

核能与算力中心低碳协同发展模式初探

马 良¹, 杨 越²

(1. 中核碳资产经营有限公司创新发展部, 北京 100010;

2. 中核汇能(内蒙古)能源有限公司经营计划部, 呼和浩特 010000)

摘要: 先进核能技术与绿色算力均为新质生产力的典型代表, 对于人工智能发展与绿色能源转型意义重大。近年来, 核能与算力中心低碳协同发展模式的商业探索方兴未艾。介绍了这一协同发展模式的形成基础, 并对当前购售电和离网直供两种潜在协同模式进行了讨论。重点分析这一模式面对来自政策、法规、技术、成本及市场等领域的挑战, 并概述国外典型业务推进情况。最后, 在技术进步、商业创新和政策支撑方面阐述了相关建议。

关键词: 核能; 算力中心; 碳中和; 协同发展; 商业模式

中图分类号: TK01+8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)12-0291-09

核能发展采取“热堆-快堆-聚变堆”三步走的发展路径。经过 40 余年的发展, 已进入快车道, 至 2023 年底, 运营核电机组已达 55 台, 装机容量达到 57 GW, 技术成果显著。热堆方面, 具有中国自主知识产权的“华龙一号”技术不断成熟, 高温气冷堆产业化技术加速推进, 为先进小型热堆发展提供重要基础^[1]; 钠冷快堆、一体化快堆技术等快堆技术加速研发, 成为下一代核能发展的重要平台; 此外, 核聚变研究反应与试验项目也明显提速。这些新进展使得核能小型化、经济性与安全性显著提升, 为核能在算力领域的发展提供了重要基础。

未来, 先进核能技术的一大重要场景是服务于人工智能的迅猛发展。人工智能的快速发展对绿色、稳定算力产生巨大需求。国际能源署数据显示, 使用 ChatGPT 等人工智能应用进行一次查询, 需要消耗 2.9 Wh 的电量, 为普通引擎搜索的 10 倍^[2]。到 2026 年, 人工智能(AI)和加密货币数据中心的年电力消耗量可能会翻一番, 从 2022 年的 460 TWh 飙升到 1 000 TWh 以上^[3]。

算力中心是支撑人工智能等数字经济发展的关键新型基础设施, 是能源与算力的转化中心, 根据应用场景的不同, 可大体分为超算中心、智算中心、数据中心等, 它们分别服务于高性能计算、人工智能及作为产业数据等作用^[4]。“十四五”期间, 算力中心产业营收规模的复合增速保持在 25% 左右, 预计未来 10 年, 算力中心、特别是绿色算力中心仍有较大的增长空间^[5]。

因此, 为了满足人工智能等领域算力需求的膨胀, 破除其能源与碳排放约束瓶颈, 打造算力用能多元化、清洁、绿色的能源供应格局, 有必要依托当前核能技术与最新实践进展, 对核能支撑绿色算力中心的业务模式开展研究。当前, 国内外就核能算力中心发展有一定商业探索, 但对于如何构建两者的协同发展关系的研究相对较少。研究通过总结核能与算力中心协同发展的趋势基础、需求变化、核心优势与业务挑战, 讨论分析了核能与算力中心协同发展两种主要模式, 以期对未来业务发展与商业模式的建设提供相关参考。

1 核能绿色发展趋势不断形成

1.1 算力中心绿色化是双碳战略的必然要求

算力中心绿色化不仅是未来发展的重要趋势, 其推进程度也已成为影响行业发展的重要因素。一方面, 政策层面要求算力中心绿色低碳发展, 发展“算力+能源”体系, 提升算力碳效水平, 并引导市场应用绿色低碳算力^[6]。《关于加强绿色数据中心建设的指导意见》明确提出 2022 年以后新建大型、超大型数据中心的电能使用效率(power usage effectiveness, PUE)降至 1.4。近年来, 工信部等部门通过评选国家绿色数据中心等名单, 为行业发展梳理绿色发展的新标杆^[7]。在政策审批层面, 算力中心的节能审批等环节, 已经成为数据中心项目落地过程中所需突破的关键瓶颈。

另一方面, 算力中心的用能绿色化有较大的市

收稿日期: 2025-01-08

作者简介: 马良(1991—), 山东泰安人, 硕士, 经济师, 研究方向为绿色园区、低碳转型、绿色发展模式等; 杨越(1993—), 内蒙古呼和浩特人, 硕士, 研究方向为企业管理、产业研究、经济模式等。

场空间,符合驱动经济绿色转型的市场诉求。宏观层面,近年来中国数据中心耗电规模逐年上升。2022年全年,全国数据中心耗电量达到2700亿KWh,占全社会用电量约为3%,预计到2025年,全国数据中心用电量占比将进一步提升至5%^[8]。但算力中心的可再生清洁能源用电在用电总量方面仍然偏低,占比仅约为23%^[9]。这一发展速度严重制约了绿色经济转型进度。从微观层面来看,当前算力中心业务的商业模式中,电力成本占运营总成本的60%~70%,降低电力运营成本对提升算力中心业务盈利水平至关重要。同时,算力是数字经济、人工智能等各类企业巨头重要的生产力要素,企业为满足政策监管要求、提升企业社会声誉,加强企业环境、社会和治理(environment, social and governmce, ESG)等方面声誉管理,有很强外部压力应用绿色算力,满足社会与公众期待。

