

# 新质生产力推动核电高质量发展的实践路径研究

叶奇蓁<sup>1</sup>, 苏罡<sup>2</sup>, 黄文<sup>3</sup>, 赵万广<sup>4</sup>, 阮天玥<sup>2</sup>, 熊凯<sup>2</sup>, 林贤军<sup>5</sup>

1. 中国核工业集团有限公司, 北京 100822
2. 中国核电工程有限公司, 北京 100840
3. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048
4. 中国工程物理研究院, 北京 100088
5. 苏州热工程研究院有限公司, 苏州 215004

**摘要** 作为国家重点培育的高科技战略性新兴产业, 核电产业长期坚持安全发展、创新发展, 在实践中已初步形成新质生产力; 面对新发展阶段, 核电行业需要加强新质生产力驱动, 积极构建现代化产业体系, 推进实现高质量发展。基于国内外核电产业发展趋势分析, 介绍了中国核电产业已初步具备的新质生产力发展特征和基础; 并结合学术界对新质生产力理论的研究成果, 提出当前应积极发挥新科技和大数据两大新型生产要素对生产力的倍增效应, 培育和发展核电新质生产力; 同时挖掘核电全要素“创新”的要义, 提出以更多的原始创新、集成创新和系统创新, 推动实现核电数字化转型变革以及“催生新产业、新模式、新动能”3个方面的实践路径推进核电高质量发展。

**关键词** 新质生产力; 核电高质量发展; 核电; 战略性新兴产业

2023年7月以来, 习近平总书记在四川、黑龙江、浙江和广西等多地考察调研期间, 提出“积极培育新能源、新材料、先进制造、电子信息等战略性新兴产业, 积极培育未来产业, 加快形成新质生产力, 增强发展新动能”。2023年12月, 习近平总书记在中央经济工作会议中提出“要以科技创新推动产业

创新, 特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能, 发展新质生产力”。2024年1月, 习近平总书记在二十届中央政治局第十一次集体学习时, 更是总结性指出新质生产力是“具有高科技、高效能、高质量特征, 符合新发展理念的先进生产力质态”。发展新质生产力, 是马克思主义生

收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-06-01

基金项目: 中国工程院咨询项目(2022-JB-05-03)

作者简介: 叶奇蓁, 中国工程院院士, 研究方向为反应堆技术及核能战略, 电子信箱: gang\_su@126.com

引用格式: 叶奇蓁, 苏罡, 黄文, 等. 新质生产力推动核电高质量发展的实践路径研究[J]. 科技导报, 2024, 42(12): 17-26;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.06.00689

产力理论在新时期中国的新实践和新飞跃,是以习近平同志为核心的党中央站在党和国家事业发展高度,对中国未来生产力发展模式和路径提出的全局性和高层次要求。

能源是人类赖以生存的基本条件,也是国家经济社会发展的战略物资,更是新质生产力形成和全球生产力发展的主战场。当前全球新一轮科技革命和产业变革正当其时,并与中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段的攻关期形成历史性交集,中国对能源尤其是清洁能源“高科技、高效能、高质量”的要求持续提升。发展能源领域新质生产力,实现“技术和业态模式层面的创新”“管理和制度层面的创新”,既是进一步落实“四个革命、一个合作”能源安全新战略的重要举措,也是未来推进能源高质量发展及实现中国式现代化的内在要求和重要着力点。

核能是最近一次全球生产力革命的重要标志性技术之一,也是现代能源工业体系的重要支柱能源和技术集大成者,其具有的科技含量高、能量密度高和出力稳定性高等特点与新质生产力“高科技、高效能、高质量”特征高度匹配。核电产业以先进核能技术为驱动,具有战略性新兴产业和未来产业的前沿技术引领、科技创新先导、产业集群发展、综合效益长远和国际竞争激烈等显著特征,其对保障能源安全转型、引领工业科技变革和推动新质生产力发展的重要作用越来越成为全世界共识。随着2023年《核能三倍宣言》发布,全球核电产业有望迎来快速发展时期,国际范围内的竞争程度也将大幅加剧,中国必须加快发展新质生产力,推动核电领域乃至能源领域的革命性变革。

本文分析了行业国际发展趋势,介绍了中国核电产业具备的新质生产力发展特征和基础,根据新质生产力理论,重点针对如何发挥科技创新和数据作为生产要素,并在此基础上分析了新时代国家发展对于核电高质量发展提出的新需求,行业发展面临的挑战,结合新质生产力理论,积极发挥科技和数据生产要素作用,从科技创新、数字转型变革和创新产业发展方式等方面分析了以新质生产力实现核电高质量发展的具体路径及未来展望。

