

美国先进核能技术发展动态分析与启示

刘冬¹, 梁田², 宋辉², 梁田^{2*}

1. 上海交通大学先进技术与装备研究院, 上海 200240

2. 行之知识产权服务集团有限公司, 成都 610095

摘要 随着全球经济结构调整和核能产业的技术升级, 美国无论是从国家政策层面, 还是从具体的项目推进看, 先进核能技术都已成为其能源发展的必然选择。从法律法规、战略规划、科研经费和重大项目部署等方面, 梳理了美国近年来在先进核能领域所采取的一系列措施, 分析了美国为推动先进核能创新发展所采取的措施和办法, 为中国核能产业结构调整提供参考。

关键词 先进核能; 非轻水反应堆; 熔盐反应堆; 美国能源部; 战略规划

美国不仅是全球核电装机容量和核发电能力最大的国家, 还是先进反应堆技术的开发先驱。强大的先进反应堆技术, 不仅为美国经济健康发展和维持强有力的国际竞争力发挥了巨大的作用, 更为美国确保全球新一代核选项符合其国家安全目标具有重要意义。

研究表明^[1-2], 为了实现深度脱碳计划, 最具成本效益的方法是采用包括核电在内的技术组合。然而, 由于未来核电厂到期退役、运营成本增加、乏燃料处理滞后等原因, 美国核能力预计将在 2030 年前后下降^[3]。这将大大削弱美国在全球能源、环境、国家安全等领域中的影响力和竞争力。虽然新型轻水反应堆将缓解美国核能力下降风险, 但是由于在建“三代”核电遭遇基建成本和工程量大增, 以

及施工进度严重拖期等问题, 导致未来大量续建新的、大型轻水堆的前景“渺茫”。

根据美国能源部(Department of Energy, DOE)的描述^[3], 先进核能一般指第四代核反应堆, 主要包括高温气冷堆、钠冷快中子反应堆、熔盐堆、超临界水堆和铅冷快堆。由于先进核能具有更好的安全性、更强的经济竞争力、更高的资源利用率、更少的废物管理挑战等诸多优势, 能够与间歇性可再生能源相适应, 持续不断地为国民经济提供电力和热量供应, 因此被置于帮助美国实现更安全、更高效率的能源换代及核能可持续发展目标必要性的位置。

近年来, 美国政界、商界及外交领域领导人逐渐认识到, 先进核能作为未来能源基础设施, 继续创新“至关重要”, 需要成功开发并部署新一代非轻

收稿日期: 2020-06-13; 修回日期: 2021-12-25

作者简介: 刘冬, 助理研究员, 研究方向为高校科研管理, 电子信箱: liudong1028@sjtu.edu.cn; 梁田(通信作者), 高级知识产权师, 研究方向为知识产权情报, 电子信箱: 397446639@qq.com

引用格式: 刘冬, 梁田, 宋辉, 等. 美国先进核能技术发展动态分析与启示[J]. 科技导报, 2022, 40(23): 106-114; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.23.014

水先进反应堆以应对新的形势变化。于是,先进核能创新者通过参与国会听证、领导 DOE 和美国核管理委员会(Nuclear Regulatory Commission, NRC)工作组、积极参与清洁能源政策制定座谈会等举措,成为了影响美国能源战略决策的重要力量,更促使国会通过了前所未有的两党支持的先进反应堆立法。在资助研发方面,凭借持续加大的政府财政和社会投资,以美国能源部为首的先进核能研发力量,不断通过先进非轻水反应堆技术和燃料设计等领域的创新,在提高反应堆安全性的同时降低造价,努力提升核电的经济竞争力。总的来说,随着核能产业的技术升级,美国无论是从国家政策层面,还是从具体的项目推进看,先进核能都已成为其能源发展的必然选择。

1 美国政府顶层规划布局先进核能

1.1 发布多项先进核能相关法案及创新计划

近年来,美国核工业在国际核反应堆市场中的不佳表现以及中国、俄罗斯等国家在该领域的迅速崛起,让美国逐渐认识到,必须通过支持先进核能技术发展才能保持全球领导者地位,但这需要政策和资金支持。为此,多家政府咨询机构先后发布咨询报告^[4],强调先进核能的商业化可以为美国带来巨大利益,有利经济增长和竞争力、促进就业和保持美国在气候变化、安全等方面的全球领导地位,呼吁政府在加强投入的同时,积极推进国家先进核能创新体系改革。这些报告发布后,先进核能研究受到美国政府的高度关注。在 2015 年核能峰会上,美国能源部宣布启动“核能加速创新通道”(Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear, GAIN)计划。该计划旨在扶持核能创新领域的各类私营企业,使其更加快捷和广泛地获取国家实验室的相关资源和经验,推动先进核能研发和部署。

