

“热堆-快堆-聚变堆”核能“三步走”发展战略,是我国1983年在“核能发展技术政策论证会”上首次提出的核能发展总战略,其核心内容是解决我国核能可持续发展、核燃料长期安全有效供应的问题。

《中国能源报》记者近日从核能“三步走”发展40年论坛上了解到,40年来,我国热堆、快堆、聚变堆相关研究均取得一定突破,目前已跻身世界核能大国行列。面向未来,在“双碳”目标和构建新型电力系统背景下,核能“三步走”后劲十足,我国应持续优化核电建设布局,推广核能综合利用技术,加强顶层统筹,并加强核领域大科学装置、综合实验平台等基础科研条件建设。

### “三步走”战略仍需坚持

作为清洁、稳定的能源,核能在过去半个世纪贡献了全球近一半的低碳电力,为维护世界能源安全、应对全球气候变化、促进世界经济增长作出了重要贡献。在我国,核能是优化能源结构、保障能源安全,实现“双碳”目标的重要力量。

电力规划设计总院高级顾问谢秋野指出,2022年我国非化石能源发电量达3.1万亿千瓦时,占总发电量的36%。核电装机约0.5亿千瓦,占总装机比重约2%,核电发电量约0.42亿千瓦时,占总发电量比重约5%。

“核电是未来电力系统的主要基荷电源之一,是电力系统实现近零排放战略选择。”谢秋野分析,按照现有项目建设周期,到2025年,我国核电装机容量将达到7000万千瓦左右;为满足碳达峰碳中和以及全社会用电需求,“十五五”和“十六五”期间,按年度开工8-10台百万千瓦机组规模预计,2030年、2035年我国核电装机将分别达到1.2亿、1.5亿千瓦左右,发电量分别约占全国总发电量的7.3%、10%。

当前,我国推动能源转型,实现“双碳”目标需要核能。“从脱碳需求及电力装机电量平衡角度看,核电有较大发展空间,2060年核能发电量占比需达到20%(4亿千瓦)以上才能实现碳中和目标。”中核战略规划



图为“华龙一号”世界首堆所在的福建福清核电基地。

## 热堆-快堆-聚变堆

# 核能发展“三步走”后劲十足

■ 本报记者 杨晓冉 李玲

研究总院院长、党委副书记白云生说。

与会业内专家表示,面向“双碳”目标,核能中长期发展对资源供应、乏燃料管理等提出了新要求,加快发展快堆是应对能源新挑战的必由之路,加快实施核能发展“三步走”十分必要、重要且迫切。

### 支撑核能产业自主化发展

多年来,热堆、快堆、聚变堆之间优势互补、紧密衔接,支撑起我国核能产业快步自主发展的格局。

“热堆是最成熟并具有显著经济性的核能技术,是近中期核能建设的主力堆型百年尺度能源;快堆是富有潜力的核能技

术,是中远期建设的主力堆型千年尺度能源;聚变堆作为颠覆性核能技术,则是远期建设的主力堆型万年尺度能源。”白云生分析,从工程化看,我国热堆实现了规模化、批量化、国产化发展,形成的研发体系、工程体系、装备体系、人才队伍等为快堆、聚变堆的研发设计与建设奠定了良好基础。

热堆作为目前在运核电机组的主力堆型,已成为我国实现碳达峰碳中和的重要力量。据了解,自上世纪80年代以来,我国充分发挥技术优势与基础科研能力,以秦山一期30万千瓦起步,同时吸收法国M310技术,研发60万千瓦、百万千瓦级二代热堆核能机型,实现了标准化、批量化发展。本世纪以来,我国推进先进核能技术研

发,尤其在2011年以后,对标全球最高安全标准,加快推进“华龙一号”“国核一号”自主三代核电实现批量化发展。

“热堆技术实现了由二代向三代的全面跨越并走出国门,核燃料制造与供应满足需求,在建装机规模持续世界领先,在运在建装机规模居全球第二,跻身世界核能大国。”白云生表示。

