

“华龙一号”： 打响中国自主三代核电品牌

◎本报记者 陈瑜

最先做报告的人来自国际原子能机构，提到中国，讲的是秦山二期技术。

随后，一个美国人上台，说正在中国山东海阳建设首堆。

之后，一个俄罗斯人上台，说已经在中国江苏田湾建成核电站。

再后来，一个法国人上台，说正在中国广东建设反应堆。

……

2012年，现任中核集团中国核动力研究设计院产业部副主任汤华鹏代表我国参加国际原子能机构在韩国举行的培训会，实际也是技术推介会。

美俄法都在中国建反应堆，作为核电引进大国，中国被国际原子能机构拿到台面上讲的还是20多年前的机型。会场虽有空调，坐在第一排的汤华鹏仍感觉汗湿衣裳，如芒在背，实在觉得没面子，插了一句：中国正在搞ACP1000（“华龙一号”前身）。

当时ACP1000的科研还没完成，当然也不为国际同行所知晓。现场反应很冷淡。

如今这一状况一去不复返了。2021年1月30日，我国自主三代核电技术“华龙一号”投入商业运行，当地时间5月20日01时15分，“华龙一号”海外首堆工程——巴基斯坦卡拉奇核电2号(K-2)机组正式进入商业运行，“华龙一号”“走出去”第一站顺利建成，中国核电实现从“跟跑”到“并跑”。

完成自主核电第一次冲锋

所谓核电，是利用原子核内部蕴藏的能量产生电能。一颗原子核，直径只有一根头发丝的一亿分之一，却蕴藏着惊人能量。

核电是战略高科技产业，是核大国必争的核能技术高地。发展核电是和平时保持和拥有强大核实力的重要途径。第二次世界大战结束后，世界各核国家的科学家都把更多注意力转向原子能和核能利用。

1951年8月，美国的原子能委员会在一座钠冷快中子增殖实验堆上，进行了世界上第一次核能发电实验，并获得成功，自此开启了人类利用原子核发电的时代。

20世纪50年代初，我国核工业时代正式起步。1964年10月16日，第一颗原子弹在大漠深处试爆成功，中国从此跨进有核武器国家行列。

1970年11月，周恩来总理对二机部（中核集团前身）负责人强调说：二机部不能只搞核爆炸，也要搞核电站。

1970年春节前，上海市领导到中央汇报，道出了当时严峻的形势：上海的许多工厂由于缺电轮流停产。

1970年10月初，周恩来听取上海市工作汇报时指出：“从长远来看，要解决上海和华东地区用电问题，要靠核电。”2月8日，上海市组织了周恩来关于建设核电的指示精神并研究了落实措施，我国第一座核电站工程由此得名“728”工程。

但之后因缺少统一战略方针和政策指导，工程几经浮沉甚至面临下马。“728”工程忽上忽下的消息令科研人员揪心。但研究不能停，蒸汽发生器设计负责人刘家钰给自己定下一条原则：“只要没看见宣布工程下马的中央正式文件，就没有权力放下手中的计算尺。”

终于在1986年，秦山一期30万千瓦级核电机组正式动工，来自西北、西南等核基地的核工业大军向秦山集结。

1991年12月15日，秦山一期成功并网发电，在中控室的欢呼沸腾中，中国大陆核电实现了从无到有、从零到一的突破。

夹缝中被重生

秦山一期30万千瓦级核电工程解决了中国大陆无核电的问题，但采用法国核电技术的



中核集团1月30日宣布，全球第一台“华龙一号”核电机组福建福清核电5号机组已完成满功率连续运行考核，投入商业运行。
新华社记者 林善传摄

大亚湾核电站单机容量是它的3倍多，达98.4万千瓦，更经济。

1996年，原国家计委提出国家核电发展方向不再是60万千瓦级，而是百万千瓦级。

2004年3月，岭澳二期被列为国家核电自主化依托项目。在秦山二期基础上，岭澳二期开发了百万千瓦级压水堆核电技术。

遗憾的是，二者均是法国进口机型M310的改进型，在堆芯设计，特别是在燃料元件设计制造技术上，不具有完全自主知识产权，不能实现出口。

参与中国近30年间所有核电站建设的中核集团“华龙一号”总设计师、首席专家、中国核电工程有限公司总工程师邢继解释，就像出国需要签证一样，通过“以市场换技术”的引进方式，只是从国外买技术和设备，不可能掌握核电的核心技术，也不可能实现出口。

