

从“单一型选手”转向“全能型辅助”——

除了发电，核能还有这么多用途

本报记者 叶子



2022年3月25日，在福建省福州市，中核集团“华龙一号”示范工程全面建成投运。

新华社发



山东省荣成市石岛管理区“国和一号+”智慧核能综合利用示范项目一期崂山光伏项目。

杨志礼摄(人民视觉)

近日，国家能源局发布1-6月份全国电力工业统计数据。上半年，全国发电装机容量约24.4亿千瓦，其中核电5553万千瓦，约占2.3%，同比增长6.5%。作为清洁能源的核电，正在中国经济社会发展发展中发挥越来越大的作用。

中国核电发展虽然起步晚，但从无到有、从小到大，形成了高水平的工业

创新链和产业链，其技术水平和综合实力已经跻身世界第一方阵。近年来，除了生产电力外，核能还应用于城市供暖、工业供汽、海水淡化、合成燃料等诸多场景。

中核集团旗下中国核电核能开发事业部副总经理于开治接受本报采访时表示，核裂变过程释放出大量热能，可以

较好匹配工业生产过程中对高温工艺热参数的需求。核能综合利用，就是契合各类应用场景，或将热能转化为电能或直接提供高温工艺热，通过能量的梯级利用，实现科学用能，有助于提高能源利用效率。未来，核能将从“单一型选手”转向“全能型辅助”，为绿色低碳发展贡献更多“核”力量。

工程可研报告进行评审，经过紧张的质询、讨论，技术方案获得专家一致认可。

2019年7月10日，海阳核能供热一期项目正式开工，工程内容包括核能供热换热站建设和15公里主管网铺设，当年9月30日全部完工。2019—2020年的供暖季，海阳市临港、度假区和核电产业园70万平方米共7757户用上了核能供热，整个供暖季运行平稳顺畅，状况良好，用户室温适宜，受到广大用户和社会各界的好评。2020年，山东核电又开启了推进大规模长距离供热的工作。2021年11月9日，核能综合利用带来的暖流输送到海阳市的千家万户。

“刚供暖，家里温度就达到了23℃。”海阳金阳海岸花园小区居民成京增说。有了核能供热，居民住宅的供暖费也由原有的22元/平方米降到21元/平方米。

紧接着，在2021年12月3日，全国南方首个核能供热项目——浙江海盐核能供热示范工程一阶段正式投运，供暖面积达46万平方米。海盐核能供热、核电南苑、枫叶新村3个小区的近4000户居民率先“尝鲜”，用上了零碳、清洁、高效的“核暖气”。这也意味着中国南方开启了核能供暖的历史，从此过冬抗寒再也不靠“抖”。

截至2022年4月，示范项目完成首个供暖季任务，持续安全稳定为近4000户居民供热100天，在供热质量提升的同时，供热价格较过去降低了约1/3。据测算，到“十四五”末，项目全部建成投运后，能够满足海盐约400万平方米供暖需求，相对于南方地区的电取暖方式，每年可节约电能消耗1.96亿度。

核能供暖不仅清洁，还很安全。“核能供暖是从核电机组抽取部分蒸汽，通过换热站进行多次加热，整个过程只有蒸汽加热水、水加热水两个步骤。”秦山核电党委书记、董事长黄晋说，核电站与用户之间有多道回路隔离，每个回路间只有热量的传递，没有水的交换，更不会有放射性物质进入暖气管道，热水也只在小区内封闭循环，与核电站层层隔离，没有任何接触。

在秦山核电总经理邹正宇看来，核能供热项目利用秦山核电基地机组冬季季余热功率，在不影响机组原有发电量和安全性能的前提下，向海盐县公建设施、居民小区及工业园区提供大规模安全、零碳、经济的核能供

暖，真正实现了当地居民、地方政府、核电企业及生态环保的多方共赢。

创新远不止于此。在泳池式研究堆50多年安全稳定运行基础上，中核集团针对北方城市供暖自主开发了一种安全经济、绿色环保的堆型产品——“燕龙”泳池堆。于开治介绍，“燕龙”泳池堆具有固有安全性高、清洁环保、管网适配性强等突出特点。一座400兆瓦的“燕龙”低温供热堆，供暖建筑面积达2000万平方米，可覆盖20万个家庭。

目前，“燕龙”泳池式低温供热堆示范工程已列入吉林省“十四五”规划。专家表示，在附近没有核电站的一些地区，泳池式低温供热堆非常适合，它的安全系数较高，可以满足一定范围内的供热需求，还可以解决散煤供热带来的大气污染问题。

多领域应用注入核能力量

前不久，全球首批商用堆碳-14辐照生产靶件，在中核集团旗下中国核电控股的秦山核电三厂2号重水堆机组入堆，开始商用堆生产碳-14同位素，预计将在2024年开始向市场供货，产量可满足国内需求。这是核能综合利用的又一重要突破。

