

## 内容目录

1、核电：清洁、稳定、安全、具备基荷能源基础.....	5
1.1 核电是双碳政策下首选清洁能源之一.....	5
1.2 核电具备基荷特征，能源转型背景下大有可为.....	9
2、国内核电技术处世界前列，四代核电稳步推进中.....	12
2.1 我国自主掌握华龙一号、国和一号等三代核电技术.....	12
2.2 四代核电研发顺利，处商业化初期.....	15
3、2024年开始核电设备进入密集交付周期，带动业绩提升.....	19
4、国内核电技术成本显著低于海外，核电出海需求空间广阔.....	22
风险提示.....	24

## 图表目录

图表 1: 核电站工作示意图.....	5
图表 2: 核裂变示意图.....	6
图表 3: 核聚变示意图.....	6
图表 4: 核岛及常规岛.....	6
图表 5: 2019年核电站设备投资成本构成.....	7
图表 6: 核岛设备投资成本占比.....	7
图表 7: 常规岛设备投资成本占比.....	7
图表 8: 各堆型冷却剂和慢化剂对应情况.....	8
图表 9: 全球核电站使用的主要堆型对比.....	8
图表 10: 截至2024年5月21日，世界在运各类型核电装机占比.....	9
图表 11: 截至2024年5月21日，世界在建各类型核电装机占比.....	9
图表 12: 每生产一度电，发电需要排放的碳当量，单位：g.....	10
图表 13: 各大能源利用小时数对比，单位：小时.....	10
图表 14: 全球天然铀历史产量变化.....	10
图表 15: 中国核电发电量占比及核电装机容量预测.....	11
图表 16: 2030年核电装机容量预测.....	11
图表 17: 核电四代技术主要特点及堆型.....	12
图表 18: 核电四代技术发展历程.....	13
图表 19: 截至2023年底，第三代核电技术研发与商业部署情况.....	13
图表 20: 核电技术发展历程.....	14
图表 21: 截至2023年底，三代核电投运/并网情况.....	15
图表 22: 截至2023年底，三代核电总计44台机组在建.....	15
图表 23: 第三代和第四代核电站的目标及要求对比.....	16
图表 24: 六种四代核能技术方案对比.....	17
图表 25: 不同技术下单堆规模对比.....	17
图表 26: 不同技术下出口温度对比.....	17
图表 27: 超高温气冷堆示意图.....	18
图表 28: 我国超高温气冷堆燃料元件示意图.....	18
图表 29: 2019-2023年我国核电核准及开工项目数（只统计大堆）.....	19
图表 30: 2014-2023年中国核电在运及在建机组数量情况统计（台）.....	19

图表 31: 2014-2023 年中国核电在运及在建装机容量情况统计 (万千瓦) .....	19
图表 32: 中国大陆地区核电厂分布 .....	20
图表 33: 2008-2024Q1 核电基本建设投资完成额 .....	21
图表 34: 2018-2023 年中国核电投资计划 .....	21
图表 35: 截至 2024 年 5 月 21 日, 全球在建核电反应堆容量及核电反应堆数量 .....	22
图表 36: 国内外核电机型造价对比 (比投资) .....	23
图表 37: 各类核电技术成本 .....	23

## 1、核电：清洁、稳定、安全、具备基荷能源基础

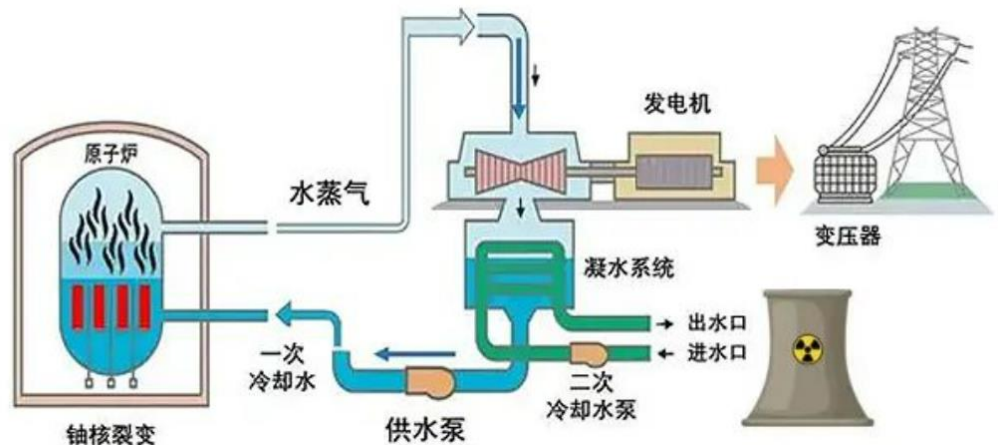
### 1.1 核电是双碳政策下首选清洁能源之一

核电是利用核反应堆中核裂变所释放出的热能进行发电的方式。在核裂变过程中，快中子经慢化后变为慢中子，撞击原子核，发生受控的链式反应，产生热能，生成蒸汽，从而推动汽轮机运转。核电站与我们常见的火力发电站一样，都用蒸汽推动汽轮机做功，带动发电机发电。

