

## 实践中形成的中国核电自主设计能力

余剑锋, 陈劲

(中国核工业集团公司核电部, 北京, 100822)

从中国核电20余年的发展实践中我们认识到, 只有通过自主设计, 才能够有效地实施核电厂的建造、安装、调试工作, 并处理建设过程中的技术问题; 只有通过自主设计, 才能掌握核电工程管理的自主权, 真正对核电的工程质量、建设进度和造价实施有效控制; 只有通过自主设计, 才能有效提高核电厂的运行管理能力, 有效地解决核电厂运行、维护和改进中的技术问题。因此, 核电的自主设计环节是中国核电自主化的关键所在, 是核电自主工程建设、自主设备制造、自主运行管理和自主维护与改进、创新的基础。提高自主设计能力是降低核电造价、提高核电运行维护和技术服务水平的必由之路; 最终有助于核电安全性、经济性的改善, 提高核电的竞争力, 为中国核电的可持续发展创造条件。

中国核工业集团公司致力于中国核能的和平利用和开发事业, 是中国核电发展过程中的核电技术开发主体, 同时也是核电投资者、营运者以及设计、技术服务和部分设备供应商等多种角色。由于拥有国内主要核电科研、设计单位, 中核集团承担了自主建设和对外出口的核电厂的技术攻关和工程设计工作, 承担了引进核电厂的部分设计和技术服务工作, 因而十分注重核电设计自主化工作, 视核电自主设计能力的提高为关键所在。

我们欣喜地看到经过多年核电技术科研开发、工程设计和运行维护技术服务等实践活动, 中国已经形成了专业配置完整、知识和年龄结构合理的研究设计队伍; 拥有了成套的设计软硬件环境和设计研究验证设施, 建立了自己的设计管理和接口控制程序和质量管理体系。

### 1 中国核电实践概述

#### 1.1 核电工程建设实践

中国大陆的核电从上个世纪80年代初开始起步, 从无到有, 目前已经初步形成了一定规模的核电工业基础, 取得了很大成绩。

1981年11月, 经多年精心筹划和认真准备, 国务院正式批准自主建设秦山核电站(秦山一期)。几乎与此同时, 国务院于1982年12月批准采用进口法国成套设备建设大亚湾核电站。随着秦山核电站和大亚湾核电站的陆续建成投产, 中国在“九五”期间又开工建设了4个核电项目(共8台机组, 装机容量为660万kW), 中国核电进入了小批量发展阶段。到2005年在建机组全部投产后, 我国核电将有11台机组、870万kW装机容量; 届时, 核电装机容量将占全国发电装机总容量的1.6%左右。另外, 以30万kW压水堆核电厂的秦山一期为基础, 中国于2000年9月成功地完成了巴基斯坦恰西玛核电站的出口合同, 近期正准备与巴方签订第二个30万kW压水堆机组的建设合同。

#### 1.2 核电技术科研开发实践

秦山一期30万kW核电站是400多项科技攻关、试验验证成果的结晶; “八五”期间, 国家计委批准实施“60万kW核电厂关键技术和成套设备研制”科研攻关项目, 包括核电厂系统设计、核岛设备研制、常规岛设备研制和核安全、环保技术四大课题70多项专题, 所取得的成果确保了秦山二期60万kW核电站自主设计某晒A?

“八五”期间, 在政府部门的支持下, 研究设计单位密切关注世界上先进核电厂的技术发展动态。在跟踪美国西屋公司的AP600的基础上, 通过对蒸汽发生器二次侧非能动应急余热排出方式、铁水反射层和堆顶进入的堆芯通量测量系统等研究, 提出了中国非能动型先进压水堆AC-600的概念设计, 被国际原子

综 述  
核 电 设 计  
工 程 管 理  
工 程 建 造  
运 行 维 护  
核 安 全  
核 电 前 期  
核 电 论 坛  
核 电 经 济 化  
核 电 国 产 证  
质 量 保 证  
核 电 信 息