什么是碳-14？它可以用来干什么？和我们的生活又有什么关系？原来，自然界中存在的碳，比如常见的石墨、钻石、铅笔芯等，都是碳-12。此外，它还有一些同位素“兄弟”，比如碳-11、碳-13以及碳-14，它们的原子核里都有6个质子，而中子数不同。碳-12很稳定，碳-14则具有放射性。

“利用碳-14的放射性进行标记和检测，可以检测幽门螺杆菌、开展药物代谢动力学研究。”中核集团秦山核电高级工程师孟智良介绍，碳-14常常被用作标记物，广泛应用于农业、化学、医学、生物学等领域。比如在农药中加入碳-14，后期通过检测农作物上碳-14的含量，就可以判断出农药的残留量。

中核集团秦山核电正高级工程师樊申介绍，此前，中国曾采用过用于实验研究的小型反应堆来生产碳-14，但是产量小，生产不连续，无法形成稳定的供应。此次使用商用核电机组，可以长期保持高功率稳定运行，连续生产碳-14。

“就拿幽门螺杆菌的诊断与追踪来说，目前我国每年的幽门螺杆菌检测需求超过3000万人次，市场不容小觑。”于开治表示，中核集团在医用同位素生产方面取得的重大突破，将有效解决和缓解国内碳-14同位素供给问题，为建立稳定自主的医用同位素供应保障体系、提升人民健康水平作出新的贡献。

除了充分利用现有核电机组开展核能综合利用外，中核集团还通过科技创新，积极研发先进核能系统，拓展更多核能综合利用的新场景。例如，2021年7月13日，中核集团海南昌江多用途模块化小型堆科技示范工程正式开工建设，成为全球首个开工的陆上商用模块化小型堆。

于开治介绍，“玲龙一号”（ACP100）技术，是中核集团通过10余年自主研发并具有自主知识产权的多功能模块化小型堆堆型，特点是小型化、模块化、一体化、非能动，可以作为清洁的分布式能源，在供电的同时可满足海水淡化、区域供暖、工业供热（冷）等多个领域应用需求。

在中国核学会理事长王寿君看来，核能既具有可再生能源的零碳排放特性，又延续了化石能源不间断稳定服役的特点，贴合大宗制造工艺的能源需求，应充分发挥大型压水堆、高温气冷堆、模块化小堆、低温供热堆等各自主优势，紧密结合用户侧综合能源消费需求，建立集供电、居民供暖、工业供汽、制氢、海水淡化、同位素生产等为一体的多能互补、多能联供的区域综合能源系统，为未来中国绿色低碳发展注入核能力量。

为工业供汽安全又节能

用核能烧开水发电，一直是许多网友对核能的有趣比喻，而这种类比也从本质上道出了核电站的发电原理。于开治解释，核电站发电主要是依靠核裂变释放能量，将水加热转化为蒸汽，从而驱动汽轮机发电。这其中，蒸汽不光可以用来发电，在工业生产中同样大有用途。

5月27日，经过3个月桩基施工建设，第一罐混凝土在田湾核电蒸汽供能项目能源站正式浇筑，标志着全国首个工业用途核能供汽工程——中核集团田湾核电蒸汽供能项目全面开工建设。该工程由江苏核电有限公司、连云港市徐圩新区石化基地联合开展，采用中核集团田湾核电3、4号机组蒸汽作为热源，将蒸汽输送至连云港石化产业基地进行工业生产利用，预计2023年底投产供汽。项目建成后年供汽量达480万吨，可实现每年减少燃烧标准煤40万吨。

“高温高压蒸汽是化工生产不可或缺的要害。目前我国化工行业的工业蒸汽主要来自燃煤电厂或自备燃煤锅炉，采用核能供汽将有效降低能耗、减少碳排放。”中核集团江苏核电维修部副总经理、工程负责人刘永生说。

不少人关注，核能供汽的安全性如何保证？刘永生介绍，加热的工业蒸汽经由独立隔离回路输送，从设计源头上确保了核能供汽清洁的安全。整个过程中，只有热量交换，不存在介质的连通，保障核能供汽清洁安全可靠。而且，通过管道预制架空蒸汽保温方案等措施，能控制每公里温度损失小于2℃、压强0.03兆帕（Mpa）以内，有效控制蒸汽长距离传输过程中温度和压力的损失，满足连云港石化产业基地工业用汽需求。