## 1 《核能三倍宣言》背景下世界核电产业发展

2023年12月2日,在第28届联合国气候变化大会(COP28)上,22个国家联合发布《核能三倍宣言》<sup>[1]</sup>指出:核能对实现2050年全球温室气体净零排放和保持1.5℃目标具有重要作用,需要国际各国共同推动核能发展,提出了“5个”承诺。包括:推动2050年核电装机容量增至2020年3倍;承诺负责任地运营并符合安全、可持续性、安保和防扩散的最高标准;承诺支持核反应堆的开发和建设,以及更广泛的脱碳工业应用;承诺支持负责任的国家在安全、可持续性、安保和防扩散的最高标准下探索新的民用核部署;承诺全面动员对核能的投资,同时呼吁世界银行等金融机构为核能提供政策贷款,以后每届联合国气候变化大会将审议宣言进展,并呼吁更多国家加入。

从《核能三倍宣言》和各倡议国核电规划建设能力和能力来看,首先核能的清洁低碳属性和可调度基荷电力来源越来越成为全球共识,行业发展面临着好的态势;面对共同发展目标,必将加深科技合作,存在着优势产能获得进一步发展的机遇。但是,从各国发布规划与实际产业链和资源供应能力来看,存在着不同层次和不同深度的差距,若想实现核能3倍目标,必然将加剧核科技、资源和产能竞争,并重塑国际资源和产能重新分配的格局。

## 2 中国核电产业发展坚持自主创新形成新质生产力

作为国家高科技战略产业,中国核工业经历60余年的发展,已经成为世界上少数建立起的完整的核科技工业体系。改革开放以来,中国核工业发展重点转向以发展核电产业服务民生经济,通过“以我为主,中外合作”的方针,具备“自主设计、自主建造、自主运营、自主管理”能力,形成了成熟且具有竞争力的“二代”压水堆核电品牌。2008年国家科技重大专项实施,进一步布局核电产业的全面发展,各集团通过自主品牌成功实现福岛后转型;

2010年核电产业也成为中国重点培育的战略性新兴产业<sup>[3]</sup>。从“华龙一号”“国和一号”自主品牌的三代压水堆核电技术,到小型模块化反应堆、一体化闭式循环快堆和可控核聚变,完成了一系列的关键技术突破。核电产业长期位列我国重点培育的战略性新兴产业名录,党的二十大报告将核电技术列为中国进入创新型国家行列的重大成果之一,体现了核电行业已经具备了创新为核心的新质生产力。

截至2023年底,中国在运核电机组达55台,总装机容量为5703.34万kW<sup>[4]</sup>,仅次于美国的93台、9583.5万kW和法国的56台、6137万kW,位居世界第3;在建核电机组26台,位居全球第1。特别是核电在沿海省份已经成为主力能源,在福建省和海南省发电量占比已经超过20%,在广东省、辽宁省和浙江省发电量接近20%,有效地促进了区域和地方绿色低碳发展。

据中国工程院等多家研究机构预测,2035年中国核能发电装机规模预计可达1.2亿~1.5亿kW,到2060年前后,核能装机规模有望提升到4亿kW以上,并且从铀资源保障和建设能力、制造能力来看,可以支撑每年10~12台机组建造能力<sup>[5]</sup>。从以上数据来看,中国核电能够稳定实现2035年核能3倍规划目标,这是有完整产业链和供应链支撑的,并且有能力向国际输出技术和产能。

### 3 新时代对核电产业的高质量发展提出新需求

新时代,习近平总书记指出,“核工业是高科技战略产业,是国家安全重要基石。要坚持安全发展、创新发展”。在强国建设、民族复兴的新征程上,推进实现中国式现代化,实现高质量发展,最根本是实现新质生产力。发挥核能产业的“安全、绿色、经济”突出优势,成为建设新时代中国式现代化产业体系的重要组成部分。现代化产业体系建设对核电产业的高质量发展提出一系列新需求。

第一,核安全是核事业发展的生命线,是生态环境保护的重要领域,是国家安全的重要组成部分,

确保核安全是核强国建设的基础前提。中国创造性提出总体国家安全观,将核安全纳入国家总体安全体系,提出理性、协调、并进的核安全观,倡导打造核安全命运共同体,要求守牢美丽中国建设安全底线,指引新时代核安全工作取得历史性成就。当前,中国核电正步入规模化加速发展新阶段,核安全监管既面临全球气候变化影响、供应链可靠性等全球共性问题,也面临核电规模大、首堆新堆多、同址群堆多等个性挑战,行业面临如何加快建设与核事业发展相适应的现代化核安全监管体系,以高水平核安全保障核事业高质量发展的问题<sup>[6]</sup>。

