

从秦山核电走来，华龙一号平稳运行，玲龙一号建设顺利——

中国核电“双龙齐飞”

本报记者 赵昊

从1970年开展“728工程”算起，中国核电事业发展经历了半个多世纪。从30万千瓦级的秦山核电站，到百万千瓦级的华龙一号，再到小堆玲龙一号，折射出中国核工业的沧桑巨变。

日前，记者来到福建福清和海南昌江，探访中国核电自力更生、自主创新的发展历程。

秦山核电站——
从无到有、从小到大

从地图上看，位于浙江海盐的秦山像一颗“龙头”，中国第一座自行设计、自行建造的核电站——秦山核电站就坐落在秦山山麓。

探寻中国首座核电站的源头，要追溯到1970年，当时上海的企业有“开三停四”的说法，即开工三天，停业四天，原因无他：缺电。如何解决上海缺电问题？靠增加煤炭供应或引入西南地区的水电，既不经济也不现实。针对上海因缺电导致工厂减产情况，1970年2月8日，上海按照中央领导指示精神，开始研究部署核电站建设工作，“728工程”由此起步。

同年8月30日，距上海千里之外的西南山坳深处传来一阵欢呼，中国第一座核潜艇陆上模式堆在中国核动力研究设计院九〇九基地满功率试验成功！研制核潜艇的关键是动力来源——核动力反应堆，陆上模式堆即在建造核潜艇前在陆地上建造的1:1工程试验反应堆，以验证核动力装置设计的可靠性与安全性。老一辈核动力专家对陆上模式堆有一个比喻——核潜艇就像一只鸭子，真鸭子下水前，要做个一模一样的“旱鸭子”，在陆地上充分扑腾后，再依此定型。陆上模式堆和后来的秦山核电站同为压水堆，为后续核电站的建设提供了借鉴。

改革开放后，中国核电事业的发展步伐加快了。1982年12月，在五届全国人大五次会议上，中国郑重宣布在浙江海盐建设秦山核电站的决定。1985年3月，秦山核电站浇筑了第一罐混凝土。1991年，被誉为“国之光荣”的中国大陆第一座核电站——秦山核电站成功并网发电，中国核电自此实现“零的突破”。

如果说秦山一期核电站是“从无到有”，那么1986年开工建设的秦山二期核电站便是“从小到大”。作为中国自主设计、自主建造、自主运营、自主管理的第一座国产化商用核电站，秦山二期1号机组装机容量为65万千瓦，约为秦山一期的2倍，于2002年成功并网发电。

时至今日，秦山一期虽已过“而立之年”，却“老当益

壮”。“如今秦山核电站和刚建成时相比，能力因子和年发电量都有了较大提升。”中核集团秦山核电安全分析处PSA应用科科长曹勇对本报记者介绍，“提升能力因子主要依靠提升燃料的富集度、减少更换燃料的周期和时长来完成。”啥是燃料的富集度？曹勇打了个比方，就像炉子里烧的蜂窝煤，提高燃料的富集度，相当于增加“蜂窝煤”里煤炭的含量，延长燃烧的时间。

“秦山核电原本的设计寿命是30年。”曹勇说，“通过更换汽轮机、电气贯穿件等部件，可以延长核电站的寿命。”2021年，秦山核电站正式获批延长服役至2041年，能够再安全发电20年。

华龙一号——
中国的一张名片

就在秦山二期核电站建设如火如荼时，全球核电技术也在飞速发展，“第三代核电技术”的概念被提出。三代和二代相比，一是发电功率达百万千瓦级，二是安全性有了显著提高。

在福建福清，记者走进中核集团中国核工业科技馆，迎面而来的是一座浮雕墙，展现中国核工业从引进到自主设计再到技术出口的蜕变。在展厅短短1小时的参观，好像走过了中国第三代核电技术的漫长发展之路。

将时钟拨回到1996年。核动力院10多位年轻的技术人员回到九〇九基地，开展了一场“头脑风暴”，主题为“我们自己的百万千瓦级反应堆应该采用什么样的堆芯方案”。

“堆芯就像一个汽车的发动机。”华龙一号反应堆及一回路过设计刘昌文对本报记者说，“就压水堆来说，堆芯布置决定了一个机组的型号。”经过讨论，技术人员决定采用“177堆芯”方案，与国际上流行的“157堆芯”相比，多了20组燃料组件，经济性和安全性都有了提升。“还有一个重要原因是我们当时调研了国内相关厂商的制造能力，必须确保‘177堆芯’完全实现自主制造。”刘昌文说。

