

# 中国核能科技“三步走”发展战略的思考

苏罡

中国核电工程有限公司, 北京 100840

**摘要** 核能作为中国的战略产业,通过坚持创新驱动战略,正在不断转型升级。聚焦于发电方向,中国推出自主三代压水堆技术,在快堆、高温气冷堆等具备第四代特征的核电技术方向实现突破,作为核心成员参加国际 ITER 计划并顺利推进采购包计划,为“热堆—快堆—聚变堆”三步走奠定了坚实的基础。本文在总结阶段性核能产业科技发展基础上,提出了“十三五”乃至更长时期,落实“三步走”战略的发展趋势和技术方向,特别是对如何实现“热堆—快堆”第二步跨越、实现“快堆和聚变”第三步跨越进行了思考,并展望了未来核能科技发展的前景。

**关键词** 自主三代核电技术;第四代核电技术;聚变技术;“三步走”战略

核科学技术是人类 20 世纪最伟大的科技成就之一,以核电为主要标志的核能和平利用,在保障能源供应、促进经济发展、应对气候变化、造福国计民生等方面发挥了不可替代的作用<sup>[1]</sup>。进入 21 世纪以来,核科学技术作为一门前沿学科,始终保持旺盛的生命力,深受国际广泛的重视和关注,世界各国对其投入的研究经费更是有增无减,推出大量的创新反应堆、核燃料循环和核能多用途等方案,在裂变和聚变领域不断取得突破。

## 1 中国核科学技术学科的发展

核工业是高科技战略产业,是国家安全的重要基石。通过 60 多年的艰苦创业、开拓创新,中国建立了世界上少数国家拥有的、完整的核科技工业体系,实现了发展中国原子能事业的战略目标,不断完善包括铀资源勘探、采冶、转化、浓缩和核燃料制造 5 大环节的核燃料供应体系,在后处理和废物处置等核燃料循环后段关键环节取得技术突破,开展工程示范建设。

改革开放以来,核工业逐步实现军民结合,重点转向为国民经济服务,通过 30 多年的发展,中国核电产业已经

初具规模,取得了世人瞩目的成就。至 2015 年底,在运核电机组 29 台,总装机容量 28.46 GW,世界排名第 5;在建机组 20 台,总装机容量 23.17 GW,占世界在建总装机容量的 36%,居世界第 1。核能具有清洁、低碳、稳定、高能量密度的特点,作为战略新兴产业的重要组成部分,是非化石能源中增加能源供给的重要支柱,也是治理雾霾,保证能源安全的重要手段。核工业不断转型升级,坚持创新驱动战略,走出了一条在引进、消化吸收基础上进行自主研发、再创新的技术发展路线,“十二五”期间,研制出具有自主知识产权的三代百万千瓦核电技术“华龙一号”,具有第四代特征的中国实验快堆实现满功率运行,高温气冷堆开工建设,航天核动力取得阶段性成果,航海核动力创新升级。

2011 年 3 月 11 日,日本福岛发生核事故,中国行业和监管部门组织安全检查,结果表明,中国核设施风险可控、安全有保证<sup>[2]</sup>;发布了《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求》<sup>[3]</sup>,已在中国所有运行与在建核电厂全面实施;发布了《核安全与放射性污染防治“十二五”规划及 2020 年远景目标》<sup>[4]</sup>,要求“‘十三五’期间新建核电站要在设计上

实际消除大规模放射性物质释放的风险”,行业发展进入理性、健康的发展阶段。通过行业开展的系列研究得出结论:“中国核电采用压水堆技术路线,无论从堆型、自然灾害发生条件和安全保障方面来看,切尔诺贝利和福岛事故序列在中国不可能发生。”

中国核能技术研究百花齐放,科技成果得到实际应用,聚焦于核能发电技术,推出了自主三代压水堆核电技术并落地国内示范工程,成功走向国际并进入大规模应用阶段,可满足当前和今后一段时期核电发展的基本需要;在快堆、高温气冷堆、熔盐堆、超临界水堆等第四代核电技术方面全面开展研究工作,其中钠冷实验快堆已经实现并网发电,目前处于技术储备和前期工业示范阶段;高温气冷堆正在建造示范工程;全超导托卡马克核聚变实验装置 EAST 成功实现了 5000 万度持续时间最长的等离子体放电,成为国际上稳态磁约束聚变研究的重要实验平台,作为核心成员参加国际 ITER 计划并顺利推进采购包计划。可以说,本阶段核能领域科技取得的突破,为未来核能技术的发展与实现“热堆—快堆—聚变堆”三步走奠定了坚实的基础。

收稿日期:2016-06-16;修回日期:2016-07-20

基金项目:中国工程院战略研究课题(2015-ZD-09-02)

作者简介:苏罡,研究员级高级工程师,研究方向为核安全与核电发展战略,电子信箱:gang\_su@126.com

引用格式:苏罡. 中国核能科技“三步走”发展战略的思考[J]. 科技导报, 2016, 34(15): 33-41; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.15.002

## 2 核能科技发展趋势

### 2.1 核能领域技术发展路线图

核能发电始于20世纪50年代晚期,在半个多世纪中经历了不同阶段的发展。伴随着核电发展的不同阶段,核电厂的设计也产生了“代”的概念。在经历了第一代的原型堆和第二代的商业堆之后,第三代轻水堆核电厂在燃料技术、热效率以及安全系统等方面采用了现代化的技术<sup>[5]</sup>(图1)。目前,分布于31个国家的超过435座核电反应堆提供了全世界11%的电力,国际上正处于二代核电技术向三代核电技术过渡的阶段。考虑到轻水堆的技术基础、发展历史、性能和价格上的优势,在未来20年乃至更长的时间内,轻水堆技术仍将是国际核电发展的主流技术路线。