第二,核科技创新战略是引领核能发展的重要驱动力,各国在核领域的竞争本质上也是核科技的竞争。近期国际核科技创新突破频出,热点不断,例如,美国国家点火实验室(NIF)通过对192条激光束的精准控制,成功实现了惯性约束“核聚变点火”,并且实现了净能量增益;俄罗斯“突破”计划实施,旨在发展以快堆闭式燃料循环为基础的新一代核能技术,实现核能可持续发展,特别是根据聚变工业协会第三次年度全球聚变产业报告,全球聚变产业的累计投资已经较2023年增加近30%,超过62亿美元。面对挑战,应坚持“四个面向”,突破原有模式,加速“热堆、快堆和聚变堆”创新,从而加快实现高水平科技自立自强,支撑和推动国家的“深空”“深海”等战略实施。

第三,中国现代化产业体系向清洁低碳转型,需要以核电产业为重要抓手。在践行“双碳”目标背景下,核电清洁、低碳、能量密度高、经济性好,对于构建新型能源体系、推动能源产业现代化转型升级具有重要作用,同时也提出了一系列时代命题,如:面对“双碳”目标,核能在目标实现路径中如何定位;如何在构建“以新能源为主体的新型电力系统”和“清洁低碳安全高效的能源体系”中发挥更重要的作用;如何持续提升核电机组全生命周期安全性和经济性;如何建立核燃料循环体系,做好铀资源保障和废物管理、循环利用工作;如何持续探索和培育新的前瞻性技术,探索前沿科技领域;如何应对规模化发展的厂址资源和极端气候风险等。

### 4 核电产业以新质生产力推进高质量发展的途径

习近平总书记强调：“要以科技创新推动产业创新，特别是以颠覆性技术和前沿技术催生新产业、新模式、新动能，发展新质生产力。”科技是第一生产力，日益成为生产力中起决定作用的要素，是驱动经济增长的根本动力；数据作为生产要素的高效应用将超越传统生产要素，成为新时代战略资源，将催生经济社会新业态、新模式。核能行业聚焦科技创新和数字变革，通过技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级来催生新质生产力，实现安全发展和创新发展，从而进入新的发展阶段，进一步推动高质量发展，形成新产业、新模式和新动能，打造自主可控、安全可靠、竞争力强的现代化产业体系，构建绿色低碳循环经济体系，实现依靠创新驱动的内涵型增长。

### 5 核电产业科技创新的关键路径探讨

#### 5.1 核能科技创新，首先是聚焦核燃料为代表的原始创新

核燃料是反应堆的能量源泉和放射性裂变物

质的主要来源，也是核技术应用必须的核材料宝库。燃料的性能，很大程度上决定了反应堆的安全性、经济性和可靠性，所以聚焦核燃料安全性和经济性持续提升，探索新材料、新工艺和创新设计的应用和验证，能够推动反应堆的性能提升，实现核电厂安全高效运营，同时也是关乎核燃料产业的可持续发展。

伴随着核电建设运营，核燃料创新一直在持续，自主化核燃料性能指标不断取得突破，快堆、高温堆等高性能核燃料研究持续投入并验证取得应用；在福岛核事故后，如何避免类似氢爆事故的发生，耐事故(事故容错)核燃料成为国际研究热点；随着小微型反应堆技术在清洁能源需求灵活性方面的优势，具备超长换料周期的高丰度低浓铀成为研究前沿和产业开发重点之一。特别是各国重点投入的，基于事故缓解的耐事故(事故容错)核燃料研发，所制定的包壳和芯块材料研发路线图，对于核燃料创新具有积极的指导意义(图1)<sup>[7]</sup>。

核燃料的研发也支撑了更安全、更经济、更可持续的核电机型研发。包括环形燃料元件等不同形状的核燃料，追求更高的冷却效率，实现更加安全的运行，探索在压水堆中应用，将更好地提升运行业绩。基于热堆研发的铀氧化物燃料，基于快堆中子性能更好的金属燃料和高铀燃料，还有钍基燃

