

2018年核能科技热点回眸

杨军, 朱东来, 吴幸慈, 王蓓琪, 徐乐瑾*

华中科技大学能源与动力工程学院核工程与核技术系, 武汉 430074

摘要 盘点了2018年核能科技重点领域所取得的重要研究与工程进展, 重点介绍了第四代反应堆、核电站项目建设以及退役方面的最新状况。总体情况显示, 核能仍是全球能源结构中的关键一环。随着新一代核能设施研发和核退役部署, 有望进一步确保和发挥核能的关键作用。

关键词 核能科技; 核反应堆; 核退役; 核安全

2018年, 第四代反应堆技术, 包括次临界加速器驱动次临界系统、钍基熔盐堆、高温气冷堆等工程建设进展顺利。受国际环境影响, 行波堆进展受到一定阻碍。具有代表性的第三代反应堆 AP1000 (AP指代 advanced passive, 1000为百万千瓦级) 与 EPR (evolutionary power reactor) 均在2018年内建设完成并发电, APR1400首堆工程正式获准建设。随着部分核电站接近或到达寿期, 核设施退役问题也提上日程, 相关研究正在进行。总体而言, 核能年度科技成果与项目建设进展显著。

1 第四代反应堆研发进展

第四代核反应堆国际论坛 Gen-IV Forum (GIF) 选定了下列6种堆型为第四代堆的重点关注对象: 铅合金冷却堆 (LFR)、熔盐堆 (MSR)、超常高温堆 (VHTR)、钠冷快堆 (SFR)、气冷快堆 (GFR) 和超临界水冷堆 (SCWR)。

1.1 ADS次临界加速器驱动次临界系统

加速器驱动的次临界系统 (accelerator driven sub-critical systems, ADS) 是由 IAEA 所承认的第四代核能

系统, 是基于铅铋合金冷却的次临界快堆。2018年3月24日, “十二五”国家重大科技基础设施“加速器驱动嬗变研究装置 (CIADS)”项目的初步设计方案通过评审。建成后它将成为国际首台加速器驱动次临界系统 (ADS) 嬗变研究装置^[1]。

中国科学技术大学和华南理工大学针对加速器驱动次临界系统中能量可以到达上百 MeV 甚至 GeV 的裂变源中子, 开发出自动生成数据库程序。该程序在设计中能群结构、权重函数等参数基础上, 通过程序自动生成适用于 ADS 系统的点状 ACE 格式和 471 群 MATXS 格式核数据库 ANDL-ADS (auto-generated nuclear data library for ADS), 支持高能中子 (能量上限为 150 MeV/200 MeV) 的截面制作, 并可需求进行多温截面的制作。通过不同材料的临界球、积分泄露率、高能屏蔽等基准例题的测试, 初步验证了 ANDL-ADS 数据库的可靠性^[2]。

中国科学院高能物理研究所针对加速器驱动次临界系统注入器束流调试要求, 研究束流的相位和能量高精度测量方法, 设计了基于快速电流变压器 (fast current transformer, FCT) 信号的相位及能量测量系统^[3]。

清华大学核能与新能源技术研究院为优化加速器

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-01-02

基金项目: 国家“千人计划”青年人才项目 (0214120048); 国家自然科学基金项目 (51708238)

作者简介: 杨军, 教授, 研究方向为反应堆热工水力与安全分析, 电子信箱: yang_jun@hust.edu.cn; 徐乐瑾 (通信作者), 副教授, 研究方向为放射性废物处理及水处理技术, 电子信箱: xulejin@hust.edu.cn

引用格式: 杨军, 朱东来, 吴幸慈, 等. 2018年核能科技热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 121-133; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.01.013

驱动次临界系统(ADS)靶件束窗形状设计,研究了ADS的含黏性力的最速降线问题。用最速降线取代半椭圆的束窗形状后,流动分离更晚且流道滞止区更小,有利于提升换热效率^[4]。

西安交通大学针对加速器驱动次临界系统(ADS)瞬态问题,采用预估校正改进准静态方法(PCQS)处理时空中子动力学方程中的时间自变量,利用蒙特卡罗方法处理相应的空间-角度-能量自变量,重点解决了低次临界度下模拟计算不稳定的问题,验证了TWGIL-Seed-Blanket动力学基准问题和小型模拟ADS问题,得到瞬态过程的功率变化结果,与基于其他方法的程序比较,经初步验证取得了较好结果,证明了该耦合方法可行^[5]。

中国科学院近代物理研究所和中国科学院大学对于具有独立回路冷却液态铅铋(liquid lead-bismuth eutectic, LBE)散裂靶的加速器驱动的次临界系统(AADS)辐射损伤问题进行了计算,为ADS系统LBE有窗靶的回路屏蔽设计提供参考^[6]。

中国原子能科学研究院利用²⁵²Cf外中子源驱动的ADS启明星II号次临界装置,验证了理论计算的次临界度及不同次临界度下的断束动态特性^[7]。并使用MCNP程序对启明星II进行了裂变率分布的详细计算分析。根据理论计算的分布规律,优化了实验测量裂变率分布方案,合理布局了探测器位置。用固体核径迹探测器开展了启明星II快中子能谱区裂变率分布的实验测量研究,确定了快中子能谱区的裂变率分布。测量结果显示,快中子能谱区裂变率分布与理论计算结果基本符合。测量结果对ADS次临界反应堆确定堆芯裂变功率提供了数据参考^[8]。

1.2 TMSR 钍基熔盐堆

钍基熔盐堆核能系统(thorium molten salt reactor nuclear energy system, TMSR),是6种第四代先进核能系统之一,包括钍基核燃料、熔盐堆、核能综合利用3个子系统,具有高固有安全性、核废料少、防扩散性能和经济性好等特点。2018年12月29日,在上海市核学会成立40周年纪念大会暨学术报告会上,中国科学院先进核能创新研究院院长徐洪杰在题为《钍基熔盐堆的昨天、今天和明天》的报告中表示,选址于甘肃省武威市民勤县的钍基熔盐实验堆,已取得国家核安全局颁发的《选址审查意见书》。目前正按计划开展实验堆建造许可证申请、实验堆工艺设备加工制造、园区配套设

施建设等^[9]。

中国科学院上海应用物理研究所等单位结合云计算平台具有弹性资源调度、敏捷运维等优点,提出一种分层级、模块化的钍基熔盐堆(thorium-based molten salt reactor, TMSR)核能系统云仿真平台系统架构。仿真运行测试结果表明,TMSR云仿真试验平台可在整个软件生命周期内敏捷、高效地为用户按需提供TMSR-SF1仿真资源,可实现仿真系统快速、灵活地部署和重构^[10]。该所基于自行研制的熔盐浸渗实验装置,采用静态熔盐浸渗试验方法,测试TMSR候选核石墨T220在不同压强下的熔盐浸渗量,并研究了温度、时间对T220、NBG-18及IG-110石墨材料熔盐浸渗行为的影响^[11]。此外,该所为研究管壳式熔盐空气换热器U型管弯管段受空气冲击诱导振动响应特性,采用单管双向流固耦合方法进行仿真,证明了单管双向流固耦合方法分析换热管流致振动问题的可行性^[12]。中国科学院上海应用物理研究所及中国科学院大学开展了六角形燃料组件熔盐冷却先进高温堆瞬态分析和安全评估,基于指数变换和六角形节块展开法,开发了三维时空动力学程序TCORE3D-HEX,为钍基熔盐堆核能系统设计提供了可靠的分析和评估工具^[13]。他们同时采用RCN程序分析了不同燃料盐对于启堆和增殖性能的影响,为提高钍铀转换性能,对堆芯结构和慢化棒设计进行了优化与分析通过对燃料盐和堆芯结构的优化研究,在慢化熔盐堆上实现了钍铀增殖能自持运行;并针对深燃烧模式下ZrH慢化熔盐堆钍铀转换性能的分析,可为ZrH慢化的新型熔盐堆设计提供参考^[14]。

