.2 大力培养运行人员，创立“1+1”岗位培训体系

面对运行人员新老不一、技能水平有待提升的局面，统筹兼顾，创新提出“1+1”岗位培训体系，如图3所示。第一个“1”代表面向老员工的“小堆大讲堂”培训制度；第二个“1”代表为新员工制定的接收培养标准化流程；“1+1”代表“1个老员工+1个新员工”的“师带徒”培训制度<sup>[12]</sup>。

#### 2.4.3 有效加强考操管理，推出“双重联锁”保障措施

为确保小堆操作员数量满足小堆装料及后续运

行要求，制定首批操作员取照考试通过率保证方案，帮助小堆首批操作员备考，协调提供必要资源。并综合运行值绩效观察（CPO）评估的标准和运行团队各岗位的基本功要求，发布小堆执照人员模拟机培训手册，提升人员技能和行为规范水平。

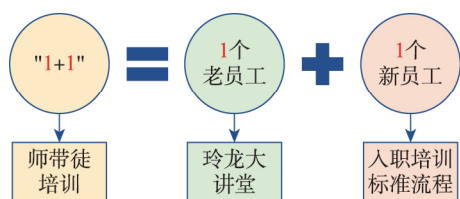


图3 “1+1” 岗位培训体系

Fig 3 The “1+1” job training framework of SMR

#### 2.4.4 全周期闭环程序管理，形成“三步走”编制流程

由于小堆程序框架尚处于空白，在组织机构和人员管理方面与传统堆型存在差异，通过引进、吸收、优化3个环环相扣的阶段，形成小堆运行领域管理程序框架，共分为大纲级、制度级和细则级3个层级，进一步形成“吸收—转化—应用”三步走标准化流程。

#### 2.4.5 持续跟踪小堆现场，制定“全程参与”厂房制度

小堆现场厂房的系统设备布置方式与传统大堆差别大，存在首台套设备多且无参考核电厂等难点，通过制定小堆人员现场熟悉、安装阶段设备安装进度跟踪、移交投产等标准化流程，提前介入建安阶段，把握设备安装调试进度，保障小堆系统设备的顺利投产。

#### 2.4.6 及时响应物资需求，定制“特项特办”配备范式

运行物资是满足运行人员办公需求、维持小堆机组正常生产的基础。通过明确“提前策划、及早投运”的物资准备原则，全时段跟踪小堆工程建设的实际进展，针对不同厂房需求及时开展相应的物资和工器具准备工作，确保物资准备安全可靠。

#### 2.4.7 专业编审运行规程，设置“内外并行”流程模式

由于缺少小堆运行及评审经验，通过“内外

并行”流程模式，即成立公司内部运行规程审查小组，建立小堆运行规程审查计划、流程及审查方法，保证能够覆盖所有的技术要求。同时协同核动力院、核电工程公司三方成立小堆运行规程相关专项组，建立沟通渠道及决策机制。最后，采用沙盘推演初步校核、模拟机验证、调试验证等多种手段，确保规程的准确性和可执行性。

#### 2.4.8 审查优化设计方案，建立“热线平台”创新机制

小堆工期短、要求高、成本受限。但其设计文件版本较低、错误偏多、更新很快，没有系统化收集和分类，严重影响设计文件审查进展。通过小堆设计文件审查优化全周期管理流程，与设计院建立线上远程沟通的热线平台，确保沟通通畅，回函及时，并制定文件与函件反馈计划与机制，推动设计审查优化落实。

#### 2.4.9 党建联建增强交流，打造“厂研一体”协同模式

为完善小堆的设计审查工作和寻找设计问题的解决方案，通过和相关单位开展党建联建活动的方式，加强技术交流，增强协同合作。由负责人收集小堆难点问题和设计优化方面的议题，对应负责人负责党建联建线下交流活动，并对设计院的答复意见和同行核电厂的先进经验进行整理和制订跟踪计划，落实到小堆的设计文件中。

