

AI浪潮下小堆多元应用场景迎来发展新格局

——访中国科学院院士、国际核能院院士、凤麟核创始人吴宜灿

■本报记者 朱学蕊



在“双碳”目标纵深推进与能源安全新战略持续深化的关键窗口期,小型模块化反应堆(以下简称“小堆”)凭借选址灵活、部署高效、贴近用户的独特优势,在算力中心电冷联供、化工园区工业蒸汽供给、海岛及偏远地区综合能源保障等多元用能场景中展现出潜力。

国家发展改革委、国家能源局近期发布《新型能源体系建设“十五五”规划》和《新型电力系统建设“十五五”规划》,在核电小堆和四代堆技术攻关及装备研发、小堆研发示范及推广应用、降低小堆成本、加强综合利用和创新商业模式等方面作出明确部署。围绕小堆产业从技术研发到市场化落地的战略路径,本报记者近日专访中国科学院院士、国际核能院院士、凤麟核创始人吴宜灿。

多应用场景同步打开

中国能源报:当前全球核能复兴加速,各国加码布局小堆赛道。您认为小堆落地应用前景如何?短中期哪些场景将成为应用“主阵地”?

吴宜灿:我国是当前核能发展最快的国家,核电工程建设规模连续19年稳居全球第一,2022年以来累计核准49台核电机组,保持着大堆批量化、规模化发展的势头,核能成为保障国家能源安全的重要支撑。

小堆和大堆是一种必要的补充和保障的关系。小堆早期应用针对的应是大电网覆盖不到的区域、需要贴近用户布置的环境,以及其他特殊应用场景,例如海岛能源保障、工业蒸汽供给、偏远地区供能等。在这些场景下,小堆在选址、产品和部署方面的灵活性优势显著。

AI技术和算力产业的发展推高了小堆热度,多类应用场景同步打开。短中期内,前景较好的应用场景主要有三类:一是算力中心的电冷联供;二是化工园区的工业蒸汽供给,包括部分小火电机组的原址

替代;三是海岛及偏远孤网地区的综合能源保障。中长期来看,其余应用场景将陆续跟进。

中国能源报:国家能源局不久前提到,我国小型模块化反应堆研发稳步推进。从全球视野看,我国小堆研发处于什么水平?具备哪些优势?

吴宜灿:首先小堆是从功率水平上加以区分和定义的,可能涵盖技术上的不同概念。第三代反应堆之前,反应堆技术以水冷为主。后来研究逐步认识到水作为冷却剂或慢化剂的不足,所以第四代反应堆的6种潜在堆型中仅有1种使用水作为冷却剂。业内将第四代及以后的反应堆技术称为革新型反应堆技术。在此基础上,我们进一步提出第五代核能系统概念。

第五代核能系统基于从源头确保核安全的基本理念,把安全建立在物理规律和材料本身特性上,强调多元化应用,而且应具备亲近性、灵活性、智能性。衡量一个国家小堆研发的水平,不能只看建成几台,更要看两件事——技术路线是不是面向未来,核心技术体系是否掌握在自己手里。

我国革新型反应堆研究在国际上处于第一梯队,多条技术路线并行布局,各条路线的战略目标和发展阶段虽不同,但不少技术方向已跻身国际前列。

成本并非制约发展的主要障碍

中国能源报:上面提到的两个《规划》提出,加快核电小堆技术攻关和装备研发,多措并举降低小堆成本。当前小堆研发示范和推广应用的主要障碍,是否在于关键技术和装备攻关难度大、成本高?