南京航空航天大学基于熔盐堆分析程序MOREL2.0对钍基熔盐堆(TMSR)初步堆芯设计方案进行了稳态计算分析,结果表明:燃料流动对缓发中子先驱核的分布影响较大,并导致 169×10^5 反应性损失;随燃料在外部回路中滞留时间的增加, k_{eff} 降低,80 s后趋于平稳;TMSR具有负的入口燃料温度系数,具有固有安全性^[15]。

1.3 高温气冷堆

高温气冷堆是中国具有自主知识产权的第四代反应堆技术。中国自20世纪70年代开始高温气冷堆技术的基础研发,并建成了10 MW高温气冷实验堆(HTR-10)。中国首座高温气冷堆示范工程燃料装卸系统已经安装完毕并开始调试,这也是核电站建成发电前的关键环节之一。作为国家重大科技专项,高温

气冷堆示范工程 2012 年 12 月 9 日开工建设, 计划于 2019 年底前后建成发电^[16]。

2018 年 10 月 31 日, 哈尔滨电气有限公司(哈电集团)制造的、助力国家四代核电自主化的“大国重器”——全球首台高温气冷堆蒸汽发生器在哈电集团(秦皇岛)重型装备公司顺利通过验收, 即将运往高温气冷堆核电站示范工程华能石岛湾核电站(图 1)。这台蒸汽发生器是国家科技重大专项、全球首台套, 拥有完全自主知识产权^[17]。

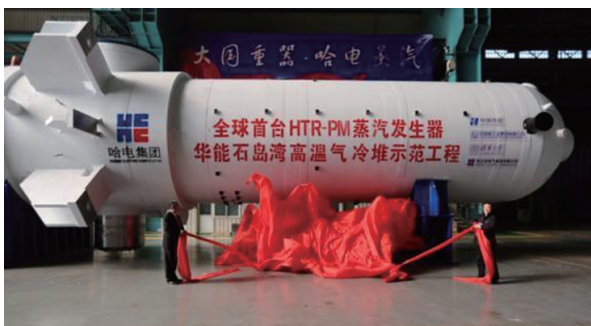


图 1 华能石岛湾 200 MWe 高温气冷堆示范工程首台蒸汽发生器(图片来源:中国新闻网)

Fig. 1 The first steam generator of the Huaneng Shidao Bay 200 MWe high-temperature gas-cooled reactor pebble-bed module (HTR-PM) demonstration power plant

清华大学朱光宇等^[18]建立了高温气冷堆非能动冷却系统的数学模型, 对冷却过程中关键设备的传热传质过程进行了动态数值模拟。动态分析表明, 新方案成功地避免了冷/热冲击, 大幅提高了安全性, 冷却时间也在可接受范围内。李俊等^[19]开展了高温气冷堆内含硼碳材料吸湿特性与扩散系数研究。原越等^[20]进行了高温气冷堆核蒸汽供应系统出口蒸汽温度的 T-S 模糊控制方法研究。

1.4 行波堆

行波堆(traveling wave reactor)是一种满足四代核能技术要求和安全标准的金属燃料钠冷快堆, 采用铀锆合金燃料, 换料周期长并可以大量使用贫铀, 机组可利用效率设计值高于 90%, 具有高效利用铀资源、减少乏燃料卸出量等优势。微软公司创始人比尔·盖茨是行波堆的拥趸, 并创立了泰拉能源公司, 曾计划与中核集团合作来发展行波堆技术^[21]。

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室等单位采用自开发的 MCNP-ORIGEN 耦合程序 MCORE 对所设计的钠冷行波堆和驻波堆开展了中

子学和燃耗分析; 基于 MCORE 获得的功率分布, 采用自开发的钠冷快堆堆芯稳态热工水力分析程序 SAST 对钠冷行波堆和驻波堆堆芯开展热工水力分析。对比钠冷行波堆和驻波堆的堆芯物理特性和热工水力特性, 结果表明: 驻波堆在燃耗、最高包壳和燃料芯块温度方面具有优势, 而行波堆在反应性波动和堆芯冷却剂出口温度均匀性方面具有优势^[22]。

1.5 快堆

快堆被称为第四代先进核能系统主力堆型, 它可将天然铀资源利用率从目前的约 1% 提高至 60% 以上, 并实现放射性废物最小化, 能一举解决铀矿资源枯竭、核材料利用率低和核废料难以处理等问题。中国是世界上第 8 个拥有快堆技术的国家。

2017 年 12 月 29 日, 中国示范快堆工程在福建省霞浦县土建开工, 计划于 2023 年建成投产。这是 2017 年以来国内开工的第一个核电项目, 也是 2015 年以后的首个。中核集团董事长王寿君在开工会上称, 示范快堆工程是国家重大核能科技专项, 对于实现核燃料闭式循环、促进国内核能可持续发展, 推动地方经济建设具有重要意义^[23]。

2018 年 6 月 8 日, 中核集团与俄罗斯国家原子能集团签署框架合同, 其中包括《中国示范快堆设备供应及服务采购框架合同》^[24]。俄罗斯国家原子能集团将协助中方生产 CFR-600 快中子示范反应堆用铀钚核燃料^[25]。

中国原子能科学研究院李淞等^[26]采用克里金方法研究快堆燃料组件的设计参数, 对快堆组件棒束中的流动与换热两方面因素对组件热工水力特性的影响进行了详细研究。核工业研究生部张松梅^[27]等开发出具有自主知识产权的钠冷快堆堆芯子通道分析程序 SSC-FR, 进行中国实验快堆(CEFR)全堆芯稳态分析、子通道稳态分析及全堆芯瞬态分析, 并将分析结果与 CEFR 运行和设计值进行对比。上海交通大学尧俊等^[28]通过对铅铋冷却快堆单盒燃料组件建模, 使用商用计算流体力学软件 STAR-CCM+ 对不同堵块参数下的 5 个堵流事故工况开展了计算分析。通过对事故后包壳内壁面温度、子通道中心温度的轴向发展和堵块周围流场的轴向速度分布进行对比分析, 获得了各种堵块参数对堵流事故后传热恶化、流场性质的不同影响规律。中国原子能科学研究院反应堆工程技术研究部叶尚尚等针对钠冷快堆二回路系统的具体结构和运行特点, 对中间热交换器、直流蒸汽发生器、钠缓冲罐以及泵、管