1.2 先进核能技术发展为绿色算力供能提供多元方案

当前,核电已经进入第四代核电技术发展阶段,新一代核电技术在经济性、环境可持续性方面具有优势,包括固有安全性、多元化与灵活的应用场景,以及小型化与更高的能源效率,为适配算力中心发展需求奠定了技术基础。

在第四代核电发展方面,具有完全自主知识产权的全球首座第四代核电——山东石岛湾高温气冷堆首个示范工程已经成功商业化运营。高温气冷堆具有供热、供气、供电等核能综合利用模式,能源效率高,具有固有安全性,并采用模块化设计显著缩短项目工期。此外,在另一项第四代核电——快堆技术方面,也取得了显著进展。2011年中国实验快堆并网发电,首个钠冷快堆核电示范工程核电站也于2019年开工建设,一体化闭式循环快堆核能系统技术也取得了显著的进展。快堆技术不仅能满足四代核电技术的安全性等要求,还可以大幅度提升对于核燃料的利用率水平,进一步降低用电成本并提升环境友好性水平。快堆技术具有较大潜力发展为优秀的小型化高功率能源供应系统,实现与大型算力中心良好的系统发展模式。因此,先进的核能技术具有同步满足算力中心供电、散热以及快速建设等相关需求的条件的潜力。

在成熟技术方面,具有自主知识产权的先进核电技术——陆上商用模块化小型反应堆“玲龙一号”采用成熟的第三代压水堆技术,技术成熟度更高,与算力中心协同发展的潜力更大。“玲龙一号”

具有体积小、重量轻、建设周期短等优点,非常适合在偏远地区或海岛等电力需求较小的场所应用^[10],能够很好地适配算力中心发展的能源需求。“玲龙一号”全球首堆工程已于2017年在海南昌江核电基地内开工建设,项目计划于2026年底并网发电。同时,相关技术还可以作为海上浮动式发电平台部署,进一步满足算力中心更加灵活的场景与空间的应用需要。

此外,中国同步研发的小型模块化钍基熔盐堆项目、“燕龙”泳池堆等其他先进核电技术,以及核聚变领域的能源创新为核能的多场景应用提供更广泛选择,能够共同支撑算力资源绿色化发展。

1.3 核能与算力中心协同发展优势显著

核电是较为理想的低碳与清洁能源,其运行过程基本不产生二氧化碳等温室气体排放。根据联合国欧洲经济委员会(UNCEC)的相关研究,2020年核能在各类能源的全生命周期电力二氧化碳排放中为最低,其平均排放仅为5.1~6.4 gCO₂/kWh。这一排放水平远低于煤电751~1095 CO₂/kWh以及其他化石能源的排放水平,也显著低于光伏8.0~83 CO₂/kWh的排放水平,即使与风能、水电相比,核电也具有更显著的减排优势^[11]。因此,应用核电是实现算力中心能源脱碳的重要路径之一。

从经济成本角度,核电也具有良好的经济性。根据国际能源署(IEA)和经合组织核能署(OECD-NEA)联合研究,在7%的折现率条件下,核电的平准化度电成本在55~95美元/MWh,长期运行的核电厂的平准化度电成本甚至可以下探至40美元/MWh;相比之下,煤炭最高价格接近100美元/MWh,天然气约80美元/MWh,陆上风电40~50美元/MWh,海上风电为80~100美元/MWh,集中式光伏为40~80美元/MWh^[12]。因此,核电具有非常显著的长期电力价格优势,能够显著降低算力中心的全生命周期运营成本,提升经济回报水平。同时,采用核能供能的算力中心业务还能显著地降低业务拓展过程中面临的政策成本,享受绿色转型所带来的政策性经济红利。

与风电、光伏等其他可再生能源相比,核能具有供电稳定、可靠的特性,能够提供连续不断的基本负荷发电,从而保障电网与工业、算力等方面能源需求的稳定性。算力基础设施特别是智算中心对能源稳定性有极高的要求,人工智能模型在训练过程中通常使得设备负载达到100%,同时训练时

间也呈指数级增长,尤其是在面临高性能芯片禁运的背景下,对于算力中心长时间、高负荷的运营要求进一步提升。相比之下,风能和太阳能等其他清洁能源具有明显的间歇性和波动性,同时受极端天气等自然气象条件影响较大。为提升该类能源的稳定性,投资方需开展大量额外的储能与新兴电网投资,在满足相关约束条件的同时,进一步增加了总体项目的成本投入。

此外,核电站的能量密度要极大地高于光伏与海风等新能源项目,表现为占地面积较小的优势。太阳能发电的占地面积约为同等规模核能发电的75倍,风力场面积更是需要同等规模核能发电面积的360倍^[13]。因此,在中国一线与二线中心城市周边建设以核电项目为供能基础的算力中心设施,能够大量节约建设用地资源,进一步提升经济性,并为更加灵活地布局在算力需求周边创造可行性。在这一优势下,核能与算力中心协同发展可有效弥补“东数西算”等远距离新能源算力中心所无法满足的如“自动驾驶”“工业自动化”“金融交易”等应用场景下低延时与本地部署要求的算力需求,更好地满足人工智能与数字经济产业的应用需求。