### 2.5 稳固一个支撑，确保运行准备卓越绩效偏差归零

为规范小堆运行准备衡量标准，坚持高标准卓越绩效引领制度，通过分析小堆设计特点，并梳理中国核电涉及运行领域的绩效指标，对标同行优秀指标目标，从而制定可衡量的小堆绩效指标，建立卓越指标目标值，即全范围模拟机进度、系统向生产移交完成率等9项一级卓越绩效指标、28项二级卓越绩效指标。同时形成指标统计周期和方法，如图4所示，充分发挥指标的信息、控制功能，利用指标预警机制分析工作偏差，有效管控运行准备工作，实现资源高效利用。

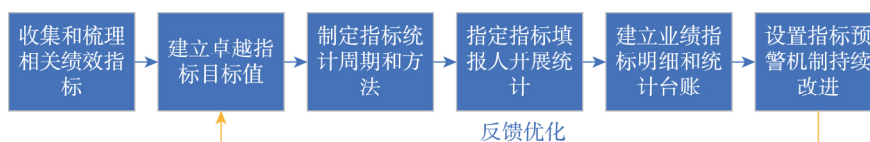


图4 小堆卓越绩效流程简图

Fig 4 The excellent performance flowchart of SMR



## 2.6 做好体系支持,保障小堆生产运行准备目标实现

### 2.6.1 贯彻双重文化理念,发挥文化指引作用

管理理念和文化建设,是体系建设和发展的基石。贯彻系统思想文化,让“正向设计”的工作思维和方式方法深入人心,提升员工工作思维和方式,并辅以对标提升,吸收现有技术和成果,形成“正向设计为主,对标提升为辅”的双重管理文化理念,进而促进体系持续优化完善。

### 2.6.2 组建双重组织机构,建立质量管控队伍

负责管理小堆建设的双重组织机构包括攻坚指挥部和生产准备委员会,建立“两总两线”工程管理机制,即工程总指挥、总工程师、执行线、监督线为一体的管理机制<sup>[13]</sup>。在总指挥、副总指挥的领导下,由工程总指挥、总工程师分别负责工程实施工行政与技术管理,并全过程接受政治、安全质量监督,通过工程执行线和监督线,推动和保障小堆按计划、高质量建成。

### 2.6.3 采用多重机制手段,强化任务保障能力

多重保障手段包括总经理协调会、项目协调会、工程周例会、总师会及各领域协调会等机制,增强各相关单位整体协同能力,整合资源推进项目;利用数字化信息化手段,实现任务的高效执行和流转等;提前介入小堆建设全周期,实现小堆全领域上下贯通。

## 3 小堆运行准备管理体系建设效益

### 3.1 建立高效管理体系,有序完成运行准备

首个小堆“1-3-9-1”运行准备管理体系全方位立体化开展和完成运行准备工作,提高了工作质量和效率,有力保障了小堆示范工程顺利建设,且体系适用性强,有利于推进核电行业运行准备标准化提升。

### 3.2 填补小堆领域空白,积累运行准备经验

该小堆作为全球首堆,没有类似的技术文件可供参考。利用该体系实现了小堆运行规程总体编制完成率达到90%以上,极大填补小堆运行技术文件领域的空白,并参与IAEA用户需求文件工作组,牵头编制7项小堆国际通用用户标准,填补小堆领域标准空白,引领全球小堆技术

发展方向。

### 3.3 防范工期延误风险,保障实现工程目标

完成上千份设计文件的收集和审查,识别超过上百个设计问题,其中包括堆芯补水箱注入、余排系统升温升压、主泵排气阀等多条机组的重大启停相关问题,以及百余条常规岛和画面设计问题。目前基本实现所有卓越绩效指标周期内完成率接近100%和偏差项基本为0。

### 3.4 大幅提升管理水平,促进机组降本增效

运行人员架构精简实现人力成本节省超过1800万元。高效的人员培训制度实现首批操作员取照考试(RO/SRO)总体笔试通过率为81.4%,确保满足机组装料及运行要求。完成DCS二层实施棒控棒位系统画面优化修改等设计优化,创造效益超过1000万元。