针对第四代核能技术的发展,“第四代核能国际论坛”(GIF)于2002年提出了第四代核电的6种堆型(包括各自的燃料循环)和研究开发“路线图”;“全球核能合作伙伴”(GNEP)致力于推动安全、可持续发展、经济和防止核扩散的先进核能技术联合研发;IAEA发起的革新型反应堆和燃料循环国际项目(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles, INPRO),目标是发展可持续的革新核能系统(sustainable Innovative Nuclear Energy System, INES),并建立相关的评价方法学。第四代核电站开发的目标为:具有固有安全性,充分利用核资源,提高热效率,开发核能制氢、冶金、化工等多种用途,处置核废料,防止核扩散、反恐<sup>[6]</sup>。

### 2.2 中国确定的“热堆-快堆和聚变”三步走发展战略

1983年6月,国务院科技领导小组主持召开专家论证会,提出了中国核能发展“三步(压水堆—快堆—聚变堆)走”的战略,以及“坚持核燃料闭式循环”的方针;在《国家能源发展“十二五”规划》中,提出了安全高效发展核电的主要任务,继续明确了坚持热堆、快堆、聚变堆“三步走”的技术路线。从核能所使用的资源角度来看,中国核能发展的第一步,发展以压水堆为代表的热中

子反应堆,即利用加压轻水慢化后的热中子产生裂变的能量来发电的反应堆技术,利用铀资源中0.7%的<sup>235</sup>U,解决“百年”的核能发展问题;第二步,发展以快堆为代表的增殖与嬗变堆,即由快中子引起裂变反应,可以利用铀资源中99.3%的<sup>238</sup>U,解决“千年”的核能发展问题;第三步,发展可控聚变堆技术,希望是人类能源终极解决方案,“永远”的解决能源问题。

## 3 自主先进三代压水堆技术跻身世界第一阵营

中国目前在运核电技术多样,但主

要以压水堆为主,在未来一定发展时期内,仍将以压水堆堆型为主开发不同的机型以满足绿色、低碳能源发展的需求。

在中国30年核电站设计、建造、运营经验基础上,充分借鉴AP1000、EPR等先进核电技术并考虑福岛事故的经验反馈,研发了中国自主知识产权的三代核电机型“华龙一号”HPR1000(图2),其示范工程已开工建设。

“华龙一号”提出并实现了“能动+非能动”的安全设计理念,采用“177堆芯”设计和自主核燃料组件,相比国内在运核电机组,发电功率提高5%~



图1 核裂变反应堆技术的发展演变

Fig. 1 History of nuclear fission reactor technology



图2 自主三代核电技术“华龙一号”

Fig. 2 Hualong-1: the third generation nuclear reactor

10%，不仅提高了反应堆的安全性和运行性能，同时降低了堆芯内的功率密度，提高了核电站的安全性；拥有双层安全壳，可以抵御商用大飞机的撞击；设计寿期达60年，堆芯采用18个月换料，电厂可用率高达90%。从型号研发到示范工程落地，“华龙一号”很好地解决了安全性、先进性、成熟性和经济性等一系列难题，安全指标和性能指标完全满足国际上对于三代核电技术的要求。“华龙一号”的成功落地，标志着中国步入世界先进核电技术国家的第一阵营。中国核电“走出去”已上升为国家战略，结合“一带一路”的发展战略，“华龙一号”正推向国际市场，已与巴基斯坦、阿根廷等国家达成合作协议。

CAP1400的研发也基于AP1000技术，采用非能动以及简化的设计理念，遵循国内外最新有效的核电法规导则和标准，满足URD等三代核电技术文件要求，充分反映了国内外目前AP1000工程化过程中的设计变更及改进。CAP1400的总体设计思路是：提高电厂容量等级、优化电厂总体参数、平衡电厂设计、重新进行全厂安全系统设计和关键设备设计、全面推进设计自主化与设备国产化、积极应对福岛事件后的国内外技术政策、实现当前最高安全目标、满足最严环境排放要求，进一步提高经济性，从而使综合性能优于三代核电AP1000。

CAP1400综合HPR1000和CAP系列安全设计特点，以及确定论分析和PSA评价结果，分析满足国际原子能机构(IAEA)和美国电站用户要求文件URD和欧洲用户要求文件EUR的相关要求，核电设计能够满足“设计上实际消除大量放射性物质释放”的要求，具备规模化建设的条件。

中国政府积极支持自主的模块式小型堆研发，并将模块式小型堆列入《国家能源科技“十二五”规划》。目前中核集团在国家资助下开展模块式小型堆的研发，已完成初步设计，正在积极推动示范工程建设，合作开展浮动核电站研究；中广核集团、国家核电技术

公司及清华大学也在开展模块式小型堆的研发工作。

#### 4 具备第四代特征的核电技术发展

自第四代核能系统国际论坛(GIF)成立以来，论坛的成员国已经提出了100多种备选的反应堆系统<sup>[7]</sup>。根据各项标准，GIF遴选出了6种最具前景的反应堆系统(表1<sup>[8]</sup>)，分别是钠冷快堆(SFR)、超高温反应堆(VHTR)、气冷快堆(GFR)、铅冷或铅-铋共熔物冷却的快堆(LFR)、熔盐堆(MSR)和超临界水堆(SCWR)。