另外,中国计划到2035年将核电发电量快速提升至全国总发电量10%的水平,算力中心也能够解决新增核能项目投入后的消纳问题。算力中心区别于传统柔性负荷,是目前已知的唯一可以不依赖电网而实现电力负荷瞬时转移的新型负荷,同时具备时间、空间调节潜力,实现“算力-电力”的时空转移与跨区协同^[14],能够成为新增核能项目的重要消纳场景,并解决部分核能项目拓展中的经济性论证需求,从而促进核能项目投资的高质量发展。

2 核能与算力中心协同发展模式讨论

2.1 核电上网购电直供模式

通过电力市场交易直供是当前可以低成本实现核能与算力中心协同发展的一种形式。在开展电力交易市场化改革的省份,核电企业成立售电公司通过电力合同销售的形式,直接与算力中心等大用户签订购电协议,通过核电上网供应算力中心使用。在实际操作层面,核电售电公司可以通过分析用电客户的需求,为算力中心用户定制购电、能源管理分析等涵盖多方面用能需求的个性化的电力供应套餐。

通过与算力中心签订电力直供等购电协议,核电售电公司可以平抑电力市场中的尖峰电价,降低算力中心用户的平均电价成本,保障电价的相对

稳定,从而显著降低算力中心运营成本。根据企业在其他行业的应用经验,在东部地区一些电力市场改革进度较快的区域(如福建),通过签订购电协议的形式为算力中心供电,能够节约10%以上的电力运营成本。

此外,这一模式下电力供应仍依赖原有的骨干电网,并不会增加短期额外的输电等方面的基础设施投资需求,这使得以此类模式开展业务在选址等方面具有很高的地理灵活性,同时,在一些场景下算力中心用能用户也可以享受如“能耗双控”等绿色能源政策领域的支持^[15]。但是核电上网购电直供模式仍只是一种“软性”的直供模式,与充分利用核电优势相比仍存在较大差距。其业务模式仍需要核电通过电网公司实现电力传输,无法实现真正的电力“直供”。

这一模式下,算力中心绿色属性的认定方面存在较大障碍。一方面,绿色电力认证方面存在障碍,核电排放虽然较低,但在政策层面并未纳入国家绿电体系中,无法通过绿证交易实现低碳认证,仅凭借供电企业出具的相关业务证明,认可度较低;另一方面,由于核电仍需经过上网过程,为规避碳排放核算重复抵减的问题,核电减排效用已经被算入国家电网平均电力排放因子中,因此,在用户层面在开展碳排放核算的过程中,仍然需要取用区域电网的平均排放因子,涉及相关业务减排效应重复核算的问题。

在经济层面上,当前国内市场并未完成电力化市场交易的改革,各省份在电力交易的改革深度存在较大差异,只有在本区域内存在核电供应且电力市场化改革试点适宜的区域才能应用这一业务模式,限制了模式的应用场景。在这一模式中,除了购电费用,算力中心用户仍然需要承担电网的输配电费、线损折价及系统运行费等额外费用,长期无法充分享受到核电价格的经济性优势。因此,这一模式只能作为核电供能算力中心业务中的一种过渡模式。

2.2 核能离网直供模式

建设核能离网直供实现核能直供算力中心是更为直接的协同发展模式,这一模式在美国被称为“co-location”的发展模式。当前核能直供的业务模式在国内较为少见,如江苏田湾核电站就实施了全国首个工业用途核能供汽项目“和气一号”^[16],该项目将核电机组蒸汽经过多级换热后,通过管道直接送达连云港石化基地,用于工业生产。算力中心在

核能利用方面可以借鉴离网直供经验,与购售电业务模式相比,这一协同发展类型可以充分认证项目低碳属性、降低长期用能成本、破除政策与法规等方面的限制,是更为理想的业务发展模式。但这一模式的构建也面临更为复杂的体系建设与更大量的早期资金投入。

第一,构建核能离网直供型算力中心业务需要将新建电网,或对既有电站及周边园区、电力微网、供热管网、能源分配中心等基础设施进行改造,并根据对应算力中心的业务需求研发制定具有适应性的总体空间布局。在整体规划方面,由于项目整体规划受到国家核安全局等机构的严格审批,应当充分考虑核电项目选址需求及算力中心发展及规模需要统筹合理布局,可考虑在核电基地满足安全控距等要求的条件下就近布置。在技术细节方面,一方面,需要考虑用能需求层面的智能调度,主要需要关注核能发电系统与算力中心之间的需求适配性等关键问题,如在微电网的范围内通过智能化能源管理系统和 AI 算力调度系统,实现对能源和算力的实时监测与优化调度,从而提高核电运营安全与效率^[17],同时满足 AI 算力的波动性变化需求,这就需要在前期规划中为相关设施预留合理空间;另一方面,核电项目规划中与常规电厂在放射性物质储备、核燃料运输、应急空间的布置上存在较大差异^[18],将高度智能化、无人化的算力设施嵌入核能基地中,需要研究在总平与竖向空间中充分进行复合功能的利用,从而在有限的空间中充分满足生产与安全的双重需求。

