

核电工程建设安全管理体系创新与数智化实践研究

姜 宁

中广核阳江核电有限公司 广东阳江 529941

摘 要: 本研究聚焦2023–2025年间中国广核集团(以下简称“中广核集团”)核电工程安全管理体系创新实践,通过调研阳江、台山、防城港、宁德等核电基地,重点分析安全管理责任体系、重要节点风险控制与安全文化培育的协同机制。数据显示,此期间中广核集团核电工程百万工件事件率从2022年0.35降至0.12,辐射污染、消防隐患等专项安全指标优于国家标准,关键安全管控环节一次达标率达100%,形成可复制的安全管理范式。

关键词: 核电工程;安全管理体系;数智化实践研究

1 安全管理责任体系创新

传统安全管理责任体系存在责任边界模糊、考核机制僵化、基层执行动力不足等问题。2023年起,中广核集团阳江核电基地率先启动改革,构建双层监管架构,实现安全责任全链条覆盖。

1.1 双层监管架构的核心设计

架构以“分级负责、协同联动”为核心,分“决策层–执行层”两级:决策层以基地安全质量委员会为核心,总经理任主任,成员含工程、技术等关键部门负责人,每季度查高风险区域,重大风险“挂牌督办”,明确整改责任人、时限与措施,确保风险闭环管理。执行层中,工程公司与承包商签安质环责任书,将责任分解至项目部、班组及个人,结合岗位细化条款,如核岛班组重高空防护与辐射管控,技术部门聚焦施工方案安全审查,避免“一刀切”式责任划分。协同机制:设“月度安全协调会”,联合多方通报情况,2024年累计解决跨单位安全责任纠纷46项,提升责任执行效率。

1.2 2025年考核体系的三大安全管理特征

1.2.1 全员安全责任穿透

首次将秘书、协管、后勤保障等辅助岗位纳入安全考核范围,通过岗位安全风险评估,明确52类岗位差异化安全责任清单:秘书岗位需协助传达安全文件、提醒会议期间安全规范;协管岗位需监督作业人员防护用品佩戴、上报现场违章行为。配套专项培训确保岗位人员掌握安全职责,2025年上半年辅助岗位累计上报安全隐患89项,同比增长62%,实现“人人有安全责任、人人管安全”。

1.2.2 动态安全奖惩机制

建立“约谈–奖金扣减–晋升否决”递进式惩处机制,强化安全责任约束力:对轻微安全履职缺陷者,由部门负责人约谈并制定改进计划;对多次违规或较严重履职不到位者,扣减5%–30%绩效奖金;发生重大安全责任事故或严重违章者,实施1–3年晋升否决。

2024年累计执行安全绩效扣罚127人次,其中晋升否决10人次。同时设立“月度安全之星”“年度安全先进个人”等荣誉,2024年156名员工获安全奖励,32人因安全表现突出优先晋升,激发员工安全履职积极性。

1.2.3 智能安全考核工具

表1 2025年核电工程核心安全考核指标(安质环专项)

| 安全风险类别 | 考核扣分规则 | 行业安全基准值 | 阳江核电2025年实际值 | 安全改进幅度 |
|--------|---------------------------------|-------------|--------------|------------|
| 人身安全 | 死亡30分/人,重伤15分/人,轻伤5分/人 | ≤0.2起/百万工时 | 0.05起/百万工时 | 较基准值下降75% |
| 辐射安全 | 放射源丢失20分/起,体表污染1分/人次,剂量超标5分/次 | 污染事件≤3起/年 | 0起/年 | 完全杜绝辐射污染事件 |
| 消防安全 | 核岛内烟头2分/个,消防设施失效10分/处,演练未达标8分/次 | 烟头检出率<0.5% | 0.1% | 较基准值下降80% |
| 设备安全 | 安装精度超标5分/台,设备损坏15分/台,调试失败10分/次 | 设备安装合格率≥98% | 100% | 较基准值提升2% |

开发移动端“安全积分APP”，实现安全考核智能化管理，实时记录作业人员违章行为、隐患整改情况及安全培训参与度，自动计算个人安全积分；后台通过大数据生成个人、班组、部门安全排名与趋势报告，数据反馈效率提升80%，准确率超99%；上线安全学习资料200余份、违章案例150余个，兼具考核与培训功能，成为安全管理数字化载体。