快堆方面,中国实验快堆于2011年7月实现并网发电。2017年12月29日,首个快堆示范工程土建在福建省霞浦县开工。通过实验快堆和示范快堆建设,我国快堆已形成完备科研技术体系。

我国核聚变研究主要以实现受控热核聚变能为主要目标。自上世纪中期以来,我

国研究实施了一系列聚变技术攻关,先后建成多个核聚变装置。2003年,我国加入国际热核聚变实验堆计划,探索利用聚变能发电的科学和工程技术可行性,是最早参与设计ITER的国家之一。“当前,聚变工程技术研发不断提升,在聚变理论与物理实验、关键技术研究等方面取得阶段性成果。”白云生指出。

### 持续优化核电建设布局

与此同时,谢秋野指出,我国核电在稳步发展的同时,装机规模和发电量占比仍然偏低。“截至2022年底,核电装机占比2.17%,发电量占比约4.8%,远低于世界平均水平。”

“当前,核能领域基础科研不断深入,人工智能、大数据、云计算等技术扩展应用已成为我国科技创新的重要领域。后续伴随三代核电技术优化、四代堆及聚变堆等技术研发,将进一步带动我国高新技术产业发展。”谢秋野建议,应充分利用现有产业能力,持续稳定推动三代核电发展,并统筹构建新型电力系统发展全局,优化核电建设布局。

从顶层战略方面,白云生提出,要制定国家层面的核能“三步走”发展战略。“核能行业一直以来都在提‘三步走’战略,但我们希望真正把它推动成国家级的核能发展战略。不论从技术路线还是政策方面,要将其放到整个国家发展战略的产业化布局中。”白云生还建议,将一体化快堆核能系统列入国家科技重大专项,并相应地加强核能领域大科学装置、综合实验平台等基础科研条件建设,加快推进紧急重大工程优先安排。

在谢秋野看来,自主三代压水堆核电技术仍将是2035年前后我国核电发展的主力堆型。“随着技术、经济条件成熟,2035年后钠冷快堆等先进核能技术有望迎来重要的商业化发展机遇,高温气冷堆、小型反应堆灵活开展多元化综合利用,将是我国核能与核电发展的重要补充。”

## 绿色矿山建设任务重空间大

■ 本报记者 李玲

作为矿业领域推进生态文明建设的重要实践,绿色矿山建设在促进资源节约和高效利用、生态修复治理等方面意义重大。自然资源部日前发布的《中国矿产资源报告(2023)》显示,2022年,我国绿色矿山建设工作稳步推进,部署实施了“十四五”第一批历史遗留矿山生态修复示范工程,建立了完善的绿色勘查标准体系。截至2022年底,全国共建成国家级绿色矿山1100余家。

针对以煤矿为代表的绿色矿山建设,多位受访者近日向《中国能源报》记者表示,近年来,在相关政策支持推动下,我国在多地进行的矿山生态修复和绿色矿山建设实践成效显著。但当前,仍存在大量历史遗留矿山待修复,绿色矿山建设理论与技术仍滞后于实践需求,亟需进一步创新。

### 煤矿规模化开采引发环境负效应

在近日召开的第18届国际矿山测量大会上,国际矿山测量协会主席、中国矿业大学教授黄乐亭坦言,随着煤矿规模化高效开采技术应用,开采过程中引发的环境负效应正在加剧。

“上世纪七八十年代,煤层埋藏较浅,采高较小,工作面推进较慢。本世纪以来,采矿技术主要为超长大面高强度综采,其采高大、推进快、采面大,高效开采矿井面临采场压力大、覆岩保水难、瓦斯灾害多、生态破坏重等新问题。”黄乐亭解释。

国家能源集团科技与信息化部一级业务总监李全生也指出,规模化煤

炭开采与生态环境保护矛盾突出。“煤炭开采会引起地表塌陷、水土流失、植被退化等生态损伤,规模化开采具有生态影响范围大、周期长、强度高、恢复难等问题,严重影响生态脆弱区的生态安全。”