主持岭澳二期工程设计的邢继，有了更明确的目标——建造一座完全由中国自主设计、建造并管理运营的百万千瓦级核电站。

有这想法的，不止邢继一人。

堆芯是核电站的心脏，是核燃料发生裂变、释放能量的核心部件。堆芯技术如果受制于人，自主核电就无从谈起。

20世纪90年代起，中国核动力研究设计院开始了堆芯自主研发设计的探索。

堆芯研发涉及336个系统，25个学科，计算量超乎想象；最难的是要研制出多种堆芯型号并进行比较。

“我们做了157堆芯的，也做了177堆芯的，193堆芯的等等。通过多个堆芯的比较论证，确定了177堆芯。”中国核动力研究设计院科技委主任吴琳说。

从157到177，看似简单，实则很复杂。在充分考虑热量传递、燃料富集度等组件之间相互制约的因素后，还要提升堆芯性能，并不是一件容易的事情。

与国际传统的157堆芯相比，数字只相差20，但拥有177堆芯的CNP1000（“华龙一号”前身），发电功率提升了5%至10%，安全性也增强了。

与此同时，既着眼于增加发电能力的眼前需要，又考虑到大国外交的合作需要，我国在“九五”期间（1996年—2000年）相继购买了俄罗斯的压力堆、加拿大的重水堆等。

新世纪之初，随着中国经济的高速发展，沿海用电量激增。

2007年7月24日，为了引进第三代技术而成立的国家核电技术公司与西屋联合体在北京人民大会堂签署了技术引进协议，全球首台AP1000机组落户三门。与此同时，中广核也引入了法国M310核电技术。

相较之下，CNP1000显得有些“受冷落”。

2009年峰回路转，由于国内仍旧依赖“二代改”发电，柳暗花明时，CNP1000被更名为

CP1000，“二代改”自主研发重新开启，邢继被任命为项目总师，并以福清5号、6号为依托项目。

2011年2月28日—3月1日，是CP1000项目落地前的最后一次例行审查会。会上，CP1000再次获得专家们肯定，终于可以开工建设了。

因福岛核事故按下“暂停键”

2011年3月8日，天气晴朗，吴琳从成都飞到福清现场，参与开工准备工作。

10多吨挖掘机已经就位，轰隆隆地在现场挖地基。望着眼前的这一切，吴琳激动又感慨——从1996年到2011年，17年，中国核电技术从“跟跑”到“并跑”，177堆芯的梦想终于要实现了。

然而，挖到第3天，日本福岛核事故发生，一切戛然而止。

“当时采取爆破加机械作业方式，3天挖出了多大的一个坑啊！事故发生后，所有作业都停止了。3月过后很快就是台风季，这个坑堆得成养鱼池，我们只能把这个坑填了回去。”回忆当时的情景，吴琳记忆犹新。

此次核事故虽然发生在日本，但是核安全没有国界，影响波及全世界。福岛核事故发生5天后，国家紧急叫停了核电项目的审批，所有已开工的项目停工进行安全检查，已批准但尚未正式开工的不再开工。很不幸，CP1000项目被打上了“不再开工”的标签。

“华龙一号”副总设计师、核反应堆及回路系统总设计师刘昌文形容：好像婚礼上迎亲的队伍已经出去了，突然这婚不结了。

2010年3月20日，漳州大雾浓得连路都看不见。当天开会的吴琳感慨，这就像核电人当时的心情——往哪儿走，看不见前路。

在一次内部讨论会上，谈到激动处，许多技术人员都流下了眼泪——搞中国自主的核电技术为何就这么难？

打破国际首堆必拖“魔咒”

“暂停键”并不意味着停止，而是对核电技术提出了更高的标准和要求。

2009年，邢继进入CP1000研发团队，并担任型号总设计师。随后，研发团队提出了“能动+非能动”、单堆布置、双层安全壳的设计。

然而，对于采用双层安全壳这一重大改进，大家产生了严重的分歧。

采用双壳有没有必要？如果采用双壳，科研团队能否在剩下不到1年的时间内完成设计和论证，满足2011年年底开工的要求？在专家讨论会上，双方争执不下。

面对专家们尖锐而直接的质疑与追问，邢继并没有急着回答，而是翻开笔记本，平静地念出了这样一段话：“我们能够深刻理解到这

件事情对我们的影响有多大，也非常珍惜有这样的机会去创造一个属于自己的核电站，同时更知道它的重要性……我们要坚持采用双层安全壳，我认为这个方案能够点燃设计人员的创新热情和激情。”

喧闹的会议室突然静了下来，随后又响起了一阵热烈的掌声。

这段话，邢继思虑良久，“我们的技术人员当然知道挑战有多大，我们有这个信心能实现目标，而我们同样希望通过自主创新来推动中国核能技术的发展。”

2013年4月，中核集团研发出完全符合国际最高安全标准的ACP1000自主三代压水堆先进机型，并向国家核安全局呈交了初步安全分析报告。

同时，中广核推出了ACPR1000+技术路线。最后，在国家能源局主导下，两者“融合”形成具有完整自主知识产权的第三代核电品牌——“华龙一号”，意为“中华复兴、巨龙腾飞”。

随着引进的AP1000建设持续拖期，支持“华龙一号”进行示范工程建设的呼声也越来越大。

2014年春节前夕，核电主管部门最后拍板：“华龙一号”如要“落地”，其设计的安全标准不能低于AP1000。

2014年，继通过国内权威评审后，国际原子能机构针对“华龙一号”前身——ACP1000的通用反应堆设计审查(GRSR)的结论也于年底出炉。

专家认为，ACP1000在设计安全方面是成熟可靠的，满足国际原子能机构关于先进核电技术最新设计安全要求；其在成熟技术和详细的试验验证基础上进行的创新设计是成熟可靠的。