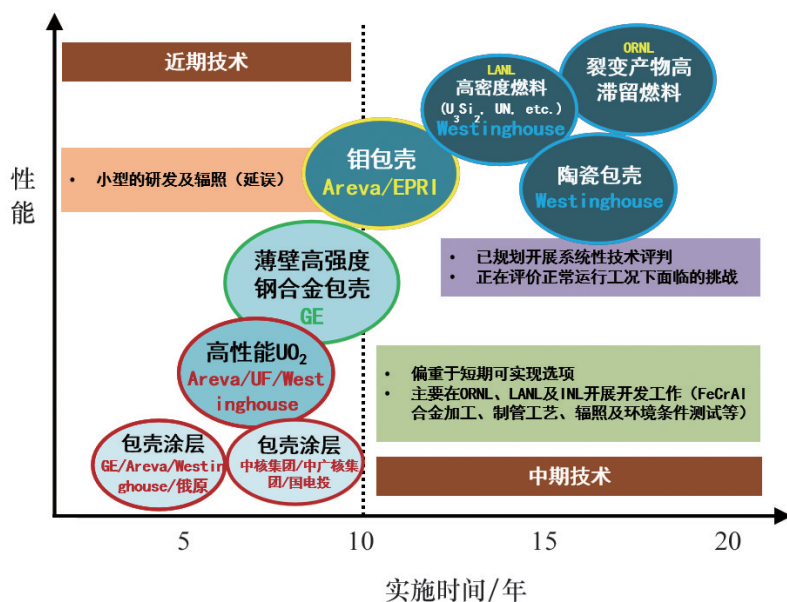


图1 耐事故核燃料研发技术路线

料,即将在武威熔盐堆入堆测试,将有可能突破资源利用瓶颈。

综合来看,意味着具有固有安全性、更加安全高效的核燃料体系,具有更加广阔资源的核燃料资源,都是核能创新发挥新质生产力,实现高质量发展的关键因素。

### 5.2 核能科技创新,核心是核电型号的集成创新引领

国际原子能机构(IAEA)一般将电功率300 MW以下称为小型核反应堆,将电功率10 MW以下称为微型核反应堆。国际上小型和微型核反应堆成为开发热点,因为小型模块化核反应堆是“游戏改变者”<sup>[8]</sup>,能够以高安全水平提供不同的核电联产解

决方案。

首先需要明确的是,小型和微型核反应堆是创新型反应堆技术研发的必经阶段,四代核电和聚变技术,无一例外都是遵循“零功率装置—原型堆—示范堆和商业堆”的研发和试验验证历程。所以IAEA公布的小型 and 微型核反应堆清单中,包含多种设计和技术,例如:可在近期部署的一体化压水反应堆;可在中期部署的采用非水冷却剂/慢化剂的小型四代反应堆;改装的或改进的紧凑环路式小型模块化反应堆,包括驳载浮动核电站和海床基反应堆;也包括正在建造中且近期并网的小型模块化反应堆,如中国的“玲龙一号”(图2)。

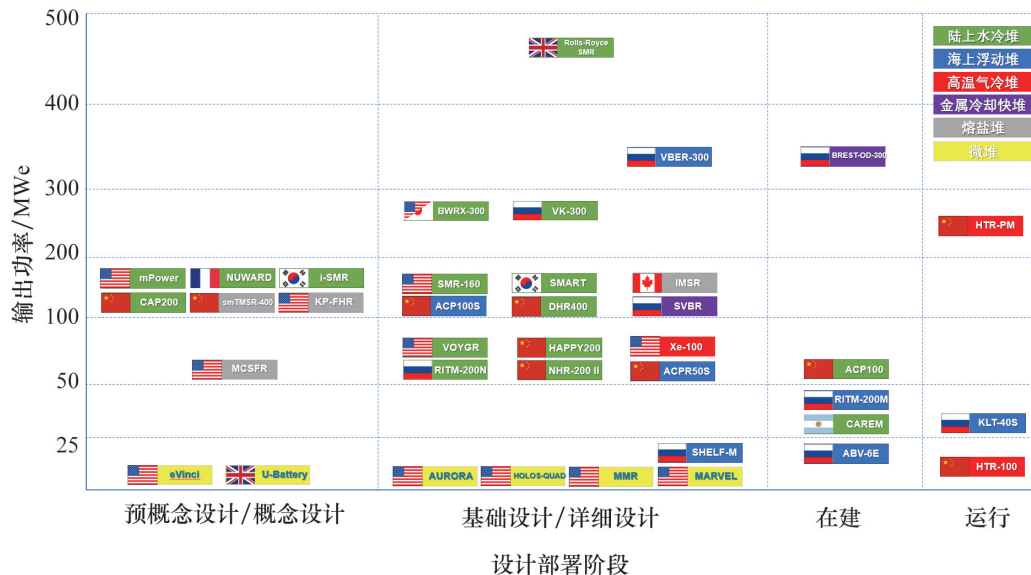


图2 小型反应堆各国部署阶段示意(IAEA)

小型反应堆的广泛应用前景已成为国际共识。在能源转型的背景下,应对全球变暖,需要在全球范围内改变能源的生产和消费方式,需要广泛的低碳能源技术来支持这种转变,小型模块化反应堆可成为清洁稳定的分布式能源,是解决低碳经济需求的一种灵活手段。包括快堆、高温气冷堆和小型模块化反应堆在内的创新型反应堆可能会慢慢被引入各种细分的市场,例如,锕系元素燃烧(如来自压水堆乏燃料或钚库存)、制氢和工艺热,并为偏远地

区和无电网地区提供电力和热力。

在理念方面,通过新燃料、材料应用和反应堆配置优化提高了热效率,同时减少了电厂安全运行所需的系统数量,特别是模块化理念应用。核心的三大理念和科技进展提升了小型模块化反应堆的竞争力和吸引力。

