

第三代核电锚定100%国产化,向国际最高水平赶超——

“国和一号”的自主创新之路

本报记者 康朴

国之重器,填补空白

在荣成的国家电投新能源科技馆,一个1:60的模型清晰展示了“国和一号”的构造。核电机组整体上可分为两大部分:一侧是核岛,有高耸直立的核反应堆压力容器和蒸汽发生器,穹顶上方放着一个巨大水箱;另一侧为常规岛,核岛产生的蒸汽传送过来驱动汽轮机发电。

“‘国和一号’是名副其实的国之重器。”国核示范设计管理处处长刘春光说,“从体型构造看,‘国和一号’单台机组总重超1400吨,其中一个直径超1米的大阀门就有29吨重,由钢水浇铸而成。内部结构也十分复杂,仅蒸汽发生器的U型管就超过1万根,如果将这些管道连接起来,总长度在300公里以上。”

据介绍,外部安全壳的直径,更是达40余米。从使用材料看,特制的钢板厚度超5厘米。开启运行后,有的组件内部每平方米承受的压力逾40吨,远超超重型装甲车的重量。

不仅“身形”巨大,效益同样突出。“国和一号”单台机组发电功率为150万千瓦,设计寿命60年,投产后年发电量114亿千瓦时,可满足超1100万居民的用电需求,每年可减少温室气体排放超过900万吨。以平均每亩树林减排1.336吨二氧化碳折算,减排效应相当于造林约674万亩。

中国核电市场一度被称作“万国牌”,有多个国家的核电技术并存。2006年,中国决定实施三代核电自主化战略。作为国家重大科技专项,“国和一号”在立项时就肩负特殊使命——攻克大型先进核电机组批量化建设难关。

研发工作自2008年启动。2020年,国家电投正式发布“国和一号”,标志着该技术终于完成研发。历时12年科研攻关,共有700余家单位、超3万名技术人员参与其中,累计形成知识产权成果1.4万余项,形成新产品、新材料、新工艺、新装置、新软件等2000余项。

“‘国和一号’采用CAP1400压水堆技术,是‘高起点再创新’,它基于引进消化吸收三代非能动压水堆核电技术,基于中国50年的核电厂研发、设计和工程经验,也基于中国核电机组近30年的安全建设和运行经验,具有完全自主知识产权。”国家电投集团核能领域工程技术管理学科专家、国核示范副总监刘新利介绍。

“国和一号”成功打破了多项材料及设备制造技术垄断,主泵、爆破阀、压力容器、蒸汽发生器、堆内构件等关键设备材料全部实现自主设计和国产化制造。

“站在世界核电技术发展前沿,‘国和一号’填补了我国核电产业的多项技术和工艺空白,推动核电行业和技术整体升级换代。”刘新利说。

安全性高,经济性好

建核电站,人们最关注的还是安全。

“随着全球对核电安全的认识进一步提升,先进核电国家针对核电设计、运行等方面进行了充分分析评估,提出一系列改进措施,三代核电技术应运而生。”刘新利说。

从模型结构可以看到,“国和一号”外层被厚厚的混凝土层包裹。“这是屏蔽厂房,厚1.1米,两层钢板内部填充高性能、高强度的混凝土,可抵御台风、海啸来袭或是飞机撞击。”刘新利介绍。

再看由4道屏障构成的内部安全保护:燃料芯块、燃料包壳、一回路压力边界,特别是直径43米、高70多米的钢制安全壳,仿佛一个巨大的胶囊型钢铁屏障,事故后可以将放射性物质牢牢包裹住。

“先进三代核电消除了大规模放射性物质释

先看两组数字。

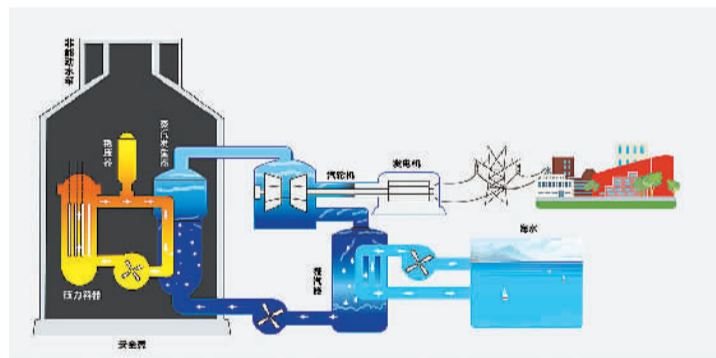
60年,900万吨,150万千瓦;
12年,700余家,超3万名,1.4万余项。