### 3.5 擦亮全球首堆名片,助推国际推广战略

主控室可用等里程碑节点被人民日报等主流媒体宣传报道,4次登上新闻联播。多批次海外国家大使官员以及相关专家参观小堆建设施工现场,如与IAEA签署能力建设执行协议等开展合作交流。获得中国核能电力股份有限公司2023年度工程建设卓越机组、2024年中核集团管理创新成果三等奖、2024年中国核电管理创新成果三等奖等奖项成果、2024年全国电力行业工程建设管理创新成果一等奖等。

### 3.6 立足能力长期建设,管理体系持续提升

上述小堆体系不是一成不变的,将根据实际情况的变化(如技术迭代改进)作适应性改进。因其系统化特征,体系设计得以全过程追溯,便于随输入条件的变化而快速同步调整,减少不必要的返工。海南核电将始终坚持高标准引领制,以正向设计为基础,不断与优秀同行核电厂对标,树立“运行准备工作永远在路上”的工作理念,不断对“1-3-9-1”运行准备管理体系建设进行优化和提升。未来随着管理理念的更新进步,如基于模型的系统工程(MBSE)投入应用,将进一步深化运行准备管理体系数字化进程。此外,小堆体系成套海外推广,可能面临相关国家法规和标准存在差异、技术与基础设施不适配、文化和运营理念冲突等潜在风险,可通过“标准输出+本地适配”双轮驱动,如试点先行、逐步适配、动态反馈等方式,促进管理体系适应性改进提升。

## 4 结语

本文首先从战略层面、机组需要、品牌建设3个维度分析了小型模块化反应堆运行准备管理体系建设的必要性。其次,基于系统工程正向设计的理念,从一个中心、三条主线、九条路径、一个支撑、体系支持与保障等方面阐述首个小堆“1-3-9-1”运行准备管理体系。最后,从体系提升、领域空白、项目保障、管理水平、品牌宣传、持续性改进等方面介绍了该体系所产生的效益。本文的研究对于核电机组运行准备工程实践具有重要参考意义。

### 参考文献:

- [1] 李琳.全球小型模块化反应堆进展情况研究[J].核安全, 2024,23(4):64-68.
- [2] 孙海翠,侯新建,张翼,等.一种多模块高温气冷堆核电厂给水系统及控制设计方案[J].中国核电, 2023, 16(4): 573-582.
- [3] 宋丹戎,秦忠.“玲龙一号”技术方案及示范工程进展[J].中国核电, 2018,11(01):21-25.
- [4] 曾子严,朱先磊,丁文广.“双碳”背景下电力企业碳管理体系的构建[J].能源与节能, 2024(10):40-45.
- [5] SMIRNOVA S L, KOROLEV A S. Critical factors of an integrated approach to the economics of small modular reactors[J].Atomic Energy, 2025,137(1):1-11.
- [6] 王锋.核电工程建设中的项目管理方法分析[J].中国标准化, 2019(18): 148-149.
- [7] WRIGHT E R, CHO K, HASTAK M. Assessment of critical construction engineering and management aspects of nuclear power projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2014, 30(4): 04014016.
- [8] 陈宇,霍建明,袁霞,等.系统工程方法应用于核电设计探析[J].信息系统工程, 2021(6): 137-139.
- [9] CORRADO J K. Model-based systems engineering adoption in the U.S. Nuclear industry[J]. Nuclear Engineering and Design, 2025, 432: 113752.
- [10] 秦锦,张丹萍,陈世雄,等.基于全价值链的“5145”核安全质量管理模式实践[J].中国质量, 2024(8): 12-17.
- [11] 郝龙,李连海,张爱国,等.核电企业多维协同的安全生产保障管理体系构建与实施[J].中国核电, 2024, 17(3):304-308.
- [12] 徐守新.HL 公司新建三代核电厂运行人员培养优化研究[D].南宁: 广西大学, 2024.
- [13] 江锋,孙健,袁家德.核电企业基于业主引领和全线协同的安全管理体系构建[J].中国核电, 2024, 17(3): 299-303.