##### 4.1 中国实验快堆成功并网，示范快堆开始兴建

中国实验快堆(CEFR)工程坚持“以我为主、自主创新”原则，在前期关键技术研究及部分国际合作的基础上，自主进行设计、制造、建安和调试工作，于2011年7月成功并网发电。通过研究，中国掌握了快中子装置的反应堆物理特性和相关理论，研究了MOX燃料的设计及制造技术并形成了一定的技术基础，全面掌握了核级钠制备、分析等技术。CEFR项目在实施过程中突破了大量的关键技术，通过引进和自主开发，70%的设备实现了国产化，成功研制了非能动事故余热导出系统、非能动虹吸破坏装置、换料系统全自动化控制系统和小型氦计化系统，部分指标已达到第四代先进核能系统的要求。中国快堆研究已形成了一批针对钠冷快堆技术的研究试验设施和工业配套能力，将成为后续快堆建设的重要基础。

中国快堆采用“实验快堆、示范快堆、商用快堆”三步走路线。CEFR的热功率为65 MW，电功率20 MW，是中国快中子堆发展的第一步，正在建设的600 MWe规模的中国示范快堆(CFR600)是第二步，在示范快堆成功建造和运行的基础上，将进一步发展商用快堆，实现快堆的商业推广。预期将于“十四五”期间建成CFR600，2030年左右建成百万千瓦级大型高增殖商用

快堆，2035年实现规模化建造。

为保证CFR600的顺利建造，将开展液力悬浮非能动停堆棒研究、堆内自然循环研究、堆芯解体事故进程研究以及雾状钠火研究，研制主泵、蒸汽发生器、控制棒驱动机构等关键设备，提高中国快堆工程设计技术和设备自主化能力。另外，将逐步建立快堆电站规范标准体系，完善中国实验快堆实验和运行配套条件，加快MOX燃料制备技术研究。

##### 4.2 高温气冷堆技术实现发展的第一步——发电

中国高温气冷堆技术研究始于20世纪70年代，2006年高温气冷堆核电站示范工程(简称HTR-PM)列入国家重大专项，经过持续研发实践，预期将在“十三五”期间建成200 MWe示范工程。目前，中国的高温气冷堆技术处于世界领先的地位。

近年来，中国成功研发了球形燃料元件中试生产线，首条商业生产线已全面建成；建成的大型氦气试验回路，是世界上规模最大的高温氦气回路试验平台；在反应堆压力容器制造技术方面也取得突破进展；另外，中国还成功研制了大功率电磁轴承主氦风机工程样机并达到世界领先水平。中国现已掌握了商业规模模块式高温气冷堆的设计和建造技术，2012年开工建造的200 MWe级模块式高温气冷堆商业示范工程，总体进展顺利。

高温气冷堆未来的主要2个发展方向主要是多模块高温气冷堆热电联产和超高温气冷堆技术。在HTR-PM示范工程的基础上，将启动600 MWe模块式高温气冷堆热电联产机组总体方案研究，开展预概念设计工作，发展安全、高效、经济的产业化多模块高温气冷堆；同时研究进入第二阶段——制氢，即在当前技术基础上进行超高温气冷堆技术的预研，开展耐更高温度的燃料元件技术、氦气透平技术、高温氦/氩中间换热器技术、高温电磁轴承技术、高温制氢技术等研究工作，以实现高温制氢，以及氢能和燃料电池应用，氢作

表 1 国际上先进反应堆概念的主要特点  
Table 1 Main features of advanced reactors in the world

	反应堆系统					
	钠冷快堆	超高温反应堆	气冷快堆	铅冷快堆/铅-铋共熔物冷却快堆	熔盐堆	超临界水堆
中子能谱	快	慢	快	快	快或慢	快或慢
功率密度/(MW·m <sup>-3</sup> )	300	5~10	100	100	330	100
慢化剂	—	石墨	—	—	石墨	轻水或重水
冷却剂	液态钠	气态氦	气态氦	液态铅或铅铋合金	熔盐	超临界水
经验反馈	20反应堆/400堆年	7反应堆运行/2在建	—	少量核潜艇	已建2机组	—
裂变/增殖材料	<sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U/ <sup>238</sup> Pu	<sup>235</sup> U/ <sup>238</sup> U <sup>238</sup> Pu/ <sup>238</sup> U <sup>233</sup> U/ <sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> Pu	<sup>238</sup> Pu	<sup>233</sup> U/ <sup>232</sup> Th <sup>235</sup> U/ <sup>232</sup> Th <sup>232</sup> Pu/ <sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> Pu
燃料状态	芯块	颗粒	芯块	芯块	芯块/液态	芯块
化学成分	液态金属	碳氧化物, 氧化物	氮化物, 碳化物	氧化物, 氮化物, 碳化物	氟化物	氧化物
冷却剂压力/MPa	≈0.15	≈7	≈7	≈1.5	≈0.5	≈25
冷却剂沸点/℃	880(0.1 MPa)	—	—	铅 1745 铅铋合金 1670 (0.1 MPa)	≈1800(0.1 MPa)	—
0.1 MPa冷却剂凝固温度/℃	98	—	—	铅 327 铅铋合金(150~200)	≈560	—
堆内冷却剂温度范围/℃	400~550	250~1000	400~850	400~480	700~770	280~500

为清洁的二次能源,作为运载工具的能源,有可观的发展前景,为更高效的安全发电、大规模核能制氢奠定基础。同时,围绕高温气冷堆未来发展的关键技术,积极参与国际合作,解决材料、燃料、设计及设备等方面的问题,使中国高温气冷堆继续处于国际前沿。