第一组,是“国和一号”的安全、经济与环保说明书——设计使用寿命60年,每年二氧化碳减排量约900万吨,单机组发电功率150万千瓦。

第二组,是背后的付出与成果——12年研发历程,700余家单位、超3万名技术人员参与其中,累计形成知识产权成果1.4万余项。

两组数字合起来,就是“国和一号”的一份亮眼“简历”。“国和一号”是依托国家重大科技专项“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站”开发的三代核电自主化标志性成果,是完全自主设计的中国核电技术品牌,代表当今核电技术的先进水平。

“国和一号”首堆——“国和一号”示范工程位于山东荣成,由国家电投国核示范电站有限责任公司(以下简称“国核示范”)负责建设、管理和运营,目前一期两台机组建设正有序推进,首期工程投产后就可实现热电联供。



▲“国和一号”示范工程现场吊环。
▲“国和一号”技术原理示意图。
▼“国和一号”模型。 本报记者 康朴摄



▲“国和一号”整体外观模拟图。

图片除标注外均由国核示范提供

放的可能性,排除了核电风险对环境与公众的放射性危害。”刘新利表示。

在安全设计思路上,“国和一号”采用了“非能动”理念。简单来说,就是不依赖外部动力或人工干预即可自行启动运行。这一理念体现在诸多细节上。比如遇上停堆,热量无法导出,反应堆就会烧毁。这时,核岛顶部的大水箱就要发挥作用了。

大水箱里装着3000多吨冷却水,是非能动核安全设计理念的关键环节之一。“水会在重力作用下流到反应堆堆芯或安全壳表面,把里面的热量置换出来,自动冷却堆芯与安全壳系统,保证堆芯与安全壳不受损。”刘新利介绍,“断电情况下,‘国和一号’反应堆能在事故发生72小时内无须人工干预自动保证安全。”

“性价比”是日常消费的重点关注点,工程建设也是如此。相较于过去的安全措施,非能动设计理念让核电设备大幅简化,安全性却有了巨大提升。相比传统电厂,“国和一号”整体阀门减少50%、管道减少80%、电缆减少70%,提高了可建造性、可运行性和可维修性。采用“标准化设计、工厂化预制、模块化施工、专业化管理、自主化建设”模式,“国和一号”在经济性上具有明显竞争优势。

全力冲刺,全国产化

超90%,这是“国和一号”示范工程设备的国产化率,后续项目也已基本具备全国产化能力。

如何保证三代核电在高安全性基础上拥有更强的竞争力?如何实现批量化建设?这些都必须通过自主化国产化来解决。

反应堆冷却剂泵,简称“主泵”,承担着为核岛运转提供动力的重任,可以看作核电站正常功率运行时的“心脏”。全新的制造工艺和运行流程,对制造业来说是一项巨大挑战。为确保研制成功,许多关键设备都采取“双线并行”的策略。主泵就是这样,一面推进屏蔽电机主泵研发,另一面启动湿绕组主泵技术方案。

2011年入职后,国核示范设备管理处刘原君就参与2种主泵的国产化研制。主泵样机产品试验期间,他3600个小时在台架旁驻守,帮助解决推力盘划痕打磨问题,按照快速识别、精准纠偏和保守验证模式,确保主泵顺利研发。

十年磨一剑,两条技术路线相继走通,使中国核电产业链在细分领域一跃成为全球领先。

在核电产业链的“朋友圈”里,不仅有大型国有企业,还包括许多民营企业。

核电机组中所用到的1万多根U型管,需要防辐射、防腐蚀,对制造的材料要求很高,过去不得不依赖进口。

2005年,一个叫庄建新的年轻人来到法国寻求合作,吃了闭门羹。回国后,庄建新成立了自己的公司,埋头苦干,U型管研发最终获得成功,产能也不断提升,成了行业“隐形冠军”。

从核电“心脏”主泵,到“大脑”核设计与安全分析软件;从“中枢系统”核仪控,到一次仪表等遍布核岛各处的“血管”“神经”……三代核电自主化技术攻关团队步履不停,填补了一项又一项空白,啃下了一块又一块“硬骨头”。