吴宜灿:成本并非制约小堆发展的主要障碍,小堆在综合用能成本方面反而具有优势——前提是要把成本这个概念说全面。谈小堆成本,必须站在用户角度算账,绑定场景来谈。如果只比单位千瓦造价,目前小堆确实没有大堆那样的规模效应,但用户真正支付的是用能综合成本,其中包含电网投资、备用容量、燃料运输、排放约束等。把这些都算进去,小堆在很多场景下具备显著竞争力,在有些场景下甚至是难以替代的方案。

真正的障碍在于首台(套)的通道还不够通畅,如工程示范的机会、监管体系对新堆型的适配、批量化订单的形成等。这些问题处理得好,小堆就能真正从示范走向规模化。

关键技术和装备攻关当然要持续推进,这是未来规模化应用的基础。但模块化的成本规律是清晰的——首台(套)要消化全部研发投入和产线建设投入,其成本本就不具代表性,真正决定经济性的是批量化生产之后的成本。一旦实现工业示范,成本下降速度会很快。

中国能源报:凤麟核研发的“核电宝”先进核能系统,也属于小堆范畴。该系统目前研发进展如何?主要锁定哪些应用场景?

吴宜灿:“核电宝”是一种采用特种液态金属(铅/铋/锂等)作为冷却工质的紧凑型先进核能系统,液态金属工质常压运行、固有安全设计,无需在厂外设置应急计划区,1次装料可运行10—30年,也不需要庞大的安全壳,设备制造门槛相对可控。相比其他革新型核能技术路线,“核电宝”

固有安全性、经济性和小型化优势显著,其商业应用能更快实现。

“核电宝”目前已实现核心技术自主化,具备陆、海、空场景工程示范应用基础,已完成实验室内几乎所有基础研发工作,权威专家组评价其“整体达到国际领先水平”。

“核电宝”可应用于算电协同场景下的电冷联供,海岛及偏远孤网地区的发电、制氢、海水淡化等综合能源保障,部分小火电机组的原址替代,以及化工园区高品质工业蒸汽供给。此外,还可为“风光”送入电网提供基荷能源,并面向小型城镇提供电力、工业蒸汽、供暖、氢能等综合能源服务。

建立首台(套)风险分担与保险机制

中国能源报:除了核电央企、中国科学院等“国家队”,商业化小堆公司不断涌现,深耕技术研发并吸引社会资本投入。您如何看待小堆领域参与力量日益多元化的产业格局?

吴宜灿:我国科技成果转化过去存在创新链、产业链、人才链、资金链脱节问题,国家一直致力于改善。资金链是重要环节,社会资本介入是必然趋势,能够真正体现社会需求导向。行业发展需要更多力量参与,小堆和大堆、国央企和民间资本都是互补的。

以凤麟核团队为例,其强调科研应以国家、社会、市场和百姓需求为导向,探索并深入实践“研学产金”四合一紧密融合的科技发展新模式,推动社会多元资本共同参与,实现协同联动的发展格局。这些年,团队打破核能研发主要依赖国家经费支持的传统模式,主动吸纳社会资本,实现资源的高效配置,推动工程研发快速突破。

中国能源报:我国小堆产业短中期(5—10年)健康发展最需要关注哪些方面的问题?您对小堆产业发展有何建议?

吴宜灿:立足我国核能产业整体发展格局,结合小堆技术特性、产业现状和市场化发展趋势看,未来5—10年是小型模块

化反应堆多样化示范、市场化推广、产业化落地的关键窗口期。现阶段产业发展整体向好、技术根基扎实,但也存在制约高质量、可持续发展的核心问题,需要行业、市场与监管层面协同发力、重点突破。

首先是行业发展格局问题。当前,核能领域传统发展模式形成的结构性垄断,很大程度上制约了市场活力释放。优质的民营科创企业、新兴科研团队难以顺畅入局,技术创新、模式创新的积极性受限,不利于小堆产业形成百花齐放、良性竞争的市场化发展生态。建议进一步做好顶层设计和资源统筹协调,优化小堆产业市场准入机制,破除不合理的行业壁垒,平衡央企、科研院所、民营企业的资源配置与发展机会。

