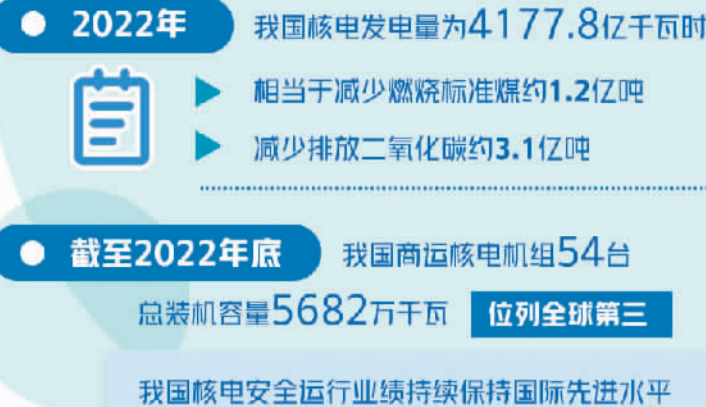


智库圆桌(第44期·总163期)

积极安全有序发展核电

党的二十大报告提出,积极安全有序发展核电。《“十四五”现代能源体系规划》提出,在确保安全的前提下,积极有序推动沿海核电项目建设,合理布局新增沿海核电项目;到2025年,核电运行装机容量达到7000万千瓦左右。本期邀请几位专家围绕相关问题进行研讨。



跻身世界核电大国之列



我国核电建设情况及发展前景怎样?

杜忠明(电力规划设计总院党委书记、院长):核电作为一种清洁能源,是我国主要的电力来源之一,对优化我国能源结构、保障能源安全、构建新型能源体系、助力实现“双碳”目标具有重要作用。

核电是指利用铀核裂变所释放出的热能进行发电,具备能量密度高、单机功率大、土地利用率高、不受季节和气候影响、发电成本稳定且相对较低等特点,可长期稳定高效运行。相比其他发电方式,核电机组的年发电利用小时数常年保持在7000小时以上,位居所有电源之首,而且在生产过程中不排放二氧化碳、氮氧化物、烟尘和二氧化碳。核电全寿期二氧化碳排放当量仅约12.2克/千瓦时,与水电基本持平,低于风电、光伏。安全是核电产业发展的前提,现有的三代核电主要在安全系统改进上提升了核电站的安全性,已从设计上实现实际消除大量放射性物质释放的可能。

自1985年秦山核电开工建设以来,经过近40年的发展,我国已跻身世界核电大国行列。截至目前,我国商运核电机组超50台,主要集中在沿海的辽宁、山东、江苏、浙江、福建、广东、广西和海南8省(区),总装机容量超5600万千瓦,位列全球第三,仅次于美国和法国。在建核电机组超20台,在建机组装机容量已连续十多年保持全球第一。“华龙一号”机组陆续投运,标志着我国实现了由二代向自主三代核电技术的全面跨越。全球首座球床模块式高温气冷堆核

电站石岛湾高温气冷堆示范工程首次并网发电,标志着我国成为世界少数几个掌握第四代核能技术的国家之一。

我国核电工程建设队伍不断发展,具备同时建造40余台核电机组的工程施工能力,能够应对多项目、多基地、几个堆型同步建设的挑战。核电平均建设工期为73个月(含AP1000、EPR等首堆工程),低于全球平均水平85个月。“华龙一号”全球首堆福建福清核电5号机组,从开工建设到投入商运历时约68个月,如期完成建设目标,成为全球首个按期投产的三代核电首堆。此外,我国已实现核安全关键设备和材料的自主研发和国产化,自主三代核电综合国产化率达到90%以上,形成了每年8—10台(套)百万千瓦级核电主设备供货能力。“国和一号”、快堆和小堆示范工程正按期有序推进,钍基熔盐堆、铅基快堆、聚变堆等先进反应堆系统研发取得新进展,并走在世界前列。

我国高度重视核安全,建立了严格的核安全监管体系,在运核电安全总体水平居世界先进行列。近年来,在世界核能运营者协会同类机组综合排名中,80%以上指标优于世界中值水平,70%以上指标达到世界先进水平。同时,建立了较为完整、自主的核燃料循环产业链,核燃料供应及后端处理能力不断增强,形成了加大国内铀资源勘查开发力度、加强海外天然铀开发、提高天然铀产品和资源储备能力、拓宽国际铀资源贸易的铀资源保障体系,从而满足中长期核电发展需要。