#### 4.3 钍基熔盐堆核能专项取得显著进展

2011年中国科学院启动“未来先进核裂变能”战略性先导科技专项,研究钍基熔盐堆核能系统(TMSR)。目前,完成了10 MW 固态燃料熔盐实验堆和2 MW 液态燃料熔盐实验堆的概念设计,开始进行10 MW 固态燃料熔盐实验堆的工程设计;研制了部分关键设备的原理机以及个别设备的工程样

机,为10 MW 固态燃料熔盐实验堆和2 MW 液态燃料熔盐实验堆的建成奠定了基础。

中国熔盐堆研究致力发展固体燃料和液态燃料2种技术,以最终实现基于熔盐堆的钍资源高效利用,下一阶段将在钍铀循环核数据、结构材料、后处理技术等方面开展基础性研究工作。依托TMSR核能专项,未来将建设TMSR仿真装置(TMSR-SFO)、10 MW 固态燃料TMSR实验装置(TMSR-SF1)和具有在线干法后处理功能的2 MW 液态燃料TMSR实验装置(TMSR-LF1)以支撑未来中国熔盐堆技术研究,实现关键材料和设备产业化。预计2030年左右,全面掌握TMSR设计技术,基本完成工业示范堆建设,同时发展小型熔

盐堆模块化技术,进行商业化推广。

#### 4.4 ADS系统研究取得多项突破

中国科学院战略性先导科技专项“未来先进裂变核能-加速器驱动次临界嬗变系统”(简称“ADS先导专项”)启动以来,在超导直线加速器、重金属散裂靶、次临界反应堆及核能材料等研究方面取得了重要的阶段进展和突破,若干关键技术达到国际先进水平,使中国具备了建设ADS集成装置的工程实施基础。

在ADS先导专项实施的基础上,针对ADS和第四代铅冷快堆(LFR)的技术发展目标和实验要求,完成了具有临界和加速器驱动次临界双模式运行能力的10 MW 中国铅基研究堆详细方案设计;建成了系列铅铋回路实验

平台,开展了冷却剂技术、关键设备、结构材料与燃料、反应堆运行与控制技术等铅基堆关键技术研发;正在开展铅基堆工程技术集成试验装置、铅基堆零功率物理试验装置、铅基数字反应堆的建设,以开展铅基堆关键设备和运行技术集成测试和验证。

铅基反应堆具有重要的发展前景,包含核废料嬗变、核燃料增殖、能量生产等,可以作为钠冷快堆的另一发展选项。

#### 4.5 正在开展超临界水冷堆基础技术研究

中国 2006 年全面启动研究工作,将 SCWR 研发规划为 5 个阶段:基础技术研发、关键技术研发、工程技术研发、工程试验堆设计建造以及标准设计研究。目前开展了超临界水冷堆基础研究,提出了超临界水冷堆总体技术路线,完成了中国有自主知识产权的百万千瓦级 SCWR (CSR1000) 总体设计方案。中国独创性开展了双流程结构堆芯和环形元件正方形燃料组件等设计和论证,验证了 SCWR 结构可行性;建立了三维模型和实体模型,完成了超临界流动传热恶化特性实验与计算流体力学模型研究,为总体设计方案的优化提供了支撑;全面开展了材料筛选,掌握了关键试验技术,构建了试验分析平台和数据库,为工程化应用奠定了基础。

按照 SCWR 研发规划,中国下一步将进入研发第 2 阶段,即进行关键技术攻关研究,全面掌握超临界水冷堆设计技术和设计方法,完成 CSR1000 的工程实验堆的设计研究。通过进行堆外实验、材料优化及工程应用堆外性能、燃料元件辐照考验装置设计等关键技术攻关,开展包壳和堆内构件材料入堆辐照研究,为工程设计和工程试验堆设计建造奠定基础。

#### 4.6 第四代核电技术利用方向

GIF 推荐的这 6 种堆型及 ADS 有着各自的特点,发挥的作用也不完全相同,技术成熟度也存在着明显的差异(表 2)。第四代堆选择快谱反应堆是因为其具备核燃料增殖的能力,钠冷快

堆、铅冷快堆、气冷快堆和熔盐堆都具备这方面的能力,明显提高铀资源的利用率;并能够嬗变以实现废物最小化。而超高温气冷堆的作用是能够实现高温制氢、提高核电厂的发电效率,同时其高温热可以在工业领域进一步拓展核能的应用。

行波堆是快中子堆的一种特殊设计,利用高性能燃料和材料技术,通过长寿命和深燃耗,使占天然铀中绝大部分的  $^{238}\text{U}$  在堆内实现原位增殖和焚烧,降低对乏燃料后处理需求。

### 5 核聚变研究水平大幅提高

纵观人类社会发展的历史,人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替,而能源的开发利用又极大地推进了世界经济和人类社会的发展。核聚变因资源丰富,相比裂变能源而言,聚变能源产生的放射性废物总量少、且不产生长期放射性核素、处置更加容易,因而是一种更加理想的清洁能源。

受控核聚变需要实现的最终目标是获得具有商业价值的聚变能源。首

先是通过加热和有效约束以获得高温聚变等离子体能够达到发生聚变反应的状态,以实现热平衡状态下核聚变反应,实现“燃烧”,获得聚变功率,实现条件是等离子体的温度( $T$ )、密度( $n$ )和维持时间( $\tau_E$ )的乘积(常称为三重积) $nT\tau_E > 10^{21} \text{ m}^{-3}\text{sKeV}$ ;并且聚变功率增益因子  $Q \geq 1$ ,即聚变产生的能量大于为创造实现聚变条件而消耗的能量,才能实现无需外部加热的自持燃烧,即实现“点火”,表明开发聚变能源的科学可行性得到证实;下一步实现长时间“燃烧”,获得聚变能源而不仅仅是短暂的聚变功率, $E_{\text{fusion}} \propto (nT\tau_E) \cdot t_{\text{燃烧}}$ ,因此  $Q$  越大越好<sup>[9]</sup>。

