



# 建设中国实验快堆 提升我国科技创新能力

□中国原子能科学研究院

我国快堆发展已有 40 多年历史。党中央、国务院在“七五”期间就决策将中国实验快堆(简称 CEFR)列入国家“863”计划。在完成前期预研后,1992 年 3 月,国务院批复了《关于“863”计划能源领域 2000 年发展目标的请示》(国办发[1992]5 号),确定要在我国建造一座热功率 65 兆瓦、电功率约 20 兆瓦的快中子实验堆。1995 年 12 月,国家计委和国家科委联合发文(计国防[1995]2397 号)批准 CEFR 工程正式立项。1996 年 11 月,国科发工字[1996]543 号批准工程可行性研究报告。1997 年 11 月,国家科委批准初步设计。2000 年 5 月,国家核安全局颁发部分建造许可证,5 月 30 日开始浇灌第一灌混凝土,工程全面进入建设阶段。

经过 10 年的建设,中国实验快堆于 2010 年 7 月 21 日顺利实现首次临界,标志着快堆的科学问题已基本解决。该项成就也获得了社会各界的表扬和认可,实验快堆首次临界分别被评为 2010 年中国能源、中国核能行业、中国国防科技工业、中国科技等“十大新闻”,也被科学时报组织的全国 557 名院士评为“2010 年中国十大科技进展”之一。作为前沿技术的突破,温家宝总理在全国科技大会上的讲话中还专门提到了此项成就,原子能院还荣获了国家科技部“十一五”科技计划执行优秀团队奖。

开展快堆技术研究并建造中国实验快堆是顺应国家科技创新这一重大需求,项目本身的目标是“建立装置、掌握技术、培养人才、开展实验”,而作为国家中长期规划前沿技术重点目标和“863”计划重大项目来讲,快堆对实现我国核能可持续发展具有重大战略意义,对我国步入先进能源技术领域具有重要作用,对我国核科技创新能力提升和高水平创新人才培养具有重要意义。

**中国实验快堆,是我国核能技术跨越和核科技创新能力提升的重要标志**

快堆是由快中子引起原子核裂变链式反应的反应堆简称,它的一个重要特点是在消耗核裂变燃料的同时,又产生多于消耗的核裂变燃料,实现核裂变燃料的增殖,所以又称快中子增殖反应堆。发展快堆及燃料循环可将铀资源的利用率从单发展压水堆的不到 1%提高到 60%以上。利用快堆技术,仅我国自己的铀资源



中国实验快堆乏燃料贮存水池

即可满足我国核能数百年以上大规模发展的需要。发展快堆是实现我国“压水堆—快堆—聚变堆”核能“三步走”发展战略中承上启下的重要环节。

能源是人类赖以生存和社会得以进步的重要物质基础,是世界各国普遍关心的重大问题。根据世界未来能源发展预测和分析,开发利用核能仍然是解决人类后续能源供应的重要途径之一。快堆以其在提高铀资源利用率和有利于核燃料废物处理两方面的优势,成为继以压水堆为主的热中子反应堆发展以来的新的核能堆型,是 2000 年以来以美国为首提出的第四代核能系统的主力堆型。它和压水堆、后处理厂、燃料制造厂匹配形成先进的闭式燃料循环体系,是在聚变堆应用之前实现核能大规模、可持续发展的现实选择。中国实验快堆采用的技术方案是钠冷池式快堆,是第四代核能系统六种堆型中最有可能率先实现产业化的堆型。

早在 20 年前,国家“863”计划在能源领域专家委员会的论证基础上,作出开展快堆技术研究并设计和建造中国实验快堆的重大决策。今天,中国实验快堆已经建成,标志我国已结束无快堆的历史,跨入世界快堆技术的先进行列。这既是国家综合国力增强的又一体现,也为我国开展科技创新活动、提升国家科研创新能力提供了一个重要研发平台。