核电在电力供应方面将发挥更大作用,成为新型电力系统安全稳定运行的重要支撑性电源。全社会用电量将在较长时间

保持稳定增长,预计2030年超过12.5亿千瓦时,年均增长约4.2%;电力在终端能源中的消费占比将持续提高,2030年达到35%左右。基于电力和电量需求平衡分析,未来我国核电需维持一定的建设速度与规模,在确保安全的前提下,积极有序推动沿海核电项目建设。

第三代核电将是未来发展的主要商用核电技术。第三代核电技术已较成熟,目前我国新建核电机组均采用第三代及以上核电技术,同时预计在未来一段时间内新开工建设的核电技术仍以第三代核电技术为主。此外,第三代核电的设计寿命为60年,在有效、良好的寿命管理下,极有可能再延寿10至20年,成为未来主流应用技术。

核能非电利用多点开花。山东海阳核能供热、辽宁红沿河核能供暖、浙江海盐核能工业供热等示范项目已建成投用,为集中供热解“燃煤”之急。目前,全国首个工业用途核能供热项目在田湾核电基地已开工建设。“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出,安全稳妥推动沿海核电建设。考虑到沿海处于我国的负荷中心,现选沿海厂址可支撑我国中长期核电发展规模。核电厂址属于十分稀缺的战略性资源,其对地震地质、水文气象等诸多因素有着苛刻要求与限制,核电厂址开发具有持续时间长、环节多、涉及面广、费用高、难度大等特点,是实现核电安全可持续发展的关键。未来,亟需梳理我国现有核电厂址资源情况,并探索厂址保护新模式,综合考虑和平衡各方利益,实现和谐共赢的发展。

多应用场景提供低碳高效能源



除了发电外,我国核电站还有哪些应用场景?

刘仕倡(华北电力大学核科学与工程学院副教授):我国核电站主要分布在江苏、浙江、福建、广东等东南沿海地区,核电站的主要用途是发电,通过核反应堆产生热能,驱动涡轮发电机发电,为周边地区提供电力。在提供清洁电力的同时,核电站还有其他一些应用场景,为生产和生活提供低碳高效的能源保障。

一是工业供热和供汽。工业是我国能源消费总量的70%左右,是碳排放的重点产业。核电站的工业供热效率高,且不会产生大量的废气和污染物,可以为周边工业提供稳定的供热、供汽服务,提高企业的经济效益。我国主要通过压水堆提供工业蒸汽。例如,中核集团秦山核电与浙江海盐县共同建设的核能工业供热项目,在2022年12月正式建成投用,是我国首个核能工业供热项目。中核集团田湾核电也启动核能供热项目。高温气冷堆具有堆芯出口温度高的优势,也是未来工业供汽尤其是高品质供汽的主要路径。2021年,石岛湾高温气冷堆核电站示范工程首次并网发电,成为我国探索高温堆提供工业蒸汽、开展制氢的重要载体。模块化小堆如国家电投的“和美一号”、中广核集团和清华大学联合开发的NHR200-II低温供热堆、中核集团“燕龙”泳池式低温供热堆等也能够提供清洁蒸汽,为高耗能产业提供脱碳方案。

二是清洁供暖。我国大约有三分之一的地区需要冬季采暖,采暖期达四至六个月。东北、华北和西北地区数百座大中型城市每年需要采暖供热的热功率高达几十万兆瓦,年耗煤数十亿吨,占总能源消耗的15%以上。核电站中核反应堆会产生大量的热能,这些热能可以转化为蒸汽或热水,通过管道输送到城市的供暖系统中,这种方式比传统的火电站、燃煤锅炉等供暖方式更为清洁、高效、可靠。无论是大堆还是小堆供热技术,在低供热领域都有广阔的应用前景。

三是海水淡化。海水淡化是指将海水中的盐分去除,使其变成可以饮用或用于灌溉的淡水,为周边地区提供淡水资源,解决水资源短缺问题,尤其适用于沿海地区。目前常用的海水淡化技术主要有三种,即多级闪蒸、低温多效蒸馏、反渗透。由于核电站能同时提供电能和蒸汽,以上三种技术都可与核电站耦合。一方面,通过利用现有在运核电站,配套建设海水淡化设施以热电联产模式运行。例如,山东海阳核电投运“水热同送”科技示范工程,将海水直接变成95摄氏度的高温高品质淡水;中核集团田湾核电在提供电力、工业蒸汽的同时,也在推进海水淡化工程;辽宁红沿河核电厂已实现利用核电站余热进行海水淡化,为核电站提供冷却水,产能为10080立方米/天。另一方面,可研发建造适用于海水淡化等领域的多用途先进核能系统。先进核能系统因体积小、灵活性高、功率比大、适应性好、应用领域广等综合优势,在海水淡化领域前景广阔。我国一直紧跟世界前沿研发多用途先进核能系统,目前已成功研发“燕龙”“玲龙一号”等,适用于海水淡化、供热等领域。