目前,最有可能实现核聚变的 2 种约束方法包括磁约束和惯性约束聚变。磁约束装置维持燃烧以获得可实用聚变能的技术途径是稳态运行,而惯性约束装置获得可实用聚变能的技术途径是高靶丸高频率点火燃烧。在磁约束核聚变方面,经过多年的探索,托卡马克成为主要途径,相继建成并成功运行大型托卡马克装置,包括欧共体的 JET、美国的 TFTR、日本的 JT-60U 等。

表 2 第四代堆型技术发展阶段

Table 2 Types of the fourth generation reactor

堆型	作用	技术发展阶段	GIF 作为候选堆的主要考虑
钠冷快堆	闭式燃料循环	商业示范验证 BN800 于 12 月 10 日 并网发电	安全性 增殖核燃料 嬗变
铅冷快堆	小型化多用途	关键工艺技术研究	安全性 增殖核燃料 嬗变
气冷快堆	闭式燃料循环	关键技术和可行性 研究	可持续性
超高温气冷堆	核能的高温利用	示范 工程验证	安全性 制氢 (高温利用)
超临界水堆	现有压水堆的基础上 提高经济性与安全性	关键技术和 可行性研究	安全性 经济性
熔盐堆	钍资源利用	关键技术和 可行性研究	核燃料增殖
ADS	嬗变	关键工艺技术研究	嬗变

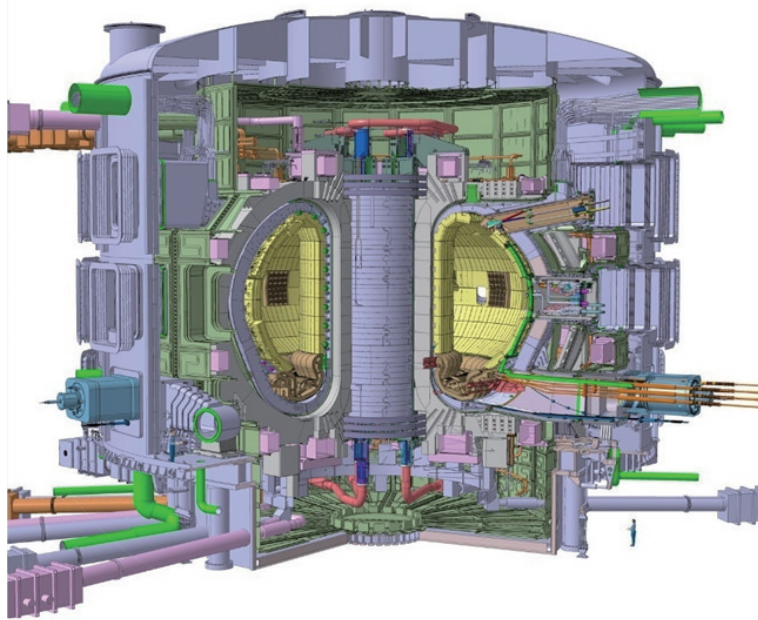


图3 国际热核聚变实验堆(ITER)

Fig. 3 International thermonuclear experimental reactor(ITER)

由中、美、欧共体、俄、日、韩共建的国际热核实验堆(ITER)(图3),磁约束聚变的科学可行性已在托卡马克类型装置上得到实验证实(17 MW,  $Q \sim 1$ ),聚变能的开发研究进入了一个新的阶段:实现长时间的聚变燃烧,正在向聚变实验堆 ITER(400 MW,  $Q=10$ )和最终建立原型聚变电站推进,必须深入进行聚变燃烧物理的理论和试验研究:包括稳态燃烧的基础与限制,加料效率的物理基础与限制;燃烧效率的物理基础与限制,稳态的加热与移能,燃烧等离子体中高能粒子的作用,破裂的物理与控制等;还必须要要有强有力的过程技术支持。

惯性约束聚变在理论、实验、诊断、制靶和驱动器方面取得了长足进展。2009年美国建成国家点火装置(NIF),利用NIF装置开展了一系列靶物理实验和点火物理实验,取得重要的物理成果。实现实验室热核聚变点火,开展高温、高密度极端物理等基础前沿科学问题研究,将是未来惯性约束聚变研究的主要方向。

国际上通过合作和技术共享,共同进行核聚变研究。中国紧跟国际步伐,在受控核聚变方面开展全面而深入的研究。自2008年以来,在核能开发科学基金支持下,核聚变科学和工程成果

显著。

在磁约束核聚变方面,中国建成了HL-2A和EAST实验装置,并成功实现高约束模(H-模)放电,这是中国磁约束聚变实验研究史上具有里程碑意义的重大进展,标志着中国在H-模物理机制研究和长脉冲H-模运行方面跻身国际最前沿。针对聚变科学,中国开展了约束和输运、磁流体不稳定、等离子体和器壁表面相互作用及偏滤器物理、高能粒子物理等方面的研究,成功将电子回旋加热应用于HL-2A撕裂模主动控制,在HL-2A和EAST两大装置上实现了偏滤器位形,在高能电子激发的比压阿尔芬本征模、鱼骨模、高能粒子模方面取得重要实验结果。在工程方面,中国设计了大型托卡马克HL-2M,建成后,将实现等离子体参数的大幅提高。大功率辅助加热系统、先进加料技术、聚变堆设计和材料的研究也取得重要进展。