1) 更多的固有安全设计。针对更小的反应堆使用非能动安全概念的可能性,它满足了日益苛刻的安全要求,同时又使得设计得以简化;不限于特

定类型的慢化剂、冷却剂或中子能量范围,并且表现出广泛不同的特性。

2) 更完整的模块化建造方式。工厂内模块化建造能力的形成,在工厂环境中更完整高效的模块化预制,更容易运输到现场并连接到电力和热力的最终用户,可以降低总成本、缩短现场的工期。

3) 更强的反应堆自我控制能力。像“即插即用”概念一样,反应堆可以基于固有和非能动安全系统进行自我调节,从而以最少的操作员操作实现高水平的控制和安全;还可以做到在反应堆的全生命周期内不需要换料。

### 5.3 核能科技创新着眼于实现核燃料循环体系的系统创新

中国核能发展基于资源和技术的双重考虑而确定采用“三步走(热堆—快堆—聚变堆)”以及“坚持核燃料闭式循环”的战略<sup>[9]</sup>。核燃料闭式循环主要采用热堆核燃料闭合循环的方式。通过后处理将热堆乏燃料中的Pu和U提取出来,回到热堆进行再循环,以提高铀资源利用率。由于热堆燃料循环仅能使铀资源的利用率提高0.2~0.3倍,循环过程又受到许多限制,故对核能可持续发展的贡献是有限的。快堆核燃料闭合循环是核能可持续发展的主要出路。采用快堆闭合循环,可使铀资源的利用率提高50~60倍。在快中子谱条件下(包括快中子临界堆和次临界堆),所有锕系核素都具有一定程度的裂变性能。所以,快堆不仅可以焚烧Pu的各种同位素,而且可以嬗变MA。通过发展快堆核燃料闭合循环(包括分离—嬗变),可以充分利用铀资源,实现铀资源利用的最优化,还能最大限度地减少高放核废物的体积及其放射性毒性,实现核废物的最少化才能充分利用铀资源,实现核能的大规模可持续发展。

国内天然铀勘查、开发是中国核电发展的重要保障,也是开拓国际天然铀市场的“压舱石”,实施铀矿大基地战略是为了保障国家天然铀的基本需求。中国铀矿地质科技工作在基础地质和铀成矿理论、战略选区与区域预测评价、找矿技术方法与深部探测及资源突破等方面取得了系列重大进展和创新性成果,需要布局实施以支撑中国铀矿大基

地建设,持续提升铀资源供应能力。

## 6 核电产业数字化转型及数字变革的实现

核能行业数字化转型发展,实现人工智能、物联网、云计算和大数据等技术与核能行业的融合,发挥数据作为第五生产要素的推动力,进而整合现有的生产关系实现数字经济腾飞,是新质生产力的核心领域之一。目前核能行业围绕产品和服务转型,利用数据资源、信息网络和通信技术融合,积极进行数字化转型规划、探索和实践。

### 6.1 实现核工业数字化变革的路径

核电产业链在数字化、信息化、智能化应用方面,存在着互联互通不充分、数据获取和应用不全面、从全生命周期考虑优化和反馈提升不足等问题,并且结合核能行业特点,推行数字孪生和人工智能等新方法和技术,需要统筹全生命周期进行规划并积极实施。要实现核工业数字化变革,需要从产品和服务两个层面做好数字化能力构建,然后以数字化交付为抓手,着眼于实现核电全生命周期管理,进而实现效率提升和产业结构优化,推动核电“数字经济”之轮转动(图3)。

### 6.2 产品实现数字化转型的路径

产品数字化转型目标是实现生产管理和经营决策数字化各种业务处理以及运行操作数字化,对各种基础数据进行综合加工,生成各方面管理需要的信息,对各种管理信息的挖掘和分析生成经营决策信息,实现智慧运营。首先,要对核电站生命周期进行数字化,以工程对象为核心形成统一的数字化信息,以数字化移交智慧运营为目标;然后,利用使能技术实现设备和装置数字化,采用现场总线技术、智能型仪表、智能化执行机构、具有通信接口的电气微机保护和配电装置等,包括5G通信、物联网技术实现设备和装置的数字化;进一步完善核电站级的过程控制数字化,拓展基于监测和控制数据的无线传输,简化核电厂仪控系统规模,在合理的功能分配分组、适当冗余的情况下,实现核电厂控制系统的服务器化。