美国的能源政策尤其是核能政策也在随着领导人的更替而发生变化。着眼于未来的美国能源策略,美国总统特朗普提出“核能行业必须得以重视和振兴”^[5],并在美国能源部发表了主题为“能源主导权”的演讲^[6]。在演讲中,特朗普提出重振和扩

大核能部门。与此同时,美国能源部前部长里克·佩里表示,美国对清洁能源的投资组合中必然包括核能^[7],将会安全、计划详尽并且经济地发展核能。同时,美国需要确保自身在技术上和经济上继续发展核能,美国政府正将注意力集中在一些新型的、低成本的核能技术上^[6]。另外,白宫科技政策办公室(Office of Science and Technology Policy, OSTP)也发布报告强调核能创新发展是特朗普政府在能源领域取得的最大成就^[8]。其中包括:对美国核能政策进行的“全面审查”;宣布美国国家实验室承包商可以使用商业化技术协议来促进与国家实验室建立新的战略伙伴关系;恢复爱达荷国家实验室的瞬态反应堆测试设施(Transient Reactor Test, TREAT)的国内核试验设施地位。2022 年 2 月,拜登政府对 2020 年 10 月 15 日发布的《关键和新兴技术国家战略》(National Strategy for Critical and Emerging Technology)进行了更新,增加了包括先进核能技术在内的多项关键技术,反映出拜登政府推进美国在先进核能技术领域开展支持国家安全任务的技术开发研究和争夺国际人才的意图。在国家发展政策方面,美国国会积极参与到支持先进核能的行动中来^[9],迅速通过了《核能创新能力法》(S. 97)、《先进核能技术发展法》(S. 1457)、《能源部创新法》(H.R. 589)和《两党核能税法》。其中,《核能创新能力法》不仅授权开发用于测试先进反应堆燃料和相关材料所需的快中子多功能反应堆,还授权建立国家反应堆创新中心,以建造实验反应堆并提供 DOE 和 NRC 之间的技术信息和专业知识共享,加快 NRC 对先进核能设计的审批许可。《先进核能技术发展法》则指导 DOE 与私营企业达成协议,在 2028 年秋季之前,至少开展 4 个先进核反应堆示范项目。

在资金支持方面,美国国会通过参议院和白宫划拨相应经费^[10],用于加强国立科研机构对先进核能的研发强度、加大对推动相关标准法规及先进反应堆商业化的支持力度。通过加大公共研发投入,有助于促进下一代核反应堆技术的发展,推动像 NuScale 公司生产的小型、经济型小型模块核电站的商业化,使核能设施更便宜、更安全、更容易建

造,以及为美国创造更多就业机会。

通过美国政府为先进核能开发和最终部署所制定的一系列顶层规划,可以看出美国政府对这些创新性技术的深度支持纵贯了整个美国社会。

1.2 通过国家级战略规划对先进核能发展进行具体安排

几十年来,美国能源规划者一直设想将建立在轻水反应堆基础上的美国电网转向非轻水反应堆设计^[11-13](采用氦气、熔融金属或熔盐等冷却剂的反应堆)和标准化的工厂制造系统,以克服轻水反应堆在成本、安全以及核废料等领域的挑战。

近年来,随着美国政府不断加大先进核能的顶层规划,以DOE为首的先进核能规划机构制定了一系列具体推进步骤,以确保美国先进核能的国家部署能够得到的顺利实施。

2016年下半年,美国核能研究所(Nuclear Energy Institute, NEI)、美国核能创新联盟(Nuclear Innovation Alliance, NIA)和美国电力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)先后发布了《先进非轻水堆(non-light water reactors)开发与商业化战略规划》^[14]、《核能创新:先进反应堆许可战略》^[15]和《技术创新计划:先进反应堆业主要求 ORD 范围研究》^[16]3份战略规划,制定了先进非轻水堆开发的长期发展规划和目标。预计2030—2035年,美国至少有2台先进非轻水堆实现商业化或者筹建;到2025年,至少实现1台先进非轻水堆示范;制定许可框架促进先进核能技术的有效、按时部署,鼓励民营企业进行投资。