数据显示,我国80%以上的煤炭产自黄河流域、北方防沙带等生态脆弱区。其中,黄河流域的山西、陕西、宁夏在我国煤炭产能中分别占比29%、16.6%、2.1%;北方防沙带的新疆、内蒙古在我国煤炭产能中分别占比9.2%、26.1%。

“生态脆弱区表土瘠薄、寒旱缺水、物种多样性少、抗干扰能力差,煤矿区的生态安全直接关系到北方防沙带、黄河流域等生态脆弱区的生态保护。”李全生表示,“规模化高效开采极大保障了我国煤炭产能,但也加剧了生态环境损伤。”

### 绿色矿山建设成效显著

面对环境负效应,近年来我国始终高度重视并持续推进绿色矿山建设。

早在2008年,原国土资源部印发的《全国矿产资源规划(2008-2015年)》就明确发展绿色矿业的要求,提出要推进矿业经济区和绿色矿山建设,加强矿山地质环境保护与恢复治理,提高矿产资源开发利用水平,到2020年基本建立绿色矿山格局。

2017年,六部门联合发布《关于加快建设绿色矿山的实施意见》,明确绿色矿山建设三大目标:基本形成绿色矿山建设新格局,构建矿业发展方式转变新途径,建立绿色矿业发展工作

新机制。这是我国绿色矿山建设从理念迈向实践的坚实一步。

多位业内专家指出,在一系列顶层设计与推动下,近年来我国在矿区生态保护科学研究和工程建设方面开展了大量工作,在矿井水资源保护利用、塌陷地复垦、植被恢复、景观构建等方面取得一定成效。各地各行业探索出多个绿色矿山绿色开采、矿山生态修复的成功案例,为绿色矿山建设积累了宝贵实践经验。江苏省徐州市探索矿地融合的“贾汪模式”就是其中的典型代表。

据《中国能源报》记者了解,“贾汪模式”依托矿产开发与土地利用统筹规划,集成地质灾害治理、土地复垦再利用、水土资源调控技术等,统筹资源开发利用,区域经济发展和生态环境治理,实现城、矿、乡三位一体协同发展。徐州市潘安湖、安国湿地等煤矿塌陷区生态修复正是矿地融合模式的典型案例。

矿山修复之外,立足煤炭开采全生命周期、统筹减损开采与系统修复的煤炭生态保护型开采理念也在各地应用实践。

“煤炭生态保护型开采技术已在准东矿区、神东矿区、乌海矿区、宁煤矿区、蒙东矿区等生态脆弱区21座大型露天矿、55座井工矿成功推广应用,近三年节约生态修复费和煤炭增产利润约50亿元。”李全生说,以蒙东露天生态保护型开采示范工程为例,其中宝日希勒露天矿10530亩示范面积植被盖度由30%提至59%,胜利露天矿12940亩示范面积植被盖度由5%提至39%。

### 理论、技术尚难支撑实践需求

绿色矿山建设虽然成效显著,但目前,我国在相关基础研究和技术创新方面仍存明显短板,无法满足实践需求。

“当前,我国矿山生态修复任务艰巨。”矿山生态修复教育部工程研究中心主任雷少刚告诉《中国能源报》记者,一是有大量的遗留矿山要修复;二是要使自然修复与人工修复相协调,促进传统生态修复模式向更加系统、科学、精准的修复模式升级转变;三是大量矿山生态修复的责任意识还处于被动落后状态,甚至认为生态修复就是简单的短期绿化,忽视了地貌、水土等基本问题,满足不了矿区生态-社会-经济协同发展的要求;四是对矿山生态的扰动与修复缺少动态监管,导致生态保护修复主动性、及时性、针对性不足,动态智能的矿山生态修复监管机制亟待建立。

据雷少刚介绍,目前全国有包括煤矿在内的超200万公顷采矿活动累计损毁土地需要修复。根据国家关于生态文明战略的相关部署,2035年前应基本完成历史遗留矿山生态环境问题治理,涉及矿山约14万座,平均每年修复面积需达到12.6万公顷以上。