建成后的中国实验快堆,将为中国快堆进一步积累经验,培养人才,同时也将为中国快堆燃料、材料和设备研制以及新工艺、新技术研发提供设施条件。国家能源局也将“国家能源快堆工程(实验)中心”授予原子能院。原子能院将依托这个设施进一步完善中心相关配套条件,依靠在快堆研发方面形成的技术和人才基础,以成为国家核能发展战略研究中心、国家快堆技术研究中心、国家快堆电站技术支持中心、国家快堆核电装备制造技术研发基地和国家先进燃料循环体系的技术研发中心为长远发展目标,为我国快堆技术研发、核能可持续发展和核科技创新能力提升作出新的贡献。2010 年 4 月 18 日,国务委员刘延东视察实验快堆,她在讲话中强调一定要运行好、管理好、利用好实验快堆,使之真正成为技术研发的大平台,做好科学实验,多出人才,积累经验,以便为我国核事业的发展提供更有力的人才保障。

**立足自主研发,全面掌握快堆关键技术并取得多项科技创新成果**

立足自主研发的中国实验快堆,设计借鉴国外几十座快堆 300 多堆年的经验,并参考了俄罗斯的技术方案。快堆技术复杂,设计起点高,安全要求严,国内首次设计等,成为项目面临的巨大挑战,为此原子能院组织国内几百家科研院所、企业开展了多项技术攻关。一方面是重点开展了快堆设计、钠工艺技术、热工水力与安全、中子物理、结构材料性能、燃料技术、钠水反应及其诊断、与安全有关的设备部件及燃料组件等方面预先研究;二是全面进行工程设计、工艺研究、设计验证、安全分析和非标准设备制造;三是积极与俄罗斯、法国等国开展合作,通过不同程序进行计算校核、标准转化和深化设计等措施,强化对国外先进技术的引进消化吸收再创新。

原子能院作为设计总包方和核岛系统设计方,组织主要设计分包单位——中国核电工程公司(原核二院),



中国实验快堆反应堆大厅

实现了工程的自主设计。在总体设计方面,建立了一套适合于实验快堆设计和安全评价的规范、标准规范体系,这些规范包括针对核安全的核安全法规(HAF、HAD 系列),针对设计、制造和安装的行业通用规范标准(GB、EJ、DL 等系列)和自行编写的专门针对中国实验快堆的设计准则和相关技术条件系列;建立了一套用于钠冷快堆设计和安全评价的规范、标准规范体系,管道系统应力应变分析和三维造型设计的范围;具备了实验快堆规模的工程设计能力,包括物理、热工、屏蔽、力学、堆本体、主热传输系统、辅助系统、控制系统、土建等设计方面。在关键工艺和设备设计方面,自主完成了中国实验快堆的堆芯设计、全厂工艺系统的设计,完成了堆容器、堆内构件和旋塞等主要设备设计,实现了复杂换料系统的自动化和全厂监控系统的数字化,掌握了钠及覆盖气体的制备、净化、储存、保护、分析等全部钠工艺技术。在先进的安全技术应用方面,设计并验证了一回路非能动事故余热排出系统和超压保护系统,采用了防止一回路钠净化管道破裂导致钠大量泄漏的虹吸破坏装置,并按照国际和国内相关要求进行了全面的安全分析和评价。

通过项目实施,还获得了多项技术创新成果。目前已获得专利授权 89 项,取得各类成果 125 项。预计最终将获得专利 150 项,成果 200 多项。

**注重产研结合,实现大部分设备的国产化 and 自主管理、自主施工、自主调试**

中国实验快堆项目是集材料、机械、电子、计算机、信息、化工、核科学、发电等工业于一身的综合性核科学工程,也是涉及研究、设计、标准、土建、安装、设备制造、调试、运行、核安全、环境影响评价、核工程管理等多方面技术的一个多学科、多专业、多接口的系统工程。在国内首次设计和建造,也面临较多的工程问题,如没有参照堆,国内缺乏统一的快堆法规标准,可以从压水堆设计和建造上借