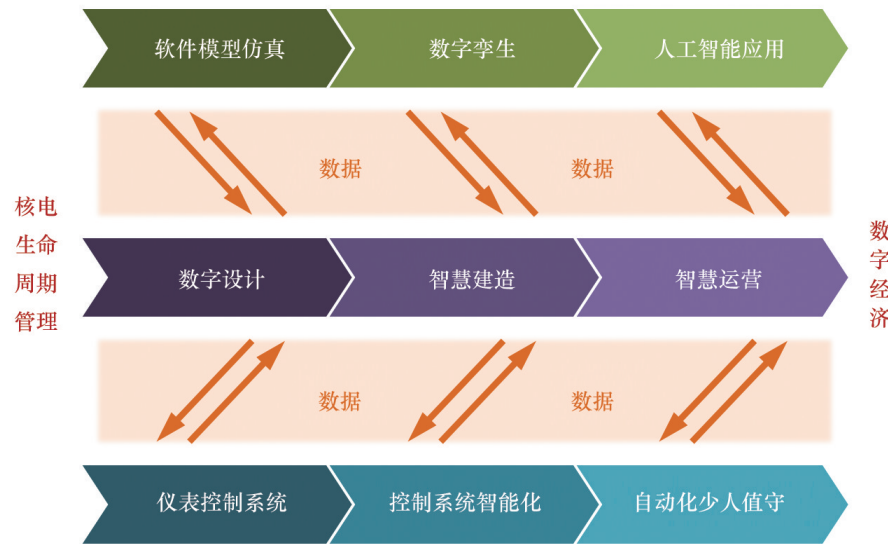


图3 核工业数字化变革路线图

### 6.3 服务领域实现数字化转型提效

研发设计领域实现核电堆型的数值化,智能装备制造领域实现设计制造一体化,工程建设领域实现工程管理信息系统落地应用,智慧工地建设积极推进,实现数字化交付平台;在此基础上,智慧核电站建设运营要成功部署产品生命周期管理数字平台,在智能化运行控制和监测诊断、智能巡检监察和维修管理以及智能安全管理和数字化生产管理领域实现突破。包括融合大数据分析、智能算法等技术,推演系统设备的状态和趋势,优化核电站运行控制策略;基于图像采集及无线传输技术和特种机器人巡检,对运行设备进行实时监控;实现大修管理可视化:检修活动集中监视,检修过程智能管理;利用人员定位、路径导航、图像识别等技术,对核电站生产现场进行全范围、全过程监控。

例如核工业机器人的研究和应用,伴随着核电技术诞生和推广从未停止,并已取得很大进展。由于核电站设备本身或其运行环境具有放射性,同时还兼具水下、高温、高压等特点,人员操作存在安全风险或操作受限等情况,而采用机器人进行设备巡检、维护检修、乏燃料转运、放射性废物处理、核事故应急处理和应急响应等工作,可以大幅提高核电站的检修水平或事故处理效率,降低工作人员受照剂量和劳动强度。致力于开发适应核辐射环境,性

能先进、可靠的核电站机器人一直是核工业界追求的目标。

2018年12月25日,核工业机器人与智能装备协同创新联盟成立。通过搭建开放式、国际化资源整合和协同创新平台,行业共同努力自主开发了多套核工业机器人与智能装备,形成了以核设施运维为代表的系列化核机器人与智能装备及产品体系。研发应用的产品包括“压力容器检测与维修机器人”“堆内构件检修机器人整机产品”“蒸汽发生器检测与维修机器人”和“核燃料组件检测与维修机器人”等,同时核设施退役和后处理领域也逐渐开始应用。

## 7 科技和数据创新催生核电产业新产业、新模式和新动能

围绕中国“热堆—快堆—聚变堆”核能“三步走”战略,推动“华龙一号”核电机组规模化发展和优化改进,加快推动一体化快堆和可控核聚变领域新质生产力创新,形成一系列重大科技创新成果,促进核电产业的高质量发展。不断突破核心技术,在核物理、核化学、核探测领域探索新结构、新反应、新机理和新域质技术;在制氢、供热、海水淡化等核能发电应用领域突破一批科研成果工程化应

用;促进学科交叉融合,探索人工智能、量子科技、信息技术、新材料等前沿科技与核电产业的融合应用,培育核电产业发展的新动能<sup>[10]</sup>。

从国际发展来看,大型压水堆仍是未来一段时间发展的主力堆型,中国具备完全的自主知识产权、完整的产业链,安全和技术水平均处于世界第一梯队,性价比优于国外供应商。中国在役、在建和待建的核电站将持续运行到21世纪末。注重科技创新和数据资源作为关键生产要素的应用,发挥新动能是当前发展的重点。包括自主核燃料高效利用,延长换料周期;利用环形燃料元件等创新燃料,提升安全性和经济性;致力于整合离散制造和流程化产业模式的数字化研发、设计和建造产业链一体化模式;通过数字化交付构建全生命周期的智慧运营平台,利用先进互联网技术、信息技术和人工智能等对核电产业实现数字化变革,乃至数字化革命,为核电技术革命和科技创新提供广阔的平台,加速各类数据要素的流动,推动核能全产业链数字经济发展。