道等设备和部件建立模型,采用 Fortran 语言自主编制了二回路系统热工水力瞬态分析程序 SELTAC^[29]。

2018年4月26日,美国能源部(DOE)和法国原子能与替代能源委员会(CEA)签署两份意向声明,分别涉及进一步加强钠冷快堆研发合作和启动人工智能研发合作。法国目前正在开发先进钠冷科技工业示范堆(ASTRID)技术。600 MWe的 Astrid原型堆将于2025年前后投运,后续还将推出1500 MWe的系列机组。这种反应堆将使用以贫铀和钚制成的混合氧化物(MOX)燃料。2018年5月,荷兰的核服务公司NRG与瑞典Lead-Cold公司进行为期数年的合作,对瑞典先进铅冷反应堆进行安全分析。2018年9月,俄罗斯国家原子能公司(Rosatom)的子公司AEM技术公司宣布完成多用途钠冷快中子研究堆(MBIR)的关键焊接工作。

1.6 超临界水冷堆

超临界水冷堆(SCWR)是入选 GIF 6种第四代堆型中唯一的水冷堆型。与常规水冷堆相比,超临界水冷堆具有机组热效率高、系统简化、主要设备和反应堆厂房小型化、核燃料利用率高等优点。中国超临界水冷堆技术发展建议的总体目标为:2025—2030年完成百万千瓦级超临界水冷堆核电站标准设计,基本具备建造商业化超临界水冷堆核电站的条件^[30]。

华北水利水电大学等单位基于类三角形堆芯子通道超临界水传热不均匀性试验,建立了棒径为8 mm、栅距比为1.2~1.4的超临界水冷堆(SCWR)类三角形堆芯子通道物理模型,对通道内超临界水传热不均匀性进行了研究,同时分析了超临界压力区子通道传热轴向与周向不均匀性^[31]。华北电力大学、中国核工业集团等研究机构以超临界水堆换热关系式为基础,利用模糊数学中贴近度的概念,并引入变异系数法确定各影响因素的权重。比较了确定工况与各经验公式适用范围的贴近程度,获得了该工况下最为适用的经验关系式。结果表明,采用 Hamming 贴近度、Euclid 贴近度及最大最小贴近度等3种方法的计算结果基本一致,模糊数学中贴近度的应用,为超临界水堆的流动换热问题提供了一种可以在已知关系式的基础上,做出针对特定工况的最优关联式选择方法,使计算结果更加精确^[32]。

同时以中国超临界水堆(CSR1000)为研究对象,参考日本超临界轻水堆恒压启动系统和超临界锅炉机组启动方式,编制了 CSR1000 超临界水堆恒压启动分析

程序。计算结果表明,CSR1000采用恒压启动,高压补水质量流量先增大后减小,主给水泵流量先减小后增大;第一流程包壳温度高于第二流程包壳温度,两个流程的包壳最高温度都低于安全限值 1260 °C;第一流程、第二流程冷却剂通道和慢化剂通道线功率密度在堆芯功率达到 50%后都趋于稳定。CSR1000 采用恒压启动方式不仅能够满足超临界水堆机组启动快速灵活,而且还可以高效平稳地达到安全运行要求^[33]。

大连理工大学杜鑫等^[34]针对超临界水冷堆堆芯六边形子通道内强制对流的传热及熵产行为,采用结构化六面体网格,利用商业软件CFX进行数值分析。

2 核电站建设进展

2018年是核电机组丰收的一年。田湾核电站的3号和4号机组、阳江核电站5号机组、三门核电站1号和2号机组、海阳核电站1号机组和台山核电站1号机组纷纷建成投产,核电装机容量增加884.5万 kW。其中三门核电站1号和2号机组、海阳核电站1号机组和台山核电站1号机组采用国际品牌的第三代核电技术,为全球最先进的核电技术,设计寿命为60年,可利用率为90%以上。同时通过延长换料周期、提升机组容量、提高核电设备国产化率和降低建造成本等措施降低造价和运行费用,与计入环境成本后的火电电价相比具备潜在的竞争力,更低于需要国家补贴的太阳能和风能等可再生能源的上网电价。在安全性能方面,高压堆芯融毁的概率降为上一代的1/10以下,反应堆设有堆芯捕集器以在堆芯融毁时收集熔融物,并且有其他安全及严重事故缓解设施,使操作员有足够时间采取必要的干预行动。在安全壳上设置湿式卸压过滤排放系统以防止安全壳超压受损与消除剩余风险。因此即使发生像日本福岛的核事故时,附近大范围的居民无需撤离,也无需担心食物受到污染,只需短时间隐蔽。此外,第三代核电站对环境和生态的长期影响近乎其微^[35]。国产第三代核电技术的代表“国和一号”(CAP1400)于山东荣成石岛湾的国核示范电站的一期工程也于2018年正式获批。

2018年投产的核电机组中值得一提的是:(1)田湾核电站的3号和4号机组是中国核电建设在日本福岛核事故后第一个获准开工的项目;(2)三门核电站1号机组是全球首座发电的AP1000(先进非能动压水

堆);(3) 台山核电站1号机组是全球首座发电的EPR™(欧洲压水堆)。

2.1 田湾核电站

田湾核电站位于江苏省连云港市连云区,是中国与俄罗斯迄今为止最大的技术经济合作项目,由中国核工业集团(中核集团)旗下的江苏核电有限公司负责建设和运营(图2)。厂址可规划建设8台百万千瓦级压水堆核电机组。1~4号机组采用俄罗斯VVER-1000型核电机组,满足国际三代核电安全要求;5、6号机组采用中核集团自主M310+改进机型;7、8号机组拟采用俄罗斯先进的VVER-1200三代核电机组。俄式VVER系列核反应堆的燃料组件的截面为六角形的,不同于美式的正方形。蒸气发生器的管路是平行于地面的,不同于美式压水堆的垂直于地面,而且包壳的成分也不同^[36]。田湾核电站1号和2号机组分别已于2007年5月17日和8月16日投入商业运行,2018年12月22日3:17,4号机组也通过商业运行的考核。3号和4号机组的额定容量为1126 MW,核岛由俄方负责设计和供货,常规岛与电厂辅助设施设备国产化率达到98%。5、6号机组于2015年12月、2016年9月相继开工建设,计划于2020年和2021年投入商业运行^[37]。2018年6月8日,在中国国家主席习近平和俄罗斯总统普京的共同见证下,中、俄企业在北京人民大会堂签署了《田湾核电站七、八号机组框架合同》和《徐大堡核电站框架合同》。两个框架合同总价值为36.20亿美元^[38]。



图2 田湾核电站(图片来源:中核集团)

Fig. 2 Tianwan nuclear power station

2.2 阳江核电站

阳江核电站位于广东省阳江市东平镇,为中广核集团的成员单位,其5号机组于2018年7月12日21时顺利完成168 h示范运行(图3)。阳江核电五号机组是

中国首个满足第三代核电主要安全指标的自主品牌核电机组,采用ACPR1000的技术路线,在CPR1000+的基础上实施安全技术改进。五号机组安全级DCS(核电站数字化仪控系统)采用中国广核集团下属广利核公司自主研发的“和睦系统”,是国内首台具有自主知识产权的国产化核级DCS平台系统,实现了核电站的神经中的中国制造^[39]。



图3 阳江核电站(图片来源:阳江核电有限公司)

Fig. 3 Yangjiang nuclear power plant

2.3 三门核电站

中核集团旗下的三门核电站位于浙江省台州市三门县,采用AP1000,是美国西屋电气公司设计的非能动型压水堆核电技术,额定容量1250 MW(图4)。其一号机组于2018年6月30日16:48并网发电^[40],为全球首台发电的AP1000核电机组。2018年9月21日3:57顺利完成168 h满功率连续运行考核,为中国第一台建成的第三代核电机组^[41]。2号机组于2018年8月24日17:22首次并网成功,并于2018年11月5日21:47通过满功率连续运行的考核^[42]。两台机组因此正式投入商业运行。在AP1000三代核电自主化依托项目上,机组核岛设备国产化率逐步提升,关键材料研制成功,比原国外采购价格下降了30%~50%^[43]。