第二,对建筑功能、项目规模、能源系统、机房工艺等方面要协同能源、算力需求与项目经济性统筹布局,提升二者的适配性,充分适配核电规模,并挖掘多种核能供热与制冷的潜力。这里特别需要注重匹配算力中心能源需求与核能装机之间的关系。当前常规算力中心的能源负荷在 5~10 MW,未来,大型算力中心的产业集群将能达到 100 MW 级别规模^[19],与中国“玲龙一号”等小型堆的发电能力相比具有较高的适配性。另外还要充分考虑能源系统的布置。一方面,实现核电直供,剔除备用化石能源供应系统,优化算力中心的备用能源系统,实现空间、投资与后期运维系统的节约^[20];另一方面,可以充分利用核能综合利用中核电余热回收等技术满足数据库制冷需求。传统算力中心中空调系统在非 IT 设备中耗能最高,可达总耗能 40%左右。在技术层面上,这种核能余热回收技术可以通过创新

的多级换热装置实现介质间“水—汽”和“汽—水”两种介质的高效转换,这种设计不仅设备体积小,还能节约占地空间,提升转换效率,更重要的是这一设计与算力中心当前布置液体冷却系统的发展方向较为容易实现耦合^[21],从而实现算力设备的高效散热。通过回收利用核电站核能余热,利用蒸汽溴化锂机组等制冷设备为算力中心提供制冷服务亦可实现高效节能,并大幅度降低制冷环节的碳排放,相关技术效益较传统机组节电超 60%^[22]。

第三,在核能与算力中心园区中,充分考虑布置光伏发电、风力发电、储能等多元化新能源系统,构建“核风光储一体化”多能互补系统。依靠核能作为基载电力,利用空间条件,在核电基地与算力中心场地中发展分布式光伏、海上光伏、海上风电及配套储能等设备应对算力中心用能的波动性需求,保障园区能源供应网络的平衡,提升园区能源系统的调节能力,进一步降低能源使用成本。随着核能技术的不断成熟与针对算力中心适配性研究的不断深入,核能离网直供模式,将表现更大的应用前景。这个方面的技术方式较为成熟,即利用系统集成核能、风能、光伏和储能等能源形式,通过智能算法在调度指令上实现不同能源之间的协同,如在风电和光伏出力不足时自动调整核能输出功率,确保能源供应的稳定性^[23]。同时,储能系统在能源过剩时储存多余电力,在需求高峰时释放,调节频率,稳定电压,提升电能质量。该系统还可采用数据采集技术,实时监测设备的运行状态和输出功率,通过传感器、监测网络、智能仪表及各项监测所用的二次设备收集风电场、光伏电站、储能设施及核电站的运行数据,对采集到的有效数据进行深度挖掘分析,实现能源需求预测、故障预警和优化调度。例如,系统可以预测风电和光伏的发电功率,提前调整总体电能输出的调度计划。此外,系统还具备智能决策功能,能够根据实时数据实时自动调整分配策略,调整设备运行参数和调度指令,降低能源损耗^[24]。通过这些技术方式,在多能互补系统的构建中,核能离网直供模式可以结合光伏发电、风力发电和储能系统,形成“核风光储一体化”多能互补系统,并且可作为基载电力满足算力中心的波动性需求,进一步优化能源供应的稳定性和经济性。

3 核能与算力中心协同发展的政策、技术与市场挑战

3.1 政策与法规挑战

当前算力中心与核能协同发展在政策与法规

层面面临双重制约。一方面,算力中心作为高耗能业务,各地对其能耗双控指标要求极高。特别是在本地需求旺盛的一线城市能耗指标管控日趋严格,使得算力中心建设指标稀缺性加剧。以北上广为例,北京于2018年规定中心城区全面禁止新建和扩建数据中心,广州地区于2021年10月对违规数据中心进行审查并依法停止使用或建设,对部分落后产能进行清理,上海每年拟支持的新建数据中心项目总规模在3万元左右,同时呈收缩趋势。未来,在政策体系由“能耗双控”向“碳排放双控”转型的过程中,低碳或零碳算力中心业务有机会破除能耗控制对产业发展所造成的限制,成为实现产业快速发展的新路径。

另外,核电站开发建设审批的要求非常严格,对区域安全因素、环境因素以及社会经济因素都有极高的要求。当前,核电项目仍需要完成各级政府机关审批直至国务院常务会议进行最终核准,项目前期开发周期可能长达数年,具有较高不确定性。由于政策等各类因素影响,核电厂址也是非常珍贵的资源,对核电发展形成极大的约束。核能项目在选址、建设等工作程序上,以及核安全要求和评审原则只参考大型核电厂的选址导向,以偏远地带为主,难以围绕用户建设,严重增加了项目开发难度和成本。同时,国内迄今仍未放松内陆民用核电的审批,进一步压缩了核电的灵活布局,限制了核能要素的空间布局潜力。核电项目布设需要符合安全缓冲距离的要求。虽然小型模块化堆型的理论辐射应急计划区范围已经由大堆的10 km缩短至300 m左右^[25],但在实际的项目审批过程中仍然面临审批尺度灵活性与政策更新等方面的挑战。因此,在布设大规模算力中心集群方面,开发临近的离网核电直供项目也存在一定的不确定性。