中国面临着核能规模化发展前景,落实核燃料循环路线,构建绿色低碳循环发展模式,是实现铀资源高效利用和解决废物最小化的必然选择。具备一定规模的压水堆发展是基础,压水堆回收铀,直接进入快堆循环,建立热堆—快堆二元核电体系,是中国核电规模化、可持续发展合理可行的路线选择<sup>[11]</sup>。中国快堆和MOX(混合氧化物核燃料)等燃料研发已经布局,商用压水堆乏燃料后处理厂具备能力,尽早建设,可以满足快堆启动燃料需求,降低天然铀需求,缓解压水堆乏燃料暂存压力,过渡方式应从时间、循环模式、经济性和安全性等多方面制定发展战略和实施路线。一座千吨级后处理大厂每年可以回收50座百万千瓦级压水堆乏燃料,可以为3座百万千瓦级快堆提供初装MOX燃料,是进入快堆循环体系不可缺少的环节。越早建成后处理大厂,压水堆乏燃料后处理能力越大,可提供快堆的燃料越多,天然铀的总消耗将越低。

核聚变作为核能新产业代表,被誉为能源行业的“圣杯”,目标是解决能源领域“不可能三角”,即聚变能源资源足够多、固有安全和环境可持续性3

种重要属性。通过国际热核聚变实验堆(ITER)项目合作和积极投入国内项目建设,以磁约束为代表的核聚变科技创新和产业布局还是需要实现阶段性的跨越,试验和应用阶段的突破,包括:高温超导材料、氦气装料等技术在试验堆的应用,以验证关键材料和物理可行性;实现点火和自持,核燃料转化,实现能量释放、转化和应用全过程的验证,以聚变能的持续释放并且能否发出电作为系统性突破为标志。

## 8 核电产业高质量发展的未来展望

面对世界核能行业在各领域、深层次、全方位正在经历的变革和竞争,中国核能行业经历近70年发展,拥有了先进科技创新体系、完整的产业链和配套能力,具备“世界第二”发展规模和“双碳”目标下的良好前景,行业进入了以新质生产力驱动的高质量发展阶段。面对新阶段,行业坚持安全发展和创新发展,发挥新质生产力作为技术革命性突破、生产要素创新型配置、产业深度转型升级的特性,构建中国式现代化发展体系,从而推动高质量发展,共同致力于“寻求加速和扩大原子能对全世界和平、健康和繁荣的贡献”<sup>[12]</sup>。

### 1) 加快科技创新实现行业发展质的跃迁。

发挥健全的核科技创新体系,积极统筹国家科技创新资源,具备强健的原始创新和集成创新能力,实现前沿领域突破形成新质生产力来引领核能发展。聚焦于耐事故燃料等新型材料和科技的应用,强化固有安全的创新性纵深防御体系,全生命周期智能运维等核心技术开发和验证应用,将积极推动大型先进压水堆提升安全性和经济性。按照“热堆—快堆—聚变堆”三步走发展方针,加快压水堆乏燃料后处理大厂的建设,在快堆示范工程建设的基础上建设百万千瓦级金属燃料的商用快堆,并开发闭式循环一体化快堆系统,以提高增殖比,充分利用核燃料。同时要加大聚变堆基础科研,以及特种材料、特种设备的研发,有步骤地实施试验聚变堆—示范聚变堆—商用聚变堆的建设,最终实现第三步聚变能的应用。

## 2) 加快产业创新实现规模质量效益并举。

在促进能源转型方面,通过大力推进自主压水堆核电批量化建设等部署,使中国核电发电量在2035年前占比达到10%左右的发展目标,在装机规模和发电量超过国际平均水平,实现中国核能倍增远景;保障能源安全方面,有效发挥核能燃料能量密度高、运行稳定可靠、换料周期长等优势,发挥完整的全产业链能力、供应链的自主保障和供应能力,实现核能规模质量效益并举,实现高质量发展。开发以小堆、微堆为代表的核能多功能应用,诸如供暖、供热、制氢、制冷、海水淡化等,进一步提高核能在国民经济和“减排”中的作用。发挥核能优势,在众多科技创新成果的加持下,能够实现对极地、深海、太空等更多区域的探索。

## 3) 加快发展方式创新构建绿色循环经济。

核能行业发展面临诸多内外部压力和挑战。行业内部应实现燃料闭式循环,构建可持续发展模式。到2035年,实现先进快堆的商用示范,规模化商用后处理厂稳步推进,形成了闭式核燃料循环可持续发展模式。更长远未来的发展格局上,实现规模化的压水堆和快堆二元核电体系的循环发展。面对能源变革和竞争,在“双碳”更远的维度上,提高核电机组的经济性和调节能力等,更好地发挥基荷及调峰功能,主动适应新型电力系统要求;通过核能综合利用类项目,协调推进核能消费利用方式的多样化,进一步增强核能在新型能源体系中发挥的作用,加快“碳达峰”;加快聚变和先进核能技术突破及转化形成新产业,助力实现“碳中和”。

