



碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析

王海洋, 荣健

(中国核电发展中心, 北京 100045)

摘 要: 在碳达峰、碳中和目标下(简称“双碳”目标), 中国能源系统将继续加快清洁低碳转型。核能具有生产过程不排放温室气体、全寿期碳排放量小、能量密度高、无间歇性等优点, 可通过规模替代化石能源助力能源系统转型。通过梳理中国能源系统现状和核能发展基础, 总结多方研究给出的能源发展目标, 分析核能在发电、制氢、区域供热、海水淡化等领域的发展机遇, 量化分解出阶段性发展子目标并匹配相应技术路线, 总结提出核能行业发展路径, 指出下一步工作重点为重塑核能在能源系统中的定位、坚持创新驱动发展、坚持与经济社会协调发展等, 提出并讨论安全和公众接受性、经济性、灵活性等需要关注问题, 为推动核能行业高质量发展提供政策建议。

关键词: 核能; 核电; 碳达峰; 碳中和; 区域供热; 核能制氢; 海水淡化

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202103141

0 引言

近年来全球极端气候灾害频发, 人们日益认识到气候问题带来的灾难性影响, 也认识到减排温室气体、应对气候变化的重要性和紧迫性。2015 年, 《巴黎协定》提出 21 世纪末全球温升控制目标; 同年, “气候行动”“清洁能源”等被联合国列入 17 项可持续发展目标。当前能源生产贡献了全球一半以上的温室气体排放, 能源行业减排任务更加繁重, “去碳化”成为主要发展方向。

2020 年 9 月以来, 习近平总书记向国际社会郑重宣示中国碳达峰新目标、碳中和新愿景和中国国家自主贡献的一系列新举措。中国作为全球最大的发展中国家、全球第二大经济体、最大的出口国与能源生产和消费国, 努力实现双碳目标, 是化被动为主动, 彰显大国责任担当的战略选择。

美国、欧洲碳排放量分别在 2000 年左右和 20 世纪 90 年代初先后达峰, 随后维持平稳波动并呈缓慢下降趋势, 至 2018 年两者二氧化碳排放量分别相当峰值时期的约 88% 和 63%^[1], 他们均设定在 2050 年左右实现碳中和目标。从碳达峰到

碳中和, 美欧有 50 年以上的过渡期, 而中国只有 30 年, 目前距离碳达峰目标已不足 10 年。中国经济仍处于中高速发展阶段, 还未完全实现工业化和城镇化目标, 人口数量和能源消费总量还在增长, 按期实现能源消费和碳排放“双达峰”是巨大挑战。

数年来世界各国研究和实践均证明, 要实现能源系统清洁低碳转型, 核能必不可少。其生产过程中不排放温室气体, 全寿期碳排放量小, 同时具有能量密度高、无间歇性、占地面积小、受自然条件约束少等优点^[2]。在双碳目标下, 核能在发电、制氢、区域供热、海水淡化等领域将有更多发展机遇。下文将通过量化分析, 总结提出核能发展路径及有关建议, 为行业高质量发展政策制定提供参考。

1 “双碳”目标下中国能源发展目标

据统计, 能源生产和消费是二氧化碳排放的主要来源, 贡献了约 70% 的二氧化碳排放, 其中煤炭和油气消费是主要来源^[3-4]。

党的十八大以来, 中国加快构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系, 非化石能源在一次能源消费中占比从 2012 年的约 9% 提高至 2019 年的 15%, 同期核能占比由 0.8% 提高到约 2.2%^[5]。

收稿日期: 2021-03-26; **修回日期:** 2021-05-12。

基金项目: 财政资金专项支持项目(核电发展改革重大问题研究)。



2019 年，中国碳排放强度比 2005 年下降 48.1%，提前超额完成对外承诺目标^[6]。

2020 年 9 月，习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布中国的“双碳”目标；12 月，他在气候雄心峰会上进一步宣布，到 2030 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降

65% 以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25% 左右，风电、太阳能发电总装机容量将达 12 亿 kW 以上。

在双碳目标提出以后，多个专家和机构以经济发展、能源转型等方面条件为约束，分析给出至 2060 年中国能源发展的若干阶段性目标（见表 1）。

表 1 中国碳达峰、碳中和量化分解目标^[7-12]

Table 1 Quantitative decomposition goal for peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality				
各阶段	2021—2030年	2031—2040年	2041—2050年	2051—2060年
能源消费目标	“十四五”单位GDP能耗下降13.5%；“十五五”年均下降约2%	达峰后稳中有降，峰值55亿~60亿t标准煤，能源结构不断优化	2050年预计45亿~50亿t标准煤 ¹⁾	能源消费稳中有降
电力消费目标	2030年能源消费中占比35%~40%	电力消费占比持续提高	2050年能源消费中占比超60%	占比超70%；非化石能源发电量占比超90%
非化石能源目标	2030年在一次能源消费中占比约25%；在电力消费中占比约50%	非化石能源占比持续提高	一次能源消费占比约70%；在电力消费中占比超过80%	一次能源消费占比达到80%以上
碳排放目标	单位GDP碳排放比2005年下降65%~70%；其中“十四五”期间下降18%	2035年以前碳排放达峰后稳中有降，2035年以后下降速度加快	大幅下降，能源产业碳排放量趋近于零	实现碳中和目标