以压水堆为例对核能发电的原理进行说明：主要依赖4大设备，核燃料在反应堆内发生裂变而产生大量热能，高温高压的一回路冷却水把这些热能带出反应堆，并在蒸汽发生器内把热量传给二回路的水，使它们变成蒸汽，蒸汽推动汽轮机带动发电机发电。整个过程的能量转换是由核能转换为热能，热能转换为机械能，机械能再转换为电能。

- **一回路：**反应堆堆芯因核燃料裂变产生巨大的热能，高温高压的冷却水由主泵泵入堆芯带走热量，然后流经蒸汽发生器内的传热U型管，通过管壁将热能传递给U型管外的二回路，释放热量后又主泵送回堆芯重新加热再进入蒸汽发生器。水这样不断的在密闭的回路内循环，被称为一回路。
- **二回路：**蒸汽发生器U型管外的二回路水受热变成蒸汽，蒸汽推动汽轮机发电机做功，把热能转换为电力；做完功后的蒸汽进入冷凝器冷却，凝结成水返回蒸汽发生器，重新加热成蒸汽。这个回路循环被称为二回路。

图表 1: 核电站工作示意图

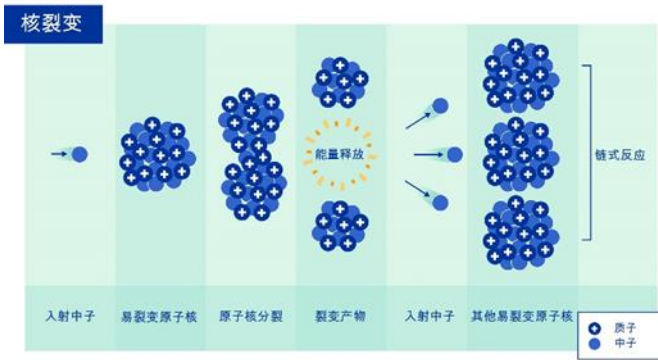


资料来源：上海市电子电器技术协会，国盛证券研究所

核电按照发电技术主要分为核裂变与核聚变两种方式，目前核能发电利用的是核裂变能。

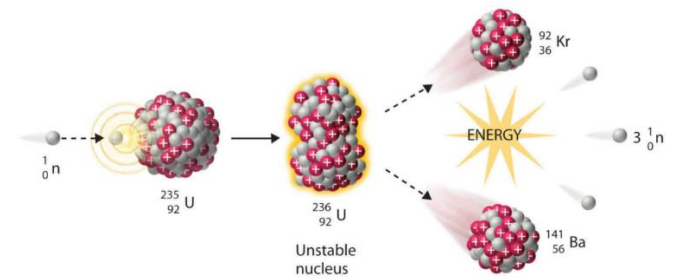
- **核裂变**是指一个较重的原子核在特定条件下分裂为两个或多个较轻原子核，同时释放大量能量和更多中子的过程。铀-233、铀-235 铀-238 和钚-239 是目前广泛运用的裂变反应核燃料。核裂变的产物主要是中等元素的原子核以及中子，不产生任何温室气体污染空气和粉尘。
- **核聚变反应**是两个轻原子核在极高温度和压力下结合成一个更重的原子核，同时释放出巨大能量。氘和氚是聚变反应的主要核燃料，反应结束后生成氦。从聚变反应机理来看，反应只产生惰性气体氦和中子射线，比裂变反应更加清洁。无论是裂变还是聚变，生成物都没有二氧化碳，也不含其他会导致温室效应的气体。

图表 2: 核裂变示意图



资料来源: 国际原子能机构新闻和宣传办公室, 国盛证券研究所

图表 3: 核聚变示意图



资料来源: 中核智慧环境科技有限公司, 国盛证券研究所

核电站主要由核岛和常规岛组成。核裂变电站可分为两部分，一是核岛，包括反应堆厂房、辅助厂房、核燃料厂房和应急柴油机厂房。二是常规岛，包括汽轮发电机厂房和海水泵房。压水堆核电站主要由核岛、常规岛和电站配套设施（BOP）等组成。核岛由核反应堆厂房和核辅助厂房构成，其中核反应堆厂房的安全壳是核电站的重要安全构筑物。安全壳一般为带有半圆形顶的圆柱体钢筋混凝土建筑，能够承受地震、台风等各种外部冲击，是核电站的第三道安全屏障，确保反应堆的放射性物质不释放到外部环境。