在惯性约束聚变方面,中国先后研制了神光I、神光II/神光II升级、神光III原型/神光III以及星光系列激光装置,形成了较完整的激光聚变研究体系,包括支撑激光器研制的元器件产生、加工和检测能力;开展了黑腔物理、内爆物理、辐射输运、辐射不透明度和

流体力学不稳定性等一系列物理研究,研制了以二维LARED集成程序为代表的激光聚变数值模拟程序体系,发展了有特色的实验诊断方法和技术;取得了重要研究成果。同时,中国还研制了聚龙一号装置,开展了Z箍缩惯性约束聚变物理研究。目前,中国激光聚变研究正在向实现聚变点火和攻克高能量密度极端条件下的科学技术难题的重要目标稳步推进。

对于核聚变,将继续瞄准世界科技前沿和国家对战略能源需求,围绕国家核聚变能源研究发展战略规划,积极开展进一步的研究。在磁约束核聚变方面,中国将积极参与ITER计划,深入开展聚变等离子体物理、燃烧等离子体物理等研究,进行广泛的国际交流与合作。在此基础上逐步独立开展核聚变示范堆的设计和研发,最终设计建造中国聚变示范堆,实现核聚变能源商业利用。神光III激光装置的建成和投入,标志着中国惯性约束聚变研究进入新层次,今后的工作将以实现惯性约束聚变热核点火为目标,开展理论、实验、诊断和驱动器等技术攻关,充分利用神光III激光装置和其它装置开展辐射输运、辐射流体力学、高压状态方程等高能密度物理研究,以及实验室天体物理、激光核物理等前沿基础科学探索研究。

## 6 实现热堆向快堆第二步跨越的思考

### 6.1 核能战略性新兴产业中长期发展展望

根据中国《核电中长期发展规划(2011—2020年)》<sup>[10]</sup>,到2020年,核电运行装机容量达到5800万kW,在建3000万kW。同时,根据中国发布的应对气候变化联合声明:“到2030年非化石能源消费在一次能源中的比重提升到20%”的目标,预计到2030年核电在运装机规模达到1.5亿kW。

到2020年,中国核电站乏燃料累积存量和每年从核电站卸出的乏燃料将随核电站总装机容量的增加而递

增。目前中国乏燃料堆内储存容量不同程度地接近饱和,随着核电规模快速增长,面临着乏燃料存储和处理日益增加的需求。

## 6.2 建设基于快堆的核燃料闭式循环体系

为解决制约中国核电发展的铀资源利用最优化和放射性废物最小化两大问题,中国已明确了“坚持核燃料闭式循环”(图4)的政策,通过后处理提取热堆乏燃料中的铀、钚,返回快堆复用,则可使铀资源的利用率提高60倍<sup>[1]</sup>。同时,通过后处理分离出的长寿命、高放射毒性的次锕系元素和裂变产物,在快堆中以焚烧和嬗变等方式消耗,可使最终地质处置核废物最小化,不仅能够有效降低乏燃料对环境的影响,监管时间也能大幅缩短,减少经济和社会成本。

为实现第二步战略以保证中国核电可持续发展,中国统筹考虑压水堆和快堆及乏燃料后处理工程的匹配发展,开展部署快堆及后处理工程的科研和示范工程建设,以实现裂变核能资源的高效利用。

在实验快堆设计、建造和试运行经验的基础上,中国快堆技术发展目前已进入了第2阶段——设计、建造中国自主示范快堆工程。中国正在自主建设核燃料循环科技示范项目,建成后将初步形成工业规模后处理能力。

为了形成与核电发展相适应的可持续发展的后处理产业,中国正在积极实施大型后处理厂相关的先进工艺、关键设备、设计和安全等技术攻关;同时,积极推动国际合作建设大型商业后处理厂。鉴于中国核能发展和后处理能力建设情况,积极完善乏燃料离堆贮存能力,确保核电站可持续安全稳定运行。在完成铀钚混合氧化物(Mixed Oxide, MOX)燃料元件生产试验线研发的基础上,继续开展工业规模快堆MOX燃料元件生产线工艺及检测研发设计工作,建立与示范快堆匹配的MOX燃料生产线,实现核燃料的闭式循环,最终

实现核能绿色低碳、可持续发展。

## 6.3 实现模块化小堆技术探索核能多用途利用

目前核能大部分用于发电,只有少于1%应用于非电领域,其他潜在应用市场的开发应用,将很大程度上影响核能发展。现已在国际上开展小批量的核能供热、制冷和海水淡化;并探索核能高温利用,开发核电高温工艺供热在稠油热采、煤液化、冶金等领域应用;进一步利用水的高温裂解制氢。

除了早期的研究实验堆以及标准核电站外,世界范围内还建造了数百台小型反应堆用于海上舰船的推进动力系统。近年来,工业化国家的发电容量日趋饱和,模块化小型堆能更好地适应这些国家的电力负荷需求。从厂址适用性上说,用于发电的小型堆可以建造在远离主电网的偏远地区;用于热电联产的小型堆可在内陆厂址和城市附近建造。不仅能为中小电网、极地岛屿和偏远山区供电,还可以为城市供热,为工业园区和石化企业提供热电,为破冰船和海上船舰提供动力等。小型堆的总造价低,建造周期短,财务风险和管理风险更低。

## 7 实现裂变向聚变能第三步跨越的思考

### 7.1 探索聚变-裂变混合堆技术

过去几十年聚变技术取得了很大发展,实现纯聚变能源的商业应用,仍需解决诸多工程技术方面的挑战。聚

变能商业应用尚需实现高的能量增益,研发耐高能中子辐照材料。聚变-裂变混合堆的出发点是结合聚变与裂变技术的优点,大幅降低对聚变堆芯参数的要求,促进聚变能源的提前应用并为裂变能源面临的资源短缺与锕系核素嬗变问题提供解决方案。

