

第十届中国核电技术发展高峰论坛报告

华龙一号安全设计与防城港 二期示范工程进展

■ 中广核华龙一号总设计师
中广核工程设计院副院长

咸春宇



华龙一号是我国具有完全自主知识产权的三代百万千瓦级核电技术，是由中国广核集团联合国内合作伙伴联合研发而成。2014 年 8 月，国家能源局、国家核安全局联合组织召开评审会，会议评审认为，“华龙一号”的安全性、成熟性和经济性均满足三代核电技术的要求，设计技术、设备制造和运行维护技术等领域的核心技术具有自主知识产权，是目前国内可以自主出口的核电机型。2015 年 4 月 15 日，国务院召开常务会议，决定核准建设“华龙一号”三代核电技术示范机组，标志着华龙一号从研发阶段转向示范工程建设阶段。

1 华龙一号技术方案

1.1 技术路线

华龙一号遵循研发逻辑，从顶层设计入手，通过对电厂总体功能要求的分解来确定构筑物、系统、设备的功能要求，通过迭代设计实现性能匹配，相比二代堆型系统性地提升了安全性，有效地避免了“补丁式改进”带来的“先天不足”问题。

华龙一号的安全性满足最高安全标准（HAF102、《“十二五”期间新建核电厂安全要求》、IAEA SSR-2/1 及其导则、URD、EUR 等），在经济性方面与国际主流三代核电站相比具有很强的竞争力，实现了安全性与经济性的均衡。

华龙一号采用经验证的成熟技术，充分借鉴了压水堆核电厂设计、建造和运行的经验反馈，充分汲取了 AP1000、EPR 的先进设计理念，全面考虑了福岛核事故后国内外的经验反馈，实现了成熟性与先进性的统一。

1.2 主要技术特征

1.2.1 单堆

华龙一号采用单堆布置，便于对核岛厂房进行优化布局，具有更好的厂址适用性。

1.2.2 双层安全壳

华龙一号采用双层安全壳，外壳能够抵御大型商用飞机撞击。安全壳设计自由容积大，能够有效包容事故情况下的质能释放，提高安全性。另外，设置了安全壳过滤排放系统，能够防止事故情况下安全壳超压破损，降低了放射性物质向环境释放的风险。

1.2.3 三系列

华龙一号设置了三个实体隔离的安全系列，每一安全系列均能够执行 100% 安全功能，冗余性强。三个实体隔离安全系列的设计安全性比传统两系列的设计安全性高一个数量级，能够更好地应对各种事故和内、外部灾害，同时具有更好的运行灵活性。

1.2.4 能动与非能动相结合

华龙一号采用了能动与非能动的设计理念。应对设计基准事故的安全系统设计主要为能动系统（三列实体隔离），能够充分发挥能动系统响应速度快、效率高的特点。为应对类似福岛事故的超设计基准事故，采用了非能动的设计理念，能够防止严重事故时堆芯熔毁，确保放射性物质不向环境泄露。

1.3 总体安全目标和方法

1.3.1 纵深防御设计

华龙一号严格遵从纵深防御的设计理念，按照纵深防御要求的“预防、检测、保护、包容、应急”五个层次要求，按层次开展设计工作，确保能够实

现不同层次的安全要求，实现纵深防御的设计目标。

表1 华龙一号技术方案主要指标

项目	性能参数
反应堆热功率	3 150 MW
发电机输出电功率	1 150 MW
机组类型	3 环路压水堆
设计寿命	60 年
电厂布置方式	单堆布置
堆芯损坏频率(CDF)	$< 1 \times 10^{-6}/(\text{堆} \cdot \text{年})$
大量放射性释放频率(LRF)	$< 1 \times 10^{-7}/(\text{堆} \cdot \text{年})$
安全停堆地震(SSE)	水平向 0.3 g；竖向 0.2 g
堆芯热工裕量	> 15%
操纵员不干预时间	> 30 min

1.3.2 基本安全设计

单一故障原则：机械、电气和仪控设备均考虑能动单一故障，机械设备还在长期阶段考虑非能动单一故障。

冗余性原则：考虑始发事件和单一故障，配置三列独立的安全系统。

多样性原则：对于高失效概率的共模失效，配置多样化的方案，防止共模失效。如额外可冷却系统(ECS)、多样化停堆系统(DAS)、二次侧非能动冷却系统(ASP)。

独立性原则：通过实体隔离或空间分隔，实现系统布置和设计的独立性。

故障安全的原则：在设计核电厂的安全重要系统和部件时，贯彻故障安全原则。即系统或部件发生故障时，电厂设计优先考虑在毋须任何触发动作的情况下进入安全状态。

设备鉴定：对安全级设备进行抗震鉴定和环境鉴定；对于严重事故“必须类”设备进行可用性论证。

1.4 工况设计

华龙一号工况设计过程中，对全范围事故工况进行了系统分析，包括对停堆工况和乏池类工况进行了分析分类，形成了设计基准工况(DBC)和超设计基准工况(DEC)两类工况。对于设计基准工况，结合工况发生的频率及影响后果，分为 DBC1-DBC4 四个工况等级；针对超设计基准工况，分为 DEC-A 及 DEC-B 两级。

在特殊工况的设计过程中，通过对可能发生的

特殊始发事件进行分析，评定并加强了安全系统的应对能力。如双根主蒸汽管道断裂、完全丧失交流电(包括 SBO 柴油机)、SBO 工况叠加轴封破口等事故。

对于超设计基准工况的选取，除法规规定的超设计基准工况外，还结合 PSA 的分析结论，选取高概率的超设计基准工况，针对性加强了事故应对措施。譬如针对同时失去两列 PTR 系统、小破口叠加中压安注失效、SGTR 事故叠加 VDA 卡开等事故，针对性加强了系统安全功能设计。