表1 中国核电工程建设实践表

核电厂名	堆型、容量	建设和投运时间
秦山（一期）	300 MW自主开发压水堆	1985年3月开工，1991年12月15日并网发电
大亚湾	2×900 MW法马通压水堆	1986年开工，1、2号机组分别在1994年1月和1994年6月投运
秦山（二期）	2×600 MW自主开发压水堆	1996年6月开工建设，1号机组2002年4月15日投运2号机组正在建设中
秦山（三期）	2×728 MW加拿大CANDU-6重水堆	1998年6月开工建设，1、2号机组分别在2002年12月和2003年7月投运
岭澳	2×984 MW法马通压水堆	1997年5月15日开工，1号机组2002年5月投运，2号机组2003年3月投运
田湾（一期）	2×1000 MW俄罗斯VVER-1000压水堆	1999年10月20日开工，1、2机组均正在建设，将分别在2004年和2005年投运

"九五"期间开展了"先进压水堆核电厂关键技术研究"，包括工程设计技术研究、先进反应堆设计技术研究、非能动安全系统研究、数字化仪控系统研究和核电工程信息管理技术研究等五个大课题。在核电厂工程设计技术研究方面，针对核电厂工程设计上的许多技术难点，初步形成了较为完善的核电工程设计分析的骨干程序系统；在先进反应堆设计技术研究方面，解决了堆芯优化装料（低泄漏）自动搜索程序研制、热工安全裕量分析等关键技术，初步形成了一套先进反应堆设计方法和实验手段；在数字化仪表与控制系统研究方面，大规模、成系统地针对这一领域组织技术攻关，研制成功了原理样机，为自主设计核电厂数字化仪表与控制系统进行了探索，积累了经验；在非能动安全系统研究方面，初步形成了一套先进压水堆非能动安全系统的设计手段和研究体系，为开展百万千瓦级新一代压水堆非能动安全系统技术研究和国际合作打下了基础。

2001年针对国内提出的百万千瓦级核电--CNP1000的概念设计及其反应堆初步设计，开展了堆芯水力模拟和流致振动等两项试验验证工作，研究结果表明，其反应堆设计完全可以工程应用。

长期开展的核电技术科研开发和陆续建成科研、设计试验验证装置，为核电自主设计的形成提供了技术储备和支持条件。

### 1.3 核电工程设计实践

中国的核电设计院在秦山一期、秦山二期的自主设计中，以及大亚湾、岭澳、秦山三期和田湾核电站的部分设计和技术服务中，积累了经验，增强了设计能力。

秦山一期的总体设计、堆芯设计、系统设计、厂房和土建设计等全部设计和技术服务工作均自主完成，对于该原型堆核电厂建设和运行中出现的技术问题，基本上都是国内专家予以分析解决的。

秦山二期是参考引进的90万kW大亚湾核电站、由中国自主设计的2×60万kW商用核电厂。国内设计单位在自主承担设计责任的同时，积极开展国际合作，通过对外技术咨询和引进部分软件、设计文件，解决了设计中遇到的一些技术问题，全面完成了工程设计任务。

岭澳核电站是主要技术进口、部分国内设计的百万千瓦级核电厂，中国设计院承担了部分总体设计、部分BOP项目和核岛土建设计。

国内设计院还参与了秦山三期和田湾核电站的设计和技术服务工作；并通过参与，最终承担了大亚湾核电站的换料设计工作。

经过20多年的努力，中国核电通过自主开发、学习和引进国外先进技术，不断地提高水平，积累经验，走过了从自主开发原型堆核电厂到自主设计建造商用核电厂的道路，在自主设计、自主建造、工程管理、自主运营、自主制造、核燃料配套以及核安全监督管理等方面形成了进一步发展的能力和基础。

## 2 核电厂的建设经验和运行业绩

### 2.1 秦山核电站

秦山核电站是一个30万kW压水堆、单机组、原型堆核电厂，是中国大陆自行设计、建造和运行管理

的第一座核电站，是中国自主建设核电站零的突破。

秦山核电站的总体设计单位是上海核工程研究设计院。参加设计的单位还有华东电力设计院、上海市政工程设计院、北京核工程研究设计院、核工业第四设计院和浙江省钱塘江工程管理局等五个单位。安全方面的设计参考了当时的国际通用标准，符合国家颁布的有关设计安全法规及“放射防护规定”标准。不但安全设施具有多重性、多样性的特点，而且充分考虑了可能发生的自然灾害如地震、潮汐、洪水、台风等的影响，保证与安全有关的建筑物、系统和设备不会遭受破坏而丧失设计功能。核电厂设计中还设置了放射性三废处理和净化系统、剂量监测系统、屏蔽防护设施，以确保机组对外排放有效控制在国家规定的限值之下，保障工作人员和附近居民的人身安全。