注：1) 个别机构预测结果为25亿t标准煤，此处采用大多数机构预测结果，通常在45亿~50亿t标准煤区间。

可以看出，实现双碳目标过程中，中国能源结构或将在一个较短的时期内快速调整，碳排放和能源消费先后“双达峰”再逐步加速下降，电力消费占比和非化石能源占比将不断提升，对化石能源的依赖度将较快下降，这意味着非化石能源进入快速发展机遇期。预计在低碳能源替代、区域多能互补、低碳能源多元化利用等方面将有更多发展机会。

2 中国核能行业发展机遇和目标分析

人类对核能的和平利用始于发电，这也是现今最主要的核能利用形式。根据国际原子能机构有关报告分析，即使从全寿命周期来看，核能单位发电量的温室气体排放也是最小的^[13]（图 1）。

从能源效率的观点来看，能量梯级利用是更为高效的一种方式。2019 年，全球共有 79 座核反应堆（其中部分为多功能）用于海水淡化（10 台）、区域供热（56 台）和工艺供热（32 台），累计有 750 个反应堆年的安全运行经验^[14]。

随着技术的发展，尤其是第四代核能系统技术的逐渐成熟和应用，核能更将超脱出仅提供

电力的角色，在核能制氢、区域供热、海水淡化等多种非电综合利用领域发挥功能，起到减排降碳、确保能源安全的重要作用（见图 2）。

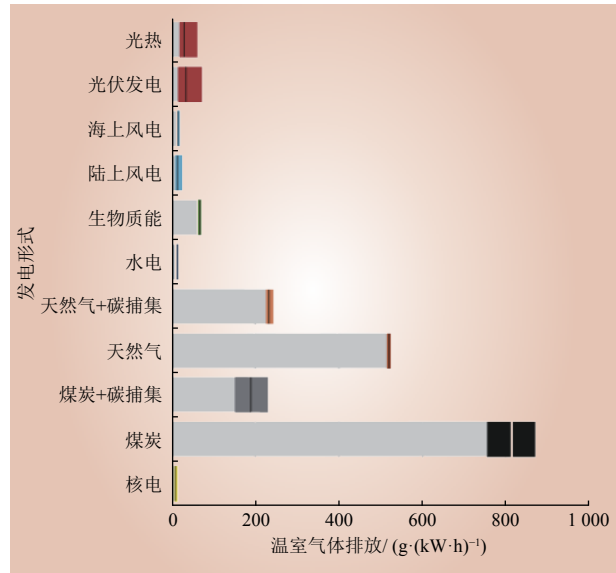


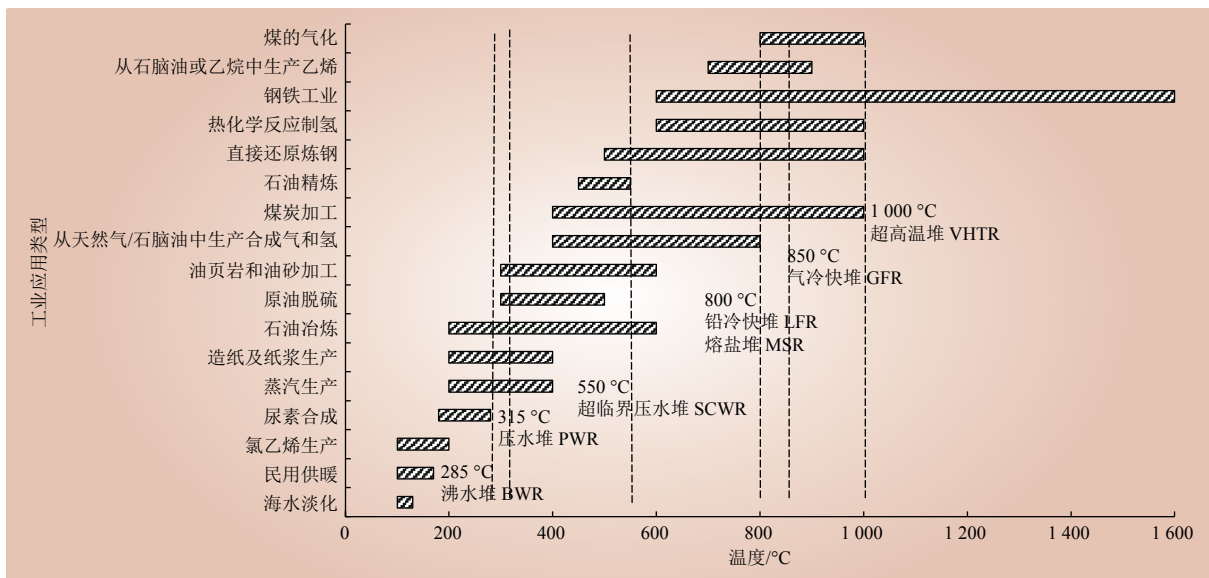
图 1 各类电力全寿命温室气体排放 (CO₂ 当量)
Fig. 1 Life cycle GHG emissions (CO₂-equivalent) of electricity technologies