随后,DOE发布了《先进反应堆开发与部署愿景和战略》^[3],表示有充分的理由相信,先进非轻水堆与新的大型反应堆和新型模块式小堆(small modular reactor, SMR)一起,将能提供可靠、安全、清洁的能源。随着老电厂退役以及经济扩展创造的额外能源需求,将来需要许多核能发电选项。DOE表示“将支持开发和部署先进堆,作为未来核能发电的有生命力的资源”。这份文件清晰表达了DOE加速部署先进堆的愿景和战略,即在2030年代初期批准并准备建设2个先进堆概念,以此作为战略部署的第一阶段。DOE制定的这份愿景和目

标报告,作为美国对清洁能源和国家安全广泛承诺的重要组成部分,以支持先进反应堆技术的开发和部署。先进反应堆概念相对于现有的轻水堆技术,在加强安全性、削减成本、提高资源利用率、减少废物管理面临的挑战、为工业企业提供工业热源、提高防核扩散能力以及简化运行操作方面,有巨大的潜在优势。在先进反应堆技术的发展中,美国可以通过展示领导作用、研发新的核能技术选项从而为全球能源需求提供有力支撑,并同时达成美国的国际安全目标。

由于现有监管框架是以轻水堆为中心的,无法对私人投资和创新提供明确的反馈,因此,NRC近年来积极推进先进核能项目分阶段执照申请、审批流程和相关法律法规标准的制定工作^[17]。2017年以来,NRC不仅完成了NuScale公司设计执照申请的第一阶段审查工作^[18],还发布了《开发非轻水反应堆主要设计标准指南》,描述了如何将NRC条例中规定的通用设计标准(General Design Criterion, GDC)应用于非轻水反应堆设计,为先进反应堆设计人员进行执照申请提供参考。总的来看,美国为先进核能发展所制定的战略规划,通过对不同新型概念堆的支持,有助于展示有更多的资金可推进先进反应堆概念设计,表明先进堆正在做出有生命力的进展,从而能够满足美国清洁能源的需求。

1.3 不断加码资助先进核能研发

美国认为针对先进核能的早期政府技术投资,将对其现在和未来强大的国内产业形成支持,是确保美国继续受益于这种清洁、有弹性的电力来源的重要一步。近年来,美国政府不断通过各种渠道多次对国立研究机构和非轻水先进核能研究项目进行资助。

2017年,DOE宣布将在先进核能研究、设备准入、交叉技术开发以及基础设施建设方面投资6600万美元^[19]。这笔经费将为美国的核能大学项目(Nuclear Energy University Program, NEUP)、核科学用户设施(Nuclear Science User Facilities, NSUF)、核能使能技术项目(Nuclear Energy Enabling Technologies, NEET)以及其他满足GAIN计划的项目研究提供相应的资金援助,旨在维护美国

在核能领域的领导地位。

2018年,为了继续从先进核能研发中受益,美国再次加码先进核能研发,多次为若干国家实验室、公司和大学提供经费支持。其中,“美国先进核能技术发展的工业机遇”资金项目招标声明(Funding Opportunity Announcement, FOA),对13个先进核能研发项目资助大约6000万美元^[20]。先进能源研究计划(Advanced Research Projects Agency-Energy, ARPA-E)框架下的建模强化创新开拓性核能振兴计划^[21](Modeling-Enhanced Innovations Trailblazing Nuclear Energy Reinvigoration, MEITNER),对10个项目提供总额为2400万美元的资金支持,研究内容包括一体化熔盐堆、可运输的高温气冷堆、反应堆负荷跟踪、安全性提升与降低成本等。NEUP项目则向若干国家实验室、公司和大学发放近6400万美元的先进核能技术奖励资金^[22]。

除了为国立研究机构提供资助外,美国能源部在2018年5月宣布,将通过小型商业创新研究和小型商业技术转让计划^[23],向41个州的183家小型企业提供共计3400万美元的补助款,用于第一阶段的研究推动任务创新(表1)。