3.2 技术与成本挑战

核能技术方面,小型化、模块化先进核能技术产业化成熟度仍然较低,同时,在核能直供模式方面仍有大量研发与优化工作需要开展。一方面,当前“玲龙一号”等适配性较高的堆型仍在商业化示范工程建设过程中,技术的成熟性有待验证,进入规模化研发阶段仍需时日。另外,当前“玲龙一号”等堆型设计中也存在一些不匹配因素,比如其运行所需的民用核燃料棒必须每两年更换一次燃料,期间停堆换料对于算力中心的持续稳定运营也会产生一定不利影响,在这一方面需要有新的技术应用对停堆换料等不匹配特征进行持续优化。解决这

些问题,需要开发更高效的核燃料管理系统,例如,采用先进的燃料元件设计和在线监测模块,延长燃料更换周期并减少停堆时间^[26]。

另外,核电项目总投资仍然偏高,建设周期偏长,在项目开发周期上很难适配算力中心业务的投资开发与运营节奏。虽然小型化堆项目的投资已经由“华龙一号”等大堆项目上千亿的投资大幅度削减至50亿元左右,但是与算力中心数十亿的投资规模相比仍然偏大。当前小型堆每千瓦的单位造价与大堆相比价格偏高,且开发周期优势并不明显,在产业化应用周期中仍然处于初期阶段,在降低算力中心所需用电成本方面仍有大量技术工作需要推进。例如,在运营层面强化研发,通过智能化的能源管理系统或AI检测系统,实现对核能发电的实时监控和调度优化。这种系统能够实时监控能源设备的运行状态、能源消耗情况以及电力影响因素的环境条件,可依据监测模块的影响参数,制定合理的能源使用和采购计划,这些技术手段和方式,使得核能离网直供系统的可靠性和经济性将得到一定提升。

算力中心方面,受制于高端算力芯片禁运等不利因素,如何进一步提升单位算力的能效水平,降低算力延时,提升算力品质对构建直接面向终端用户核能算力中心的产品竞争力至关重要。充分利用区位、能源与绿色优势,与“东数西算”等国家重大工程的算力供给形成差异化。此外,投资建设巨大的离网基础设施将极大地提升开发项目资金成本,造成经济性不足的风险。

3.3 市场等其他挑战

从市场方面来看,核能直供算力中心业务模式的建立还可能会面临来自各市场主体的多重挑战,除了市场监管相关挑战已经在政策与法规层面进行了论述,能源公司、算力运营商以及投资者是推进业务模式深化的主要利益攸关方。

其一,对于能源公司而言,核能离网直供模式虽然带来新的机遇和挑战,例如,小型模块化反应堆(small modular reactor, SMR)技术的开发和应用所带来的潜在经济价值,但目前该技术仍处于早期阶段,SMR技术在功率调节、燃料管理等方面仍面临技术瓶颈,影响了其在核能直供模式中的应用效率,该技术的成熟度和经济性亟待提升^[27]。另外,能源公司确实要考虑如何将核能直供模式与现有能源供应体系结合。组建离网直供项目为高耗能算力中心供能的业务模式可能会引发电网公司

的反弹。虽然中国政府不断推动深化电力系统改革,支持配电网建设与分布式电源就近消纳等新增市场需求^[18],但大型电力公司严重依赖电网的业务模式使得他们非常审慎地推动离网直供项目的投资。从宏观看,具备核电投资运营许可的四家企业均为中央企业,其传统业务模式高度依赖电网公司,往往审慎处置这类直供业务的发展。电网企业对潜在业务的流失与对电网造成的波动也存在不满足意见,如在美国科技公司核电与算力中心耦合发展的背景下,一些美国电网企业发出了对该类业务扩张的警告与反对的声音^[28]。

其二,算力运营商则尤其关注核能直供模式对数据中心运营成本和供应稳定性的影响。核能离网直供有望降低能源成本,但需解决技术接口和适配性问题。此外,算力运营商需要与能源公司加大合作力度,推动核能直供模式的商业化应用落地。

其三,投资者高度关注核能直供模式的经济性与投资回报率,对投资成本、利润率、回收周期及资产收益率等核心指标均有明确要求。离网直供项目存在初始投资高、回收周期长的特点,这可能影响投资者的决策判断。投资者需要审慎权衡项目所面临的技术风险、市场风险和政策风险,做出合理抉择,以此保障投资安全,实现收益的稳定性。

此外,核能直供算力中心业务模式的建立还可能受到环保组织、公众对核能安全性的恐慌、国际政治博弈,以及核扩散条约、国际法令等方面因素的影响。核能直供算力中心的离网直供模式在市场推广中面临的影响和挑战繁多且复杂,针对监管方、能源公司、算力运营商、投资者和公众等多方面的挑战各不相同,对于这些挑战的应对措施需要通过政策支持、技术创新和市场机制的完善来形成合理的战略路径选择,以期在未来逐步克服。