由业主和设计院组成联合调试队自主实施的调试工作进展顺利。1990年11月开始核岛主系统冷态水压试验，到1992年8月完成100%额定功率阶段的试验，历时两年，共完成调试项目260余项。其中大型调试项目如核岛主系统冷态水压试验、汽轮机非核蒸汽冲转、安全壳强度密封试验、反应堆装料、物理启动及首次并网发电均一次成功。

自1991年12月15日机组首次并网成功，秦山核电站已安全运行近十三年，没有发生任何核安全事故，没有发生任何影响公众及环境的放射性泄漏事件。在役检查和安全壳强度、密封试验结果表明，核电厂三道屏障完整，设备安全可靠。秦山核电站运行以来，未对周围环境产生辐射影响，仍保持在天然本底水平；废物排放控制接近国际同类电站的先进水平。十余年运行与同等发电量的燃煤发电相比，向环境减排硫氧化物十多万吨、二氧化碳约二千万吨。

在完成了第七个燃料循环后，目前正在按计划进行换料大修；1995年、1996年、2001年能力因子分别达86.8%、81.9%、93.9%，均高于同期世界中值。2002年在第六个燃料循环内连续安全运行331天，2003年在第七燃料循环运行中，更是创下安全运行443天的其历史最好成绩。截止到2003年10月21日，累计发电量达到206.2亿kWh，取得了良好的经济效益和社会效益。

从秦山核电站的科研开发到投产运行，开展了大量的科研试验工作，共完成科研开发和技术攻关400余项，拥有了一些自主知识产权，如反应堆堆芯设计、燃料组件设计以及大量软件开发。先后有150多项科技创新和技术开发项目获得国家级和省部级科技进步奖，核电厂设计与建造荣获国家科技进步特等奖。

通过秦山核电站的自主实践，使核电技术人员做到了既知其然又知其所以然。这对保证核电厂建设质量、提高电站运行水平具有非常重要的意义。掌握技术，有利于实现设备国产化，有利于降低造价。秦山核电站比投资仅为每千瓦5900元人民币，比同期进口核电厂单位造价低很多。4万多台套的设备，大多数由国内600多家厂商自主制造。由于掌握了技术，在几次大修、整治、技改和故障排除中，技术人员能找出问题、提出对策，有效排除设备故障，同时还在新的实践中继续提高技术，积累第一手经验，对于保证电站设备可靠运转、提高电站运行效率起到了非常重要的作用。

秦山核电站10年安全运行的良好业绩，说明了核电是安全、经济、清洁的能源。说明了中国已经基本具备了依靠自己的力量设计、建造、运行和管理好核电站的能力，是我国走自主发展核电道路的一次成功实践。

## 2.2 秦山二期2×60kW压水堆核电站

秦山核电二期工程是中国自主设计、自主建造、自主运营的第一座商用核电厂，装机容量2×60万kW，工程总投资148亿元。设计、施工和工程监理分别由核工业集团公司、核工业建设集团公司和华东电力设计院、建筑安装公司承担。秦山核电二期工程采用国际标准，遵循“以我为主，中外合作”方针，1号机组于1996年6月开工建设，于2002年4月15日提前47天投入商业运行，以1330美元/kW的造价显示了自主化建设的商用核电机组的成本优势。

“以我为主、自主设计”，秦山二期工程就是自主选定设计目标、确定技术方案、选择技术参数、确定关键设备的功能和指标，即：技术决策权真正掌握在自己手里。以中方人员为主体完成了可行性研究、总体设计、初步设计和施工设计以及设备制造、工程施工中的技术与接口问题的处理。同时尽量利用对外合作的条件，采用国外先进的、成熟的技术，以更好地实现选定的目标。

