

核电厂操纵员的多维知识结构

张捷 孙雪峰

苏州热工研究院有限公司

DOI:10.32629/pe.v4i3.21048

[摘要] 本文构建了核电厂操纵员的多维知识结构模型,并深入探究该模型如何为核安全提供多层次、系统性的支撑。文章系统性地构建了由“基础知识层”、“专业技能层”与“核心素养层”构成的三维知识结构模型。该模型强调,操纵员的能力不仅限于熟悉电厂工艺系统设备和掌握操作技能,更涵盖了情景意识、决策能力、团队协作及安全文化素养等高阶认知与非技术技能。最后,本文提出,构建、评估并持续优化此多维知识结构,是提升人因可靠性、巩固纵深防御体系中人因屏障的战略举措。

[关键词] 核电厂操纵员; 知识结构; 多维能力

中图分类号: TL48 文献标识码: A

Nuclear Power Plant Operator's Multidimensional Knowledge Structure

Jie Zhang Xuefeng Sun

Suzhou Nuclear Power Research Institute Co. Ltd

[Abstract] This paper build a multi-dimensional knowledge structure model of nuclear power plant operators, and explore how the model works to provide multi-level and systematic capability support for nuclear safety. First, this paper reviews the key role of operators, and then constructs a three-dimensional knowledge structure model which is consisted by "basic knowledge", "professional skill" and "core literacy". The model emphasizes that the operator's ability is not only limited to the familiarity with the plant process system equipment and the mastery of operational skills, but also covers with high-level cognition and non-technical skills such as situational awareness, decision-making ability, teamwork and safety culture. Finally, this paper proposes that the construction, evaluation and continuous optimization of this multi-dimensional knowledge structure is a strategic measure which will enhance the reliability of human factors and consolidate the human factors barrier in the defense-in-depth system.

[Key words] nuclear power plant operator; knowledge structure; multi-dimensional ability

引言

核电作为一种清洁、高效的能源,在全球能源结构中占据重要地位。历史上的切尔诺贝利、三哩岛和福岛核三起核事故始终警示我们,核安全无小事。核电行业在从设计、建造到运行、退役的全过程中都采用“纵深防御”的安全理念,通过设置多重、独立、重叠的实体屏障与技术措施来防止放射性物质向环境的释放,通过一系列连续和独立的防御层次的结合,防止核电厂事故对人员和环境造成危害^[1]。在这个过程中,人,特别是主控室内的操纵员,是最关键的因素。操纵员不仅是核电厂系统设备的监控者和操作者,更是在异常工况和事故状态下做出关键决策、稳定电厂状态、守护最后安全防线的“守门员”。因此,操纵员的能力直接影响电厂的核安全水平。传统上,对操纵员能力的评价更多强调技术方面,如对规程的熟悉和操作技能的熟练,而对“非技术技能”的重要性认识不足。现代的核安全观认为,操纵

员的知识结构是一个多维、动态、立体的能力体系。本文将系统剖析这一结构,并阐述其如何为核安全提供多维度的能力支撑。

1 操纵员的角色定位

核电厂的运行工况可分为正常运行、预计运行事件、设计基准事故、没有造成堆芯明显损伤的事故、严重事故(堆芯熔化)。在这一过程中操纵员所承担的任务目标相应改变,操纵员的角色定位从监控者、操作者逐渐转换为判断者、决策者,直至应急响应团队中的一名协作参与者。操纵员需在电厂不同运行状态和事故工况下按照适当的程序正确履行职责^[2]。因此,操纵员的知识结构必须与其角色相匹配。

2 核电厂操纵员的多维知识结构模型

核电厂操纵员要完成各项工作任务,其知识体系需完备且能够应对不同的核电厂工况。通过分析操纵员的任务,我们可以

构建一个模型来描述操纵员的知识结构,这个模型由三个相互关联、逐层递进的维度构成,能够完整展现驾驭反应堆、维护电厂核安全的关键人员所需具备的能力。核电厂操纵员知识结构模型见图1。

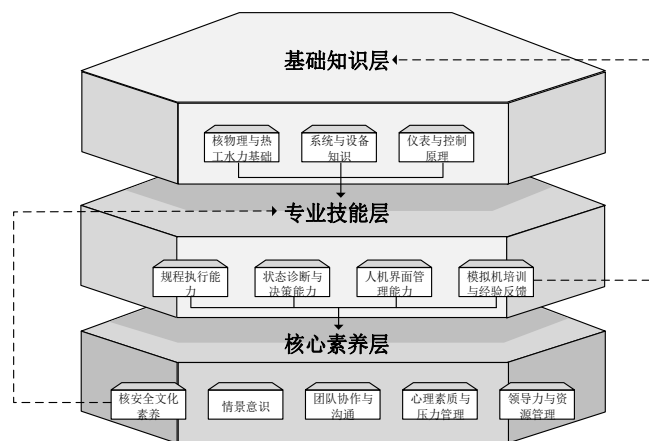


图1 核电厂操纵员知识结构模型

2.1第一维度：基础知识——理论根基

要想成为一名操纵员首先需要掌握一定的理论知识,这是操纵员理解核电厂物理过程、系统运作和故障原因的“为什么”层面。这些知识主要包括:

(1)核物理与热工水力基础:核物理、热力学、传热学、流体力学等物理学科的相关知识是理解反应堆原理、核电厂正常运行和事故工况物理过程的基础。

(2)系统与设备知识:操纵员需熟练掌握核电厂各系统的功能、构成、工作原理及相互关系,以及各主要设备的结构、工作方式、工艺参数。这些系统设备的相关知识是核电厂工艺流程的核心,掌握这些知识才能清楚核电厂如何发电。

(3)仪表与控制原理:各种复杂的自动控制调节系统可确保核电厂运行在规定的安全范围内。因此核电厂操纵员必须掌握控制理论、仪表测量原理,只有这样才能够正确分析各种参数背后的物理意义。

此层面的知识确保了操纵员在面对异常参数时,能进行根源分析,而非机械地执行操作步骤。

2.2第二维度：专业技能——实践支柱

掌握理论知识基础后,动手能力就是操纵员知识结构的第二层次。这是将理论知识转化为实际行动的能力,是解决“怎么做”的层面。这个层面核电厂操纵员需具备的知识能力包括:

(1)规程执行能力:操纵员在机组上的各种操作必须严格依据既定规程执行。操纵员执行什么样的任务就需找出相应的操作规程按部就班执行,哪怕在进行事故处理时也需使用对应的事故应急规程。因此熟练、准确、无误地执行各类运行规程是对操纵员的基本要求。

(2)状态诊断与决策能力:核电厂所有系统设备的状态参数都送到主控室展示给操纵员是不现实的,只能把最关键核心的信息传至主控室,使操纵员能够据其判断出整个电厂所处的状

态。操纵员在信息不完整、时间压力大的情况下,综合各种参数和报警,快速、准确地诊断电厂状态,并制定或调整操作策略是对操纵员能力的极大挑战。这也是应对超设计基准事故的关键。需强调的是,操纵员的决策应是基于证据的定量决策^[3]。它不是一时的拍脑袋冲动,而是基于仪表数据、规程、经验和团队讨论所形成的共识。

(3)人机界面管理能力:现代的核电厂都使用数字化主控室。核电厂的运行参数,设备状态信息都是通过主控室的显示终端向操纵员展示;操纵员做出的每一个操作也都是在主控室的控制终端中发出指令。操纵员需要对主控室的人机接口十分熟悉,能高效地与数字化主控室人机界面进行交互,快速获取关键信息,同时也要避免信息过载。

(4)模拟机培训与经验反馈:操纵员对于正常和事故工况下的各项操作必须十分熟练,但这些练习不可能在实际机组上进行,需要通过高保真全范围模拟机进行反复演练,这是操纵员必须经历的一项重要培训,通过在模拟机上的实操积累处理各种瞬态和事故的经验,将隐性知识显性化。经验反馈也是操纵员培训中的重要环节,并且将贯穿操纵员的整个职业生涯。它不仅丰富操纵员的个人经验,更是组织知识的重要来源。

2.3第三维度：核心素养——安全灵魂

核电厂与常规电厂的区别在于其存在核安全风险,核电厂操纵员的一举一动都与核安全息息相关。操纵员在掌握基础知识和专业技能外,还需具备高于普通工程技术人员的核心素养,这是最高层次的能力,它不是依靠一两节课的培训能够学来的,需要个人身体力行的实践思考,在平时的工作环境中慢慢熏陶,经过长期的耳濡目染逐渐养成。核心素养决定了操纵员在压力下的行为模式和决策质量,是诠释“为何坚守”的层面,主要属于非技术技能。这个层面主要包括:

(1)核安全文化素养:安全文化是存在于单位和个人中的种种特性和态度的总和,它建立了一种超出一切之上的观念,即核电厂安全问题由于它的重要性要得到应有的重视^[4]。它由组织和个体不同的安全要求形成完整的核安全文化。作为核电行业从业者,核电厂操纵员必须将“核安全高于一切”的理念内化于心、外化于行,任何时刻都坚持保守决策,严格遵守程序,始终保持质疑的工作态度和严谨的工作作风,在工作中用实际行动践行审慎细实。

(2)情景意识:安德斯雷的感知-理解-预测三层次态势感知模型^[5]能够较好地对此进行阐释。操纵员需要能够持续地感知环境信息,通过获得的各种信息判断电厂状态,理解其含义,并预测其未来的发展。这是一个动态、持续的过程,是有效决策的前提。