聚变-裂变混合堆包层中含有裂变材料或可转换材料,通过聚变中子引起的裂变倍增能量和中子,实现产氦,释放能量,易裂变材料生产和锕系核素嬗变。混合堆是次临界核反应堆,聚变堆芯是独立的外部高能中子源,可以使裂变包层以次临界态运行,有较多的剩余中子可用来产氦,实现氦自持循环。利用混合堆能谱较硬以及高能区有效裂变中子数多的特点,裂变包层内还可实现如下功能:(1)能源生产;(2)核废料嬗变;(3)易裂变材料生产。

中国聚变-裂变混合堆研究始于20世纪80年代,先后探索了增殖堆和嬗变堆的混合堆概念。2010年以来,在ITER项目国内配套研究的支持下,中国开展了磁约束聚变驱动混合堆的研究,提出了次临界能源堆概念设计方案,形成了磁约束聚变的混合堆概念设计方案,并给出比较可靠的安全性、经济性和工程可行性分析。该方案系统分析了传统的增殖堆与嬗变堆面临的主要问题,对未来堆运行中核燃料的一系列提出了解决思路。并进一步提出与先进次临界能源包层技术结合,形成满足大规模能源应用为基本诉求的新

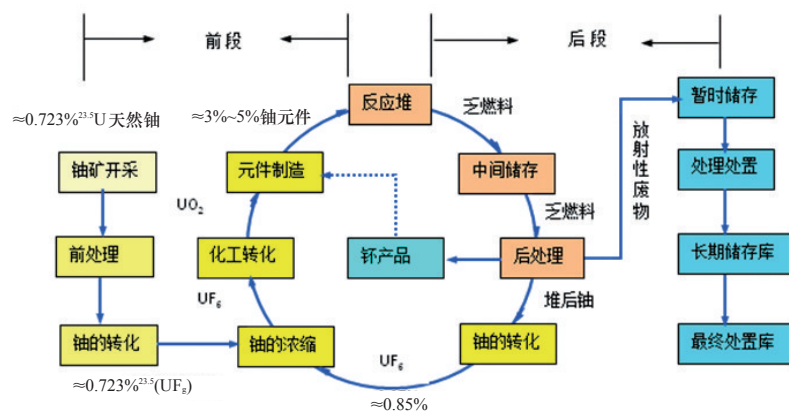


图4 核电站闭式燃料循环示意

Fig. 4 Schematic diagram of fuel closed cycle of nuclear power station

型聚变-裂变混合堆概念,逐步形成工程化应用的成套技术,为聚变能源技术及早大规模服务于人类经济社会创造条件。但是也清醒地看到,混合堆的建造要以大力开展受控聚变的理论与实验的研究为前提。

## 7.2 关注聚变和裂变技术的交叉研究

随着聚变技术的开发,聚变和裂变的研究在很多领域有协同增效的研究效果。目前,主要鼓励在材料特性研究和新材料研发的多尺度建模领域开展更紧密的合作。该研究需重视模型的设计规则,并验证建模方法,包括必要的环境试验和适当的辐照。该活动有助于核裂变与核聚变的核材料研究领域的交流,帮助克服限制聚变和裂变开发中的障碍。

裂变和聚变设施的运行必须考虑氙的排放量。因此需要进一步研究评估和减轻限制氙排放所造成的影响。该研究要尽量减少氙在源头的渗透,并捕获和储存金属废物、液态和气态流出物中的氙,该研究将有助于解决聚变与裂变设施中氙管理的关键问题,满足监管要求,从而减少对环境及健康的负面影响,提供可靠的基于科学的政策建议。

## 7.3 核聚变中间技术的应用开发

在核聚变领域研发过程中开发出的尖端技术,同时又产生出众多对产业有贡献的革新技术,并带动各个尖端科技领域的进步。就ITER而言。涉及的领域包括超导研究、高真空、生命科学、

遥控密封、环境科学、等离子体、信息通信、加热技术、纳米材料等学科。随着聚变研究开发的深入进行,必将带动人类高新科技的更大发展,同时也在各个领域对人类做出积极的贡献。

## 8 结论

经过近60年的发展,核电及配套的核燃料技术成为日益成熟的产业,在世界上成为继火电及水电以外第三大发电能源,能够规模化提供能源并实现CO<sub>2</sub>及污染物减排。福岛核事故5年后,世界核电发展的总趋势和格局是稳定的,面对全球广阔的核电市场,中国核能“走出去”成为必然的选择。中国已经制定了宏观核能发展战略,核能作为比较清洁、低碳、环境友好的能源,在保障安全的基础上,进一步规模化发展能够加强中国能源多元化、清洁化和低碳化趋势。在雾霾肆虐全国的大背景下,选择既清洁又经济的核电,将对大气污染的治理做出重大贡献。

相比于全球核电站运行经验超过16000堆年,中国核电站运行经验约180堆年,核能产业的发展仍处在初级阶段,需要认识到中国核能基础研究薄弱,技术储备不足,对长远发展目标和路线图的论证还不够深入,全产业链各个环节的发展尚未协调配套,核能发展的法制建设和管理体制有待改进完善。特别是针对核能科技发展的“三步走”战略还有待深入论证,通过科技规划来落实;在科技规划实施中坚持自主

创新和集成创新,以先进核电机型号研发引领,以基础研究的原始创新推动核科技规划的快速稳定发展;仍需整合行业研发资源,统筹布局,建立国家实验室与国家科学中心、科技创新中心、国家重点实验室等科技平台;建立大型工程试验室,夯实中国创新基础平台;建立企业级创新研发平台,包括核电装备的生产工艺和产品制造创新。