秦山二期工程反应堆的堆芯物理、热工水力、主回路系统布置及相关的辅助系统、反应堆厂房设计、土建结构设计及计算，以及与厂址特性有关的子项等都是自主设计的。堆芯采用121组燃料组件布置，降低了平均线功率密度，反应堆热工安全余量大于15%，满足了URD的要求。在设计中增大了专设安全系统的可靠性和冗余度，加大了安全壳自由空间，提高了缓解严重事故后果的能力，符合国际上核电发展的趋势。加大堆内构件与压力容器之间的水层厚度，减少了快中子注量对压力容器的辐照损伤，提高了反应堆压力容器的工作寿命。在系统设计上进行了一些重要的技术改进，在主厂房布局与设计、主要设备设计以及建筑安装等方面也采用了一些新技术。增大了稳压器的比容积，在反应堆压力容器上增设两个直接安全注入口，采用汽动加电动多重、冗余的辅助给水系统。应急柴油发电机由“二拖一”改

为“一拖一”，提高了运行的同步性和可靠性。安全壳穹顶首次采用整体吊装，缩短了工期。

核电厂控制、保护和信息系统也是自主设计的，汲取了当前在集成电路和计算机技术发展方面取得的成果，成功开发了采用集成电路的反应堆保护系统和棒控棒位系统；采用了以分布式计算机系统为基础的电站信息系统；三废系统首次采用全数字控制系统等，为今后新建核电厂开发全数字化的仪控系统积累了经验。

从机组759项调试试验结果和并网后运行情况看，秦山二期核电站反应堆设计是成功的。在100%堆功率情况下，电功率达到67万kW。各项指标均达到或优于设计值。堆芯临界硼浓度、控制棒当量、堆芯功率分布等的实测值与理论计算符合非常好，精度达到国际先进水平。

通过技术引进和设计咨询，提高了秦山二期核电站的设计水平，加快了掌握技术的进程。较早地与法马通公司签订了核电厂核岛技术转让协议，获得了三环路压水堆核电厂的部分设计软件和设计图纸。先后签订了两个设计咨询合同，针对在设计中尚未完全掌握的重点、难点进行咨询。通过技术转让和设计咨询，较好地获得了国外研究积累的技术成果和实践经验，节省了大量科研开发费用和时间，使工程有更高的技术起点。

坚持自主设计，搞好中外合作，就能在技术上做到既知其然又知其所以然。这样才能掌握建设和管理的主动权，才能实现自主建造、自主采购和自主管理，及时处理施工、设备制造、调试和运行过程中出现的各种问题，并真正提高自主设计水平和项目管理能力，保证工程质量和进度，降低工程造价，锻炼人才，有力地推进我国核电国产化进程。这是工程取得成功的关键所在。在自主设计的前提下搞好中外合作，在中外合作中提高自主发展核电的水平。这种以我为主，积极寻求国际合作的路子，是加快我国核电自主化的有效途径。

秦山二期1号机组2002年4月15日投入商运，当年（2002年）累计满功率运行207天，累计发电34.9亿kWh，超计划发电4.9亿kWh，负荷因子达74.9%，取得了较好的运行业绩。

2003年3月，国际核营运者联合会（WANO）组织了世界各国16名专家对秦山二期1号机组进行了为期20天的全方位运行评估，其中有4个方面被WANO列入强项向世界核电同行推广，WANO对秦山二期在不到一年的时间里自主管理国产化机组所达到的运行业绩表示了积极的肯定，显示了国产核电机组自主运营的潜在力量。

2003年4月4日，1号机组进入首次换料大修，于6月4日提前18日结束大修。大修结束后，一直保持连续满功率运行，截止2003年9月29日，秦山二期1号机组已连续功率运行117天，2003年累计发电31亿kWh，完成年计划的88%，显示了自主管理国产商用核电机组的美好前景。尤其在7—9月份华东电网进入迎峰度夏时期，秦山二期核电1号机组的安全稳定运行为缓解华东电网的用电紧张作出了积极的贡献。

作为第一台自主设计、建造、运营的商用核电厂，它的提前建成实现了中国自主建设商用核电厂的重大跨越。

## 2.3 秦山三期2×70万kW重水堆核电厂

由中加合作，按国际标准建设，于2003年7月24日全面建成投产，整个工期比计划的55个月提前了112天。工程造价较国家批准的概算节省10%，比投资约1790美元/kW。

秦山三期核电工程建设周期与国际上33座重水堆相比，时间最短。工程质量高，多项施工记录创国际同类核电厂建设之最。项目管理实现了与国际接轨的程序化和信息化。秦山三期的建设受到国内外的一致好评。