四是核能制氢。利用核能可进行氢的大规模生产,并且具有不产生温室气体、以水为原料、高效率、大规模等优点,是未来氢气大规模供应的重要解决方案。高温气冷堆是我国拥有自主知识产权的第四代先进核能技术,具有安全性好、堆芯出口温度高等优势,其高温高压的特点与适合大规模制氢的热化学循环制氢技术十分匹配,被认为是最适合核能制氢的堆型,也是未来最有前景的核能制氢技术路线。2021年12月,全球首座球床模块式高温气冷堆核电站并网发电,该示范工程投产后,将进一步由单一的“电”向“氢、汽、水、热、电”五大细分目标市场进军,其温度参数也覆盖乙醇提纯、盐化工、石油化工、煤化工、制氢等领域绝大部分热源需求,将为“双碳”目标的实现提供综合能源解决方案。

建成完整的核电产业链



我国具有完整的核工业体系,目前核电产业链建设成效如何?

白云生(中核战略规划研究总院院长):核电既有“核”的特点,也有“电”的属性,具有高科技产业知识密集、资金密集、人才密集等特征,涉及上下游几十个行业,产业关联度高,产业链长,带动性强。随着我国核能的持续发展,核电产业链各环节逐步建立并不断完善,已形成涵盖核能研发设计、核电建设、天然铀生产、核燃料加工、装备制造、核电运营、核电退役、乏燃料及核废物管理等的核电全产业链。

在核能研发设计方面,创新能力持续增强,自主品牌逐步建立。我国核能研发设计经历了从技术后援到引进、消化吸收、自主设计再到自主品牌形成的过程,逐步实现了百万千瓦级压水堆核电站研发设计的“四级跳”。目前,已拥有“华龙一号”和“国和一号”两种自主三代核电技术,掌握高温气冷堆研发设计技术,国内各核电集团积极推进小型压水反应堆研发设计和示范应用,钠冷快堆、铅基快堆、钍基熔盐堆等先进核能系统的研发和示范项目正在加紧推进。

在天然铀生产方面,铀资源开发供应保障能力进一步夯实。我国天然铀生产从无到有、持续发展,形成了涵盖地质勘察、采选、冶炼、加工等的全产业链,形成了一定规模的天然铀产能。建立了空间遥感、地面勘查、地下物理与水文相结合的勘查体系,形成以北方砂岩为主、南方硬岩为补充的产能格局。目前,新疆伊犁大基地高效稳定运行,内蒙古通辽、鄂尔多斯千吨级大基地建设加快推进,中核集团罗辛铀矿、中广核集团湖山铀矿等海外铀资源基地高效运行。

在核燃料加工方面,产业能力逐步进入世界前列。我国已建成南北两个铀纯化转化生产基地,新一代铀浓缩离心机研制进展顺利,单机分离功能力、技术经济指标进一步提高,建成了覆盖国内多机型、多堆型的核燃料元件加工供应能力。目前,拥有压水堆核燃料元件产能1400吨/年,重水堆核燃料元件产能200吨/年,高温气冷堆元件产能形成一定规模,具备快速扩产产能规模的综合实力。

在核电建造方面,核电工程建设管理自主化能力及总承包能力持续提升。我国已

全面掌握涵盖全球首台AP1000机组、重水堆、压水堆、第四代核能钠冷快堆和高温气冷堆等国际核电主流及科研堆型的建设能力,并构建了高质量精细化管理新模式。

在装备制造方面,核电装备产业布局已基本完成,核心环节自主可控。目前,我国形成了东北、上海、四川三大核电装备制造基地,发展壮大了一批核电配套设备及零部件生产企业。装备企业自主研发的核电产品及系统已成功应用于“华龙一号”“国和一号”“玲龙一号”以及示范快堆等核电项目,形成了较为完整的产业链,已具备产业化、批量化生产能力。

在核电运营方面,商运核电机组装机规模持续增长,运行业绩全球领先。根据世界核能运营者协会发布的2022年业绩指标数据,我国核电厂满足该协会综合指数计算条件的51台机组中,有37台机组达到满分100,占世界满分机组(74台)的50%,综合指数满分比例和平均值均高于美国、俄罗斯、法国、韩国等主要核电国家,同时优于全球机组的平均水平。