图表 4: 核岛及常规岛



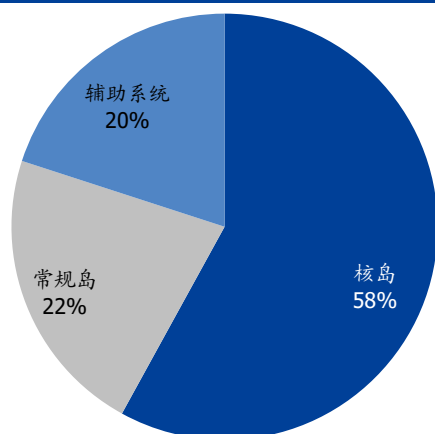
灰色建筑物为核岛，圆柱体建筑物内安装了核反应堆，  
长方体建筑物为燃料厂房

白色建筑为常规岛，安装了汽轮机和发电机组

资料来源: 中国核电招股说明书, 国盛证券研究所

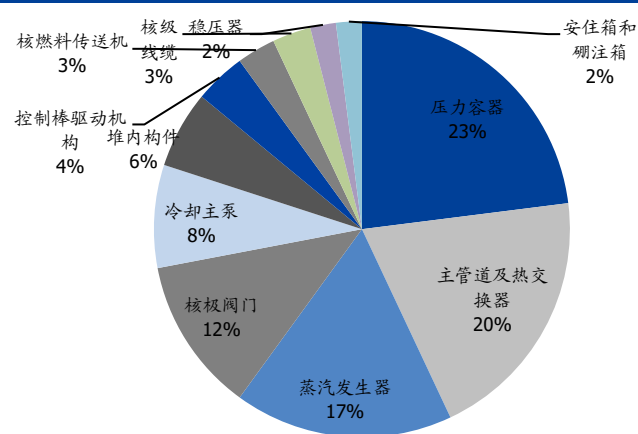
核岛设备制造是核电国产化核心，投资成本过半。核岛设备核心产品技术难度大、质量要求高、资金投入多等原因导致核岛设备的进入壁垒极高，因此整体成本更高，占比达58%，且盈利性更高。常规岛设备由于发电原理与火电、水电等其他发电站相似，设备具备一定的通用性，因此常规岛设备的市场竞争程度较高，盈利性较低。辅助系统设备市场中民营企业较多，由于无特殊的技术要求，技术壁垒低，市场参与者较多且竞争激烈，毛利率水平偏低。

图表 5: 2019 年核电站设备投资成本构成



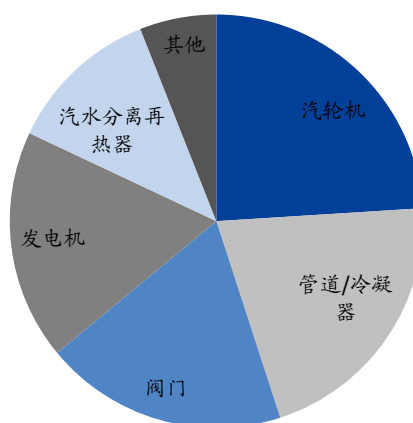
资料来源: 中国核能行业协会, 国盛证券研究所

图表 6: 核岛设备投资成本占比



资料来源: 前瞻产业研究院, 国盛证券研究所

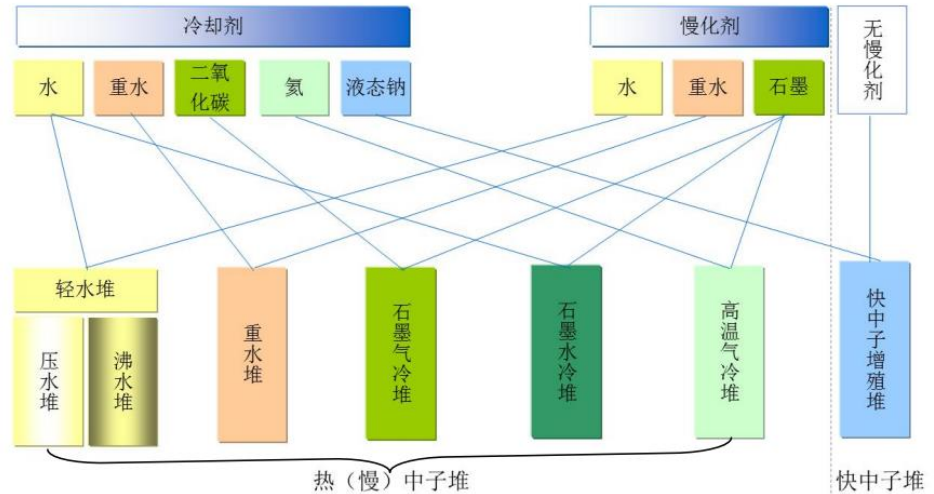
图表 7: 常规岛设备投资成本占比



资料来源: 前瞻产业研究院, 国盛证券研究所

各种核电堆型的区别主要在于反应堆的冷却剂和慢化剂的不同。按照冷却剂的不同可分为轻水堆（分为沸水堆和压水堆）、重水堆、气冷堆等，按照慢化剂的不同可分为热中子堆、快中子堆。我国目前核电站采用的堆型有压水堆、重水堆、高温气冷堆和快中子堆。