表1 2018年美国政府对熔盐堆研究的部分资助情况

经费来源	资助对象	研究内容	资助金额/ 万美元
FOA	Elysium Industries 公司	计算流体力学模型,该模型将用于模拟和优化其熔融氯盐快堆压力壳和热交换器中的氯化物熔盐燃料的流动	320
ARPA-E	Terrestrial Energy USA	一体化熔盐堆磁悬浮转子泵研制	315
ARPA-E	黄石能源公司	熔盐堆非能动安全技术	260
ARPA-E	伊利诺伊大学厄本那香槟分校	使熔盐堆能够在电力需求减少期间降低其输出的燃料处理系统	77
NEUP	宾夕法尼亚州立大学	通过将稀土产品转化为无氯的稀土氧化物来帮助熔融盐的循环利用,这种氧化物可以加入到传统的玻璃/陶瓷废料中	80
NEUP	田纳西大学	为液态燃料熔盐堆(MSR)系统开发一个可切换质量流量的模块工具箱,用于评估材料控制和计量技术	79.9207
NEUP	田纳西大学	通过互补的合成、光谱和建模研究熔盐堆相关的熔盐化学	80
NEUP	北卡罗来纳州立大学	目标是缩小由热中子驱动的先进核反应堆的核数据差距,包括诸如高温气冷堆和熔盐堆等	39.8821
NEUP	佐治亚理工学院	测试低铬合金以及新开发的合金在流动条件下的基本腐蚀数据	80
NEUP	佐治亚理工学院	开发一种高保真连续能量(CE)传输工具,用于在具有棱形芯/燃料组件设计的氟盐冷却高温反应堆中进行高效瞬态计算	80
NEUP	麻省理工学院	研究熔盐的分子学和动力学结构,为熔盐堆的设计提供帮助	80
NEUP	康涅狄格大学	研究将使用 XAFS 光谱和拉曼光谱,在相关温度下测量氟盐和氟盐(7Li, UF4)原子和分子尺度上的信息,并开发现场监测手段	79.9979
NEUP	威斯康星大学麦迪逊分校	开发用于未来熔盐堆中熔盐环境下的结构材料的耐腐蚀涂层和衬垫	80
NEUP	威斯康星大学麦迪逊分校	开发和评估用于熔盐堆(MSRs)结构部件的特殊先进金属合金	79.6792
NEUP	弗吉尼亚理工学院暨州立大学	研究 TRISO 燃料在意外空气和水蒸气进入条件下的氧化行为	80

注:根据参考文献[20-22]整理。

据统计,1998—2015年,DOE平均每年只有约15%的预算用于先进核能研发和部署^[24],但随着2016—2018年DOE大幅增加该领域投资,2019年先进核能的总经费达总额的24.4%。2020—2021年的先进核能总经费虽然有所下降,但仍保持在15%以上(图1)。

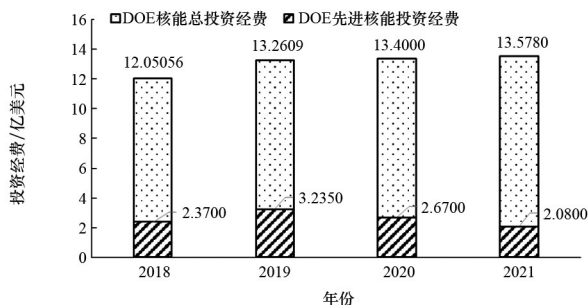


图1 2016—2018年DOE先进核能经费年度变化

综上所述,为了将投资效益最大化,美国政府不仅通过加大公共研发投入,积极推进综合性示范项目,还采用多样化的政府资助形式,与核工业界共同致力于技术研发和人才培养,以满足未来先进核工业领域的人才需求。

2 美国科学界积极推进先进核能研究

除了美国政府的公共研发投入外,阿贡、爱达荷和橡树岭3个国家实验室积极通过自有经费持续推进先进核能基础技术研发,成为美国先进非轻水反应堆研究的摇篮。据统计,2004—2015年,美国五大非轻水实验室利用自有经费为先进反应堆研发投资了4700万美元^[24]。