其次是产业资本支撑的短板问题。小堆产业是具有高技术、重资产、长周期等特点的战略性新兴产业,技术研发、工程示范、项目建设都需相对长期、稳定、持续的资金投入,高度依赖耐心资本。建议持续引导和培育适配小堆产业的耐心资本,通过政策引导、专项扶持、投融资机制创新等方式,鼓励长期产业资本、科研基金投向小堆核心技术研发、关键设备国产化、示范工程建设领域。关建环节的抓手,就是建立首台(套)风险分担与保险机制。小堆的资本难题本质上不是资金不够,而是首台(套)风险很少人愿意单独承担。风险分担机制建立起来,耐心资本才能真正进来。

最后是核安全监管与公众接受度的双重课题。安全是核能产业的生命线,小堆安全性、灵活性优势突出,但属于新兴核能业态,安全监管体系、标准规范仍在持续完善,需要进一步适配小堆模块化、分布式的应用特点。同时,公众对小堆的认知仍很有限。建议继续加快完善适用于小堆的安全监管标准、审查体系和运维规范,守住核安全底线,同时常态化、体系化开展核科学与小堆技术科普工作,为小堆产业规模化推广筑牢社会基础。

现代化用电营商环境赋能高质量发展

■本报记者 苏南

党的二十届四中全会和“十五五”规划纲要对建设全国统一大市场、发展壮大民营经济、营造一流营商环境、加快建设新型能源体系和新型电力系统作出系统部署。与此同时,新能源、新型储能、电动汽车等新主体新业态快速发展,企业和群众对可靠供电、绿色用能、便捷办电提出了更高要求。

供电服务一头连着经济社会发展大局,一头连着千家万户的切身利益,为能以高品质供电服务赋能经济社会高质量发展,国家电网(以下简称“国网”)近日出台十项举措,把党中央决策部署和国家政策要求转化为企业的任务书、施工图和责任清单;在服务发展方面,更好保障民营经济、新质生产力和重点项目用电;在服务转型方面,提升新能源、新型储能等新主体接网和市场服务能力;在服务民生方面,着力解决城乡群众办电用电中的难点堵点。

■量化标准让政策红利可感可及

此次十项举措,是国网贯彻国家政策部署、履行供电企业主体责任的具体行动。2025年,国家发展改革委、国家能源局印发《关于深化提升“获得电力”服务水平 全面打造现代化用电营商环境的意见》,围绕办电便捷化、供电高质化、用电绿色化、服务普惠化、监管协同化,提出14项任务、38条措施。

在降低办电成本方面,国网对用电报装容量160千瓦及以下的各类民营经济组织,全面实行380/220伏低压供电,实现低压客户办电“三零”(零上门、零审批、零投资)。在直辖市、省会城市和计划单列市等具备条件的城市,将低压接入容量上限标准由160千瓦进一步提升至200千瓦。

在服务新型主体发展方面,国网提出规范公开配电网可开放容量信息,保障“十五五”时期年均新增6000万千瓦以上分布式电源及时并网。

在民生用电领域,“十五五”期间完成县域网联系薄弱区域主干网架升级改造,2030年全年农网户均停电时间较2025年下降30%以上;“网上国网”注册高

压客户100%推送能效账单,免费提供节能诊断、绿电绿证咨询服务;推动新建居民小区固定车位100%配建私人充电设施或预留安装条件,推广存量居民小区“一小区一证明”,方便客户申请安装私人充电桩。

针对居民装桩“协调难、流程繁”问题,“国网北京电力创新‘小区一证通’模式,以小区为单位统一签约、批量出具物业同意安装证明,已惠及3777个居住区。”国网北京电力相关负责人对《中国能源报》记者介绍,“我们还协同运营商推广‘统建统服’‘共享充电’,统筹解决老旧小区选址和增容难题,并将‘三零’服务延伸至电动自行车充电场景。”

■公平高效并网激活新动能

在十项举措中,最值得关注的是“积极服务新型主体发展”。随着新型电力系统不断加快建设,新能源、新型储能、源网荷储等新主体新业态快速发展,对电网接入和市场服务提出全新要求。

国网营销部相关负责人向《中国能源报》记者解释,这项举措主要面向新能源、新型储能、源网荷储等新主体新业态,重点解决接网信息是否透明、并网服务是否高效、计量结算是否规范、参与市场是否便利等问题。