《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》提出，构建现代能源体系作为中国“十四五”阶段重点任务，“安全稳妥推动沿海核电建设”



“非化石能源占能源消费总量比重提高到 20% 左右”，“积极有序推进沿海三代核电建设。推动模块式小型堆、60 万 kW 级商用高温气冷堆、海

上浮式核动力平台等先进堆型示范……开展山东海阳等核能综合利用示范”。这为中国核能行业近中期发展指明了方向。



数据来源：文献 [15]

图 2 不同反应堆典型出口温度及工业应用所需温度范围

Fig. 2 Typical outlet temperatures for different reactors and the range of temperatures required for industrial applications

2.1 发电

截至 2021 年一季度末，全球在运行核电机组 444 台，装机容量 3.94 亿 kW；在建核电机组 53 台，装机容量 0.57 亿 kW。2019 年全球核能发电量占比约 10.4%，在非化石能源中发电量占比约 27.8%^[5]。在经济总量排名靠前国家中，发达国家核能占一次能源消费比例多年保持在 4%~9%（见图 3，除法国占比高达约 40%，德国决定弃核后核能占比明显下降，日本受福岛核事故影响核能占比下降以外）。截至 2018 年，这些国家的核电发电量占非化石能源发电量比例高达 34%~52%^[16]。

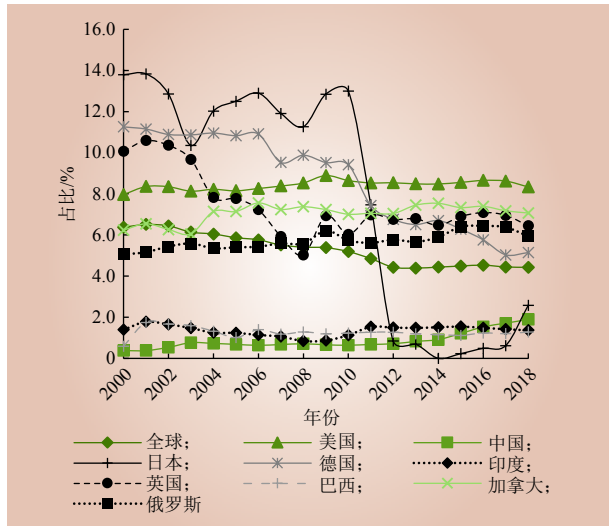
虽然近十几年来以风电、光伏为代表的新能源快速发展，同时受 2011 年福岛核事故影响，部分国家调整了核电政策，但统计表明，除中国外，福岛核事故前后年均开工新建核电机组数量相差甚微，可见其受重视程度并未减弱^[17]。目前，全球有 19 个国家正在新建核电机组，约有 30 个国家正在考虑、计划或启动核能项目，另有约 20 个国家在某种程度上表达了意愿^[18]。

截至 2021 年一季度末，中国在运核电机组 49 台，装机容量约 5100 万 kW；核准在建核电机

组 17 台，装机容量近 2000 万 kW，在运、在建机组数量分别居世界第三和第一。虽然近年来中国核能产业发展速度较快，但根据公开数据，2019 年中国核能一次能源消费占比仅约 2%，发电量占比约 4.7%，发电量在非化石能源中占比约 14%，均远低于发达国家和世界平均水平，未来发展空间很大。

按照表 1 给出目标，2030 年，中国一次能源需求总量达峰，约 55 亿 t 标准煤，其中非化石能源占比 25%，约 14 亿 t 标准煤，电力需求 11 万亿~13 万亿 kW·h。2050 年，一次能源需求总量有所下降，电力需求和非化石能源需求仍将保持增长，这意味着电力结构需持续优化；按一次能源消费总量 45 亿 t 标准煤计算，其中非化石能源消费约 31.5 亿 t 标准煤，电力需求超过 16 万亿 kW·h。

保守假设 2030、2050 年核电发电量占总发电量比例分别为 8%、20%（分别接近目前全球核电发电量平均占比和达到有核电发达国家的核电占比水平，见图 4），即分别为 0.96 万亿和 3.20 万亿 kW·h，保守按照年利用小时数 7800 h 计算，装机规模分别达约 1.23 亿和 4.10 亿 kW。按照典型