关键技术是要不来、买不来、讨不来的。不只是堆芯，其他重要设备也要实现国产化。以蒸汽发生器

为例，在华龙一号早期的设计过程中，这一关键设备本打算向国外公司采购。然而对方在谈判中坚持要求：如果将来使用这种蒸汽发生器的核电技术用于出口，必须经过其同意。“相当于给车买个轮胎，结果轮胎商不允许这辆车出口。”刘昌文说，在场的中国专家听了都十分气愤，最终决定自主研发。仅仅27个月后，用于华龙一号的第三代核电ZH-65型蒸汽发生器成功问世。

站在观景台上眺望华龙一号首堆示范工程，中国核动力研究设计院福清项目部总工程师、华龙一号综合系统总工程师魏峰对记者说：“华龙一号首堆工程国产化率达到88%以上，反应堆压力容器、蒸汽发生器等关键核心设备实现100%国产化。非国产的部分不是没有能力实现国产化，而是本着节约的原则，没必要国产化，这部分不会制约我们的发展。”

如何确保“国之重器”华龙一号的运行万无一失？带着这个疑问，记者走进华龙一号首堆示范工程的主控室内，墙上大屏幕闪烁着各种数据，操纵员们正在有条不紊地操作着各类仪器。这里是核电站的“大脑”，要想让核电站安全平稳运行，操纵员们每一个操作都必须非常精准。

“操纵员又被称为‘黄金人’，是因为培养一名操纵员的成本大约是和他们体重相当的黄金价格。”华龙一号模拟机教员曹宇华对记者介绍，每一名操纵员都经历了千锤百炼，平均每人培训时间在2-3年，要学习40多门课程，小到仪表故障，大到自然灾害，能够熟练应对各种可能发生的危险，确保核电站运行安全。

今年3月25日，中核集团“华龙一号”示范工程全面建成投运，两台机组年发电能力近200亿度，每年减少标准煤消耗约624万吨，减少二氧化碳排放1632万吨，相当于植树造林1.4亿棵。“华龙一号”已出口巴基斯坦，成为中国的一张名片，能够满足当地200万人口的年度生产和生活用电需求。”中国核动力研究设计院副院长唐传宝说。

玲龙一号——
“小块头”有“大作为”

研制出华龙一号后，中国核工业下一步该怎么走？

一路南下，记者来到了位于海南岛西岸的海南昌江，这里或许能给出答案——全球首个陆上商用模块化小型反应堆玲龙一号正在这里建设。

相较华龙一号，玲龙一号更加“小巧玲珑”，占地面积只有华龙一号的1/3。“除占地面积小之外，玲龙一号的另一个特点是用途广。”玲龙一号总设计师宋丹戎对记者介绍，除了发电，玲龙一号还能满足多种需求，例如城市供热、海水淡化、石油开采、工业蒸汽等，适用于园区、海岛、矿区、高耗能企业自备能源等多种场景。

比起大堆，小堆的布局距离居民区、工业园区更近，这对小堆的安全性提出了更高要求。宋丹戎说，为确保玲龙一号的安全性，在设计上采用一体化布置，“大型堆不同设备之间需要用管道连接，一体化布置能够消除因管道破裂带来的风险”。

另一方面，玲龙一号的冷却系统全部为非能动。宋丹戎说，非动动的冷却系统能够在不依靠电力的情况下，使核反应堆温度保持在正常范围。即使处在反应堆失去供能的极端情况下，也能利用自然规律如重力来确保反应堆的安全。

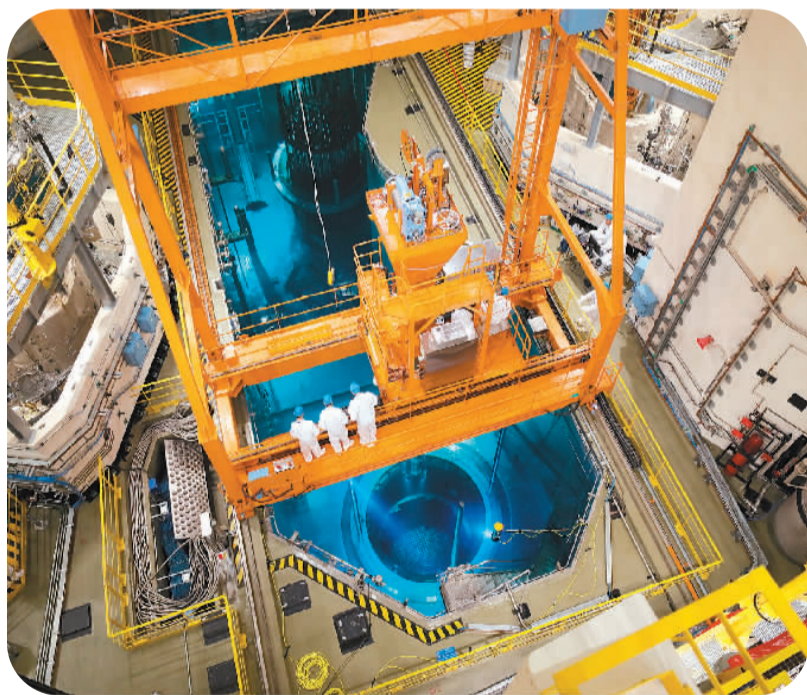
除整体设计外，玲龙一号在实际建设中也坚持高标准。在建设现场，记者登上距地面30多米的玲龙一号最高处，能够看到半个手掌宽的安全壳，外表似水泥，实际是国产特种钢，能够抵御较强的外部冲击。