图表 8: 各堆型冷却剂和慢化剂对应情况



资料来源: 中国核电招股说明书, 国盛证券研究所

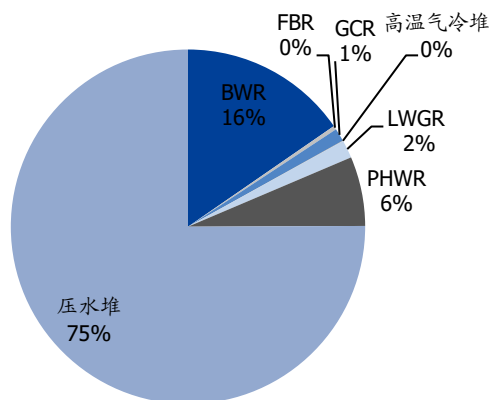
图表 9: 全球核电站使用的主要堆型对比

堆型名称	燃料	冷却剂	慢化剂	原理及技术特点
压水堆 (PWR)	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	水	把轻水 (普通水) 加压后能降低沸点, 加压水在 325°C 的高温下仍能保持液体状态。PWR 在其一回路系统中使用加压水吸收热量, 之后在二回路系统中降低气压释放热量。
沸水堆 (BWR)	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	水	沸腾轻水在反应堆压力容器内直接产生饱和蒸汽的动力堆。沸水堆与压水堆同属轻水堆, 都具有结构紧凑、安全可靠、建造费用低和负荷跟随能力强等优点。
重水堆 (HWR)	天然 UO <sub>2</sub>	重水	重水	重水堆能高效、充分的利用核燃料, 但体积比轻水堆大, 建造费用高, 重水昂贵, 发电成本比较高。
石墨气冷堆 (GCR)	天然 UO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> 或 氦气	石墨	用石墨慢化, 二氧化碳或氦气冷却的反应堆。近期的研究集中在氦气冷却的高温气冷堆 (HTGR) 上。
石墨水冷堆 (LWGR)	浓缩 UO <sub>2</sub>	水	石墨	堆芯和循环回路庞大, 难以设置安全屏障, 运行比较复杂。
快中子增殖堆 (FBR)	浓缩 UO <sub>2</sub> 、PuO <sub>2</sub> &UO <sub>2</sub>	液态钠	无	由快中子引起链式裂变反应所释放出来的热能转换为电能。快堆在反应中既消耗裂变材料, 又生产新裂变材料, 而且所产可多于所耗, 能实现核裂变材料的增殖。

资料来源: 中国广核招股说明书, 国盛证券研究所

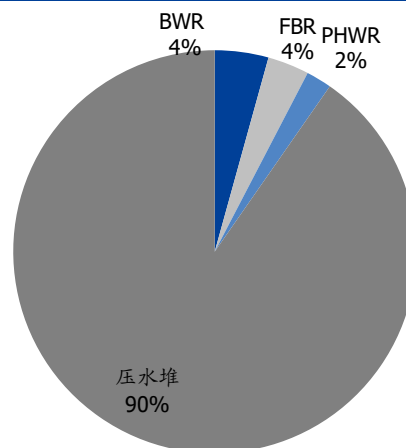
压水堆以普通水作冷却剂和慢化剂, 是目前世界上最普遍的商用堆型。据 IAEA 数据, 截至 2024 年 5 月 21 日, 世界 31 个国家在运核电机组共计 441 台, 装机容量 395.87GW。世界 15 个国家在建核电机组共计 59 台, 装机容量为 61.64GW。世界 31 国在运 441 台核电中, 压水堆 311 台, 装机容量 297.2GW, 占比 75%。世界 15 国在建 59 台核电中, 压水堆 51 台, 装机容量 55.67GW, 占比 90%。