## 4) 推动数字变革加快行业全方位转型升级。

当前,先进快堆、高温气冷堆、钍基熔盐堆、铅冷堆等先进反应堆核燃料技术成熟度处于不同水平,应用科技、数据和模型将加快研发进程;模块化小堆和微堆、浮动核电站、空间堆、新型核燃料循环等不同应用场景,也会通过数字化和信息技术加快部署;利用核电站数字交付平台,运营方作为主体构建数字核电站,整合产业链和供应链形成一体化模式,持续提高安全性和运行性能,同时稳步提高效率,从而不断降低成本,确保实现核电站全生命

期运营和绿色退役目标;相信利用人工智能和大数据、云计算、物联网等信息化技术与核电业务的结合,发掘数据价值实现以数据驱动创新发展,将促进核电发展进入第四次工业革命的新格局。

## 参考文献 (References)

- [1] 安蓓, 谢希瑶. 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[J]. 自然资源通讯, 2021(20): 32-38.
- [2] At COP28, countries launch declaration to triple nuclear energy capacity by 2050, recognizing the key role of nuclear energy in reaching net zero[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key>.
- [3] 国务院. 国务院加快培育和发展战略性新兴产业的决定[EB/OL]. (2010-10-10)[2024-03-31]. [https://www.gov.cn/zwgg/2010-10/18/content\\_1724848.htm](https://www.gov.cn/zwgg/2010-10/18/content_1724848.htm).
- [4] 中国核能行业协会. 全国核电运行情况(2023年1—12月)[EB/OL]. (2024-01-31)[2024-04-05]. <https://wap.china-nea.cn/site/content/44467.html>.
- [5] 核能在实现“碳达峰、碳中和”目标中的作用项目组. 核能在实现碳达峰碳中和目标中的作用研究报告[R]. 北京: 中国核工业集团有限公司, 2021.
- [6] 董保同. 以总体国家安全观和核安全观为遵循 加快构建现代化核安全监管体系[N]. 学习时报, 2024-06-05(1).
- [7] 李冠兴, 周邦新, 肖岷, 等. 中国新一代核能核燃料总体发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 6-11.
- [8] 中国工程院, 法国国家技术院, 法国科学院. 关于核能未来的联合建议-中法三院核能合作[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [9] 杜祥琬, 叶奇蓁, 徐铤, 等. 核能技术方向研究及发展路线图[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 17-24.
- [10] 屈凡玉, 李言瑞, 杨彬. 积极安全有序发展核电 助力“双碳”目标顺利实现[J]. 能源, 2022(12): 38-43.
- [11] 核能发展战略研究(2035)项目组. 中国核能发展战略研究(2035)报告[R]. 北京: 中国核工业集团有限公司, 2020.
- [12] the Statute of the IAEA[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.iaea.org/about/statute>.

## Research on the practical path of promoting high-quality development of nuclear power through new productive forces

YE Qizhen<sup>1</sup>, SU Gang<sup>2</sup>, HUANG Wen<sup>3</sup>, ZHAO Wanguang<sup>4</sup>, RUAN Tianyue<sup>2</sup>, XIONG Kai<sup>2</sup>, LIN Xianjun<sup>5</sup>

1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100822, China
2. China National Nuclear Corporation, Beijing 100840, China
3. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China
4. China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China
5. Suzhou Nuclear Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, China

**Abstract** As a high-tech strategic emerging industry that is a key focus of national cultivation, China's nuclear power industry has long adhered to safe and innovative development, and has initially formed new productive forces in practice; In the face of a new stage of development, the nuclear power industry needs to strengthen the drive of new quality productivity, actively build a modern industrial system, and promote high-quality development of nuclear power. This article is based on the analysis of the development trend of the nuclear power industry at home and abroad, and introduces the characteristics and foundation of the development of new productive forces that China's nuclear power industry has initially possessed. Based on the research results of the academic community on the theory of new quality productivity, it is proposed to actively leverage the doubling effect of new technologies and big data on productivity, and cultivate and develop new quality productivity in nuclear power. At the same time, we will deeply explore the essence of "innovation" in all elements of nuclear power, propose to promote the high-quality development of nuclear power through three practical paths: propose more original innovation, integrated innovation, and systematic innovation, promote the digital transformation of nuclear power and "giving birth to new industries, new models, and new driving forces".

**Keywords** new quality productive forces; high-quality development of nuclear power; nuclear power; strategic emerging industries ●



(责任编辑 王微)