4 商业模式案例分析

虽然核能算力中心有诸多前述的优势,但受制于厂址开发等发展限制,国内当前缺乏相关项目的投资案例。近年来,美国科技与能源企业开展核能算力中心协同发展的商业尝试,这些商业探索能够为下一步业务发展提供借鉴。

4.1 美国奥克洛公司钠冷快堆核能算力中心项目

美国奥克洛(OKlo)公司是 2013 年成立于加利福尼亚州的核能创业公司,主要业务是推动先进核能技术液态金属快堆(Aurora 堆)实现技术的产业化。公司已经获得了来自美国能源部,知名企业家、OpenAI 创始人奥特曼(Sam Altman)的大力支

持,并于 2024 年在纽约证券交易所上市。

美国奥克洛“Aurora”的微型快堆,能够产生 15 MW 的输出电功率,同时其微型快堆具有建造时间短,资金占用低,占地面积小等一系列成本优势,其建设周期低于 18 个月,建造成本约为 7 000 万美元,同时占地面积仅约为 2 ac(1 ac=4 065.85 m²),平准化度电成本在 80~130 美元/MWh,在美国与峰值燃气电厂和海上风电相当。同时,微型快堆具有固有安全性、燃料利用率高与建造标准化程度高等优势,非常适宜在多种场景下与算力基础设施协同发展。Aurora 项目首堆已经获得了美国能源部的项目支持,但仍未获得美国核管理委员会的许可。公司预计 2027 年 Oklo 将在美国爱达荷国家实验室建成 Aurora 首堆并实现发电。

Oklo 在这一领域发展取得了显著的商业成绩。2024 年 5 月,Oklo 与美国数据运营商 Equinix 签订意向书,为其位于美国的数据中心提供期限为 20 年,总量不少于 100 MW 且不超过 500 MW 的电力服务合同,双方通过电力购买协议的形式进行了签约,Equinix 向 Oklo 支付了 2 500 万美元的预付款。这是全球首个数据中心运营商与 SMR 开发商之间的合同,标志着两个行业的重要融合^[29]。

此外,2024 年 5 月,Oklo 与美国数据运营商 Wyoming Hyperscale 达成协议,将通过签订一份非约束性意向书,推动双方达成一份为期 10 年的 100 MW 购电协议。Oklo 将向 Wyoming Hyperscale 计划在怀俄明州的埃文斯顿附近的阿斯本山脉开发的 58 ac 的先进算力中心提供配套核能,使得这一数据中心成为全美最先进的可持续数据中心,其项目余热还可以用于周围农场的运营^[30]。数据中心运营商通过与 Oklo 签署长期购电协议,以预付款的形式提前支付电力成本,加速了先进核能技术微型快堆的商业化进程,对于产业体系的孵化具有重要的支持作用。

4.2 美国 NuScale Power 小型堆支撑项目

NuScale Power 专注小型模块化反应堆研究计划,公司成立于 2007 年,由美国工程咨询业巨头福陆公司控股。NuScale Power 于 2020 年获得美国核管理委员会开出的首个小型模块化堆的设计许可。NuScale Power 能够提供 VOYGR SMR 等不同类型的能源供应产品^[31],功率模块是压水反应堆,所有用于产生蒸汽和热交换的设备都集成在一个单独的模块中,其技术成熟度相对较高。NuScale Power 公司认为其核心产品非常适合数据中心和人

工智能公司,其标准模块能够提供 77 MWe 的能源供应。NuScale Power 与能源商 ENTRA1 Energy 通过建立战略合作伙伴关系来为数据中心提供定制化的能源服务。

NuScale Power 一方面通过与数据中心等相关机构签订预购电合同融资,加速技术融资。这一技术与算力中心的协同发展已经计划在俄亥俄州和宾夕法尼亚州建设两座发电厂中开展应用。NuScale 与美国标准电力公司(Standard Power)的一份价值约为 370 亿美元的合同,在这两州提供 24 台 77 MWe 模块,预计共计生产 1 848 MWe 的清洁能源。标准电力公司将为区块链矿工和数据中心开发商等数据处理公司提供数字基础设施服务。首个项目预计将于 2029 年投产运营^[32]。

另外,NuScale Power 通过聚合多家用户需求的商业模式,进一步获得市场支持,如聚合谷歌、微软和纽柯公司等全球性能源买家的需求,这种方法旨在降低公用事业公司和开发商考虑早期商业项目的风险,实现规模效益,加速项目的产业化。2023 年 5 月,纽柯公司与 NuScale Power 签署了一份谅解备忘录,探索在纽柯公司的废钢电弧炉钢厂部署 NuScale 的 VOYGR SMR 发电厂为数字经济提供清洁能源^[33]。

4.3 美国 Helion Energy 核聚变能源算力中心开发项目

Helion Energy 是一家核聚变初创公司,是一家核聚变初创公司,成立于 2013 年,总部位于美国华盛顿州埃弗雷特,采用磁惯性的技术引发聚变反应^[34]。2023 年 5 月,Helion Energy 宣布将在 2028 年之前建成世界上第一座聚变发电厂,同期,微软与 Helion Energy 签署了电力购买协议,这份协议被认为是核聚变领域的首个商业协议。Helion Energy 承诺将从 2028 年开始向微软提供不少于 50 MW 的核聚变能源供数据中心业务使用,协议中包含晚于 2028 年供能罚金的对赌条款。虽然这项技术目前仍处于理论阶段,但微软对其潜力充满信心,明确将先进核能、聚变能源以及传统反应堆列为公司绿色政策的核心支柱之一。