不只是石化产业，工业用热或蒸汽有着广泛需求。例如，在造纸行业，纸张生产中一些化学药品的加热溶解需要使用蒸汽，加工成型等程序也离不开蒸汽。在纺织印染行业，不论是染色、烘干还是浆纱、印染等步骤，都离不开蒸汽的支持和配合。在橡胶行业，橡胶的压延、硫化、干燥等工艺都要使用蒸汽。在制药行业，制药时需要大量的工业蒸汽和纯蒸汽对原材料、器械和设备进行高温灭菌，干燥、压片、制粒等工艺也需要蒸汽支持。在有色金属行业，新能源锂电池的制造，同样需要使用蒸汽以保证反应温度。

就在7月15日，浙江海盐核能供热示范工程（二阶段）工业供热项目顺利开工，预计今年8月底建成，可提供24小时热能供应保障，年工业供热约28.8万吉焦。此举相当于节约标准煤约1万吨，减排二氧化碳排放约2.4万吨，将实现产业发展和节能降碳双赢。今后，越来越多行业将用上核能供的蒸汽。

为居民供热清洁又温暖

与为工业提供蒸汽的原理相似，核能也为居民在冬日送去暖气。浙江海盐核能供热示范工程的一阶段便是民用供暖工程。事实上，在去年冬天，中国一南一北两座小城——浙江海盐、山东海阳都已经用上了核能供暖。

2021年11月9日，海阳提前进入供暖季，新老城区居民用上了核能供热，供热面积达450万平方米。依靠“暖核一号”提供的清洁热量，海阳市告别了延续多年的燃煤取暖历史，成为全国首个零碳供暖城市。

作为全国首创，核能供热项目并



图为位于江苏省连云港市连云区的田湾核电站7号机组建设现场。

王健民摄(人民视觉)



2021年7月13日，“玲龙一号”陆上商用模块化小型反应堆在海南省昌江黎族自治县开工。

新华社发

没有现成的经验可以参考，技术攻关的每一步都是在创造历史。“清洁电”能否产出“清洁热”？为积累经

核能综合利用前景广阔

叶奇霖

有11个国家69台机组除核能发电外，还实现了包含区域供暖、工业供热、海水淡化等其中一项或两项的综合利用。

经过不懈努力，中国核电发展规模已处于世界前列，科技创新能力大幅提升，在安全水平、装备制造、燃料保障、人才队伍等方面实现了跨越式发展，正在朝着世界核电强国行列大步迈进。中国核能行业协会发布的数据显示，截至2021年底，中国大陆运行核电机组53台，装机容量5465万千瓦，年发电量4071亿千瓦时。在实现“双碳”目标的背景下，中国核能综合利用空间巨大。

中国高度重视推动核能综合利用。中共中央、国务院印发的《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》明确，“在北方城镇加快推进热电联产集中供暖，加快工业余热供暖规模化发展，积极稳妥推进核能余热供暖”。今年3月，国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代能源体系规划》再次提出，“积极安全有序发展核电”“推动核能在清洁供暖、工业供热、海水淡化等领域的综合利用”。

从实践层面看，党的十八大以来，中核集团开足马力，积极拓展核能多用途利用领域，充分对接核电站周边市场需求，积极推进核能余热供暖，推动在核

电基地建设核能综合利用示范项目。

近年来，浙江秦山核电站和山东海阳核电站均已利用核能供热技术为城市居民供暖；全球首座球床模块化高温气冷堆核电已在山东荣成并网发电；全球首个陆上商用模块化小型堆已在海南昌江开工；全国首个工业用途核能供汽工程——江苏田湾核能蒸汽供能项目全面开工建设……核能综合利用特别是在高耗能行业中的应用，将进一步凸显核能的零碳价值。

总之，核能综合利用前景广阔，科研创新正蓬勃开展，相信中国一定会走在世界前列。随着“双碳”行动持续推进、能源安全战略的深化落实，核能将在支撑中国“双碳”目标实现过程中发挥不可或缺的作用，核能综合利用也将迎来新的发展机遇。

（作者系中国工程院院士、中国核能行业协会专家委员会主任）

作为一种清洁能源，核能在降低煤炭消费、有效减少温室气体排放、缓解能源输送压力等方面，具有独特的优势和发展潜力，是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要能源组成。除传统的核能发电外，核能综合利用的内涵广泛，应用场景多样，可用于区域供暖、工业供热（冷）、海水淡化、核能制氢、同位素生产等；此外，在太空航行、深海探测、海岛供能等特殊场景中，核能还具有持续性强、供能形式多样等特殊优势。

联合国欧洲经济委员会、世界核学会等多个权威机构报告指出，作为低碳电力和热力的重要来源，核能在减少二氧化碳排放、实现碳中和方面将发挥重要作用，是推动全球清洁转型发展、构建现代能源体系的关键驱动力。根据国际原子能机构发布的2021年版《世界核反应堆》报告，截至2020年底，在全球32个国家总计442台在运核电机组中，