图表 10: 截至 2024 年 5 月 21 日, 世界在运各类型核电装机占比



资料来源: IAEA, 国盛证券研究所

图表 11: 截至 2024 年 5 月 21 日, 世界在建各类型核电装机占比



资料来源: IAEA, 国盛证券研究所

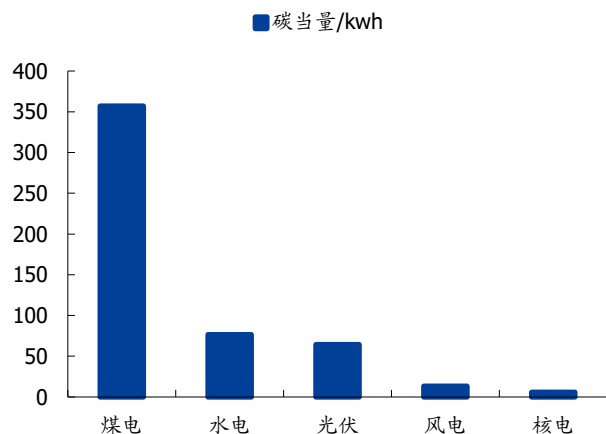
## 1.2 核电具备基荷特征, 能源转型背景下大有可为

核电是基荷能源, 具有持续稳定电力供应的能力, 可以有效缓解新能源波动对电网的冲击。核电与风光等新能源互为补充、协同发展, 可以有效支撑大规模新能源上网消纳, 在构建以新能源为主体的新型电力系统中发挥更大的作用。据国家能源局数据, 2060 年电力系统要实现碳中和, 非化石能源发电占比应达到 90% 以上, 核电发电量应接近 20%。

核电清洁高效, 是少有的优质能源。核电从发电机理上来讲, 属于非化石能源, 具备碳排放量少, 清洁性高, 安全稳定, 利用小时数高等特点。

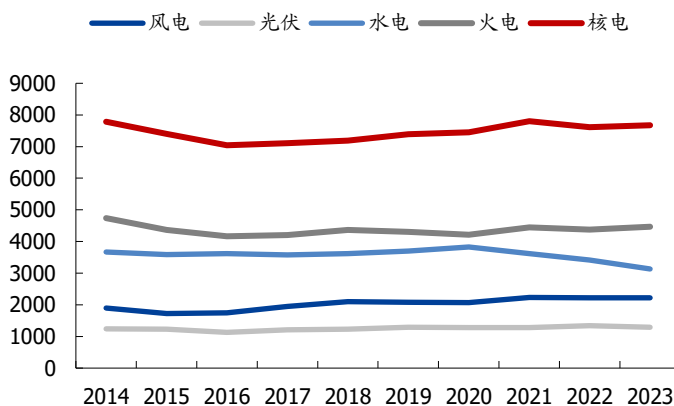
- **核电每度电碳排放量在所有能源中最低。**根据国际原子能机构 (IAEA) 发布的报告显示, 每生产一千瓦时电力 (即一度电), 煤炭发电需要排放 357 克碳当量, 光伏发电需要排放 76.4 克, 水力发电需要排放 64.4 克, 风能发电需要排放 13.1 克, 核能只需要排放 5.7 克。在同等能源情况下, 核能的高能量密度特性可以释放更多能力, 而在同等发电水平下, 核能又能排出最少的碳量。
- **核电技术成熟, 安全性高。**我国高度重视核电发展, 将安全性列为首位。核电站在设计和建设的过程中, 一般会采用纵深防御来提高其安全性, 将放射性物质置于多道屏障之下。同时 2017 年我国发布了《核安全法》, 我国的核安全管理水平, 核安全监管能力和核应急能力有了进一步的提升。
- **核电发电稳定性高, 利用小时数长。**换料周期在 1 年-1.5 年, 这确保了核电拥有更长的持续运行时间。2023 年核电利用小时数为 7670, 约为风电的 3.45 倍、火电的 1.72 倍、光伏的 5.96 倍。