在橡树岭国家实验室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL), 1/3的先进堆项目集中在熔盐技术方向^[24]。在熔盐技术方向,为了帮助美国先进核工业界推进下一代熔盐堆设计,ORNL在2018年上半年成立了熔盐净化实验室^[25]。该实验室通过将含有氟化锂和氟化铍的液态盐(称为FLiBe)用于熔盐反应堆冷却的可行性研究,不仅为多家先进反应堆技术公司提供FLiBe熔盐制造和纯化技术、装备和腐蚀测试,还在乏燃料处理研究方向设计并合成了一种选择性分子捕获器,可以将镅从镅钚(钚作为镅系元素实验模型)混合物中分离出来^[26],有助于减少并更好地管理乏燃料。

在爱达荷国家实验室(Idaho National Laboratory, INL), 1/4的先进反应堆项目集中在气冷反应堆

和先进燃料方向^[24]。在先进核燃料方向,INL不仅利用先进试验堆(advanced test reactor, ATR)完成了法马通事故耐受燃料(accident-tolerant fuel, ATF)^[27]的辐照试验,还根据《先进反应堆开发与部署愿景和战略》于2017年11月重启了核燃料和材料实验的TREAT设施^[28]。INL还与民用放射性废物管理办公室一起,在编制尤卡山高放废物处置的规程方面,发挥了重要作用。

在阿贡国家实验室(Argonne National Laboratory, ANL), 1/2先进反应堆项目致力于钠冷却快堆及其燃料循环研究^[24]。2017年以来,ANL在GAIN计划的资金支持下,在物理、建模、分析、集群计算和编程方面与6家企业共同开展包括熔盐堆在内的先进反应堆设计分析研究^[29]。

此外,为了帮助美国能源部及其承包商制定运行玻璃固化厂的计划,美国西北太平洋国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)放射化学处理实验室的研究人员在2018年开展了一次实验室规模的放射性废物玻璃固化处理测试^[30]。此次玻璃固化测试使用了PNNL设计的试验平台对汉福德正在建造的直接进料低放射性废物处理系统(Direct Feed Low-Activity Waste system, DFLAW)所使用的关键工艺进行的模拟测试,为最终处理数百万加仑有害废物奠定了基础。

除了国立科研机构以外,美国各大高校和NASA也积极开展先进核能研究。麻省理工学院核反应堆实验室正尝试设计一座小型的、可移动的熔盐冷却型反应堆(Jump-Start Advanced-Reactor, JSAR)^[31],用于为偏远的村庄或工厂提供电力。NASA则计划开始对被称为“Kilopower”的核发动机进行测试^[32],这或许将为宇航员登陆火星并在火星表面开展任务提供能源。

总的来看,为了保证美国核能产业的未来,美国国立科研机构和高校正在逐步加大先进核能创新体系的改革力度,持续推进对不同先进反应堆技术研发,通过建立新的公私合作机制,支持私营部门的创新,加快先进核反应堆设计的商业化进程。

3 美国工业界积极推进先进核能商业化部署

从初创公司到传统大型公司,美国核工业界对先进核能开发显示出越来越浓厚的兴趣。全美共有48家研究机构或公司^[4]正在致力于包括熔盐堆、液态金属冷却堆和高温气冷堆等先进反应堆设计。同时,在以突破能源联盟(Breakthrough Energy Coalition)和任务创新(Mission Innovation)为代表的社会创新资本的努力下,美国先进核能领域的私募投资多达13亿美元^[4],为潜在颠覆性技术的早期研发提供资金支持。

为了抢占未来市场,美国核工业界近年来积极推进各类先进核反应堆商业化部署。X-energy公司在行业专家外部评估小组进行审查评估后,宣布开始其Xe-100高温气冷球床模块化反应堆的概念设计工作^[31],并计划在10年内部署Xe-100反应堆。霍尔台克公司(Holtec International)则在GAIN计划的支持下,积极推进与ORNL合作开发SMR-160自然循环一次侧流动仿真发动机的研发工作^[34]。西屋公司则在经历破产重组后,表示前期开展的“耐事故燃料方案——EnCore燃料”取得成功^[35]。美国拜伦2号机组已于2019年装入EnCore先导组件,并在2020年秋季计划停运期间完成运行周期后拆除。2021年6月,它们由美国NAC国际公司(NAC International)运往橡树岭国家实验室,后者将开展辐照后检测,以支持美国核管会(NRC)对EnCore燃料进行许可证评审。初步测试结果显示,燃料从反应堆中取出后没有任何质量下降迹象。首个提交SMR设计认证申请的NuScale公司,在2017年完成了5项关于SMR非电力应用的研究^[36]。这些研究包括:淡化海水,提供清洁的水;燃料和化学原料的氢气生产;通过减少炼油厂的碳排放来提供清洁的空气;将NuScale核电与风电场联合应用;向某些特定领域或设施提供可靠能源的可能性。陆地能源公司和西北能源公司,签署了关于在INL就IMSR(Integral Molten Salt Reactor)反应堆的可能选址、建造和运行的谅解备忘录^[37]。陆地能源希望IMSR可以在21世纪20年代投入市场,并开始对