2014年11月3日，国家能源局复函同意福清核电5、6号机组工程调整为“华龙一号”技术方案。

历时近20年，从以177堆芯为主要特征的CNP1000，到“能动+非能动”为主要特征的CP1000，再到ACP1000，“华龙一号”，在硬碰硬的技术较量中，我国具有自主知识产权的百万千瓦级核电站终于获得了认可。

2015年5月7日，“华龙一号”首堆在福清开工，现场欢腾，掌声震天，吴琳掏出手机，拍下珍贵的开工照片，并通过微信传给千里之外的中国核动力研究设计院原副院长张森如，胸中仿佛有千言万语，最后却只汇成一句话：张总，“华龙一号”终于开工了！

“华龙一号”是个复杂的系统工程，是从无到有的创新过程。但自从开工以来，顶住“高压”，打破国际首堆必拖“魔咒”。

在中核集团董事长余剑锋看来，“华龙一号”是勇闯“无人区”，勇当探路者的代表，一锤接着另一锤持续用力，一步一个脚印接续奋斗，不断攀登世界核科技高峰，在别人没有走过的路上收获最美风景。

邢继： 在别人没走过的路上收获最美风景

亲历者说

◎本报记者 陈瑜

“华龙一号”的研发集结了国内17家高校、科研院所的力量，带动上下游产业链5000多家企业，共同实现了411台核心装备的国产化，首堆工程国产化率达到88%，实现了由“中国制造”向“中国创造”的飞跃。

2021年1月30日，在北京举行的“华龙一号”商业运行仪式上，中核集团“华龙一号”总设计师、首席专家、中国核电工程有限公司总工程师邢继没有像往常一样谈“华龙一号”的技术创新，而是感性地分享了几个小故事。

2018年8月29日凌晨，当所有人都已进入梦乡之时，参加非能动安全壳余热排除实验的技术人员，拖着疲惫的身躯走出了主控室、离开试验台。尽管已是深夜，但他们脸上都洋溢着快乐的笑容。

伴随着最后一次试验的结束，非能动系统圆满完成11个正式工况、累计18次试验。

非能动安全壳余热排除，是为保证在事故后作为第三道安全屏障的可靠性。此前，我国缺乏核电站非能动研究技术。基础薄弱，没有现成的东西可供借鉴，研究难度非常大。

这群研究人员从理论研究开始，研究出初步方案，再进行原理性实验验证非能动循环理论的可能性；为了让系统具有足够的换热能力，研究人员对10多种不同换热器进行了研究，选择出最适合的，设计出来再进行1:1试验，确认换热器性能满足要求。

这还不够。

他们设计并建造了世界上最大规模综合试验台，模拟事故后的反应堆厂房，又进行了全面的实验验证，以确保设计可靠性，大幅提升了安全余量。

邢继说，这样的故事可以讲几天几夜，比如，三代核电站电缆鉴定寿命延长到60年必须经历的极端试验是这样进行的：15天模拟高温高压环境试验，15天强碱性溶液浸泡试验，最后是耐压性能试验。

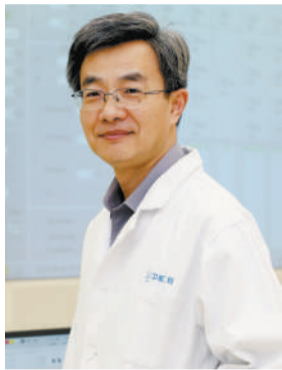
邢继说，“华龙一号”的诞生并非偶然，而是必然。以30余年来中国在核能科研、设计、制造、建设和运行上的经验积累为基座，研制出中国三代核电品牌，只是时间早晚问题。

“华龙一号”团队里，35岁以下年轻人占了一多半。邢继常常感慨，这群年轻人用“非常6+1”和“白加黑”的工作方式，诠释了什么是奉献精神：核工业是一个沉甸甸的行业，如果没有奉献精神，很难在选择如此多元、诱惑如此多的今天，在这个行业扎根。

参与中国近30年间所有核电站建设的邢继说，中国核工业人的初心一直没变，坚持“自主”路线，把中国核工业做大做强。

大事记

- 2014年11月3日
国家能源局给予批复：“华龙一号”落地福清5号、6号机组
- 2015年5月7日
“华龙一号”首堆示范工程即福清5号机组正式开工建设
- 2019年4月27日
冷试开始，比计划提前50天，标志着工程由安装阶段全面转入调试阶段
- 2020年9月4日
开始装料，标志着5号机组进入主系统带核调试阶段，向建成投产迈出重要一步
- 2020年11月27日
5号机组首次并网成功，为后续机组投入商业运行奠定坚实基础
- 2021年1月30日
5号机组投入商业运行，标志着我国成为继美国、法国、俄罗斯等国家之后，真正掌握自主三代核电技术的国家
- 2021年当地时间5月20日
“华龙一号”海外首堆工程——巴基斯坦卡拉奇核电2号(K-2)机组正式进入商业运行，“华龙一号”“走出去”第一站顺利建成



受访者供图