图4 三门核电站(图片来源:中核集团)

Fig. 4 Sanmen nuclear power plant

2.4 海阳核电站

海阳核电站(图5)位于山东海阳市核电装备产业园区邵家庄村南,由国家核电技术公司、山东省国际信托股份有限公司、烟台蓝天投资控股有限公司、华能核电开发有限公司、中国国电集团公司和中国核能电力股份有限公司出资设立,由山东核电有限公司负责设计、建设及运营管理,共规划建设6台百万kW级压水堆机组。一期工程1号和2号机组为1250 MW AP1000 核电机组^[44]。1号机组于2018年10月22日22:12通过168 h满功率连续运行考验^[45]。



图5 海阳核电站(照片来源:山东核电有限公司)

Fig. 5 Haiyang nuclear power plant

2.5 台山核电站

台山核电站位于广东省台山市赤溪镇,台山核电一期工程是中法两国能源领域的最大合作项目,由中国广核集团、法国电力集团(EDF)和粤电集团共同投资组建,由台山核电合营有限公司负责建设和运营(图6)。采用的EPR™,是德国和法国基于多年核反应堆运转的经验共同研发的第三代核能反应堆,容量比第二代反应堆更大,发电效率更高,有更多的安全防护系统^[46]。其1号、2号机组的单机容量为175万kW,是目



图6 台山核电站的工程剪影

(照片来源:台山核电合营有限公司)

Fig. 6 Engineering silhouette of Taishan nuclear power plant

前全球单机容量最大的核电机组。1号机组于2018年6月29日17:59并网发电,为全球首台发电的EPR™核电机组。2018年12月13日17时完成168 h示范运行,具备商业运行条件。2号机组预计2019年完工^[47]。

2.6 石岛湾核电站

2018年11月2日,“国和一号”(CAP1400)示范项目一期工程正式获得国务院常务会议核准,成为“十三五”期间第一个获批的第三代核电项目,也是继2015年国常会核准防城港二期、田湾三期之后再次放行新的量产型机组^[48]。“国和一号”是消化吸收AP1000的技术基础,具有中国自主知识产权、功率更大的非能动大型先进压水堆核电机组。示范电站位于山东威海市荣成石岛湾,由国家核电技术公司和华能核电开发有限公司按75%和25%比例出资成立的国核示范电站有限责任公司建设、管理和运营,拟建设2台CAP1400型压水堆核电机组,单机容量140万kW^[49]。

2.7 福清核电站

2018年1月28日,“华龙一号”全球首堆、中核集团福清核电5号机组反应堆压力容器顺利吊装入堆。2018年3月,由中核集团中国核动力研究设计院研制、上海第一机床厂制造的“华龙一号”全球首堆示范工程——福清5号核电机组堆内构件通过验收,正式在国产核电和关键设备研制舞台上亮相。2018年11月15日,中核集团“华龙一号”总设计师邢继表示,目前国内在建的“华龙一号”示范工程均按预期计划向前推进,工程安全和质量处于良好受控状态,其中,福清核电5号机组有望在2020年建成。“如果按计划投产,这将是全球核电史上首个按工期投产的新研发项目首堆机组。”

“华龙一号”核电技术,是由中国两大核电企业中核集团和中国广核集团(下称中广核)在中国30余年核电科研、设计、制造、建设和运行经验的基础上,合作研发设计的先进百万千瓦级压水堆核电技术,也被称为“中国自主研发的三代核电技术路线”。目前,国内共有两个厂址的4台“华龙一号”机组开工,分别为中核集团福建福清5、6号机组和中广核广西防城港3、4号机组。在海外,巴基斯坦卡拉奇核电2、3号机组的进展与国内示范工程进程相当。

截至2018年底,中国在运核电机组达到46台,装机规模4280万kW,位列全球第3;中国在建核电机组共11台,总装机容量1098万kW,在建规模继续保持世界第一^[50]。

3 核退役进展

迄今为止,全球大约有250多座研究堆、110多座商业动力反应堆、100座铀矿冶设施、48座实验或原型反应堆和多个核燃料循环设施已停止运行,其中一些正在退役或已经被完全拆除^[51-52]。根据反应堆的设计寿命推测,全球预计将面临退役的反应堆有:2020—2030年约183座,2030—2040年约127座,2040年以后约89座。

根据国际原子能机构(IAEA)的有关建议,核设施的退役策略有3种:(1)立即拆除,在核设施安全关闭后尽快(一般在5年内)对部件和场址进行拆除和去污,适用于前处理核设施、后处理厂、核技术利用设施和中小型研究堆;(2)延缓拆除,将核设施在保证安全条件下封存若干年,待其放射性水平低至一定程度后再进行拆除工作,适用于核电站、生产堆和大型研究堆;(3)封固埋葬,把核设施整体或主要部分处置在其现在位置或核设施边界范围的地下,让其衰变到审管控制允许释放的水平,其实质是把核设施场址变成了近地表处置场。以上3种策略各有优缺点,不同的核设施,应根据设施类型、特性和放射性水平,优选退役策略。如对于反应堆的退役,特别是核电站的退役,由于反应堆的堆芯中包容着90%以上的放射性物质,并且大部分为短寿命核素,堆芯延缓拆除有利于减少工作人员的受照剂量,因此,优选延缓拆除;而对于核燃料循环的前段设施和后处理厂,由于污染核素的半衰期长,延缓拆除几十年对降低工作人员受照剂量来说受益不大,因此建议采用立即拆除。

全球核工业在退役多种类型核设施方面积累了不少经验。美国共有32座动力反应堆、16座实验/研究堆已经关闭,采用延缓拆除和立即拆除相结合的策略执行退役计划^[53]。美国核管会要求所有核电站停止服役关闭后,封存时间不超过60年。根据美国能源信息署的消息,位于新泽西州Forked River的费城以东50 km处的Oyster Creek核电厂于2018年9月17日正式退役^[54]。该电站为装机625 MW的单机通用电气沸水反应堆,于1969年12月1日首次上线,是美国现有最古老的商业核电站。

英国有29座反应堆已停止运行,其中25座是具有石墨调节剂的第一代Magnox堆。核设施的退役将产生大量的放射性废物,由于英国缺乏废物处置厂,因此核

电站退役采用延缓拆除策略,将Magnox堆封存100年后最终进行拆除^[53]。2018年7月2日,英国核退役管理局(NDA)宣布,NDA将于2019年接管镁诺克斯公司(Magnox Ltd.),加之前段时间NDA收回了塞拉菲尔德(Sellafield)的管理,这意味着NDA管理和控制了英国约85%的核退役和去污活动^[55]。2018年7月,英国Magnox核退役公司首次将蛇臂机器人Laser Snake用于激光切割英国温弗里斯(Winfrith)的Dragon反应堆强放射性堆芯(图7)^[56]。同时,英国林肯大学的计算机科学团队创造了机器学习算法,用以增加机器人在核科学技术几个关键领域的的能力,包括用机器人进行废物搬运、实施退役和场址监测等。这些机器人的使用使得核设施退役更加智能化。