在加拿大国家核实验室乔克河场址的商用IMSR选址进行可行性研究。此外,IMSR反应堆设计已经完成了加拿大核管会供应商设计审查的第一阶段。

总的来看,在美国电力市场强烈需求的刺激下,美国先进核工业界通过若干核工程计划,充分利用发达的风险投资和国家实验室的创新资源,不断采用更具颠覆性的设计推动市场发展。

4 启示

通过对近年来美国先进核能发展热点事件的回顾,可以发现:充分公平的竞争环境、良好的市场预期以及精心设计和有针对性的政府资助,正迅速改变着美国先进核能的发展进程,并对整个核能产业产生着积极的影响。

1) 公共研发投入与社会风险投资相结合。

美国先进核能领域的研发投资方向取决于技术、市场和政治因素。市场可以决定政府的注意力应该放在哪里,哪些技术应该被优先考虑。然而,由于市场较关注短期,技术判断在确定更根本的研发优先次序方面也很重要。此外,受到美国政治体制的影响,政府公共研发投入规模和可持续性还取决于党派政治、组织惯性和人际关系等因素。然而,通过将长期公共研发投入和发达的风险资本投资相结合,即使近年来美国核工业发展略显萧条,但仍能在先进核能技术领域保持领先地位。

2) 广泛支持先进堆示范工程项目。

美国目前对熔盐堆、液态金属冷却堆和高温气冷堆等先进堆的示范项目提供了广泛的支持,其目的不仅在于通过解决特定的技术问题展示先进堆的性能,从而减少技术风险,推进概念的成熟度,还在于展示有更多的资金可用于推进特定的概念,同时也表明先进核能正在做出有生命力的进展,能够满足国家清洁能源的需求。

3) 大力促进公私合作机制的建立。

通过下一代核电机组(Next Generation Nuclear Plant, NGNP)、GAIN等国家核工程计划,美国不仅建立了新的公私合作机制,提高了私营部门使用国家创新资源的能力,加速了先进堆设计从概念到

实现商业化的进展,还有助于识别潜在的政府投资机会,有助于先进反应堆的概念设计创新。此外,通过新的公私合作机制可与其清洁能源投资主体合作,探索其他适当的激励措施,以支持先进堆部署。

综上所述,美国政府不仅通过加大资金支持,降低了技术先行者的金融风险、加速了先进反应堆商业化并保持了国家竞争力,还通过创新公私伙伴关系,不断加强美国在先进核能领域的领导地位,并通过优化研究、测试和示范部署的创新路径,使先进核能技术得以逐步成熟。美国近年来为先进核能发展所实施的诸多有力措施,不仅代表其核创新政策的巨大变化,更展示了美国为推动先进核能创新发展所寻求的有效途径。

参考文献(References)