2 重要节点安全风险控制

核电工程建设中，DCS系统安装、核岛穹顶吊装等节点集中高风险作业，中广核集团针对各节点特性制定专项安全管控方案，实现风险精准防控。

2.1 DCS系统安装安全专项控制

DCS系统作为核电机组“神经中枢”，其安装质量直接影响机组安全运行。2025年，中广核集团防城港核电4号机组通过双重管控，实现DCS系统安装“零安全缺陷”。

2.1.1 三维空间安全预演

采用BIM技术构建DCS系统电缆敷设三维模型，对7.2公里电缆的敷设路径、弯曲半径、与设备间距等参数进行模拟优化：提前规避43处电缆与管道、建筑物的碰撞风险，避免施工中因路径调整引发的安全隐患；精准计算每根电缆长度，减少材料浪费的同时，避免因电缆短缺导致的停工与返工安全风险，累计节约成本20万元。

2.1.2 无尘化安全环境管控

DCS设备对环境洁净度要求极高，颗粒物易导致设备短路、信号干扰。防城港核电4号机组实施超严环境管控：设立正压防尘室，采用三级空气过滤系统，将颗粒物浓度控制在 $0.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，严于国家标准5倍；制定无尘作业规范：施工人员需经风淋除尘、穿戴专用防尘服，工具设备清洁后方可入场，电缆敷设时用专用套管保护，避免外皮磨损产生碎屑。最终实现DCS设备调试一次成功，未出现因环境因素引发的安全故障。

2.2 核岛穹顶吊装安全专项控制

核岛穹顶吊装是核电工程标志性节点，具有吊装重量大（单台穹顶重量超2000吨）、作业高度高（吊装高度超60米）、精度要求高（对接偏差需 $\leq 5\text{mm}$ ）等特点，安全管控难度大。2024年，中广核集团台山核电3号机组核岛穹顶吊装作业，通过“三维模拟+全程监测+应急备援”三重安全管控，实现“零偏差、零风险”吊装。

2.2.1 吊装前三维模拟与方案优化

数字孪生预演：采用BIM+有限元分析技术，构建穹顶与吊装设备的数字孪生模型，模拟吊装过程中起吊、旋转、对接等全流程，分析吊点受力、绳索形变、风荷载影响等关键参数，优化吊装角度与速度曲线，提前规避8处潜在碰撞风险与2处受力过载风险。

方案多级评审：组织行业专家、吊装工程师、安全管理人员开展5轮专项评审，对吊装设备选型（选用3200吨级履带吊为主吊、1200吨级汽车吊为辅助）、吊索具强度校验、地基承载力检测等核心内容进行论证，确保方案安全可行性。

2.2.2 吊装过程全程安全监测

实时受力监测：在吊索具、吊点等关键部位装28个应力传感器，采样频率500次/秒，实时监测受力并传至指挥中心，受力近安全阈值90%时自动预警，保障设备与结构安全。

姿态与偏差监测：用激光定位仪、高清工业相机实时监测穹顶姿态与对接偏差（精度 $\pm 1\text{mm}$ ），指挥人员借可视化平台调参数，最终对接偏差仅2.3mm，优于 $\leq 5\text{mm}$ 标准。

环境实时监测：吊装区部署风速仪等，监测风速（要求 $\leq 12\text{m/s}$ ）、能见度，风速超8m/s预警、超12m/s停作业，2024年吊装当日规避2次短时大风风险。

2.2.3 应急备援与人员管控

应急预案与物资：制定“设备故障、姿态失稳、极端天气”3类应急处置预案，储备备用吊索具、应急电源、救援设备等物资，组织200人次应急演练，确保突发情况快速响应。划定吊装警戒区，设置物理隔离与电子围栏，严禁无关人员进入；吊装指挥团队（12人）经专项培训并考核合格，佩戴智能安全帽（具备实时通话、定位、一键报警功能），实现人员位置与状态全程可控；高空作业人员（8人）配备双钩安全带与防坠器，作业平台设置防护栏杆与安全网，杜绝高空坠落风险。

3 安全文化培育机制

3.1 多维度安全教育模式

2025年，中广核集团阳江核电基地整合“系统化宣贯+沉浸式警示+实战化排查”三维教育模式，变“被动安全”为“主动安全”。

3.1.1 系统化安全宣贯教育

构建“线上+线下”安全培训体系：线上依托安全管

理平台设法规、规程、核电专项课程,员工学后需通过测试获取学分确保学习效果;线下定期办专题讲座、知识竞赛,邀专家与资深安全员授课。2025 年开展线上课 45 期、线下讲座 28 场,员工安全知识考核合格率从 92% 升至 98%。