“绿色矿山建设的理论和实践一直在不停创新发展,但随着社会进步和基础条件提高,尤其是行业认知提升,就会发现这两个要素是无法满足实践需求,诸多问题有待解决。只有更进一步且持续的理论和技术创新,才能系统性地解决问题。”黄乐亭说。

国际热核聚变实验堆(ITER)计划被誉为全球最大的“人造太阳”,是多国合作的重要核聚变科研项目。日前,由东方电气集团承制的ITER18套极向场线圈PFCS 3-4悬挂梁在广州交付,将运往ITER法国现场,标志着由中国独立承担制造的磁体支撑系统全面交付。

据ITER计划副总干事罗德隆透露,目前ITER第一等离体建设进度已完成超78%,七方采购已完成85%。

聚变因燃料资源丰富、固有安全性好、释放能量大、污染物极少等优势,被公认为是最终解决能源问题的选项。《中国能源报》记者近日在核能行业论坛上了解到,作为最早参与ITER计划的国家之一,我国为该计划实施作出了重要贡献,目前已建成中国环流二号、三号,东方超环(以下简称“EAST”)等核聚变科研装置,为掌握聚变核心技术奠定坚实的创新基础。

中国核聚变能源研究所计划执行中心专家表示,2008年至今,我国国家磁约束核聚变能发展研究专项共部署220个项目,总计安排经费约60亿元,取得多项国际和国内第一的研究成果,使我国在核聚变领域处于与国际同等甚至某些方面领先的地位。

2020年12月,中国环流器二号M装置建成并实现首次放电,标志着我国自主掌握大型先进磁约束核聚变实验装置的设计、建造、运行技术,并为深度参与ITER计划及未来自主设计建造聚变堆提供重要技术支撑。2021年12月,东方超环装置实现1056秒的长脉冲等离子体运行,在长脉冲高参数运行方面取得新突破。2022年10月,HL-3装置等离子体电流突破115万安培,标志着我国核聚变研发向聚变“点火”迈重要一步。2023年4月,EAST装置获得403秒稳态高约束等离子体,创造该参数下运行时间新的纪录。2023年8月,HL-3首次实现100万安培等离子体电流高约束模运行,再次刷新中国磁约束核聚变装置运行纪录,标志我国掌握可控核聚变高约束先进控制技术。

基于国内和国际项目的实验和建设,2018年1月3日,国家发改委宣布聚变堆主机关键系统综合研究设施在合肥集中建设,旨在为下一代聚变堆的超导磁体和偏滤器系统提供研究和环境,保障我国核聚变堆核心技术发展的先进性、安全性和可靠性,加快聚变能实际应用进程。

“为实现未来聚变堆关键系统和部件的国产化,聚变堆主机关键系统综合研究设施瞄准聚变堆主机关键系统设计和研制,建成国际参数最高、功能最完备的综合性研究平台,预计在2025年底全面建成。”中国科学院等离子体物理研究所所长宋永涛说。

此外,新奥集团自主设计建成国内首座中等规模球形环物理实验装置“玄龙-50”,并于2022年启动整体参数国际领先的球形环新装置新奥“和龙”建设。该公司认为,当前融合人工智能已成为加速聚变研发,实现数智“球形环+氢硼”聚变商业化的必要手段。据了解,新奥聚变研究的下一代球形环装置“和龙-2”的物理设计也已全面开展,将成为攻关和验证球形环氢硼聚变路线可行性的关键装置。

## 我国核聚变研发多点开花

■ 本报记者 杨晓冉

## 粤港澳大湾区首个百万千瓦级海上风电项目并网



### 图片新闻

日前,粤港澳大湾区首个百万千瓦级海上风电项目——中广核惠州港口二海上风电项目首台风机并网广东电网。该项目总装机容量100万千瓦,一期于2021年9月并网发电,全部建成投产后,预计每年可提供清洁电能约30亿千瓦时,可等效节省标煤约100万吨,减排二氧化碳约235万吨,相当于植树造林约6000公顷。图为中广核惠州港口二海上风电项目。

翁鸿滔/摄