在核电退役方面,我国具备提供完整的退役技术解决方案的能力。借助已建成的大型设施退役经验,基本掌握核设施退役技术,可提供从源项调查、去污、拆除、处理、整备、运输直至最终处置的整体解决方案,能够为未来核电退役工作的实施奠定基础。

在乏燃料及核废物管理方面,管理体系能力进一步加强。建成了包括铁路、海路和公路等多种运输模式联运的乏燃料运输体系,并正式启动运行,完成两批乏燃料运输任务。形成了干湿结合的乏燃料中间贮存能力,大亚湾、秦山、田湾核电站乏燃料干式贮存设施正式投运。后处理科研专项及示范工程建设稳步推进,龙和国集团中处置场一期工程建设投运,广东阳江中低放固体废物处置场建设、广西防城港、辽宁徐大堡、山东海阳处置场项目前期工作有序推进,放射性废物集中与区域处置相结合的格局正在形成。

整体而言,核电产业规模的不断扩大将持续带动上下游产业实现高质量发展,产业链自主可控水平也将进一步提高。预计2030年前,我国在运核电装机规模有望成为世界第一,在世界核电产业格局中占据更加重要的地位。



确保安全是核电发展前提



核安全是核电发展的生命线。未来我国在安全有序发展核电方面应注意些什么?

赵成昆(中国核能行业协会专家委员会常务副主任、国家核安全局原局长):截至2022年底,全球在运机组422台,总装机容量超过3.78亿千瓦,分布于世界32个国家和地区。全球在建核电机组57台,分布于18个国家和地区,总装机容量达5958万千瓦。

国际上主要核工业大国中,美国有92个可运行的反应堆,总装机容量9471.8万千瓦,核电发电量占比约为20%。法国拥有56个可运行的核反应堆,分布在沿海及内陆,核电发电量占70%左右。俄罗斯有37个可运行的反应堆,大部分位于西部地区,核电发电量占比约为20%。2011年福岛核事故后,日本关闭了所有反应堆,近年来受能源供应紧张等因素影响,经监管部门批准已重新启动10余台反应堆,另有多台反应堆正在进行重启审批。

经过70余年的发展,美国在核能领域建立了完善的法律法规,形成了完整的核工业体系和强大的核科学与技术研发能力。但在三哩岛核事故后,美国大量铀矿关闭,产能逐步萎缩,铀转化、核电建造能力均明显下降。近年来,美国重新恢复对核能发展的重视,《重塑美国核能竞争优势》报告将推动核燃料循环前端产业发展列为首要任务,实施国内铀储备,扩大核燃料供应,重视微堆研发,推动核能综合利用加快发展。

法国2022年出台“2030投资计划”,其中包括到2030年实现小型模块化反应堆技术示范和核能大规模制氢计划。俄罗斯拥有健全的核领域法律法规和明确

的发展政策,以俄罗斯原子能公司为代表的俄罗斯核工业体系提供从铀资源开发到核废料处理的核能全生命周期服务,近年来在东亚、东南亚以及中东国家先后启动了多个海外市场项目,并推动不同应用场景下的核反应堆开发。日本原子能机构于2021年恢复小型高温气冷堆的运行,2022年与三菱重工宣布将在此基础上建立一个示范性的制氢项目。同时,日本十分重视小型模块化反应堆领域的发展。日本原子能机构、三菱重工和三菱快堆系统公司正在与美国泰拉能源公司合作开发钠冷快堆。

从国际核电发展看,历次核事故的发生让各国更加深刻认识到核安全的重要性。如今,世界主要核能大国正积极研发第四代核电技术,进一步提升核电的安全性和经济性。目前,我国核电布局不均衡,在运在建核电机组全部分布在沿海地区,核电厂址较为稀缺,而且核电发电量占总发电量的比重低于当前10%的世界平均水平,与发达国家相比仍有较大差距。

在“双碳”目标下,随着核电规模发展,天然铀的需求量及乏燃料、放射性废物的产生量将持续增加。按照2035年在运压水堆规模达到1.5亿千瓦预测,年天然铀需求量将达到3万吨,乏燃料年产生量约0.3万吨,另外,一座百万千瓦级压水堆运行60年,需天然铀约1万吨,1.5亿核电装机全寿命周期需天然铀约150万吨。因此,进一步完善我国天然铀的保障能力是实现核电可持续发展的关键。