图7 LaserSnake在Sellafield场址上的使用
Fig. 7 LaserSnake has already demonstrated its capability at Sellafield

法国已有9座核电站关闭,需要退役的反应堆(包括动力堆和实验堆)和核燃料循环设施采用局部拆除和全部拆除策略。针对游泳池式反应堆、核燃料循环工厂、用于燃料循环各工序中的设备及包装放射性产品用的热室,一般采用短期内全部拆除的策略;针对反应堆,短期内部分拆除,仅留反应堆堆芯作延缓拆除;针对厚度和性能不佳的材料或设备,宜尽快拆除。目前,法国电力公司(EDF)正在对比热伊、希农和圣洛朗3座核电厂的6座第一代石墨气冷堆进行退役,该退役工作将持续至2100年。2018年6月26日,法国电力公司(EDF)和法国威立雅公司(Veolia)签署合作协议,将开展核退役和废物管理合作,研发用于气冷堆拆解和放射性废物玻璃固化的远程控制(机器人)技术^[57]。同期,法国电力公司收购了Oreka系统公司,该公司专门

为核设施退役提供数字化3D模拟技术,可利用3D模拟、沉浸式和虚拟现实以及强大的计算代码,优化对核工业和核环境的维护、延寿、拆解等干预措施^[58]。

德国有34座研究堆、19座核电反应堆和原型核电堆以及12个核燃料循环设施永久关闭,其中22座研究堆已完全拆除,10座研究堆正在拆除或准备拆除,2座被安全封存^[53]。除了德国的Greifswald核电站采用延缓拆除策略外,核电站退役优选立即拆除方案,目前一些已退役的场址已经向公众完全开放。俄罗斯有6个民用反应堆正在退役,所采用的退役政策是退役一套机组、建一套新机组,即所谓的“计划生育”退役政策。日本有13个机组运行超过了设计寿命(30年),践行关闭后先封存5~10年后拆除的策略。目前,加拿大已完成2座研究堆的退役工作(分别位于达尔豪斯大学和阿尔伯塔大学)。2018年7月,加拿大坎杜能源公司(Candu Energy)获得Slowpoke-2研究堆退役合同,该研究堆于1981年投运,主要用于中子活化分析^[59]。2018年6月,瑞士米勒贝格核电厂获准退役,这是瑞士首座启动退役工作的核电厂。该核电厂于1972年投运,具有一座372 MWe沸水堆^[60]。

韩国的Kori 1号机组是其第一个商业核电站,由于其40年的延长运营许可证到期,于2017年6月永久关闭;除了该机组外,Kori还有5个核电厂,预计在2023年至2051年期间永久关闭^[61]。面对日益增长的核退役市场,韩国于2018年11月16日成立了由20家国营公用事业公司、建筑公司和智库组成的咨询机构(包括韩国水电和核电公司),启动了一项公私伙伴关系计划,涉及净化、反应堆拆除、废物处理和环境恢复技术,旨在培育核退役行业,为进入全球市场铺平道路^[62]。

尽管中国大陆正在如火如荼地新建核电站,但是早期运行的核电站也面临着延寿或退役。一方面,中国正在建立和完善核电厂运行许可延续方面的相关标准和技术政策,为核电厂延寿。秦山核电作为中国大陆第一座自主开发、自行设计、自行建造和运营管理的核电机组,其30万kW机组自1991年12月15日并网发电,设计寿命为30年。2017年12月20日,国家核安全局批准了秦山核电基地7台核电机组运行许可证续证的申请,秦山核电厂1号机组、秦山第二核电厂1~4号机组和秦山第三核电厂1、2号机组的运行许可证有效期分别延至2021年7月30日、2041年10月8日、2044年1月28日、2050年5月29日、2051年10月19日、2042

年7月17日、2043年3月15日^[63];这创建了国内核电站许可证延续的示范工程,也促进了中国核电机组运行许可证延续监管体系的建立。

另一方面,中国也在积极为核退役做政策和技术储备。2017年1月,由中国核动力研究设计院组织申报的四川省首个核设施退役及放射性废物治理工程实验室成立,主要研发核设施退役及三废治理方向的系统设计和设备集成、三废处理系统技术研发和工程实施、退役技术与工程实施、三废处理系统调试、运行、维护和退役专用设备,旨在掌握国际先进的核设施退役及废物治理核心技术^[64]。2017年12月26日,中核环保有限公司成立,主要业务为后处理厂和MOX燃料元件厂的科研、设计、建设和运行,核设施退役治理的技术研发、设计与实施,乏燃料等放射性物质运输、高中低放处置场的科研、设计、建设和运行等^[65]。2018年3月15日在北京召开了《核退役规范和技术交流会》,会议议题包括“核设施退役和核废料再处理,以及对环境安全长期处置的管制和法律框架(规则、规范、法律、制度)”“核反应堆(老化)的退役关键技术”“对长期储存中等和高放射性部分(包括转化,分离,“永久”处理,玻璃化)的控制,处理,处置和储存技术”“核潜艇(停靠在港口)与其核反应堆退役”。作为首届与德国企业进行的核退役技术研讨会,借鉴了德国在核设施退役领域的先进技术与经验,探讨了具有中国特色的核设施退役实施理论与方法^[66]。2018年10月26日,中国和乌克兰在山东青岛合作建立了中乌先楚核能科技有限公司总部及装备制造、新材料基地,重点对核设施退役和核废料处理两大领域的29项国际顶尖技术进行引进转化并形成自主知识产权,并培养核电退役领域人才,增强中国核能科技水平和核电退役竞争实力^[67]。

隶属于中国台湾电力公司的金山核电厂1号机组的运营许可证将于2018年12月到期,并在近几年开始退役工作;该核电厂的两座沸水堆(BWR)机组分别于1978年和1979年开始商业运营。由于乏燃料处置场未落实,金山核电厂的乏燃料将仍留在反应堆堆芯中,即反应堆堆芯和乏燃料池合并,在退役过程中作为乏燃料池进行管理^[68]。

4 结论

当前,全球核能电力与其他形式的新能源、水电

以及传统化石能源呈竞争态势。为了争取核能的可持续发展,维持可靠的安全性、燃料的高利用率以及良好的经济性成为核电发展的重要目标。2018年,第四代反应堆技术,包括次临界加速器驱动次临界系统、钍基熔盐堆、高温气冷堆等工程建设进展顺利。第三代反应堆 AP1000 与 EPR 均在 2018 年内建设完成并发电。核退役技术的研发和部署建立了中国核工业“规划-设计-建设-运营-退役”的完整产业链。能源结构转型中的核电发展存在地区性差异,但从全球范围看,核电仍有良好的发展潜力。

参考文献 (References)

