

历时 12 年科研攻关，“国和一号”示范工程——

推动核电行业和技术整体升级换代

谷业凯 李云起

2020 年 9 月 28 日，我国三代核电自主化标志性成果——“国和一号”正式发布。这也意味着我国从本世纪初开始实施的三代核电自主化战略取得重大突破。

目前，“国和一号”示范工程按计划稳步推进，首期工程就可实现热电联供，将为清洁低碳、美丽中国与能源转型作出更大贡献。

“国和一号”是我国在引进消化吸收三代非能动压水堆核电技术的基础上，通过大型先进压水堆及高温气冷堆核电站国家科技重大专项开发的、具有自主知识产权的大型先进压水堆核电型号。机组设计寿命 60 年以上，安全水平相比二代核电机组提高了 100 倍；单台机组年发电量大约 120 亿千瓦时，可满足超过 2200 万居民的用电需求，每年可减少温室气体排放超过 900 万吨。

三代核电技术安全性高，经济性好，可建造性强，运维方便，是名副其实的“国之重器”

“国和一号”研发工作自 2008 年正式启动，历时 12 年完成。国家电力投资集团有限公司作为牵头单位，组织全国 600 多家单位、31000 余名技术人员参与，累计形成知识产权成果超 7611 项，建成了具有国际先进水平的三代核电自主创新体系和产业链供应体系，标志着我国核电技术实现了从“二代”到“三代”的跨越，具备先进核电自主化、批量化、规模化建设能力。

国家电力投资集团有限公司核能总工程师郑明光，是大型先进压水堆核电站国家科技重大专项总设计师。他对“重、大”二字的理解非常直观：“‘国和一号’单台机组中，超过 100 吨的设备、模块有 30 件左右，最大的模块体积有 5000 多立方米，重达 1400 多吨”“安全壳是个直径 40 多米，高 70 多米的‘大胶囊’，用 5 厘米厚左右的钢板制成，每平方米可承受 40 吨以上的压力”“蒸汽发生器里面有 1 万多根用于热交换的 U 型管，总长超过 300 公里……”

“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化设计和国产化制造。郑明光对“自主创新”四字深有体会：“站在世界核电技术发展高端，‘国和一号’填补了我国核电产业的多项技术和工艺空白，推动了核电行业和技术整体升级换代，是名副其实的‘国之重器’。”

从 1970 年开展“七二八工程”开始，我国核电已经走过了 50 多年的奋进创新之路。

“第一代核电技术主要是以实验研究堆为主。第二代核电技术主要发展阶段是上世纪 60 年代初到 1979 年以前，该阶段技术建成的核电称为二代，之后将满足三里岛核事故后对策与响应措施的核电站称为二代加核电。”郑明光说，“美国三里岛核事故发生后，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、运行安全等方面进行了充分认识与分析评估，提出了一系列改进、增强安全性的措施，三代核电技术应运而生。”

郑明光介绍，作为三代核电型号的“国和一号”，关键核安全设计理念是“非能动”，例如安全壳冷却系统就采用这一理念，不依赖外在动力源即可运行工作。“利用钢制壳体作为传热表面，事故条件下安全壳内的蒸汽就会在安全壳内表面冷凝，然后通过导热将热量传递到钢制壳体外的水膜或大气，安全壳内外部冷却都是一个自然循环。”

“通过把安全系统的水放在高位，一旦发生事故，水会在重力的作用下流到反应堆堆芯或安全壳表面，自动冷却堆芯，同时对安全壳壳体实施外部喷淋形成冷却水膜，降低安全壳内的压力和温度，保证安全壳这道安全屏障不受损坏。”郑明光说。

“国和一号”是全面、系统、完整落实非能动设计理念的核电型号，实现了系统、设备的大幅简化。郑明光介绍，这个“简化”却不像原理看上去那么简单，需要大量的理论分析和系统性的试验验证。它的安全设备与相应的备品备件大大减少，安全性反而有了大幅度增强。工厂化预制、模块化建造缩短了建设工期，运维的方便性更优化了经济性，能够满足我国经济社会安全高效的发展需求。