- [1] Lester R K. A roadmap for U.S. nuclear energy innovation [J]. *Issues in Science and Technology*, 2016, 32(2): 7-18.
- [2] Dickenson B, Sharp P. The future of the U.S. electricity sector[M]. Washington D C: The Aspen Institute, 2013.
- [3] Office of Nuclear Energy. Vision and Strategy for the development and deployment of advanced reactors[EB/OL]. (2016-05-27) [2021-12-11]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/02/f34/71160%20VISION%20%20STRATEGY%202017%20FINAL.pdf>.
- [4] Third Way. The advanced nuclear industry[EB/OL]. (2015-06-15)[2021-12-11]. <https://www.thirdway.org/report/the-advanced-nuclear-industry>.
- [5] 特朗普推能源新政 振兴核能成主题[EB/OL]. (2017-06-30)[2021-12-11]. <http://www.chnfund.com/article/AR-13453219>.
- [6] 杨漾, 张静. 特朗普宣布能源新政: 重振核电, 把煤炭卖给全球有需求的国家[EB/OL]. 澎湃新闻. (2017-07-01) [2021-12-11]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1722545.
- [7] 美能源部长: 退《巴黎协定》不妨碍中美清洁能源合作[EB/OL]. (2017-06-13) [2021-12-11]. http://www.sohu.com/a/148509811_559378.
- [8] World Nuclear News. White House report highlights nuclear achievements[EB/OL]. (2018-03-09) [2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/NP-White-House-report-highlights-nuclear-achievements-0903187.html>.
- [9] Thaddeus S. Congress Passes bill to advance American nuclear innovation[EB/OL]. (2018-09-13) [2021-12-11]. <https://www.nei.org/news/2018/congress-passes-bill-to-advance-american-nuclear>.
- [10] Robbie H. Senate shows bipartisan support for nuclear energy in 2019 budget[EB/OL]. (2018-06-26) [2021-12-11]. <https://www.nei.org/news/2018/senate-bipartisan-support-nuclear-energy-budget>.
- [11] OECD, Nuclear Energy Agency. Strategic and policy issues raised by the transition from thermal to fast nuclear systems[EB/OL]. (2009-04-07) [2021-12-11]. https://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/strategic-and-policy-issues-raised-by-the-transition-from-thermal-to-fast-nuclear-systems_9789264060654-en.
- [12] Assembly of Engineering of the National Research Council. Interim report of the National Research Council Committee on nuclear and alternative energy systems [M]. Washington D C: National Academies of Science, 1977.
- [13] National Research Council. Energy in Transition, 1985-2010: Final report of the committee on nuclear and alternative energy systems[M]. Washington D C: The National Academies Press, 1980.
- [14] Nuclear Energy Institute. The US Nuclear Energy Industry's strategic plan for advanced non-light water reactor development and commercialization[EB/OL]. [2021-12-11]. <https://www.nei.org/CorporateSite/media/filefolder/resources/reports-and-briefs/advanced-reactor-strategic-plan-201605.pdf>.
- [15] Nuclear Innovation Alliance. Experts call for regulatory changes to enable advanced nuclear reactor innovation [EB/OL]. (2016-04-12)[2021-12-11]. <http://www.nuclearinnovationalliance.org/single-post/2016/04/12/Experts-Call-for-Regulatory-Changes-to-Enable-Advanced-Nuclear-Reactor-Innovation>.
- [16] EPRI. Program on technology innovation: Scoping study for an owner-operator requirements document (ORD) for advanced reactors[EB/OL]. (2016-09-30) [2021-12-11]. <https://www.epri.com/#/pages/product/000000003002008-041/?lang=en-US>.
- [17] NRC. Advanced Reactors (non-LWR designs)[EB/OL]. (2021-12-11) [2021-12-11]. <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced.html>.
- [18] NuScale Power. NuScale power's small modular nuclear reactor becomes first ever to complete nuclear regulatory commission's phase 1 review[EB/OL]. (2018-04-30) [2021-12-11]. <http://newsroom.nuscalepower.com/press->