- [1] 国际首台加速器驱动次临界系统(ADS)嬗变研究装置将开建[EB/OL]. [2018-05-10]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2018/4/407984.shtm>.
The world's first accelerator-driven subcritical system (ADS) metamorphosis research device will be built[EB/OL]. [2018-05-10]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2018/4/407984.shtm>.
- [2] 周兴彬, 赵永松, 方海涛, 等. 加速器驱动次临界系统核数据库 ANDL-ADS 的研发和初步测试[J]. 核技术, 2018, 41(3): 65-70.
Zhou Xingbin, Zhao Yongsong, Fang Haitao, et al. Development and preliminary test of data library ANDL-ADS for accelerator-driven systems[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(3): 65-70.
- [3] 岳军会, 吕朋辉, 曹建社, 等. ADS 注入器 I 束流相位及能量测量系统设计[J]. 核技术, 2018, 41(2): 35-41.
Yue Junhui, Lu Penghui, Cao Jianshe, et al. Beam phase and energy measurement system of ADS injector I[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(2): 35-41.
- [4] 李胜强, 谭铭, 张展博. 含黏性力最速降线问题的最优化解法及其在 ADS 设计中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(6): 563-569.
Li Shengqiang, Tan Ming, Zhang Zhanbo. An optimization method of brachistochrone problem with viscous friction and its application in ADS design[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2018, 58(6): 563-569.
- [5] 郑琪, 吴宏春, 李云召, 等. ADS 瞬态分析中的概率论-确定论耦合方法[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 132-138.
Zheng Qi, Wu Hongchun, Li Yunzhao, et al. Coupled stochastic-deterministic method for accelerator-driven subcritical system transient analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(1): 132-138.
- [6] 刘照青, 赵泽龙, 杨永伟, 等. ADS 中液态铅铋靶流动管道屏蔽计算[J]. 核技术, 2018, 41(3): 93-98.
Liu Zhaoqing, Zhao Zelong, Yang Yongwei, et al. Shielding calculation of LBE target flow pipeline in ADS[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(3): 93-98.
- [7] 梁淑红, 朱庆福, 史永谦, 等. 跳源法测量 ADS 启明星 II 号的次临界度及动态特性[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 302-306.
Liang Shuhong, Zhu Qingfu, Shi Yongqian, et al. Sub-critical reactivity and dynamic characteristic measured by Souce-Jerk method on VENUS-II[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(2): 302-306.
- [8] 王璠, 朱庆福, 陈效先, 等. 启明星 II 快中子能谱区裂变率分布研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(1): 107-111.
Wang Fan, Zhu Qingfu, Chen Xiaoxian, et al. Fission rate distribution research for Venus II fast neutron spectrum zone[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(1): 107-111.
- [9] 中国正引领全球熔盐堆研发技术可应用于高效储能[EB/OL]. [2019-01-10]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190107/9544-28.shtml>.
China is leading the R&D technology of the global molten salt reactor for efficient energy storage[EB/OL]. [2019-01-10]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190107/954428.shtml>.
- [10] 何越, 程懋松, 戴志敏. TMSR 云仿真平台初步设计与实现[J]. 核技术, 2018, 41(7): 79-86.
He Yue, Cheng Maosong, Dai Zhimin. Preliminary design and implementation of TMSR cloud simulation platform[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(7): 79-86.
- [11] 唐辉, 贺周同, 张灿, 等. 核石墨与熔盐相容性测试装置设计与实验[J]. 核技术, 2018, 41(7): 92-98.
Tang Hui, He Tongzhou, Zhang Can, et al. Equipment design and experiment of compatibility test of nuclear graphite and molten salt[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(7): 92-98.
- [12] 缪洪康, 陈玉爽, 吕刘帅, 等. 基于双向流固耦合的换热管流致振动分析[J]. 核技术, 2018, 41(5): 80-86.
Miao Hongkang, Chen Yushuang, Lü Liushuai, et al. Flow-induced vibration analysis of heat transfer tube based on two-way fluid-structure interaction[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(5): 80-86.
- [13] 程懋松, 林铭, 左献迪, 等. 基于指数变换的三维六角形节块法动力学程序开发及验证[J]. 核技术, 2018, 41(6): 85-94.
Cheng Maosong, Lin Ming, Zuo Xiandi, et al. Development and validation of a three-dimensional hexagonal nodal time-spatial kinetics code based on exponential transform[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(6): 85-94.
- [14] 朱帆, 伍建辉, 陈金根, 等. 棒状钍化钨慢化钍基熔盐堆中子学性能优化[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(9): 1656-1664.
Zhu Fan, Wu Jianhui, Chen Jingen, et al. Neutronic optimization

- tion of thorium molten salt reactor moderated by zirconium hydride rod[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(9): 1656-1664.
- [15] 庄坤, 曹良志, 汤晓斌. 基于MOREL2.0对石墨慢化熔盐堆的稳态分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(10): 1774-1779. Zhuang Kun, Cao Liangzhi, Tang Xiaobin. Steady analysis of graphite-moderator molten salt reactor based on MOREL 2.0 [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(10): 1774-1779.
- [16] 我国首座高温气冷堆示范工程进入燃料系统调试阶段[EB/OL]. [2018-10-12]. <http://news.sina.com.cn/c/2018-09-21/doc-ihkhfqt4053514.shtml>. China's first high-temperature gas-cooled reactor demonstration project entered the fuel system commissioning stage[EB/OL]. [2018-10-12]. <http://news.sina.com.cn/c/2018-09-21/doc-ihkhfqt4053514.shtml>.
- [17] 全球首台高温气冷堆蒸汽发生器问世[EB/OL]. [2018-12-13]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1615887475342099318&wfr=spider&for=pc>. The world's first steam generator of the high-temperature gas-cooled reactor came out[EB/OL]. [2018-12-13]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1615887475342099318&wfr=spider&for=pc>.
- [18] 朱光宇, 朱宏晔, 居怀明, 等. 高温气冷堆堆芯主动冷却过程动态分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 255-261. Zhu Guangyu, Zhu Hongye, Ju Huaiming, et al. Transient analysis of active cooling procedure of HTR reactor core[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(2): 255-261.
- [19] 李俊, 银华强, 何学东, 等. 高温气冷堆内含硼碳材料吸湿特性与扩散系数研究[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 622-626. Li Jun, Yin Huaqiang, He Xuedong, et al. Moisture absorption property and diffusion coefficient of carbon material with boron carbide in HTGR[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(4): 622-626.
- [20] 原越, 黄晓津. 高温气冷堆核蒸汽供应系统出口蒸汽温度的T-S模糊控制方法[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(4): 699-704. Yuan Yue, Huang Xiaojin. T-S fuzzy method for control of steam temperature of modular-HTGR-based nuclear steam supplying system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(4): 699-704.
- [21] “因美国新政,我和中国的核能项目黄了”[EB/OL]. [2019-01-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1621558832609771580&wfr=spider&for=pc>. Bill Gates' nuclear venture hits snag amid U.S. restrictions on China deals[EB/OL]. [2019-01-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1621558832609771580&wfr=spider&for=pc>.
- [22] 郑美银, 陈平, 李权, 等. 钠冷行波堆和驻波堆堆芯特性对比分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(3): 397-404. Zheng Meiyin, Chen Ping, Li Quan, et al. Contrastive analysis of core characteristics for sodium cooled traveling wave reactor and standing wave reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(3): 397-404.
- [23] 福建省霞浦县核电示范快堆工程土建开工[EB/OL]. [2018-02-05]. <http://www.china-nengyuan.com/news/118922.html>. Civil construction of the nuclear power demonstration fast reactor project started in Xiapu County, Fujian Province[EB/OL]. [2018-02-05]. <http://www.china-nengyuan.com/news/118922.html>.
- [24] 中俄最大核能合作签署框架合同 总价36亿美元[EB/OL]. [2018-07-15]. https://military.china.com/important/11132797/20180613/32519131_all.html#page_2. China-Russia largest nuclear energy cooperation signed framework contract with the total price of 3.6 billion US dollars[EB/OL]. [2018-07-15]. https://military.china.com/important/11132797/20180613/32519131_all.html#page_2.
- [25] 俄原子能集团将协助中方生产CFR-600快中子示范反应堆用核燃料[EB/OL]. [2018-12-15]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181030/937889.shtml>. Russian Atomic Energy Group will assist China in producing nuclear fuel for CFR-600 fast neutron demonstration reactor [EB/OL]. [2018-12-15]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181030/937889.shtml>.
- [26] 李淞, 杨红义, 周志伟, 等. 基于克里金方法的快堆燃料组件设计[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(7): 1288-1293. Li Song, Yang Hongyi, Zhou Zhiwei, et al. Design of fast reactor fuel assembly based on kriging method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(7): 1288-1293.
- [27] 张松梅, 张东辉. 钠冷快堆棒状燃料堆芯子通道分析程序开发及验证[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(2): 320-325. Zhang Songmei, Zhang Donghui. Development and verification of sub-channel analysis code for solid fuel core of sodium cooling fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(2): 320-325.
- [28] 尧俊, 张熙司, 胡文军, 等. 铅铋冷却快堆堵流事故下堵块参数对流动传热的影响[J]. 核技术, 2018, 41(2): 80-88. Yao Jun, Zhang Xisi, Hu Wenjun, et al. Effect of block parameter on fluid flow and heat transfer in LBE-cooled fast reactor under blockage accident[J]. Nuclear Techniques, 2018, 41(2): 80-88.
- [29] 叶尚尚, 杨红义, 刘一哲, 等. 钠冷快堆二回路系统热工水力瞬态分析程序SELTAC的开发与应用[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(6): 1013-1020. Ye Shangshang, Yang Hongyi, Liu Yizhe, et al. Development