(3)团队协作与沟通:核电厂不是由一名操纵员控制的,它时刻处于一个运行团队的掌控下,值长、操纵员、现场操作员之间是一个高效协作的整体。操纵员作为这个团队中的重要角色,必须具有团结协作的意识,和团队中的成员甚至核电厂其它部门进行清晰、准确、闭环的沟通。

(4) 心理素质与压力管理: 核电厂操纵员需具备坚韧的心理素质和强大的抗压能力。在紧急事故下保持冷静、沉着, 清楚任务目标, 按照规程有条不紊地操作, 在长时间的高强度工作负荷下能够抵抗疲劳和压力, 维持稳定的认知能力和判断力。

(5) 领导力与资源管理: 对于高级操纵员和值长, 还需要具备任务分派、资源协调、决策指挥的领导能力。

3 多维能力对核安全防线的支撑机制

上述三个方面的内容共同构建起核电厂操纵员需掌握的知识体系大厦, 这三个维度的知识结构并非孤立存在, 而是协同作用, 共同造就操纵员完整的技能。三个维度层层递进, 以纵深防御的理念打造操纵员的核安全意识。通过操纵员群体对核电厂高质量的掌控能力支撑起核电厂坚固的核安全防线。

3.1 理解深度

基础知识层能够为纵深防御提供“理解深度”。例如当安全系统自动触发时, 具备操纵员能够依靠扎实的理论基础迅速理解安注的原因, 并能监视系统是否正常动作, 在必要时进行干预, 防止机组工况恶化。如果缺乏相关知识, 则有可能产生误判, 甚至在慌乱中出现错误。三哩岛事故中的操纵员就犯了此类错误, 最终造成反应堆堆芯失水而损坏。

3.2 操作准度与响应速度

专业技能层在纵深防御中保证“操作准度”和“响应速度”。在事故处理中, 操纵员需要严格按照规程操作, 同时根据实际情况进行诊断和决策。熟练的技能和丰富的模拟机经验可以大幅缩短操纵员的响应时间, 提高操作的准确性, 从而有效将事故控制在早期阶段。

3.3 系统韧性与容错能力

核心素养层为纵深防御提供“系统韧性”与“容错能力”, 这是防止人因失误的最关键屏障。良好透明的核安全文化是杜绝违章操作的重要手段, 能从源头消除隐患, 构建纵深防御的第一道防线。高度的情景意识能使操纵员在报警泛滥时, 抓住关键信号, 避免迷失方向, 从而守住纵深防御的第二、三道防线。卓越的团队协作能通过交叉检查、互相提醒, 弥补个人认知的局限性, 形成“团队冗余”; 质疑的态度能够避免羊群效应, 使团队做出正确的决策。这在处理复杂的多重故障叠加事故时至关重要。强大的心理素质能确保在极端压力下, 个人和团队的能力不发生崩溃, 从而守护住最后的防线。

4 结论与建议

核电厂操纵员的知识结构是一个由“基础知识-专业技能-核心素养”构成的多维能力体系。它与传统“操作员”概念不同, 要求操纵员这个复合型人才既是一名工程师, 又是一个诊断专家, 还是一个决策者和团队协作者。操纵员的这种多维能力与纵深防御原则相结合, 为核安全提供了多层次的支撑。

为持续巩固核安全, 不断提升核电厂的安全水平, 建议从以下方面完善操纵员的选拔、培训与评估体系:

(1) 优化选拔与培训体系: 在选拔中注重候选人的认知潜力和心理特质。可引入认知能力和心理评估测试等工具。在培训中推行从理论到模拟实操再到素质培养的培训模式。

(2) 强化非技术技能训练: 将决策、团队协作和领导力等核心素养的训练, 系统地纳入模拟机课程和日常培训考核中, 并采用基于行为的评分标准进行客观评估。

(3) 营造持续学习的安全文化氛围: 鼓励主动报告失误, 并定期组织技术研讨会和案例复盘。强化经验反馈和知识共享, 建立学习型组织, 持续动态优化操纵员的多维知识结构。

只有这样, 才能培养出一支技术精湛、心理过硬、行为规范的高素质操纵员队伍, 真正打造出坚实维护核安全的最后一道防线。

[参考文献]

[1] 国家核安全局. 核动力厂设计安全规定: HAF102-2016 [S]. 北京: 国家核安全局, 2016.

[2] International Atomic Energy Agency. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation: No. SSR-2/2 (Rev.1) [S]. Vienna: IAEA, 2016.

[3] 司千宇. 决策学: 决策理论与方法. [M]. 北京: 经济管理出版社, 2002: 210.

[4] International Atomic Energy Agency. Safety Culture: A report by the International Nuclear Safety Advisory Group: No. 75-INSAG-4 [R]. Vienna: IAEA, 1991.

[5] Endsley M R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems [J]. Human Factors, 1995, 37(1): 32-64.

作者简介:

张捷(1975—), 男, 汉族, 广东深圳人, 高级工程师, 本科, 核电厂运行。