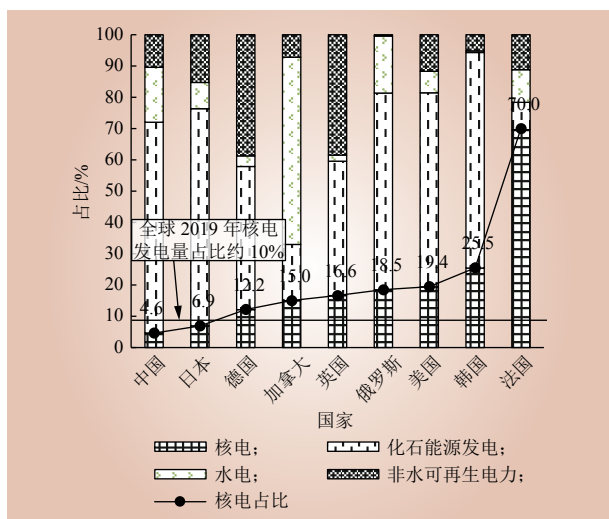
法国核电能耗占比多年保持在 40% 左右，不再在图中展示。
数据来源：文献 [16]

图 3 2019 年全球经济总量排名靠前国家核能占一次能源消费比例

Fig. 3 Proportions of nuclear energy in primary energy consumption in the countries with the largest economic aggregates in 2019 (except France)

三代自主知识产权核电机型华龙一号、国和一号单台功率分别为 120 万 kW、150 万 kW，核电建设周期为 5 年考虑，2020—2025 年、2026—2045 年分别年均开工建设 7~8 台、10~12 台百万 kW 级三代压水堆机组。

考虑到核电发展现状及各方面基础条件，设



数据来源：文献 [16]

图 4 2019 年中国和部分发达国家的核电发电量占比

Fig. 4 Share of nuclear power generation in China and some of the developed countries in 2019

定目标是较为现实的，以中国现有能力完全可以实现。此外，未来高温气冷堆、钠冷快堆、模块化小堆等先进核能技术与非电应用将逐步成熟商用，核能规模提升仍有潜力。

2.2 制氢

氢能是具有发展潜力的二次能源，同时还是钢铁、化工等传统产业的重要原料或还原剂。全球多个国家，特别是美国、日本、法国、韩国等发达国家，已制定氢能发展计划并开展有关工作。

根据氢能行业有关研究报告，2018 年，中国氢气产量约 2100 万 t，预计 2030 年氢气需求将达到 3500 万 t，2050 年接近 6000 万 t，主要用于交通运输、工业领域、建筑及其他领域。中国政府部门已于 2020 年出台有关文件提出加快新能源发展，加快制氢加氢设施建设。目前，已有一批制氢和产储运一体化产业链项目获批 [19]。

在双碳目标约束下，低碳、零碳制氢工艺成为关注焦点。核能制氢主要可采用传统电解水工艺、高温蒸汽电解制氢和硫碘循环工艺制氢 3 类，有关研究最早始于 20 世纪 60 年代。采用传统电解水工艺只需要核电厂所产生的电，要与现有成熟技术抗衡，电力成本应足够低。高温蒸汽电解通过固体氧化物电解池，在至少 600 °C 高温下制氢，比低温工艺耗能更少、效率更高（超过 40%）[20]；高温气冷堆出口温度 800~950 °C，恰好具备这样同时供电、供高温蒸汽的能力，具有较好的发展前景。硫碘循环工艺也属于热化学工艺，该工艺流程需要硫酸、氢碘酸、碘以及这些物料的混合物参与，对材料抗腐蚀性能要求很高，其中硫酸在 400 °C 下沸腾蒸发是腐蚀最严重的工艺步骤；考虑到材料耐久性问题，该工艺尚未实现商业化。

以高温气冷堆为例，经估算，一台 60 万 kW 高温气冷堆机组可满足 180 万 t 产能对氢气、电力及部分氧气的能量需求，对应于每年可减少能源消费约 100 万 t 标准煤，减排约 300 万 t 二氧化碳。目前，位于山东石岛湾的高温气冷堆示范电站即将装料，计划 2021 年底投入商业运行；60 万 kW 高温堆项目正在积极推进。

根据前文所述预测目标，保守假设 2030、2050 年分别有 4%、10%（即同年核电发电量占比的一半）制氢产能由核能提供，按照某核能制氢



示范装置效率计算,相当于分别约 750 万 kW 和 3 200 万 kW 热功率。相比于煤制氢,减少二氧化碳排放分别达 0.15 亿 t/年和 0.60 亿 t/年。

2.3 区域供热

核能区域供热是十分具有发展前景的方向。全球许多国家,特别是欧洲国家已有约 50 年商业化的居民核能供热实践。早在 1954 年,前苏联应用热功率为 10 MW 的实验供热堆型,发展了核能供热技术;随后几十年间,以前苏联为代表的一批欧洲国家陆续将运行的商用核反应堆用于供热^[21]。