5 结论与建议

5.1 加速先进核能技术与算力适配性研发

核能与算力中心协同发展体现出的一系列比较优势,其实现高度依赖于先进核能技术的发展。因此,加速适配性先进核能技术的成熟应用是这一业务模式发展的优先任务。建议重点关注以下

方面。

第一,加速针对适配算力中心发展的模块化、小型化、安全化的快堆、压水堆、聚变技术等先进核能技术研发工作,促进技术的快速产业化。

第二,进一步推动先进核能技术的经济性提升,提升能源转化效率,针对核能技术与算力的耦合性发展进行针对性的效率与成本优化,最大化清洁能源转化效率。

第三,重点提升先进核能项目开发的安全性、地域灵活性及公众的接受程度。开展核电离网项目体系研究,在空间上研究布局临近需求中心的离网直供布局模式,进一步发挥业务模式的比较优势。

第四,研究同步应用风、光、储等多元化新能源技术与核能共同组建适配算力中心发展的综合能源一体化解决方案,充分发挥各类型清洁能源的优势。

5.2 创新核能与算力商业模式

当前,核能与算力中心协同发展业务在技术层面仍需要较长的发展周期。商业模式的创新发展能够为技术发展提供必要的资金、市场与人才资源支撑,对于为技术创造良好的孵化与发展环境而言至关重要。

第一,构建由市场化机制驱动的核能前期技术创新投资体系,对标欧美发达国家的产业孵化机制。民用先进核能技术的技术创新可以更多引入市场化的资本、技术与人才,提升行业商业市场活跃度。

第二,灵活发展各类商业交易框架,如通过购电协议预支能源费用等多种灵活的形式,为核能与算力技术与项目开发等资金密集型创新活动的早期发展提供资金支撑。

第三,放松各类民间及外资对核能技术与算力技术投资的限制,发展耐心资本,吸纳用户、电网以及技术方等各利益攸关方参与投资,为商业模式发展创造更为广阔的融资渠道。

第四,培育领域技术人才与商业人才,推动二者协同发展,储备行业人力资本,建立与之对应的市场化激励机制,支撑这一商业领域的长期发展。

5.3 推动政策支持进一步优化

本业务具有重大的外部性,因此,政策导向对行业发展与变化有至关重要的影响。为加速新质生产力的形成,应对在人工智能与能源革命领域上的大国竞争,建议各级政府对这一创新业务模式给予更多政策支持。

第一,在政策审批上,配合先进核能技术的发展,发展有别于传统民用大型核能项目的审批模式,安全有序地实现更为灵活的先进核能项目布局,降低项目审批周期与成本,为业务空间布局的扩充、商业模式的成立提供条件。