在接网服务方面,国网将规范公开配电网可开放容量信息,为项目主体合理确定开发时序和接入方案提供参考,保障年均新增6000万千瓦以上分布式电源及时并网;在运行服务方面,依法依规做好电能计量和电费结算;在市场服务方面,积极支持符合条件的新型主体按照国家电力市场规则参与交易。“服务新型主体发展的核心是公平、透明、规范、高效。国家电网将严格遵守国家规划、产业政策、技术标准和市场规则。”国网营销部相关负责人说。

此外,十项举措将低压办电服务进一步拓展到用电报装容量160千瓦及以下各类民营经济组织,目的在于降低办电投入和制度性交易成本,帮助更多民营企业、个体工商户早接电、早投产、早经营。“为进一步降低企业办电成本,国网北京电力配合北京市有关部门建立市政公共基础设施‘五联’服务机制,推动报装、勘查、施工、验收、过户协同办理;创新提出‘非禁免批’政策,并将范围拓展至35千伏及以下电力接入工程。”国网北京电力

相关负责人表示,对重大项目实行“项目长制”“契约制”,提前对接用电需求,明确接电时序和双方责任,推动配套电网建设与项目建设有效衔接,保障重点项目“快接电、早用电”。

■构建全链条服务体系

十项举措不是彼此孤立的单项服务,而是围绕“赋能经济社会高质量发展”形成的系统安排,大体可以概括为“惠企、惠民、惠民”三个板块。

惠企板块,从降低办电成本、保障新质生产力可靠用电、服务新型主体发展,到为市场化客户和外向型企业提供精准服务、支持企业节能降碳,覆盖企业办电、用电、交易和绿色转型全过程。例如,在服务企业节能降碳增效方面,深化“供电+能效”服务,全面推广“企业用电助手”,积极服务零碳园区建设,支持外向型企业绿电直连、可再生能源替代等低碳发展。

惠民板块,主要聚焦在非电网直供电小区治理、县域电网补强、临时用电、服务乡村全面振兴和居民充电设施建设。比如,在积极助力乡村全面振兴和服务业发展方面,全面推广“扫码用电”服务,支持炒茶烤烟、排灌排涝、地摊夜市、快递物流等季节性、临时性、流动性用电客户“免报装、快用电”。

提效板块,国网将推广水电气网等公共服务联合办,推行房产过户与电力过户、销户与退费、客户更名与增值税信息变更等关联业务一次办。国网将推进京津冀、长三角、川渝等重点区域供电业务跨省通办,试点闽粤、黑琼等地跨网协办。

此外,国网还将推进供电服务网格与地方政府基层社会治理网格全对应、全覆盖,公开网络经理信息和客服电话,提供政策咨询、业务办理等“一站式”服务,实行需求收集、派单处置、结果反馈闭环,快速处置、妥善办结群众用电诉求。以北京为例,今年以来,北京已完成25家电能敏感用户“一企一策”深化治理方案编制,完成319个老旧小区配电改造,惠及居民33.41万户,1319名客户经理融入政府网格,供电服务网格与政府基层治理网格实现100%融合。

三个板块相互衔接,体现了供电服务从单一办电环节向全过程用能服务延伸、从企业单独办理向政企协同推进、从普遍服务向普遍服务与精准服务相结合转变。

近日,工业和信息化部等十部门联合印发《促进中小企业发展“十五五”规划》(以下简称《规划》),目标到2030年,数智化绿色化水平加速跃升,打造一批数智化转型典型应用场景,专精特新中小企业数智化水平二级占比达到95%以上,三级占比达到80%以上,能源资源利用效率明显提升。从中央到地方,从研发补贴到场景开放,从融资支持到要素保障,一套覆盖中小企业全生命周期的政策体系正在加速成型。业内认为,这份《规划》为千万级中小企业送来更多“阳光雨露”,也让深耕新能源赛道的中小企业吃下了“定心丸”。