## 2.4 田湾2×100万kW压水堆核电站

由中俄合作建设，目前1号机组进入调试阶段，2号机组进入了全面安装阶段，工程按计划顺利进行，两台机组将分别于2004年和2005年投产。田湾核电站，采用双层安全壳结构，安全系统采用完全独立和实体隔离的四通道结构，采取了缓解严重事故后果的安全设施，采用先进的数字化仪控系统先进的设计技术方案。田湾核电站的建设，将有利于我国核电吸收先进技术，对推进我国核电发展发挥积极的作用。

## 3 实践中形成的自主设计能力

从前述中国核电实践和自主设计的核电厂的建设经验和运行业绩中可见，在历时20余年的核电科研开发、工程建设和运行维护等实践活动，中国的核电研究设计单位已逐步形成了一定的核电自主设计能力。以下主要结合中核集团公司所属的三家主要核电设计单位的情况，简单将目前的自主设计能力概括

如下：

(1) 拥有一支近2000人的、经验较丰富的从事核电设计和试验研究工作的技术队伍，覆盖了核电工程所必需的60多个专业与学科。通过设计、建造实践及国内外培训，各专业均有一批承担过核电工程设计任务的技术骨干，他们既有理论知识，又有实际经验，他们掌握本专业技术，熟悉设计方法，熟悉和正确应用国内外标准、规范，已形成了核电自主设计的骨干队伍。

(2) 熟悉适用于中国国情的、与核电相关的较为完整的法规、标准、规范、准则，除中国的HAF、GB和EJ等之外，还包括ASME、ASTM、IEEE、ASCE、RCC等国外或国际的标准规范体系。通过对这些法规和标准的研究和在国内核工程项目上的消化和实践，结合国情理出了约500个基本配套的、适用于核电设计的规范标准，并能较好地掌握和使用这些规范标准。

(3) 已拥有基本配套的核电厂设计计算机程序体系，包括工程设计、计算分析、辅助设计、工程项目管理等软件及相应数据库和设计手册。目前用于核电设计的主要计算机程序有470多个，其中自主开发132个，其余为引进；覆盖了核设计、热工水力和事故瞬态分析、燃料组件、辐射屏蔽和环境评价、结构力学分析、严重事故和PSA、工程管理和设计工具等各个方面，并配套形成了热工水力与事故分析数据库、设备可靠性数据库、核截面数据库、结构数据库、设备数据库和模型数据库等。

(4) 已建立了一批具有较先进设备的科研开发和设计验证设施和装置。主要的大型装置有：反应堆水力模拟实验装置、控制棒驱动线冷态水力实验装置、设备综合实验装置、电热元件考验装置、反应堆全压堆芯补水箱补水实验装置、二次侧非能动余热排出系统实验装置、氟里昂热工实验装置、大型热工实验装置、水化学实验装置、多点激励抗震实验竖井装置、力学实验反力墙及加载基础、6m×6m地震模拟实验台、高温高压试验台架、低温低压驱动机构冷态功能试验台架、50kW电加热热工水力试验台架、蒸汽发生器热工水力试验台架等。

(5) 各设计院均建立了核电设计管理质保体系。明确了设计质保体系的组织结构，规定了参与设计的各类人员和部门的职责权限和接口要求，规定了开展设计活动必须遵守的基本要求。核电设计管理质保体系的建立和正常运转，将有利于核电工程项目的三大控制的实施。

综上所述，中核集团公司所属的三家主要核电设计单位已完全具备30万和60万kW压水堆核电厂总体和核岛的自主设计能力；并基本具备百万千瓦级压水堆核电厂总体和核岛的自主设计能力。

诚然，随着世界核电技术的更新换代和对核电安全性、经济性要求的不断提高，以及国内对安全、成熟、经济和先进的大容量核电机组需求的凸现，质疑目前具备的自主设计能力是否能担负起到2020年核电装机容量达到3600万kW的重担，也是一种对中国核电发展负责任的态度。但是，我们应该看到，遵循“以我为主，中外合作，引进技术，推进国产化”工作方针，通过核电自主化依托项目的工程建设和中国新一代核电技术的科研开发，在设计技术完整性、设计管理技术、接口管理技术方面吸收国外先进经验，不断提高水平，争取“建设一代、设计一代、研究开发一代、跟踪预研一代”的思路，在实践中提高核电自主设计的能力和水平，为中国核电的自主化做出更大的贡献。