为更好促进核工业的未来发展,需要通过立法完善科学、健康的行业发展体制,通过标准化和建立经验反馈平台,建设提高安全水平和运行性能,通过建设数字化核电站来整合核电研发设计方、建设方和制造方,保证全寿期的安全运行。同时,必须考虑客户需求,还要考虑与其他能源的竞争,核能应保持在能源领域的竞争力,在国际上实现“走出去”;在能源格局中发挥重要作用,与可再生能源协调发展;同时,核燃料产业前后段发展等方面协调发展,探索核能和核技术的多用途利用,造福人类。

核能是稳定且丰富的低碳能源,核工业在应对全球气候变化进程中有着独有的突出贡献。中国核工业将坚持安全发展、创新发展,通过科技创新和体制机制创新驱动,构建行业创新体系,不断推动转变升级,全面提升核工业的核心竞争力,最终实现将为人类提供可持续发展的核能。

## 参考文献(References)

- [1] 李克强. 致第二十届太平洋地区核能大会的贺信[EB/OL]. 2012-06 [2016-06]. [http://www.gov.cn/guowuyuan/2016-04/06/content\\_5061622.htm](http://www.gov.cn/guowuyuan/2016-04/06/content_5061622.htm).  
Li Keqiang. A letter of congratulations to the 20th Pacific Nuclear Conference[EB/OL]. 2012-06 [2016-06]. [http://www.gov.cn/guowuyuan/2016-04/06/content\\_5061622.htm](http://www.gov.cn/guowuyuan/2016-04/06/content_5061622.htm).
- [2] 环境保护部国家核安全局, 国家能源局, 中国地震局. 关于全国民用核设施综合安全检查情况的报告[EB/OL]. 2012-06 [2016-06-10]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615\\_231738.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615_231738.htm).  
People's Republic of China Ministry of Environmental Protection, National Energy Administration, China Seismological Bureau. Report on national civilian nuclear facilities comprehensive safety inspection[EB/OL]. 2012-06 [2016-06]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615\\_231738.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201206/t20120615_231738.htm).
- [3] 国家核安全局. 福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求[EB/OL]. 2012-06-12 [2016-06-10]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615\\_231698.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615_231698.htm).  
People's Republic of China Ministry of Environmental Protection. General technical requirements of improve operations after the Fukushima nuclear power plant[EB/OL]. 2012-06-12 [2016-06-10]. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615\\_231698.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/haq/201206/t20120615_231698.htm).
- [4] 环境保护部国家核安全局. 核安全与放射性污染防治“十二五”规划及2020年远景目标[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

- China Ministry of Environmental Protection. Nuclear safety and radioactive pollution prevention: "Twelve Five Year Plan" and 2020 vision[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] 张锐平, 张雪, 张禄庆. 世界核电主要堆型技术沿革[J]. 中国核电, 2009, 2(3): 276–281.  
Zhang Ruiping, Zhang Xue, Zhang Luqing. Technical evolution of leading nuclear power reactor types in the world[J]. China Nuclear Power, 2009, 2(3): 276–281.
- [6] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展研究报告 2014[M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
Chinese Academy of Engineering Science and Technology Development. China strategic emerging industry development report 2014[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [7] 中国科学技术协会. 2014—2015核科学技术学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.  
Chinese Association for Science and Technology. Report on advances in nuclear science and technology (2014–2015)[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2016.
- [8] IRSN Report. Review of generation IV nuclear energy systems[R]. Paris: IRSN, 2015.
- [9] 中国国际核聚变能源计划执行中心, 核工业西南物理研究院. 国际核聚变能源研究现状与前景[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2015.  
China International Nuclear Fusion Energy Program Execution Center, Southwestern Institute of Physics. Current situation and prospect of international nuclear fusion energy research[M]. Beijing: China Atomic Press, 2015.
- [10] 国家能源局. 核电中长期发展规划(2011—2020年)[R]. 北京: 国务院, 2013.  
People's Republic of China National Energy Administration. Medium and long term development plan of China nuclear power (2011–2020). Beijing: State Council, 2013.
- [11] 中国工程科技发展战略研究院. 中国战略性新兴产业发展研究报告 2015[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
Chinese Academy of Engineering Science and Technology Development. China strategic emerging industry development report 2015[M]. Beijing: Science Press, 2015.

## The "three steps development strategy" of China nuclear power science and technology

SU Gang

China Nuclear Power Engineering Company Limited, Beijing 100840, China

**Abstract** As a strategic industry of China, the nuclear power industry follows an innovation-driven strategy and keeps on reforming and upgrading. By focusing on the power generation technology, China has developed a Generation-III pressurized water reactor technology independently and achieved breakthroughs in the fast reactor and the high-temperature gas-cooled reactor with the features of Generation-IV reactor technology. As a key member in the international ITER program, China has successfully promoted the Planning Package program and achieved the delivery plan, laying a solid foundation for the "thermal reactor-fast reactor and nuclear fusion" three-step strategy. On the basis of summarizing the development stages of nuclear power science and technology, this paper points out the development tendency and the technical direction for implementing the three-step strategy in the 13th Five Year Plan periods and, especially, how to realize the second step of "thermal reactor to fast reactor" and the third step of "fast reactor and nuclear fusion". Finally, this paper gives a prospective for the future development of the nuclear power science and technology.

**Keywords** proprietary Generation-III nuclear power technology; Generation-IV nuclear power technology; nuclear fusion technology; three-step strategy

(编辑 韩丹岫)