国家统计局数据显示,2019 年,中国城市集中供热面积 92.51 亿 m²,比 2011 年几乎翻一番,2012—2019 供热面积年均增速超过 8%,供热总量也在以超过 4% 的年增速增长。随着中国乡村振兴与新型城镇化建设推进,还会有更多集中供热需求。

2017 年印发的《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021 年)》提出,到 2021 年北方地区清洁取暖率达到 70%;对“2+26”重点城市,2021 年城区全部实现清洁取暖,县城和城乡结合部清洁取暖率达到 80% 以上,农村地区清洁取暖率 60% 以上;研究探索核能供热,推动现役核电机组向周边供热,安全发展低温泳池堆供暖示范。

中国于 1959 年开始建造 49-2 泳池式轻水反应堆;1989 年,清华大学核能与新能源技术研究院开发出热功率 5 MW 的供热堆型 NHR-5,采用“一体化全功率自然循环”模式,具有固有安全性。近年来,清华大学、中核集团等单位又分别开发出 NHR200-II 低温供热堆、“燕龙”泳池式低温供热堆等堆型,为核能供热技术推广应用打下基础。2019 年 11 月,山东海阳核能供热项目首次正式商用,抽取少量 AP1000 机组常规岛蒸汽为 70 万 m² 住宅供热。“开展山东海阳等核能综合利用示范”也被写入“十四五”规划纲要。随着后续项目建成,最终海阳核电站可达到超过 2 亿 m² 的供热能力,供热半径达 100 km,每年可节约标准煤约 662 万 t。

在中国北方的核电基地中,海阳核电、石岛湾核电、红沿河核电、徐大堡核电等均已(考虑)实施热电联供,进行了相应的技术改造或设计,有望于 2030 年全部实施区域供热,至 2050 年具备条件的核电基地均可进行热电联供;

对于小型低温供热堆各类机型,可待项目成熟后尽快示范、商业推广,十四五期间先行示范 2~4 个机型,此后逐步推广。

当前中国北方地区城乡供热面积总计约 200 亿 m²,保守假设 2030、2050 年分别有 4%、10% 供热需求由核能提供,按照供热量 50 W/m² 测算,分别相当于 0.4 亿 kW 和 1 亿 kW 供热功率。相比燃煤锅炉供热,分别减少二氧化碳排放约 0.7 亿和 1.7 亿 t/年。

2.4 海水淡化

淡水资源不足是全球很多地区面临的问题。据联合国统计,全球约 20% 人口无法获得安全饮用水,而且这一比例还在增加。根据世界银行测算,到 2025 年,将有超过 10 亿人生活在缺水地区。根据中国水利部数据,2030 年中国人均水资源量预计仅有 1 750 m³;在充分考虑节水情况下,用水总量为 7 000 亿~8 000 亿 m³,要求供水能力比当前增长 1 300 亿~2 300 亿 m³。

考虑到海水资源量巨大,成本低廉,将海水淡化使用极具发展潜力。目前,大多数海水淡化工艺使用化石燃料,因此也产生了大量碳排放。而利用核能淡化海水,占地少、水质好、供给稳定。前苏联于 1973 年开始,利用核能技术(快增殖反应堆)进行海水淡化实验,结果证明,在技术和经济效益上皆可行。20 世纪 90 年代以来,核能应用于海水淡化技术得到了国际原子能机构和世界许多国家的广泛重视。

目前较成熟方案是依托大型核电机组建设海水淡化厂,该方案已在中国红沿河、宁德、三门、海阳等多座核电厂采用;也可直接建设低温供热堆用于海水淡化,相关技术方案正在研究中。以红沿河核电海水淡化厂为例,最大产水规模 1.5 万 t/天,正常情况下 1.3 万 t/天,该技术较为成熟,在许多地区具备进一步扩大产能和商业化推广的条件。

此外,随着中国海防建设的需要,如何解决海岛供水安全问题已迫在眉睫。中国存在资源性缺水问题的海岛约占全国海岛总数的 91%,大多远离大陆、分散偏僻,无法引水,面积较小(500 m²~5 km² 的海岛约占中国海岛总数的 98%),开发本地水资源的能力有限。淡水资源保障是中国大力发展海洋科技的后盾,鉴于此,对滨海核电



海水淡化厂、浮动堆海水淡化的需求预计将持续增加。

在国内外一些海岛地区，已有海上浮动核电站的应用实例。2020 年 5 月，俄罗斯建成世界首座浮动核电站“罗蒙诺索夫院士”并投入商业运营，由一艘驳船搭载 2 台 35 MW 的 KLT-40C 核反应堆，为其北极海岸的楚科特卡地区城市提供能源和淡水。