3.1.2 沉浸式安全案例警示

基于中广核集团真实安全事故案例,开发 VR 事故模拟系统:模拟高空坠落、物体打击、辐射泄漏等场景,员工佩戴 VR 设备可体验事故过程与后果,安全风险认知提升 40%;每月组织事故案例分析会,邀请事故亲历者分享教训,强化“违章即事故”的安全意识,减少侥幸心理。

3.1.3 实战化安全隐患排查

将施工现场划分为若干安全责任区,由安全总监带队,联合工程、技术、质量等 7 部门组建联合巡查小组:采用“查现场、看资料、问人员”方式,重点排查高空作业防护、特种设备状态、消防设施等隐患;现场分析隐患成因与危害,指导员工识别风险,2025 年上半年闭环整改安全隐患 376 项,其中重大隐患 18 项,培养“人人都是安全员”的责任意识。

3.2 基层安全能力激活工程

3.2.1 安全技能比武

2024 年举办 28 场安全技能专项竞赛,覆盖焊工、吊装工、电工等 12 类高危工种:理论考核侧重安全操作规程与应急处置知识,实操考核模拟真实作业场景,如主管道焊接安全操作、核岛设备吊装风险控制;评选“安全技能标兵”120 名,员工安全操作技能平均提升 30%,关键工种操作失误率下降 25%,从技能层面降低安全风险。

3.2.2 承包商安全自主管理

将承包商纳入安全管理体系,激发自主管控动力:设“优秀承包商安全员”奖,获奖者可参与中广核安全培训,获奖单位优先续约;建承包商安全绩效评价体系,从隐患自查率、违章发生率等维度考核,结果与合同金额挂钩——优秀者奖 5%–10% 合同额,不合格者约谈或终止合同。2025 年承包商安全隐患自查率从 2023 年 65% 升至 90%,获奖承包商续约概率提 35%。

3.2.3 近失事件安全激励

近失事件是事故预防的重要预警信号。2025 年阳江核电基地设近失事件专项基金:员工可通过 APP、邮件报告事

件(含时间、地点、潜在风险),安全部门分析后定整改措施,按事件重要性奖 200–2000 元;数据显示,每 100 起报告可消 80 余个隐患、防 1 起重大事故。2025 年上半年收报告 1200 余起,消除隐患 960 余个,从源头遏制事故。

4 安全管理未来发展与建议

4.1 智能安全预警升级

当前安全管理已从“事后处置”向“事中控制”转变,未来需向“主动预防”突破:推广 AI 违章行为识别系统:在阳江核电试点基础上,扩大应用范围,优化算法以识别高空作业违规、有限空间未通风等特殊场景违章,系统对未佩戴 PPE 行为识别准确率达 98.7%,响应时间 <3 秒,实现违章实时预警;构建设备安全预警模型:基于数字孪生与物联网传感器,实时监测主泵、蒸汽发生器等关键设备运行参数,通过 AI 分析预测故障,提前 1–3 个月发出预警,避免设备突发故障引发安全事故。

4.2 承包商安全深度整合

承包商安全管理是整体安全关键,需构建“安全命运共同体”:建立安全文化成熟度评估模型,从四维度(安全理念、制度执行、行为规范、绩效结果)量化评估,得分纳入合同续签核心条款,优先选安全管理强的合作单位;打造一体化安全培训体系,整合中广核与承包商资源,联合开发课程、组织演练,统一标准提素养;搭建安全协同平台,实现隐患、整改、文件实时共享,破信息壁垒提效,确保与集团标准一致。安全管理实证启示:防城港核电 DCS 安装“零缺陷”、台山核电穹顶“零偏差”吊装等表明,核电安全需“双轮驱动”——制度精益化(全员考核、吊装方案评审)定边界,执行精准化(VR 培训、近失激励)激动力。“制度约束”与“文化自觉”深度融合,方能筑牢核电安全长效根基。

参考文献:

- [1] 中核五公司.防城港核电 DCS 系统安装安全质量控制[R].广西防城港:中广核集团,2025.
- [2] 陈伟仲,崔建斌.追求卓越,聚焦安质环提升,全面实现阳江核电六台机组高质量投产[J].中国核电,2021,14(03):370–376.
- [3] 中国核能行业协会,中广核集团.核电工程安全文化培育指南[S].北京,2023.