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，推动我国核电实现跨越式发展

如何保证三代核电在高安全性基础上拥有更强的竞争力？怎样研制出具有竞争力的核电机型，实现批量化建设？在郑明光看来，这些都必须通过自主化国产化来解决。

带着这些挑战，中国核电人正式踏上了三代核电自主化国产化的创新之路。

首先摆在面前的，就是一个看似难以逾越的障碍——根据外方的合作协议，只有电功率超过135万千瓦，我国才能拥有三代非能动核电的自主知识产权。为此，以郑明光为代表的三代核电自主化技术攻关团队，在原定技术方案基础上对“国和一号”顶层设计方案进行了全局性再创新，包括增加钢制安全壳的直径和厚度以扩大核岛空间，重新设计研制反应堆冷却剂泵、蒸汽发生器、爆破阀和汽轮发电机，大幅度优化主泵流量、主管道流通截面等，实现型号总体安全性、经济性和效率的全面提升。

“135万千瓦，对非能动安全、主要设备来说是个‘大门槛’。”郑明光说，“为了确保拥有自主知识产权，我们果断调整了方案。这不是简单的等比例放大，要真正懂设计、懂技术，具备自主研制、自主试验的能力，不掌握核心技术，这个‘大门槛’就过不去。”

要想提升核电型号功率，从材料研发到零部件生产再到设备安装调试，几乎都要重新论证、分析、评估与研制。

一回路冷却剂管道，简称“主管道”，是连通核电站压力容器、蒸发器等主要设备的大型管道，好比人体的“大动脉”。为了更加安全可靠，“国和一号”主管道设计为没有焊缝的一体化锻件。主管道热加工后，还需要进行弯管，任何一个控制不当都会导致失败，只能靠试验不断摸索、改进。2年多的时间里，多家参研单位协同攻关，试验主管道毛坯从8吨、20吨、36吨，最后升格为70吨，最终，中国锻造的“大动脉”研制成功。

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。为消除全厂断电时冷却剂泄漏概率，决定采用无轴封新型主泵，型号研发伊始就采用“双线并行”的模式，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。十年磨一剑，湿绕组主泵和屏蔽电机主泵相继研发成功，有效支撑了核电先进型号的落地。

从核电“大动脉”到“心脏”，从“大脑”核设计与安全分析软件，到“中枢系统”核电仪控，再到一次仪表等遍布核岛各处的“血管”“神经”……从设计方案到产品研发，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”，在关键核心技术“卡脖子”的地方下功夫，推动我国核电实现跨越式发展。

“国和一号”研制成功，离不开行之有效的重大科技项目组织管理方式

“国和一号”研制成功，离不开行之有效的国家重大科技项目组织管理方式：反应堆压力容器由上海核工院和中国一重共同研发；蒸汽发生器由上海核工院、东方电气（广州）重型机器有限公司和上海电气核电设备有限公司等共同研制；主泵研发“双线并行”，参研单位分工明确；主管道制造难度大，机械行业骨干企业组建联合体，集智攻关；U型管管材、核级锆材、核级焊材、大锻件制造等材料工艺难题，采用产学研协同推进的办法，终于成功解决……

“利用国家科技重大专项，每一种设备、材料的技术开发，都布局2至5家有竞争力与积极性的单位参与研制，我们从设计技术到制造技术与工艺来回多次迭代，引入竞争机制，用市场化的手段来推动相应的技术竞争，激发创新活力。”郑明光介绍，“国和一号”联合国内相关大学、

科研院所、企业等一大批产学研用单位，共同构建了三代核电自主化技术攻关团队，全面布局科研攻关任务和工程项目实施，有效发挥了新型举国体制的优势。

自主化设计、制造不仅可以增强核电站的经济性，还可以提供可靠的、可持续发展的资源保障。目前，国内已形成较为完备的先进核电设备整机配套能力与供应体系，以及标准化、批量化、产业化的生产能力。我国已具备年产 8 至 12 台/套先进核电机组的装备能力。

通过三代核电自主化，我国正在实现对国际最高水平的赶超。郑明光自豪地说：“技术上有保障，安全上有优势，经济上有竞争力，‘国和一号’将有效支撑以新能源为主体的新型电力系统的构建，助力‘碳达峰、碳中和’目标的实现。”