鉴的经验不多,还存在资金落实与工程进度不匹配以及工程设计、设备、施工、调试等工种之间相互接口配合条件不充分等诸多现实困难。

原子能院充分发挥国内相关资源,并遴选上百家设备制造、建筑、安装和调试企业参与工程建设,经过全体参建单位的团结协作和联合攻关,实现大部分设备的国产化和自主管理、自主施工、自主调试。一是设备国产化率达到 70%。通过与厂家联合研制,掌握容器、堆内构件、管道、钠阀、灭钠火设备、旋塞、转轮机、换料系统专用工具、主控室、反应堆功率测量和调节系统、安全参数检测系统、计算机监控系统等设备和系统的制造技术。二是攻克建筑施工关键技术,形成自主施工能力。发明逆做法,缩短大混凝土主厂房施工时间;研制了高七层混凝土浇筑方法;解决密集钢筋下混凝土的振动密实问题等。三是突破复杂系统设备安装关键技术,形成池式钠冷快堆自主安装能力。自主掌握大型薄壁容器的制造和装配技术,掌握大口径管道、双层钠套管、异种钢材之间和蒸汽发生器密封膜片等焊接工艺技术。四是自主进行调试,掌握快堆调试技术并充分积累运行和维修经验。

通过工程建设,国内快堆工业体系配套能力基本形成,参建单位的技术创新能力显著提升,相关产业发展得以积极促进,产研结合效果凸显。如原子能院与中国第一重型机械集团等企业联合,圆满完成了堆容器、旋塞等设备研制,掌握了快堆级关键设备制造技术。这一成果得到了俄罗斯专家的高度肯定,为此俄罗斯有关设计单位还建议中方参与俄罗斯正在建设的快堆电站制造和安装。与上海电气集团的第一机床厂和大连宝原核设备有限公司等企业联合,成功实现全自动换料,突破快堆复杂系统设备集成的技术瓶颈。这对制造工业维护并强化其核电品牌发挥了积极作用。与中核北京核仪器厂等企业联合,研制出中国实验快堆核测、控制与保护系统,提升我国反应堆核测、控制与保护系统的设计和制造水平。与兰太实业公司联合建厂,大规模、高质量制备核级金属钠,促进了钠工艺技术从实验室走向工业化。兰太公司通过本次合作也已成功切入到高科技的核能领域,有

效实现了国有资产的保值增值。在核级钠投产当日,兰太实业的股票应声而涨。鉴于这一合作成果,印度、俄罗斯等正在发展快堆技术的国家表示了浓厚的兴趣。与中核建设集团的二、三、四公司联合,自主完成建筑和安装,在快堆大体积厂房建筑和钠系统安装技术等方面取得充分积累。这为他们参与下一步示范快堆电站建设奠定了坚实基础。

为巩固上述成果,加快我国快堆商用化进程,2010 年 11 月,原子能院、一重、上海电气、二、三、四公司等共同发起,在北京成立了“快堆产业化技术创新战略联盟”,原子能院为理事长单位。快堆产业联盟致力于推动我国快堆技术进步,加快快堆技术产业化步伐,打造完整、先进的快堆技术产业链,开发我国具有自主知识产权的商用快堆电站品牌,形成自主设计、自主建造、自主运行和自主管理的能力,发展核燃料循环经济,建设中国可持续发展核能。目前,共有 41 家企业和研发机构加入了联盟,另外还有多家单位正在申请加入。由于该联盟意义、作用重大,在 2010 年 12 月,经申请和审查批准,快堆产业化技术创新战略联盟已正式成为中国产学研联合促进会会员。

**加强管理创新,为国家重大科研项目组织和重大科研设施建设提供经验**

要加快科技创新能力的提升和创新人才培养,必须建立相应的管理体制和运行机制,以管理创新促科技创新。中国实验快堆这一重大科研课题和重大科研设施建设,对原子能院是机遇,也是挑战。而要做好项目管理,必须结合实际,转变观念,与时俱进,不断创新。