根据上文对用水能力增长的预测目标，综合考虑 2050 年人口变化、人均用水量增加和节水技术进步多重因素作用，保守假设 2030、2050 年中国需水量分别为 1300 亿和 2300 亿 m^3 ，核能海水淡化占比分别为 4%、10%（即同年核电发电量占比的一半），按能耗 $4 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ 测算，即 2030、2050 年新增核能淡化能力分别为 52 亿和 230 亿 m^3 ，相当于 270 万 kW 和 1180 万 kW 核电装机，分别减少二氧化碳排放约 0.17 亿和 0.74 亿 t/年。

3 核能行业发展路径及有关问题建议

3.1 双碳目标下核能行业发展路径

在双碳目标约束下，结合中国核能行业发展现状和有关规划、政策，本文梳理出未来核能技术较为具有发展前景的方向，并尽可能分阶段给出量化目标，见表 2。

为抓住机遇，实现新一轮高质量发展，核能行业要坚持以安全为前提，扎实推进以下工作。

（1）要重塑核能在能源系统中的定位。在能源系统清洁转型过程中，各类能源品种的地位和作用都将转化。核能一方面要扩大电力占比，替代高碳排放能源品种承担基荷角色，主动与风、光、蓄等能源品种互为补充、相互支撑；另一方面要积极改变自身，技术向着灵活化、智慧化方向发展，通过大中小装机配合，地上、地下、水面等多重空间布局，抓住机会开拓制氢、供热等核能综合利用领域市场，确立核能在清洁能源替代中的突出位置。

（2）坚持创新驱动发展。虽然几十年来，中国核能行业从小到大、从弱到强，积累了大量发展经验，取得了一定成绩，但要在新的能源体系中发挥好作用，还需要不断开展科研创新，牢牢掌握核心技术。美国自 20 世纪 80 年代起，很少

建设新的核电项目，但一直未停止新技术研发，始终保持强大的基础研究能力。美国的经验值得学习，要进一步优化自主品牌核电技术的设计，提高经济竞争力；对关键核心技术、核心部件和基础材料仍需加大攻关；小型堆研发要尽快走出“大堆小型化”的局限，探索实现固有安全、高度智能、极度简化、工厂预制、模块配置等特性；对于第四代各种堆型应分层次开展研发示范工作，形成梯次推进的技术布局；面向长远，加强对基础性、原创性科技创新的投入，形成持续、稳定的投入机制^[17]。

（3）坚持全产业链协同推进，与经济社会发展相协调。核能行业在新领域探索发展过程中要充分考虑到扶植培育整个产业链，打下扎实的发展基础，营造良好的市场环境，避免诸如核电越建越贵、关键技术部件受制于人的被动局面。贯彻“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念，让核能成为经济上有优势，对社会有助益，发展成果可共享的绿色产业。同时要把握“双循环”新发展格局，在全球新一轮核能发展中占据主动地位。

3.2 需要关注问题和建议

（1）安全和公众接受性问题。核安全是国家安全的重要组成部分，安全是核能行业发展的前提和生命线。2011 年日本福岛核事故发生后，世界各国汲取事故教训，积极采取措施提升安全性，重建发展信心。随着中国发展进入新时代，党和国家对确保核安全的要求更严、标准更高，人民群众对核安全的关注更多、期待更高。只有解决安全性问题，公众对核能的接受度才能提高，行业发展才有更大空间。因此，面向双碳目标，核能行业要在可能影响安全与公众接受性的环节下大力气，为规模发展奠定基础。

（2）核能经济性问题。据国际可再生能源总署统计，2010 年以来，太阳能光伏、聚光太阳能电池储能、陆上风电和海上风电等新能源技术成本分别下降 82%、47%、71%、38% 和 29%^[22]，在三代核电安全性要求提高、新建项目成本不断攀升的背景下，核能技术发展压力很大。以核能制氢技术为例，现有技术电解 1 m^3 氢气需要 $5 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 电能，未来可以下降到 $2.8 \text{ kW}\cdot\text{h}$ ；当用电成本下降到 $0.15 \text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 以下时，电解水制氢成本可