- and application of transient analysis code SELTAC for secondary loop of sodium-cooled fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(6): 1013-1020.
- [30] 王晨香. 超临界水冷堆: 举旗国际前沿[J]. 中国核工业, 2018(2): 18-21.
Wang Chenxiang. Supercritical water cooled reactor: the frontier of the world[J]. China Nuclear Industry, 2018(2): 18-21.
- [31] 王为术, 侯彦亮, 徐维晖, 等. 超临界水冷堆类三角形子通道传热不均匀性研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(3): 33-39.
Wang Weishu, Hou Yanliang, Xu Weihui, et al. Investigation on nonuniformity of heat transfer in triangular subchannels of supercritical water cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(3): 33-39.
- [32] 周涛, 李兵, 齐实, 等. 模糊贴中度方法在超临界水堆换热关系式选择中应用[J]. 核技术, 2017, 40(12): 75-80.
Zhou Tao, Li Bing, Qi Shi, et al. Application of fuzzy nearness method in the selection of heat transfer relationship of supercritical water reactor[J]. Nuclear Techniques, 2017, 40(12): 75-80.
- [33] 周涛, 李子超, 陈杰, 等. 超临界水冷堆 CSR1000 恒压启动特性研究[J]. 核科学与工程, 2018, 38(4): 569-576.
Zhou Tao, Li Zichao, Chen Jie, et al. Study on the constant pressure startup characteristics of supercritical water-cooled reactor CSR1000[J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(4): 569-576.
- [34] 杜鑫, 邱庆刚, 丁雅倩, 等. 超临界水冷堆子通道中熵产行为数值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(8): 1290-1295.
Du Xin, Qiu Qinggang, Ding Yaqian, et al. Numerical research on entropy generation in a sub-channel of SCWR[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(8): 1290-1295.
- [35] 中国核能行业协会, 中国核能行业智库丛书第一卷[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2018.
China Nuclear Energy Industry Association. The first volume of the China Nuclear Energy Industry Think Tank Series[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2018.
- [36] Ryzhov S B, Mokhov V A, Nikitenko M P, et al. VVER-Type reactors of Russian design[M]. Cacuci D G. Handbook of Nuclear Engineering. Boston: Springer, 2010, 2249-2320.
- [37] 田湾 3 号机组具备商业运行条件[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180222/881240.shtml>.
Tianwan Unit 3 has commercial operating conditions[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180222/881240.shtml>.
- [38] 中俄最大核能合作项目 田湾核电二期工程按期投产[EB/OL]. [2019-01-02]. <https://news.sina.com.cn/o/2018-12-24/doc-ihmutuee2060483.shtml>.
- Sino-Russian largest nuclear energy cooperation project: Tianwan Nuclear Power Phase II project put into operation on schedule[EB/OL]. [2019-01-02]. <https://news.sina.com.cn/o/2018-12-24/doc-ihmutuee2060483.shtml>.
- [39] 中广核阳江核电 5 号机组具备商运条件[EB/OL]. [2019-01-02]. http://www.yjnp.com.cn/yjnp/c100603/2018-07/13/content_e5c8b233b1fd4af09e1a7a8a77200260.shtml.
The unit 5 of CGN Yangjiang nuclear power plant has commercial operating conditions[EB/OL]. [2019-01-02]. http://www.yjnp.com.cn/yjnp/c100603/2018-07/13/content_e5c8b233b1fd4af09e1a7a8a77200260.shtml.
- [40] 全球首台 AP1000 机组三门核电 1 号也并网发电了[EB/OL]. [2019-01-02]. https://www.jiemian.com/article/2273377_qq.html.
The unit 1 of world's first AP1000 Sanmen nuclear power plant is also connected to the grid to generate electricity[EB/OL]. [2019-01-02]. https://www.jiemian.com/article/2273377_qq.html.
- [41] AP1000 全球首堆三门核电 1 号机组具备商运条件[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.chinapower.com.cn/fdhyw/201809-21/123206.html>.
The unit 1 of world's first AP1000 Sanmen nuclear power plant has commercial operating conditions[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.chinapower.com.cn/fdhyw/20180921/123206.html>.
- [42] 三门核电一期工程建成投产 核电建设迎高峰[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181115/941844.shtml>.
The first phase of Sanmen Nuclear Power Project was completed and put into operation, and nuclear power construction ushered in a peak[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181115/941844.shtml>.
- [43] 改革开放 40 周年 三代核电发展历程[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181218/949903.shtml>.
The 40th anniversary of reform and opening up, and the development of three generations of nuclear power[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181218/949903.shtml>.
- [44] 山东核电有限公司简介[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.sdnpc.com/aboutus/companyinfo/index.html>.
The introduction of Shandong Nuclear Power Co., Ltd. [EB/OL]. [2019-01-02]. <http://www.sdnpc.com/aboutus/companyinfo/index.html>.
- [45] 海阳核电 1 号机组具备商运条件 业内关注核电审批进度[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/2018102-4/936504.shtml>.
The unit 1 of Haiyang nuclear power plant has commercial operating conditions, and the nuclear power industry is con-