图表 12: 每生产一度电, 发电需要排放的碳当量, 单位: g



资料来源: 国家原子能机构, IAEA, 国盛证券研究所

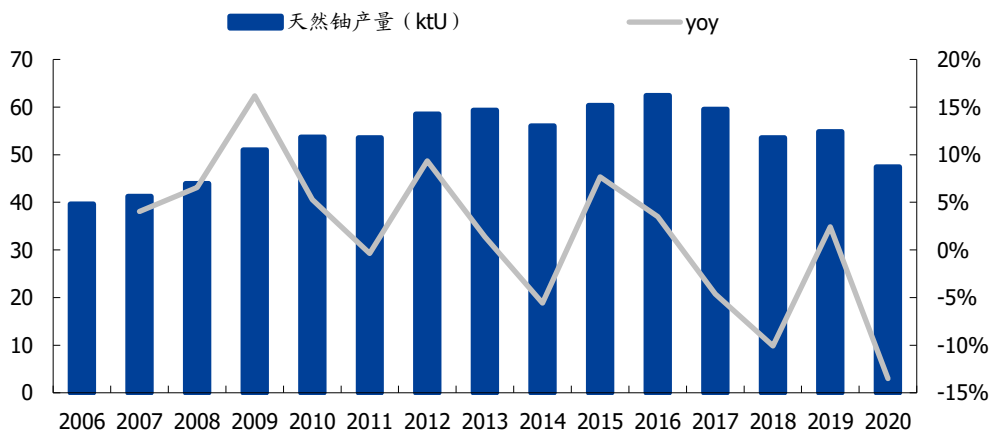
图表 13: 各大能源利用小时数对比, 单位: 小时



资料来源: wind, 国家能源局, 国盛证券研究所

核能发电不依赖与自然状况, 原料供应充足, 可稳定供电。风力发电的效率高低取决于风资源的丰富程度, 包括场址所在地的风速和空气密度; 光伏发电的效率则由光资源决定, 包括场址所在地的日照时间和日照强度。而天气不可控的特性, 使风电和太阳能发电的供电能力波动幅度较大。两者年发电利用小时远低于核电。核能发电以铀为燃料, 在燃料供应充足的情况下, 可以稳定持续产电; 截至 2021 年 1 月 1 日, 开采成本低于 260 美元/kgU 的已查明铀资源总量为 791.75 万吨铀, 能够满足全球核电中长期发展的天然铀需求。

图表 14: 全球天然铀历史产量变化



资料来源: 《后疫情时代世界天然铀供需结构与我国天然铀供需趋势\_张晓等》, 国盛证券研究所

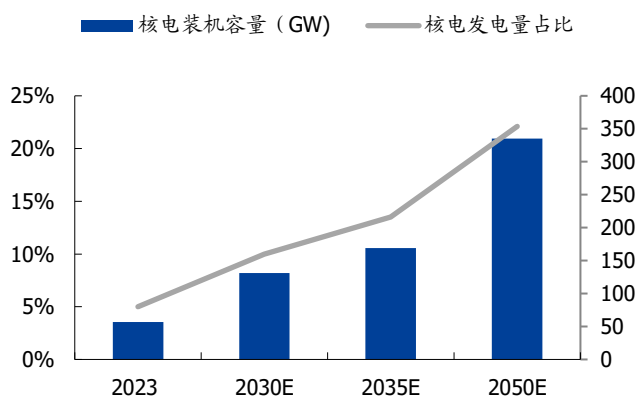
核电站所受地域限制相比风电和太阳能发电更小, 并且单位土地的供电量更大。风力发电站和光伏发电站的地址选取主要考虑发电资源的分布。风电站的选址取决于风能资源的分布, 一般在高原、山区、海岸线和开阔的平原等地带; 光伏电站的选址则与光照条件密切相关。在光照充足、气候温暖的地区, 光伏电站具有较好的适应性。目前我国的核电站虽然大多建设于沿海地域, 但其受自然条件限制较小。此外, 核电站的土地利用效率较高。以风电场为例, 100 万千瓦的风电场需要占地近 600 平方公里, 而我国大亚湾核电站的发电功率为近 200 万千瓦, 面积仅为 2 平方公里。在土地资源较为紧张的省份, 建设核电站是最优解。

国内外核电需求共振, 至 2030 年, 预计国内/全球年均新增装机量达 11/18GW。截至 2023 年底, 我国大陆在运核电机组 55 台, 总装机容量为 57GW, 核准及在建核电机



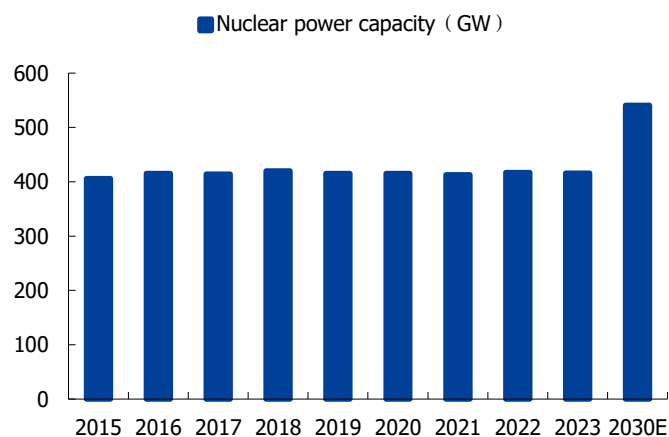
组 36 台,总装机容量为 44 GW;全年核电发电量 44 万 GWh,占全国累计发电量近 5%。根据中国核学会预测,2030、2035、2050 年核电装机规模达到 131GW、169 GW、335GW,发电量占比达到 10.0%、13.5%、22.1%;对应 2024-2030 年、2031-2035 年、2036-2050 年均核电新增装机量达 11、8、7GW。据 IEA 数据,2030 年全球核电装机量达 541GW,则 2024-2030 年年均装机量达 18GW, CAGR 达 4%。