1.5 安全分级

华龙一号安全分级按照 IAEA“核电厂构筑物、系统和部件的安全分级”(SSG-30)2014 年版为参考标准进行设计。

1.6 灾害防护设计

华龙一号的灾害设计充分考虑了内外部各种灾害及可能的后果，并针对性进行了灾害防护设计。内部灾害主要考虑了管道故障、容器故障、泵和阀门故障、内部飞射物、重物坠落、内部爆炸、火灾、内部水淹等；外部灾害主要考虑了管道及容器故障、泵和阀门故障、地震、飞机撞击、外部爆炸及极端气象条件等。极端气象条件包括极端温度、冰雪干旱、大风、龙卷风和台风、外部洪水、雷暴等。

1.7 电厂自治性

华龙一号的自治原则主要包括：30 min 内主控室可以不干预；1 h 之内现场不用干预；6 h 内可以不使用移动设备；设计基准工况能够在 24 h 内达到安全停堆状态；72 h 内不需要厂外设备支持。

华龙一号的现场储备措施主要包括：三台应急给水箱能够满足热停堆 24 h 的冷却要求；SBO 柴油机能够满足 24 h 满负荷运行要求；全厂断电(LOOP)工况下 7 天可以不需要外部电源供应；不间断蓄电池满足满负荷 2 h 的供电要求，满足严重事故 12 h 供电要求。

1.8 福岛及严重事故应对措施

华龙一号具备应对类似日本福岛核事故的事故应对能力。针对地震，华龙一号将安全停堆地震从 0.2 g 提高到 0.3 g，大幅提升了地震事故的应对能力。针对海啸等外部灾害，在采用最高设防标准的同时，为应对可能发生的全厂断电风险，加强了电源系统，能够通过纵深防御的电源供应系统，提供

全厂断电应急供电,确保安全系统运行。针对堆芯熔毁的严重事故,设计了蒸汽发生器二次侧非能动余热排出系统,能够通过非能动手段将堆芯热量排出,避免堆芯熔毁。设置了非能动的堆芯熔融物滞留系统(IVR),确保反应堆压力容器不熔穿,将放射性物质限制在压力容器内。针对氢气爆炸的经验反馈,设置了非能动氢气复合器和点火器,能够及时消除安全壳内氢气聚集,防止氢气爆炸。这些措施加强了严重事故的应对及缓解能力,实现了极端事故的兜底。

2 国内示范工程推进

中广核防城港3、4号机组目前已经完成开工建设的各项准备工作,具备开工建设条件。

2.1 工程设计

华龙一号示范工程初步设计工作已全部完成,核岛及常规岛厂房、构筑物、系统和设备的设计已全部定型。设备设计有序开展,目前已完成约50%的设备规格书及设备施工图册的设计工作,后续设计工作将按照项目采购进度有序开展。土建设计方面,完成了核岛土建施工设计的总体策划及安排,工程开工所需施工图已全部出版,后续图纸将结合施工进度计划有序出版。

2.2 设备采购

目前已完成示范工程设备采购的总体策划及安排,首批长周期设备已完成招标并签订合同,后续设备采购正在按计划有序开展招投标工作。

2.3 执照申请

项目可行性研究报告及项目核准报告已分别通过电规总院及中咨公司审查,目前正在要求逐级报批。

示范工程PSAR已与核安全局安审中心组织召开多轮审评对话会,基本完成审评工作。

2.4 现场准备

示范工程已完成土建施工承包商的遴选工作,

施工现场已做好正式开工的准备工作。

3 结语

华龙一号的研发是在我国三十多年核电站建设、生产、运营的基础上,通过“引进、消化、吸收”到“再创新”的重要成果,是我国核工业几十年来经验积累和智慧的结晶,是具有自主知识产权的三代核能发电技术。华龙一号的主要特点体现在以下三个方面:

1)安全水平大幅提升,具备应对类似福岛核事故的能力。反映核电站设计安全性的主要表征指标CDF(堆芯损坏频率) $<1.0 \times 10^{-6}/(\text{堆} \cdot \text{年})$ 、LRF(放射性物质大量释放频率) $<1.0 \times 10^{-7}/(\text{堆} \cdot \text{年})$,达到世界先进水平。在抗震能力、全厂断电应对能力、乏燃料水池冷却、氢气浓度监测和控制、水源的多样性和可靠性、水淹防护、加强事故后余热导出功能、加强严重事故缓解能力等方面,华龙一号设计性能优越。

2)基于成熟装备制造体系。华龙一号采用经过验证的技术进行设计,主系统的设计、环路配置与现有运行压水堆核电厂较为相似。关键设备有成熟、完善的装备制造体系做支撑(带动国内装备制造业“走出去”),工程建造及运行经验较为丰富。

3)设计理念更为先进。华龙一号采用了能动加非能动的设计理念,选用了数字化仪控、LBB等先进的工程技术,提升了华龙一号的市场竞争力。

综上所述,华龙一号的技术指标满足当前世界上最新、最高安全标准的要求,实现了安全性和经济性的平衡、先进性和成熟性的统一、能动和非能动的结合。华龙一号已成为我国核电发展规划实施的重要选择,是当前我国调整能源结构、实施能源“四大革命”的重要依托,承载着中国核电“走出去”战的庄严使命,是“新常态”下核电产业“一带一路”战略的实施的重要基础。