- cerned about the progress of nuclear power approval[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181024/936504.shtml>.
- [46] Leverenz R. The EPR—A safe and competitive solution for future energy needs[C/OL]. [2018-12-31]. <http://www.nss.si/proc/port2006/pdf/0409.pdf>.
- [47] 官宣! EPR 全球首堆台山核电 1 号机组具备商运条件[EB/OL]. [2019-01-02]. http://www.tnpjvc.com.cn/tnpjvc/c102308/2018-12/15/content_0d6de7db61794cbab2069432fa14e04c.shtml.
- The unit 1 of world's first EPR Taishan nuclear power plant has commercial operating conditions[EB/OL]. [2019-01-02]. http://www.tnpjvc.com.cn/tnpjvc/c102308/2018-12/15/content_0d6de7db61794cbab2069432fa14e04c.shtml.
- [48] 核电行业深度报告: 千呼万唤始出来 核电重启终落地[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181120/942914.shtml>.
- In-depth report on the nuclear power industry: After a long wait, the nuclear power restarts[EB/OL]. [2019-01-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181120/942914.shtml>.
- [49] 国核示范电站有限责任公司[EB/OL]. [2019-01-10]. <http://www.sndp.com/page/gongsijianjie.html>.
- National Nuclear Demonstration Power Station Co., Ltd. [EB/OL]. [2019-01-10]. <http://www.sndp.com/page/gongsijianjie.html>.
- [50] 2018 年中国核能行业十大新闻[EB/OL]. [2019-01-03]. <http://www.china-nea.cn/site/content/35537.html>.
- Top Ten News of China's Nuclear Industry in 2018[EB/OL]. [2019-01-03]. <http://www.china-nea.cn/site/content/35537.html>.
- [51] Mostecak A, Bedekovic G. Metal waste management and recycling methods in the nuclear power plant decommissioning and dismantling process[J]. The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 2018, 33(1): 25-33.
- [52] 世界主要国家核设施退役情况概述[EB/OL]. [2017-06-10]. http://www.360doc.com/content/17/0610/00/36312979_661502333.shtml.
- Overview of the decommissioning of nuclear facilities in major countries of the world[EB/OL]. [2017-06-10]. http://www.360doc.com/content/17/0610/00/36312979_661502333.shtml.
- [53] 石磊, 李金英. 核设施退役产业全球经验探析[J]. 能源, 2018(7): 84-87.
- Shi Lei, Li Jinying. Analysis on the global experience of nuclear facilities decommissioning industry[J]. Energy, 2018(7): 84-87.
- [54] 美国新泽西州古董级核电站终于退役 完成退役过程需要 60 年! [EB/OL]. [2018-09-18]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180918/928623.shtml>.
- The antique nuclear power plant in New Jersey, USA, has finally retired, and it will take 60 years to complete the decommissioning process! [EB/OL]. [2018-09-18]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180918/928623.shtml>.
- [55] 戴定, 伍浩松. 英核退役管理局将接管镁诺克斯公司[J]. 国外核新闻, 2018(8): 10.
- Dai Ding, Wu Haosong. The UK Nuclear Decommissioning Authority will take over Magnox [J]. Foreign Nuclear News, 2018(8): 10.
- [56] Snake slithers through to tackle Dragon [EB/OL]. [2018-05-04]. <https://www.gov.uk/government/news/snake-slithers-through-to-tackle-dragon>.
- [57] 伍浩松, 张焰. 法电和威立雅开展退役和废物管理合作[J]. 国外核新闻, 2018(7): 26.
- Wu Haosong, Zhang Yan. France and Veolia carry out cooperation in decommissioning and waste management[J]. Foreign Nuclear News, 2018(7): 26.
- [58] 伍浩松, 张焰. 法电收购核设施退役 3D 模拟专业公司[J]. 国外核新闻, 2018(7): 26.
- Wu Haosong, Zhang Yan. EDF bought a 3D simulation Co., Ltd. for the decommissioning of nuclear facilities[J]. Foreign Nuclear News, 2018(7): 26.
- [59] 伍浩松, 戴定. 坎杜能源获得研究堆退役合同[J]. 国外核新闻, 2018(8): 20.
- Wu Haosong, Dai Ding. Candu Energy won the research reactor decommissioning contract[J]. Foreign Nuclear News, 2018(8): 20.
- [60] 伍浩松, 张焰. 瑞士米勒贝格核电厂获准退役[J]. 国外核新闻, 2018(7): 15.
- Wu Haosong, Zhang Yan. Swiss Millerberg nuclear power plant was approved for decommissioning[J]. Foreign Nuclear News, 2018(7): 15.
- [61] Seo H W, Sohn W, Jo K H. Proposal for the spent nuclear fuel management plan from the decommissioning of Kori site NPPs[J]. Annals of Nuclear Energy, 2018, 120: 749-762.
- [62] 韩国将在私营-公共伙伴关系下培育核退役工业[EB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.zggjzs.com/xinwen/0566e43daf854439a50e61f8456a068f.html>.
- South Korea will foster nuclear decommissioning industries under private-public partnerships[EB/OL]. [2018-11-22]. <http://www.zggjzs.com/xinwen/0566e43daf854439a50e61f8456a068f.html>.
- [63] 关于批准秦山核电基地 7 台核电机组运行许可证续证申请的通知[A/OL]. [2017-12-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171222_428467.htm.
- Notice on approving the application for renewal of 7 nuclear power plant operation permits of Qinshan nuclear power plant

- [A/OL]. [2017-12-20]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/haq/201712/t20171222_428467.htm.
- [64] 四川首个核退役及放废治理实验室落户动力院[EB/OL]. [2017-01-03]. http://192.168.73.130/www.sohu.com/a/123287071_313834.
Sichuan's first nuclear decommissioning and waste disposal laboratory settled in the Nuclear Power Institute of China[EB/OL]. [2017-01-03]. http://192.168.73.130/www.sohu.com/a/123287071_313834.
- [65] 胡春玫. 中国核环保产业: 打造具有国际竞争力的核环保企业[EB/OL]. [2018-10-09]. http://192.168.73.133/www.sohu.com/a/258463018_673510.
Hu C M. China's nuclear environmental protection industry: To create an internationally competitive nuclear environmental protection enterprise[EB/OL]. [2018-10-09]. http://192.168.73.133/www.sohu.com/a/258463018_673510.
- [66] 核退役规范和技术交流会顺利举办[EB/OL]. [2018-03-16]. <http://www.nestec.com.cn/newsitem/278172467>.
The specifications and technical exchanges of nuclear decommissioning were successfully held[EB/OL]. [2018-03-16]. <http://www.nestec.com.cn/newsitem/278172467>.
- [67] 中乌两国首个核设施退役和核废料处理合资公司总部落户青岛[EB/OL]. [2018-10-29]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181029/937278.shtml>.
China and Uzbekistan's first joint venture in the decommissioning of nuclear facilities and nuclear waste disposal settled in Qingdao[EB/OL]. [2018-10-29]. <http://news.bjx.com.cn/html/20181029/937278.shtml>.
- [68] Chen Y S. Thermal analysis for the integrated spent fuel pool of the Chinshan plant in the decommissioning process[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, 119: 163-174.

Hot spots of nuclear energy science and technology in 2018

YANG Jun, ZHU Donglai, WU Hsingtzu, WANG Beiqi, XU Lejin*

Department of Nuclear Engineering and Technology, School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract This paper summarizes the important research and engineering progress of nuclear energy science and technology in 2018, focusing on the latest developments in Generation IV reactors, construction of nuclear power plants, and decommissioning of nuclear facilities. The state quo shows that nuclear energy is still an important part of the global energy structure. With the development of new generation of nuclear power facilities and the deployment of nuclear decommissioning, this situation is expected to be further ensured.

Keywords nuclear energy; nuclear reactor; nuclear decommissioning; nuclear safety ●



(责任编辑 祝叶华)