■政策“及时雨”给中小企业更多底气

《规划》提出,围绕新能源、新材料、机器人等新兴产业和量子科技、脑机接口、具身智能等未来产业,大量中小企业深耕细分赛道、专注核心技术攻关,是突破关键核心技术、推动成果转化应用的生产力军。

在国家信息中心信息化和产业发展部绿色产业(数字社会处)助理研究员关乐宁看来,《规划》的落地实施,将从制度层面赋能能源领域中小企业数智化升级:一是降低转型门槛,有效破除中小企业“不会转、不敢转”的现实难题,二是打造能源AI产品,释放“人工智能+能源”场景效能,三是优化行业标尺,引导数智化转型成为能源行业发展共识。

“对广大中小能源科技企业来讲,该政策相当于给我们吃了一颗‘定心丸’,为今后的发展带来更多底气。”淳华氢能科技(湖南)有限公司作为一家专注PEM电解水制氢装备的硬科技中小企业,该公司董事长谢曙告诉《中国能源报》记者,今后融资渠道有望更宽,绿色化场景更确定,账款拖欠有长效机制,公共服务也更精准。

据谢曙介绍,公司眼下正处在产业化爬坡期,正推进新一轮融资。“这类国家级政策信号能让资本对我们更有信心,让‘敢投早、投硬科技’的市场预期更稳。”

位于河北廊坊的圣思科技(廊坊)有限公司年营收逐渐跃升至亿元门槛。作为一家科技型中小企业,公司深耕新能源及高端装备制造领域,主营氢能、钙钛矿光伏等产品生产线设备、高端真空镀膜生产线设备及风电产品的研发、生产、销售及工艺技术支持,凭借精准市场定位,各业务板块实现相互依托与促进,正从中试阶段性批量化生产上慢慢拓展。

圣思科技董事长杨焕军颇有感触地说:“政策鼓励中小企业加大研发投入,这十分有利于我们对接地方的一些科技扶持资源,促进产品技术迭代以及成果转化。今后,我们将紧扣新能源与真空镀膜装备细分赛道,深耕核心技术攻关,做实技术积累。”

■企业应朝着数智化、绿色化转型

《规划》明确指出,数智化绿色化水平加速跃升,打造一批数智化转型典型应用场景,专精特新中小企业数智化水平二级占比达到95%以上,三级占比达到80%以上,能源资源利用效率明显提升。

其实,能源行业的中小企业数智化,不能追求技术概念上的“高大上”,核心是要找准数字技术与自身主营业务深度耦合的“小切口”。

“举例来说,有人以为‘买设备就是数字化’。”关乐宁纠正了这一认知偏差,认为中小企业发力的重点应围绕设备运维管控、能源消耗管控、零部件质量检测、项目供应链协同、安全生产管控等能源场景突出痛点,把降低运维损耗、提升设备可用率、节约用能成本、保障生产安全作为转型成效的核心评判标尺,坚持“痛点在哪里,改造就投向哪里”。

在谢曙看来,数字化不是另起炉灶,而是给装备装上“大脑”和“神经”。

他结合公司的业务,认为具体可从三个层面发力:产品侧——让设备会变聪明;产线侧——用数据反哺良率;碳侧——让绿色“用数据说话”。

比如,在电解槽控制系统中嵌入智能算法,实现基于工况的功率自适应、能效寻优和故障预诊断,让单台设备从“能制氢”升级为“会算氢、会省电、会自诊断”;再叠加远程运维和数字孪生,客户在手机或中控屏就能看到全球部署机组的实时状态。

对于如何更好利用好政策红利,关乐宁建议,广大中小企业应当把握政策窗口期,不跟风、不冒进,立足自身资源,以解决实际经营问题为出发点,借助政策红利与产业生态力量,把数智能力转化为企业实实在在的市场竞争力。

也有业内专家建议,把专精特新、数智化分级、融资对接做成一站式入口,用好服务“一张网”,让政策主动找企业、企业少跑腿。

中小能源企业将享受更多『阳光雨露』

■本报记者 张胜杰