唐传宝介绍，2016年，玲龙一号成为全球首个通过国际原子能机构安全审查的小型堆，这意味着它未来可向海外出口，为全球能源贡献中国力量。

站在玲龙一号最高处俯瞰，建设现场一片热火朝天。塔吊、挖掘机等设备相互配合，建筑工人在核岛内外来回穿梭。正值海南30多℃的高温，穿着厚重劳保服的工人们仍然干劲十足。

“目前，玲龙一号小堆工程常规岛挡土墙完成浇筑，顺利实现小堆工程一体化三级里程碑节点目标。”海南核电小堆工程管理科科长杨军华对记者说，“各项施工已经全面铺开，工程建设进展顺利，预计如期完工。”

题图：华龙一号福建福清核电机组外景 中核集团供图



华龙一号福清核电6号机组装料水池。

新华社发



位于海南昌江的玲龙一号建设工地。

中核集团供图



秦山核电站外景。

中核集团供图

中国核电的发展史印证了一句话：“核心技术靠化缘是要不来的，必须靠自力更生。”

这里的“要不来”至少有两方面含义：首先，它指的是技术拥有国很少愿意向别国转移技术；其次，它意味着技术不可能凭空获得，花钱能买来图纸，却买不来将图纸变为现实的能力，后者只有在自力更生的研发实践中才能习得。

在中国核电的故事里，这样的例子不胜枚举。核电技术从外部引进常常伴随着艰难的谈判：外方很乐意提供全包圆式的“交钥匙工程”，可在技术转让上却咬死不松口，或是要求签署条件极为苛刻的协议。人家是把核心技术当“定海神针”“不二法器”，谁会轻易提供给你呢？

正因为从一开始就自己研发、自己干，中国人在核电技术上才有了扎实的

核心技术是自己干出来的

韩维正

“基本功”，才拥有了日后吸收更先进技术的能力，进而才实现了今天中国核电的腾飞。探寻中国核电的发展脉络，我们不难发现华龙一号的技术源头，始于中国上世纪60年代对核潜艇反应堆的研发。而在没有任何外援的情况下，中国人研发核潜艇就是从自学美苏两本教科书开始的。所以，当1970年中国用自己造的核动力装置发出第一度核电时，核电技术的大门其实已经开始向中国人缓缓打开了。

掌握核心技术，为什么“自己干”如此

重要？因为技术尤其是工业技术，对于实践经验有着极高的要求。就像体育运动技能必须通过反复练习才能获得，工业技术能力也必须通过不断的技术实践才能被掌握。在经济学理论中，这种只有在实践经验中形成的知识被称为“缄默知识”。不同于技术图纸、操作手册、专利说明书等“显性知识”，“缄默知识”永远不可能从市场上买到，也无法在组织间轻易转移。在技术研发领域，正所谓“纸上得来终觉浅，绝知此事要躬行”。

由此也就解释了一个现象：从美、法、德等国家引进核电站的发展中国家很多，为什么只有中国成功实现了“消化吸收”，甚至在一些方面还能青出于蓝？不是因为“核电老师”们偏心，给中国多教了几手，而是因为中国人自己干过。“引进”并不会天然带来“吸收”，就像有的国家只是引进了产品，不久之后就会陷入“引进、落后、再引进、再落后”的怪圈；有的国家真正引进了技术，实现“引进、消化、吸收、再创新”。决定二者区别的，在于本国的积

累和内功。国际创新学界用“吸收能力”这个概念来刻画这种区别：一个组织自主研发的水平，同时也决定了它吸收和利用外部知识的能力。在核电发展上，中国人有“知”有“行”，知行合一，最终决定了中国拥有超强的“吸收能力”。

中国核电的故事告诉我们，核心技术只能自己干出来。在全球日趋激烈的综合国力竞争中，我们应当坚定地走自主创新之路，在自力更生的基础上博采众长，把发展的主动权牢牢掌握在自己手中。

品牌论