“国和一号”示范工程两台机组共有8万余台设备,部分核级设备要求严苛,研制难度极大,此前国内并不具备生产能力。研发初期,为尽快实现商业化运行,研发团队在对国内核电装备产业全面梳理的基础上,首先选择攻克其中“最贵”“最难”的部分,剩余小部分标准设备则进行国际采购。

“这一小部分设备属于市场价格合理、竞争充分、不存在少数几家企业垄断的物项,也不会影响‘国和一号’的落地和出口。”国核示范机械采购科科长王亚松说。

随着国际环境的变化,这一小部分设备成了压在核电人心头的巨石。“为彻底补上短板,避免‘因1%卡死100%’,在攻克大多数设备国产化难题后,产业链上下游单位开展联合攻关,目前国产化率已超90%,正向100%国产化目标冲刺。”王亚松说。

今天,从设计到制造,从工程的建设到建造安装,再到核电站后期的运维,中国已形成了一整套核电产业链,具备先进核电设备整机配套能力与供应链体系。通过三代核电自主化,中国正实现对国际最高水平的赶超,助力“双碳”目标实现。

延伸阅读

数说中国核电

■商运核电机组55台

2023年,中国商运核电机组数量达55台,额定装机容量5703万千瓦;全年核发电量4334亿千瓦时,位居全球第二,年度等效减排二氧化碳约3.4亿吨。

■在建核电机组26台

截至2023年底,中国在建核电机组26台,总装机容量3030万千瓦,位居全球第一。2023年中国核电工程建设投资完成额949亿元,创近5年最高水平。

■33台机组综合指数满分

中国商运核电机组继续保持安全稳定运行,2023年中国共有33台机组在世界核电运营者协会的综合指数达到满分,满分比例和综合指数平均值位居世界前列。

■3省核电发电量占比超过20%

中国核电站大多分布在沿海地区,福建、辽宁、海南3省核电发电量占比超过20%,分别为27.3%、23.4%、22.7%。

代表性核电站

■大亚湾核电站

大亚湾核电站位于广东深圳,是中国大陆第一座大型商用核电站,至今已安全运行30年。截至今年7月,大亚湾核电基地累计上网电量近1万亿千瓦时。目前,大亚湾核电基地共有3座核电站6台核电机组,总装机容量达612万千瓦,是世界上最大的压水堆核电基地之一。

■岭澳核电站

岭澳核电站是广东第二座大型商用核电站,位于大亚湾核电站之侧。去年3月16日,岭澳核电站1号机组实现连续安全运行6000天,刷新了国际同类型机组连续安全运行天数的最高纪录。

■秦山核电站

秦山核电站位于浙江嘉兴,是中国自行设计、建设和运营管理的第一座30万千瓦压水堆核电站,采用世界上技术成熟的压水反应堆,1985年开工,历经数十载,已发展成为中国核电机组数量最多、堆型最丰富的核电基地。

■宁德核电站

福建宁德核电站规划建设6台百万千瓦级压水堆核电机组,一次规划,分期建设,一期工程拟采用中广核集团具有自主知识产权的CPR1000技术,建设4台百万千瓦级压水堆核电机组,也是中国第一个海岛核电站。

核电技术代际划分

核电技术起步于上世纪中期,迄今第三代核电站已商运,第四代尚处于开发阶段。总体而言,60年来,核电技术一代比一代安全。

第一代核电技术即早期原型反应堆,主要目的是通过试验示范形式来验证核电在工程实施上的可行性。第一代核电站现已退出历史舞台,不再使用。

上世纪60年代中期以后投入运行的大部分核电站是基于第二代核电技术建设的,压水堆、沸水堆和重水堆等技术路线均实现商业化、标准化,单机组的功率水平在第一代核电技术基础上大幅提高,达到千兆瓦级。目前世界上商业运行的四百多座核电机组绝大部分是在这段时期建成的。

为解决三里岛和切尔诺贝利核电站严重事故的负面影响,国际核能界集中力量对严重事故的预防和后果缓解进行了研究和攻关,美国和欧洲先后出台“先进轻水堆用户要求”文件和“欧洲用户对轻水堆核电站的要求”,国际上通常把满足这两份文件之一的核电机组称为第三代核电机组。

第四代核能利用系统,是指安全性和经济性都更加优越,废物量极少,无需厂外应急,并具有防核扩散能力的核能利用系统,商用化估计要到2030年左右方能实现。

资料来源:《中国核能发展报告2024》蓝皮书、中国核电网、第四代核能系统国际论坛

(本报记者 康朴整理)