图表 15: 中国核电发电量占比及核电装机容量预测



资料来源: 中国核学会, 国家能源局, 国盛证券研究所

图表 16: 2030 年核电装机容量预测



资料来源: IEA, 国盛证券研究所

## 2、国内核电技术处世界前列， 四代核电稳步推进中

### 2.1 我国自主掌握华龙一号、国和一号等三代核电技术

**全球三代核电陆续商用，四代核电稳步研发中。**1942年12月，在美国芝加哥大学建成的世界第一座反应堆验证了可控的核裂变链式反应的科学可行性。

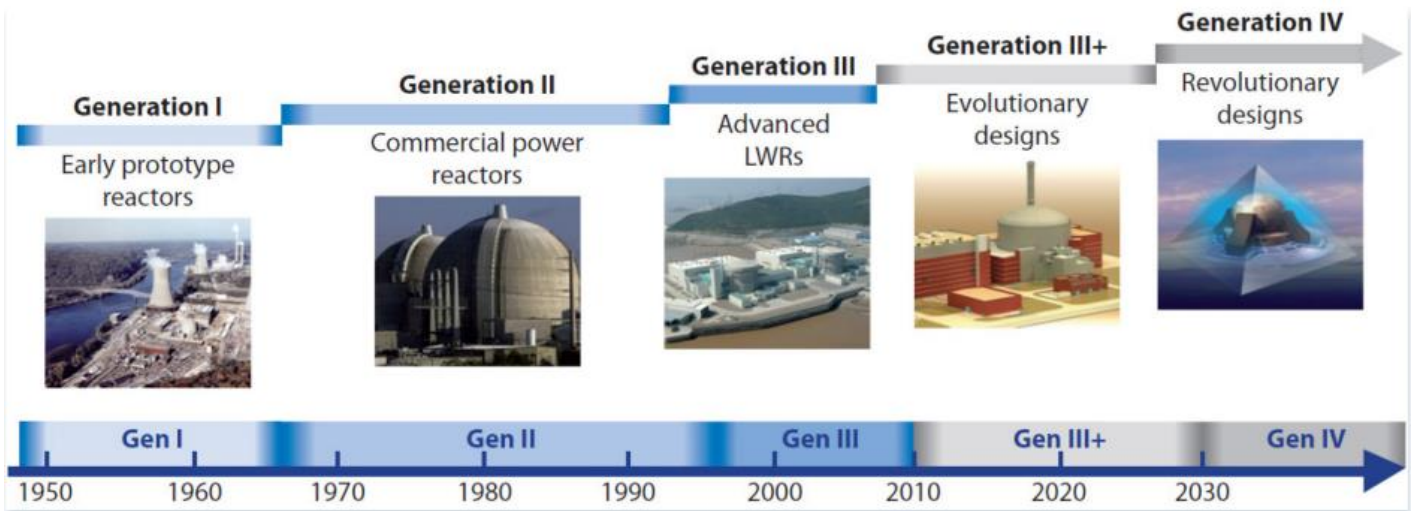
- 第一代核能系统是二十世纪50~60年代，基于军用核反应堆技术，由美国、前苏联、加拿大、英国等国家，设计、开发、建造的首批原型堆，用于发电或生产裂变材料。
- 第二代的核电机组类型主要有压水堆、沸水堆、重水堆、石墨水冷堆和改进型气冷堆等。目前全世界范围正在运行的绝大部分商用核电站均采用第二代核电技术，其中压水堆、沸水堆和重水堆分别占目前总机组数的61%、21%和10%。
- 第三代核能系统的开发始于上世纪90年代，首次建成的采用第三代技术的核电机组是日本1997年投入运行的柏崎刈羽核电厂的两台先进型沸水堆机组（ABWR）。
- 第四代核能系统在反应堆、燃料循环方面有重大的革新和发展。2000年，美国首次提出了第四代反应堆计划，即规划在2030年左右投入市场的新一代核能系统。目前第四代核能系统最具发展前景的反应堆有六种：气体冷却快堆（GFR）、铅冷却快堆（LFR）、钠冷却快堆（SFR）、熔盐堆（MSR）、超临界水冷堆（SCWR）和超高温气冷堆（VHTR）。第四代核电技术仍处于商业化应用早期阶段。