表 2 中国核能行业发展路径
Table 2 The development path of China's nuclear energy industry

	发展方向	2020年	至2030年	至2050年	至2060年
发电	规模目标	5 100万kW	1.23亿kW	4.10亿kW	—
	主要技术路线	二代、二代加改进型 AP1000、华龙一号等三代核电技术	华龙一号、国和一号等国产三代核电技术规模化小型堆灵活部署	华龙一号、国和一号等国产三代核电技术规模化小型堆灵活部署	先进裂变反应堆小型堆灵活部署受控核聚变
	主要科研创新方向	—	四代核电技术、小型堆；受控核聚变	四代核电技术、小型堆；受控核聚变	受控核聚变
核能制氢	规模目标	—	高温气冷堆等若干项制氢技术商业化核能制氢占比4%，约750万kW热功率*	高温气冷堆等制氢技术商业化规模部署核能制氢占比10%，约3 200万kW热功率*	—
	主要技术路线	—	高温气冷堆等可提供高品质热源的技术	高温气冷堆等可提供高品质热源的技术	高温气冷堆等可提供高品质热源的技术
	主要科研创新方向	高温气冷堆商业化部署	高温气冷堆技术成熟性和经济性制氢工艺所需材料耐腐蚀性	制氢工艺成熟性和经济性	制氢工艺成熟性和经济性
区域供热	规模目标	1个大型压水堆基地	北方大型核电基地热电联供小型供热堆示范与推广提供4%供热需求，约0.4亿kW热功率*	北方大型核电基地热电联供小型供热堆商业化规模部署提供10%供热需求，约1亿kW热功率*	—
	主要技术路线	大型堆热电联供	大型压水堆燕龙等小型供热堆	大型压水堆燕龙等小型供热堆	小型堆热电联供
	主要科研创新方向	小型供热堆	小型供热堆	小型供热堆	—
海水淡化	规模目标	—	大型核电基地配备淡化厂小型堆海水淡化示范与推广市场占比4%，约270万kW装机*	大型核电基地配备淡化厂低温堆、浮动堆等小型堆商业化规模部署市场占比10%，约1 180万kW装机*	—
	主要技术路线	大型堆配备淡化厂	大型堆配备淡化厂低温堆海水淡化示范	大型堆配备淡化厂、低温堆商业化规模部署浮动堆多功能示范与推广	低温堆、浮动堆等小型堆多功能利用
	主要科研创新方向	浮动堆海水淡化	低温堆、浮动堆海水淡化	浮动堆多功能利用	—

注：* 有关数据是在调研分析基础上按保守原则提出的测算值。

以和既有供氢技术竞争^[23]。目前国内核电上网电价大多在 0.4 元/(kW·h) 以上，因此如何通过技术改进和创新降低核电成本，成为一个关键问题。

(3) 在未来能源体系中的灵活性问题。中国资源禀赋和用能负荷不均衡，加之新能源的时空不匹配，预计下一步新能源的波动性和间歇性将给电网运行带来巨大影响。此外，根据国网能源研究院预测，在用户端将更加明显地呈现夏季、冬日负荷“双峰”特点。在传统情况下，核电一般以带基荷运行为主，不参与电网调峰^[24]；在新的发展阶段，核电灵活性不足问题将显现，或面临更频繁的调峰压力。根据有关研究，随着核电参与调峰深度的加深，电力系统运行成本和单位发电量成本都将较显著提高。广泛开发核能多功能利用或配备储能，对于弥补核能调峰深度受限

问题、增加核能系统灵活性意义重大，还可能避免因大型核电机组频繁参与调峰带来的经济性和安全性挑战。当前储能技术中，抽水蓄能较为成熟，相比于化学储能大多在 0.6~0.8 元/(kW·h) 的度电成本，抽水蓄能度电成本较低 (0.21~0.25 元/(kW·h))^[25]。下一步，探索核能参与“多能互补”电源基地，加强“源网荷储”互动^[26]，是重要研究方向。

4 结语

在“双碳”目标下，中国能源系统将向着多元清洁方向发展。核能作为典型低碳能源品种，可在未来能源体系中超脱出仅提供电力的角色，助力能源清洁低碳转型，实现高质量发展。



本文结合中国能源系统现状和核能发展基础，分析核能在发电、制氢、区域供热、海水淡化等领域的发展机遇，总结提出行业发展路径，指出下一步核能行业工作重点为重塑其在能源系统中的定位、坚持创新驱动发展、坚持与经济社会协调发展，同时应关注安全和公众接受性、经济性、灵活性等重要问题，为有关政策制定提供参考。