- release/company/nuscale-powers-small-modular-nuclear-reactor-becomes-first-ever-complete-nucle.
- [19] Nuclear Energy University Program. Department of energy awards over \$66 Million to advance nuclear technology[EB/OL]. (2017-06-14)[2021-12-11]. <https://neup.inl.gov/Lists/Headlines/AnnouncementDispForm.aspx?ID=1-57>.
- [20] Department of Energy. Secretary of energy Rick Perry announces \$60 million for U.S. industry awards in support of advanced nuclear technology development', department of energy[EB/OL]. (2018-04-27) [2021-12-11]. <https://www.energy.gov/articles/secretary-energy-rick-perry-announces-60-million-us-industry-awards-support-advanced>.
- [21] Department of Energy. Department of energy announces 10 projects to support advanced nuclear reactor power plants[EB/OL]. (2018-06-04)[2021-12-11]. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-announces-10-projects-support-advanced-nuclear-reactor-power-plants>.
- [22] Department of Energy. Department of energy invests \$64 million in advanced nuclear technology[EB/OL]. (2018-06-18)[2021-12-11]. <https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-64-million-advanced-nuclear-technology>.
- [23] Department of Energy. The U. S. Department of energy announces \$34 million for small business research and development Grants', department of energy[EB/OL]. (2018-05-21)[2021-12-11]. <https://www.energy.gov/articles/u-s-department-energy-announces-34-million-small-business-research-and-development-grants>.
- [24] Abdulla A, Ford M J, Morgan M G, et al. A retrospective analysis of funding and focus in US advanced fission innovation[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(8): 084016.
- [25] Ellis J. Nuclear—pass the salt[EB/OL]. (2018-05-30) [2021-12-11]. <https://www.ornl.gov/news/nuclear-pass-salt>.
- [26] Levy D. Exceptionally efficient extraction may improve management of nuclear fuel[EB/OL]. (2018-03-29) [2021-12-11]. <https://phys.org/news/2018-03-exceptionally-efficient-nuclear-fuel.html>.
- [27] World Nuclear News. Tests begin on Framatome accident-tolerant fuel[EB/OL]. (2018-06-18) [2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/UF-Tests-begin-on-Framatome-accident-tolerant-fuel-1806187.html>.
- [28] World Nuclear News. US test reactor resumes operations[EB/OL]. (2017-11-16)[2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-test-reactor-resumes-operations>.
- [29] Argonne National Laboratory. Small businesses to GAIN from Argonne nuclear expertise[EB/OL]. (2017-09-15) [2021-12-11]. <https://www.anl.gov/article/small-businesses-to-gain-from-argonne-nuclear-expertise>.
- [30] Susan Bauer. PNNL successfully vitrifies three gallons of radioactive tank waste[EB/OL]. (2018-05-16)[2021-12-11]. <https://www.pnnl.gov/news/release.aspx?id=4508>.
- [31] James T. MIT's Nuclear Lab has an unusual plan to jump-start advanced-reactor research[EB/OL]. (2017-05-27)[2021-12-11]. <https://www.technologyreview.com/s/603963/mits-nuclear-lab-has-an-unusual-plan-to-jump-start-advanced-reactor-research/?set=603987>.
- [32] Anderson G, Wittry J. Demonstration proves nuclear fission system can provide space exploration power[EB/OL]. (2018-05-21)[2021-12-11]. <https://www.nasa.gov/press-release/demonstration-proves-nuclear-fission-system-can-provide-space-exploration-power>.
- [33] World Nuclear News. Xe-100 HTGR moves to conceptual design[EB/OL]. (2017-03-17) [2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/Articles/Xe-100-HTGR-moves-to-conceptual-design>.
- [34] Nuclear Engineering International. US DOE support for Holtec's SMR[EB/OL]. (2017-08-26) [2021-12-11]. <http://www.neimagazine.com/news/newsus-doe-support-for-holtecs-smr-5909342>.
- [35] World Nuclear News. Westinghouse launches its EnCore Fuel[EB/OL]. (2017-06-14) [2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/UF-Westinghouse-launches-its-EnCore-Fuel-14061702.html>.
- [36] World Nuclear News. NuScale highlights non-power uses of its SMR[EB/OL]. (2017-09-19)[2021-12-11]. <http://www.world-nuclear-news.org/NN-NuScale-highlights-non-power-uses-of-its-SMR-1909174.html>.
- [37] 多企合作推进在美建设一体化熔盐堆[EB/OL]. (2018-04-16)[2021-12-11]. http://www.atominfo.com.cn/hxx-gy-hxx_info.aspx?url=3705.

Analysis of American advanced nuclear energy development and its enlightenment

LIU Dong¹, LIANG Tian², SONG Hui², LIANG Tian^{2*}

1. Research Institute of Advanced Technology and Equipment of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

2. Xingzhi Intellectual Property Group, Chengdu 610095, China

Abstract With global economic restructuring and upgrading of nuclear industrial technology, the advanced nuclear energy technology has already become the inevitable choice of American in terms of national policy and project. This study reviews USA's series of measures of advanced nuclear energy industry and briefly analyzes those measures and methods for US government to promote advanced nuclear energy technological innovation. The paper provides instructive suggestions for China's adjustment of nuclear energy industrial structure.

Keywords advanced nuclear energy; non-light water reactors; molten salt reactors; US Department of Energy; strategy planning



(责任编辑 傅雪)