我国拥有相对完整的核工业体系,基础研究能力也不断加强,并自主研发了三代核

1817吨,氮氧化物908吨,二氧化碳5.9万吨。小堆方面,中核集团自主研发的“燕龙”泳池式低温供热堆,是专门用于北方地区冬季居民取暖供热的反应堆型号,具有固有安全性高、热网适应性好、选址灵活等优势,一座40万千瓦的泳池堆可以为30多万人口供暖,每年可替代32万吨燃煤或1.6亿立方米燃气,减少排放烟尘5000吨,减少灰渣5万吨,减少排放二氧化碳64万吨,减少排放二氧化硫5000吨,减少排放氮氧化物1600吨,真正实现减污降碳协同效应。

三是海水淡化。海水淡化是指将海水中的盐分去除,使其变成可以饮用或用于灌溉的淡水,为周边地区提供淡水资源,解决水资源短缺问题,尤其适用于沿海地区。目前常用的海水淡化技术主要有三种,即多级闪蒸、低温多效蒸馏、反渗透。由于核电站能同时提供电能和蒸汽,以上三种技术都可与核电站耦合。一方面,通过利用现有在运核电站,配套建设海水淡化设施以热电联产模式运行。例如,山东海阳核电投运“水热同送”科技示范工程,将海水直接变成95摄氏度的高温高品质淡水;中核集团田湾核电在提供电力、工业蒸汽的同时,也在推进海水淡化工程;辽宁红沿河核电厂已实现利用核电站余热进行海水淡化,为核电站提供冷却水,产能为10080立方米/天。另一方面,可研发建造适用于海水淡化等领域的多用途先进核能系统。先进核能系统因体积小、灵活性高、功率比大、适应性好、应用领域广等综合优势,在海水淡化领域前景广阔。我国一直紧跟世界前沿研发多用途先进核能系统,目前已成功研发“燕龙”“玲龙一号”等,适用于海水淡化、供热等领域。

四是核能制氢。利用核能可进行氢的大规模生产,并且具有不产生温室气体、以水为原料、高效率、大规模等优点,是未来氢气大规模供应的重要解决方案。高温气冷堆是我国拥有自主知识产权的第四代先进核能技术,具有安全性好、堆芯出口温度高等优势,其高温高压的特点与适合大规模制氢的热化学循环制氢技术十分匹配,被认为是最适合核能制氢的堆型,也是未来最有前景的核能制氢技术路线。2021年12月,全球首座球床模块式高温气冷堆核电站并网发电,该示范工程投产后,将进一步由单一的“电”向“氢、汽、水、热、电”五大细分目标市场进军,其温度参数也覆盖乙醇提纯、盐化工、石油化工、煤化工、制氢等领域绝大部分热源需求,将为“双碳”目标的实现提供综合能源解决方案。

电技术“华龙一号”和“国和一号”。受限于整体工业水平及相关的专业基础能力,当前我国核电仍有部分关键设备、材料等还存在短板和弱项。此外,作为“热堆—快堆—聚变堆”技术发展路线的关键环节,快堆可以大幅度提高铀资源的利用率,减少高放废物,对提高核电的经济性、安全性具有重要意义。世界核能大国在发展快堆方面均投入大量人力物力,从基础研究、设施开发到示范工程,加大研发力度,并力争控制技术制高点。我国已开展钠冷快堆示范工程建设,正在研究更先进的一体化快堆核能系统,但离商业化规模应用仍有较大差距,在反应堆堆芯设计、干法后处理技术,以及金属燃料元件制造等方面需加大研发力度。除钠冷快堆以外,国内多家单位开展铅(铋)冷快堆研究,有关部门应加强引导形成合力,提高研发效率。

由于核能项目开发周期长,存在部分核电厂址的保护成本增加、厂址开发跨行政区协调困难等问题。相关配套设施选址及开发利用邻避效应突出,部分项目由于沟通不足、处理不当等原因被迫停建。应通过有效沟通和科普宣传,处理好利益相关方的关切,提高公众对核能的接受度。

确保核能项目有序高效发展的前提。我国已颁布放射性污染防治法、核安全法,但放射性废物管理、核事故赔偿及核能管理等涉及核领域的法律法规体系有待尽快完善。需要重视可能出现的各种风险挑战,贯彻“安全第一、预防为主、责任明确、严格管理、纵深防御、独立监管、安全保障”的安全工作原则。核电从业单位要始终重视核安全文化建设,并将其作为一项长期性、系统性、全局性重要工作,把核安全文化理念、价值观落实到规划、科研、设计、经营各个环节,保障我国核电安全可持续发展。