第二,绿色业务支撑上,尽快实现对核能绿色属性的认证,推动核能绿色算力中心在节能审查、绿色金融、企业声誉、绿色补贴等方面享受与风光资源同等的政策地位。

第三,强化对公众与市场关于先进核能的教育,提升社会公众对于先进核能项目的接受度,吸引更多的社会资本与人才进入业务领域,创造核能与算力中心行业发展的重要契机。

参考文献

- [1] 邓博文. 核能“三步走”点亮现在、照向未来[J]. 中国核工业, 2024(7): 1-10.
- [2] IEA. Electricity 2024[R]. Paris: IEA, 2024.
- [3] 张佳欣. 破解 AI 耗电困局科技巨头“押注”核能[N]. 科技日报, 2024-06-24(004).
- [4] 刘雯蜀, 李佩京. 算力中心铸就大模型时代基座——超算、智算及数据中心行业报告[R]. 杭州: 浙商证券, 2023.
- [5] 中国通服数字基建产业研究院. 中国数据中心产业发展白皮书(2023年)[R]. 北京: 中国通服数字基建产业研究院, 2024.
- [6] 邵文娜. 《算力基础设施高质量发展行动计划》配套解读[J]. 数据中心建设, 2023(11): 82-83.
- [7] 安永碳中和课题组. 一本书读懂碳中和[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [8] 董梓童. 耗电量将接近 4000 亿千瓦时! 数据中心亟待绿色转型[N]. 中国能源报, 2023-10-17(004).
- [9] 绿色和平, 华北电力大学. 点亮绿色云端: 中国数据中心能耗与可再生能源使用潜力研究[R]. 北京: 绿色和平, 2019.
- [10] 索炜. 核能“三步走”从“一堆一器”讲起[EB/OL]. [2024-11-10]. <https://news.cn/energy/20240410/71cof5cfcbdc47da82e7fela89d7862f/c.html>.
- [11] GIBON T, HAHN M A, GUITON M. Life cycle assessment of electricity generation options[M]. Geneva: UNECE, 2021.
- [12] IEA. Projected costs of generating electricity: 2010 [M]. Paris: IEA, 2010.
- [13] NEITNEL. Land needs for wind, solar dwarf nuclear plant's footprint [EB/OL]. [2024-09-30]. <https://www.nei.org/news/2015/land-needs-for-wind-solar-dwarf-nuclear-plants>.
- [14] 岳昊, 武冰清. 智能算力快速发展对电力供需的影响及建议[J]. 电力设备管理, 2024(15): 12-14.
- [15] 关于加强绿色电力证书与节能降碳政策衔接大力促进非化石能源消费的通知[S]. 北京: 国家发展改革委, 国家统计局, 国家能源局, 2024.
- [16] 杨阿卓, 高原, 段新瑞, 等. 我国首个工业用途核能供汽项目正式投产[J]. 中国核工业, 2024(6): 2-7.
- [17] 陈本林, 常野, 吴云龙, 等. 基于小型核电站构建海岛型微电网的规划设计[J]. 中国核电, 2017, 10(2): 6-12.
- [18] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于新形势下配电网高质量发展的指导意见[S]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 2024.
- [19] ALBERS J. 2024 global data center market comparison [R]. New York: Cushman and Wakefield, 2024.
- [20] 李岩, 郝鹏. 核电数据中心方案设计浅析[J]. 绿色建造与智能建筑, 2024(8): 101-104.
- [21] 杨桔永, 袁钰. 中国液冷数据中心市场发展研究[J]. 数据中心建设, 2021(1): 10-20.
- [22] 吴强. 核电厂余热在数据中心的再利用[J]. 绿色建造与智能建筑, 2023(4): 41-44.
- [23] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 等. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 407-416.
- [24] 窦潇潇. 综合能源系统优化调度、效能评价及应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [25] 袁艇. 中国到底能建多少核电站, 在哪建? [J]. 中国核工业, 2022(9): 16-21.
- [26] 杜祥琬, 叶奇慕, 徐铄, 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.
- [27] 张薇薇, 何正熙, 万雪松, 等. 小型模块化反应堆控制方法综述[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2024(2): 7-18.
- [28] 史正丞. 一场事关“核电数据中心”的口水仗正在美国悄悄升温 [EB/OL]. [2024-10-30]. <https://www.clscn/detail/1719720>.
- [29] CLARK K. Data centers driving Oklo's nuclear project pipeline [EB/OL]. [2024-12-24]. <https://www.power-eng.com/nuclear/data-centers-driving-oklos-nuclear-project-pipeline/>.
- [30] HONNEY T. Oklo secures contract to supply nuclear power to Wyoming Hyperscale's data centre campus [EB/OL]. (2023-05-18) [2024-10-01]. <https://www.neimagazine.com/news/nucor-considers-deploying-nuscale-smr9-atarc-furnace-steel-mills-10862177>.
- [31] KAWADA E, SATO Y, KAI S, et al. Nuscale Voygrtm SMR Power plant technical and safety features and engineering collaboration with nuscale through NEXIP initiative[J]. The Proceedings of the International Conference on Nuclear Engineering (ICONE), 2023, 30: 1281.
- [32] CIAMPOLI P. Standard power chooses NuScale small modular reactor technology for data centers [EB/OL]. [2024-09-27]. <https://www.publicpower.org/periodical/article/standard-power-chooses-nuscale-small-modular>.

lar-reactor-technology-data-centers.
[33] HONNEY T. Nucor considers deploying NuScale SMRs at arc furnace steel mills[EB/OL]. (2024-05-29)[2024-12-07]. [https://www.neimagazine.com/news/gupply-](https://www.neimagazine.com/news/gupply-chain/oklo-secures-contract-to-supply-nuclear-power-to-wyoming-hyperscales-data-centre-campus/)

chain/oklo-secures-contract-to-supply-nuclear-power-to-wyoming-hyperscales-data-centre-campus/.
[34] 彭毅, 张恬. Helion Energy——持续探索核聚变商业化应用: 可控核聚变产业观察[R]. 宁波: 甬兴证券, 2024.

Preliminary Exploration of the Collaborative Low-carbon Development Model between Nuclear Energy and Computing Power Centers

MA Liang¹, YANG Yue²

(1. CNNC Carbon Asset Management Co. Ltd., Innovative Development Department, Beijing 100010, China;

2. CNNC Rich Energy(Inner Mongolia) Co. Ltd., Hohhot 010000, China)

Abstract: Advanced nuclear energy technology and green computing power technology are both typical representatives of new quality productive forces, and are of great significance for the future development of artificial intelligence and the transformation of green energy. In recent years, the collaborative development model between nuclear energy and computing power centers has been burgeoning. The formation basis of this collaborative development model, as well as the advantages of the business model in the fields of energy conservation and carbon emission reduction, economic profitability, safety and stability, resource saving and market absorption were introduced. The two potential coupling models of electricity purchase-sale model and off-grid direct supply model were also discussed. At the same time, the article also focused on the challenges from the fields of policy, regulations, technology, cost and market, and outlined the typical business experiments abroad. Finally, recommendations are elaborated on in three aspects including technological advancement, commercial innovation and policy support.

Keywords: nuclear energy; computing power centers; carbon neutrality; collaborative development; business model