参考文献：

- [1] World Resources Institute. Climate watch[DB/OL]. (2021-03-14)[2021-03-15]. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>.
- [2] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear power for sustainable development[R]. Vienna: IAEA, 2017.
- [3] Hannah Ritchie and Max Roser. CO₂ and greenhouse gas emissions[EB/OL]. (2020-08-01)[2021-03-12]. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- [4] International Energy Agency. World energy balances[DB/OL]. (2021-03-31)[2021-04-01]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables>.
- [5] BP. Statistical review of world energy[EB/OL]. (2021-03-31)[2021-04-01]. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
- [6] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展 [R]. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, 2020.
- [7] 张运洲, 张宁, 代红才, 等. 中国电力系统低碳发展分析模型构建与转型路径比较 [J]. 中国电力, 2021, 54(3): 1-11.
ZHANG Yunzhou, ZHANG Ning, DAI Hongcai, *et al.* Model construction and pathways of low-carbon transition of China's power system[J]. Electric Power, 2021, 54(3): 1-11.
- [8] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
HU Angang. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 1-15.
- [9] 王克, 刘芳名, 尹明健, 等. 1.5 °C 温升目标下中国碳排放路径研究 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 7-17.
WANG Ke, LIU Fangming, YIN Mingjian, *et al.* Research on China's carbon emissions pathway under the 1.5 °C target[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 7-17.
- [10] Energy Transitions Commission, Rocky Mountain Institute. China 2050: a fully developed rich zero-carbon economy[EB/OL]. (2019-11-01)[2021-03-15]. <https://www.energy-transitions.org/publications/china-2050-a-fully-developed-rich-zero-carbon-economy/>.
- [11] 项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1-25.
- [12] 杨鲲鹏, 王怡. 统筹能源安全保障和绿色转型发展 [N]. 中国电力报, 2021-04-19(1).
- [13] International Atomic Energy Agency (IAEA). Climate change and nuclear power[R]. Vienna: IAEA, 2018: 34-35.
- [14] World Nuclear Association. Nuclear process heat for industry [EB/OL]. (2020-09-01)[2021-03-05]. <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/industry/nuclear-process-heat-for-industry.aspx>.
- [15] International Atomic Energy Agency (IAEA). Industrial applications of nuclear energy[R]. Vienna: IAEA, 2017: 13-15.
- [16] US Energy Information Administration. International energy statistics[DB/OL]. (2021-03-14)[2021-03-15]. <https://www.eia.gov/international/overview/world>.
- [17] 荣健. 我国核电安全高效发展路径与措施 [EB/OL]. (2020-08-20)[2021-03-25]. <http://www.china-nea.cn/site/content/37816.html>.
- [18] World Nuclear Association. Emerging nuclear energy countries [EB/OL]. (2021-03-14)[2021-03-15]. <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx>.
- [19] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述 [J]. 热力发电, 2021, 50(6): 1-8.
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, *et al.* Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 1-8.
- [20] 杨勤, 刘建国, 张晨佳, 等. 高温固体氧化物电解水制氢系统效率分析 [J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 28-31, 36.
YANG Qin, LIU Jianguo, ZHANG Chenjia, *et al.* Efficiency analysis of hydrogen production system using high temperature solid oxide water electrolyzer[J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 28-31, 36.
- [21] 李小斌, 张红娜, 曲凯阳, 等. 核能集中供热系统优越性分析 [J]. 华电技术, 2020, 42(11): 69-82.
LI Xiaobin, ZHANG Hongna, QU Kaiyang, *et al.* Analysis on the superiority of nuclear energy district heating systems[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 69-82.
- [22] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2019 [EB/OL]. (2020-06-01)[2021-03-15]. <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power->



Costs-in-2019.

- [23] 姜克隽, 向翩翩, 贺晨旻, 等. 零碳电力对中国工业部门布局影响分析 [J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 5–11.

JIANG Kejun, XIANG Pianpian, HE Chenmin, *et al.* Impact analysis of zero carbon emission power generation on China's industrial sector distribution[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 5–11.

- [24] 彭波, 余文奇, 刘云. 国外核电机组参与系统调峰情况分析 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(3): 23–26.

PENG Bo, YU Wenqi, LIU Yun. Overview of foreign nuclear power plants in load-following[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(3): 23–26.

- [25] 何颖源, 陈永翀, 刘勇, 等. 储能的度电成本和里程成本分析 [J]. 电工电能新技术, 2019, 38(9): 1–10.

HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, *et al.* Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 1–10.

- [26] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 1–8.

ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, *et al.* Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 1–8.

作者简介:

王海洋 (1984—), 女, 高级工程师, 从事核电行业发展研究, E-mail: whynuclear@126.com。

(责任编辑 杨彪)

Analysis on China's Nuclear Energy Development Path under the Goal of Peaking Carbon Emissions and Achieving Carbon Neutrality

WANG Haiyang, RONG Jian

(China Nuclear Energy Development Center, Beijing 100045, China)

Abstract: China's energy system will continue to speed up the clean and low-carbon transformation under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality (the dual-carbon target). Nuclear energy has the advantages of zero-emission of greenhouse gases in the production process, low carbon emission during the whole life cycle, high energy density and non-intermittency, and can help realize the transition of energy system through large-scale replacement of fossil energy. Based on an investigation of the current situation of China's energy system and the foundation of nuclear energy development, this paper summarizes the energy development goals proposed by various researches. Then an analysis is made of the development opportunities of nuclear energy in the fields of power generation, hydrogen production, district heating and water desalination, and the staged development objectives and the corresponding techniques are proposed. Furthermore, the development path of nuclear energy industry is discussed, and it is pointed out that the focus of future work should be on reposition of nuclear energy in the whole energy system, insisting on innovation-driven development, and adhering to the coordinated development of economic society. In the end, the issues that attention should be paid to are discussed, including safety and public acceptability, economy and flexibility, and some policy suggestions are proposed for the high quality development of nuclear energy industry.

This work is supported by Special Supported Project by Financial Funds (Research on Major Issues of Nuclear Power Development and Reform).

Keywords: nuclear energy; nuclear power; peaking carbon emissions; achieving carbon neutrality; district heating; nuclear hydrogen production; seawater desalination