图表 17: 核电四代技术主要特点及堆型

技术类别	起始时间	主要特点	主要堆型
第一代核电技术	20世纪50年代-60年代中期	多为早期原型机，使用天然铀燃料和石墨慢化剂。证明了核能发电的技术可行性，具有研究探索的试验原型堆性质。设计上比较粗糙，结构松散，尽管机组发电容量不大，一般在30万千瓦之内，但体积较大。且在设计中没有系统、规范、科学的安全标准作为指导和准则，因而存在许多安全隐患，发电成本也较高。	美国希平港核电站、德累斯顿核电站、英国卡德霍尔生产发电两用的石墨气冷堆核电厂、前苏联APS-1压力管式石墨水冷堆核电站、加拿大NPD天然铀重水堆核电站等
第二代核电技术	20世纪60年代-90年代	是较为成熟的商业化反应堆，使用浓缩铀燃料，以水作为冷却剂和慢化剂，其堆芯熔化概率和大规模释放放射性物质概率分别为 $10^{-4}$ 和 $10^{-5}$ 量级。反应堆寿命约40年。在第一代核技术的基础上，它实现了商业化、标准化等，单机组的功率水平在第一代核电技术基础上大幅提高，达到百万千瓦级。目前全世界在运核电机组大多数使用第二代技术或其改进型。	压水堆（PWR）、沸水堆（BWR）、加压重水堆（PHWR）、石墨气冷堆（GCR）、及石墨水冷堆（LWGR）等
第三代核电技术	20世纪90年代至今	第三代核电技术指满足美国“先进轻水堆型用户要求文件”（URD）和“欧洲用户对轻水堆核电站的要求”（EUR）的压水堆型技术核电机组，是具有更高安全性、更高功率的新一代先进核电站。其堆芯熔化概率和大规模释放放射性物质概率分别为 $10^{-7}$ 和 $10^{-8}$ 量级。反应堆寿命约60年。	先进沸水堆（ABWR）、非能动先进压水堆（AP600/AP1000）、欧洲压水堆（EPR）及华龙一号、国和一号、俄罗斯的VVER技术
第四代核电技术	21世纪	2000年美国首次提出了第四代核反应堆计划，规划在2030年后投入市场推广建设。目标是满足安全、经济、可持续发展、极少的废物生成、燃料增殖的风险低、防止核扩散等基本要求。预计将有封闭的核燃料产业链，提高核燃料使用效率，或将使用钍元素作为燃料，显著降低核废料半衰期，提高核能使用的安全性。	石岛湾核电站（HTR-PM）（目前处于在建过程）

资料来源：中国广核招股说明书，能源新媒，国盛证券研究所

图表 18: 核电四代技术发展历程



资料来源: 《GIFR&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems》, 国盛证券研究所

全球已开发并实现商业部署的三代核电技术包括以下几种堆型: 美国同日本联合开发的先进沸水堆 ABWR (由于采用沸水堆技术的国家并不多, ABWR 技术原先计划在全球范围内大规模推广的设想未能实现); 美国开发的先进压水堆 AP1000; 俄罗斯开发的先进压水堆 VVER; 法国和德国联合开发的欧洲压水堆 EPR; 韩国开发的先进压水堆 APR-1400; 中国自主研发的大型先进压水堆“华龙一号”(HPR1000)、“国和一号”(CAP1400)。

图表 19: 截至 2023 年底, 第三代核电技术研发与商业部署情况

已经部署	等待部署	正在研发
华龙一号(中国) 国和一号(中国) CAP1000(中国) AP1000(美国) VVER1200(俄罗斯) VVER-Toi(俄罗斯) APR-1400(韩国) EPR(法国) ABWR(日本)	APWR(日本) Atmeal(日本) APR-1000(韩国) ESBWR(美国)	ACPR1700(中国) CAP1700(中国) VVER-1500(俄罗斯) VVER-1800(俄罗斯) EPR1000(法国)

资料来源: 能源新媒, 国盛证券研究所

华龙一号是我国自主掌握的第三代核电技术。“华龙一号”是我国具有自主知识产权的三代压水堆核电技术, 其堆芯热功率为 3180 兆瓦, 采用三环路核蒸汽供应系统设计。2021 年 1 月 30 日, 我国自主三代核电技术“华龙一号”全球首堆福建福清核电站 5 号机组投入商业运行, 成为继美国、法国、俄罗斯等国家之后真正掌握自主三代核电技术的国家。目前我国核电装备制造产业已形成了每年 10 台/套百万千瓦级压水堆主设备的制造能力, 且自主三代核电综合国产化率达到 90% 以上。截至 2024 年 4 月, 国内外有 5 台“华龙一号”机组已投运, 有 13 台正在建设。

“国和一号”(CAP1400)是我国具有自主知识产权的大型先进压水堆核电技术。CAP1400 是在国家科技重大专项的支持下, 在消化、吸收 AP1000 技术的基础上, 通过自主创新, 进一步提升电厂容量、优化总体参数、平衡电厂设计、重新设计关键设备, 安全性、经济性均优于 CAP1000 的非能动压水堆核电技术。“国和一号”堆芯热功率为 4040 兆瓦, 采用两环路核蒸汽供应系统设计, 目前其示范工程 2 台机组均已在山东荣成

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/198062033027006076>