原子能院积极探索,采取了一些创新的做法,并取得了一定的经验。一是统一组织力量,实施专项管理。原子能院专门成立了中国实验快堆工程部代院行使业主职能,并实行总经理负责制,同时将设计队伍和工程管理部门统一管理,以减少接口并提高效率。二是加强技术研发,充分发挥设计。项目首

先围绕堆目标开展关键技术预先研究,其次围绕设计进行充分的设计审查和鉴定验证,还针对设备制造、施工、调试中的技术问题及时进行专题研究。另外,充分发挥设计的龙头作用,积极依靠设计人员做好在工程管理中的技术配合和在设备采购、现场施工等方面的技术把关。三是依靠自身优势,发挥所长。依靠在快堆堆物理、热工、安全和钠工艺研究的技术基础,原子能院进行设计总包并承担核岛主工艺系统和设备设计,由核工业第二研究设计院(现中国核电工程有限公司),承担核岛厂房及部分辅助系统设计以及常规岛、BOP 设计,同时还部分设计工作委托给其他高校和科研院所。在工程建设中,组织工程建设方面具有丰富经验的核工业二、三、四公司、中国一重、上海机床厂、核工业 261 厂、核工业 262 厂等多家企业参与。原子能院内也是以快堆工程部为主,组织辐射安全部、核技术所、核仪器厂、实验工厂、器材工程部、动力工程部等多家单位参加。四是坚持以我为主,加强国际合作。根据国家“863”计划“尽量采用国外成熟的先进技术、不搞重复性研究、减少研制费用、缩短研究周期”的宗旨,原子能院确定了“以我为主、联合设计、引进国外关键技术和设备”的指导方针,积极与俄罗斯、法国、意大利等国家进行技术合作与交流,以较低投入解决了工程的难题,通过引进技术进行消化吸收再创新。采用国外成熟设备以保证反应堆的安全性和可靠性。五是实施项目管理,强化过程控制。强化项目管理的理念,引进先进管理方法,借助现代化管理手段,对项目科学、规范、高效的管理体系,建立了一套高效执行的质量保证体系,建立了以总经理为首的行政领导和以总工程师为主的技术领导的“两总”决策系统,重点从程序、合同和计划三方面的规范管理和精细管理入手,严格实施安全、质量、进度和投资四大控制。六是全面培养人才,管好知识成果。按照“专项组织、矩阵管理、重点培养、逐步过渡”的思路,一体化组织快堆技术队伍,使设计人员在完成设计的同时,全面参与工程技术服务、系统调试和试运行,培养快堆技术的“全能选手”。另外,在注重技术掌握和人才培养的同时,积极做好知识和成果的管理,收获更多规范、标准、专利、成果,固化并形成自己的知识产权。

**结束语**

我国大规模发展核电机组有近一半在中国。根据中国工程院 2 月 28 日在北京发布的《中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究》报告,到 2020 年、2030 年和 2050 年,核电总装机规模将分别达到 7000 万千瓦、2.2 亿千瓦、4 亿千瓦,核电装机容量占电力总装机比重分别为 4.6%、10%、16%。核发电量占总电量比重将分别达到 7%左右、15%、24%。按照我国核能发展“压水堆—快堆—聚变堆”三步走战略,快堆的商用化进程必须加快,以便实现我国核能的大规模可持续发展,支撑上述目标的实现。中国实验快堆的建成,为我国快堆的产业化发展打下了坚实的基础,我们掌握了绝大多数快堆核心技术,掌握了大量一手资料,初步在国内形成了快堆产业链。相信在党和国家的英明领导和统一部署下,快堆和核能事业必将能够为我国国民经济、低碳经济的发展作出巨大贡献。



中国实验快堆主控室



中国实验快堆堆容器生产



中国实验快堆堆内构件生产



中国实验快堆核级钠生产