

总 报 告



General Report

B.1

中国核能发展报告（2019）*

摘 要： 在全球范围内，核能产生了世界上近 1/3 的低碳电力，为世界提供了清洁、安全、可靠的能源供应。核能也是我国清洁低碳、安全高效的现代能源体系的重要组成部分，是积极应对气候变化、兑现减排承诺和绿色低碳发展的重要选择，是带动科技进步与产业升级、促进经济发展的重要动能，是落实“一带一路”倡议、拓展国际产能合作的重要抓手。《中国核能发展报告（2019）》系统阐述了 2018 年国际核能发展的基本情况与趋势；从核电生产运行、核电工程建设、核能科技研发、核燃料循环产业、核电装备制造、核能行业管理与安全保障、核能国际合作等方面总结了 2018 年我国核能发展主要成果；并就我国核能发展形势进行了分析与展望。

关键词： 核能发展 核电生产运行 核电工程建设

* 本报告作者信息详见文前“编写说明”。



— 2018 年世界核能发展

（一）核电生产运行

核电作为一种安全、低碳、可大规模利用的能源，对于优化能源结构、保障能源安全、减排、促进经济可持续发展的作用受到广泛认可。截至 2018 年年底，全球在运机组 454 台，总装机容量超过 4 亿千瓦，分布在 30 个国家（见表 1）。2018 年，全球有 9 台机组新并网发电，包括中国 5 台（海阳核电厂 1、2 号，三门核电厂 1、2 号，台山核电厂 1 号，田湾核电厂 4 号，阳江核电厂 5 号）和俄罗斯 2 台（ROSTOV 核电站 4 号，LENINGRAD 核电站二期 1 号）。其中，中国三门核电厂 1 号机组于 2018 年 9 月 21 日顺利完成 168 小时满功率连续运行考核，成为全球首个具备商业运行条件的 AP1000 机组。中国台山核电厂 1 号机组于 12 月 13 日投入商业运营，成为全球首个投运的 EPR 反应堆。

截至 2018 年底，全球核电机组共有 17856（堆·年）的运行经验，在运反应堆中，压水堆、沸水堆和重水堆是三种主要的堆型，数量分别占总数的 65.86%、16.52% 和 10.79%。世界在运反应堆分布情况见图 1。

表 1 世界各国和地区在运核电机组情况

国家	反应堆数量	净装机容量（MWe）	2017 年核发电量（TWh）
亚美尼亚	1	375	2.4
伊朗	1	915	6.4
荷兰	1	482	3.3
斯洛文尼亚	1	688	6.0
巴西	2	1884	15.7
保加利亚	2	1926	15.5
墨西哥	2	1552	10.6
罗马尼亚	2	1300	10.6
南非	2	1860	15.1
阿根廷	3	1633	6.2



续表

国家	反应堆数量	净装机容量（MWe）	2017 年核发电量（TWh）
芬兰	4	2769	21.6
匈牙利	4	1889	15.2
斯洛伐克	4	1814	14.0
巴基斯坦	5	1318	7.9
瑞士	5	3333	19.5
捷克	6	3930	26.8
比利时	7	5918	40.0
西班牙	7	7121	55.6
德国	7	9515	72.2
瑞典	8	8612	63.1
乌克兰	15	13107	85.6
英国	15	8918	63.9
加拿大	19	13554	96.1
印度	22	6255	34.9
韩国	24	22494	141.1
俄罗斯	37	28264	187.5
中国	46	42800	247.5
日本	42	39752	29.1
法国	58	63130	379.1
美国	98	99333	805.0
总计	454	400285	2497.5

注：反应堆数量和净装机容量，统计截至 2018 年年底，核发电量为 2017 年数据。中国数据指我国大陆情况，由于衡量标准不同，与国内统计数字略有差别；全球总量数据中包括我国台湾的数据（4 台机组，装机容量总计 3844MWe）。

资料来源：IAEA（国际原子能机构）。

全球已具有核发电能力的国家中，美国、法国、中国、日本、俄罗斯和韩国在运反应堆规模居世界前 6 位，反应堆数量占全球总量的 67.2%，装机容量占全球总量的 73.9%。2017 年，全球电力结构中核电发电量占比为 10.3%。世界各国电力结构中，核电占比超过 10% 的有 20 个国家，超过 25% 的有 13 个国家，超过 50% 的有 4 个国家。各国电力结构中核电占比情况如图 2 所示。

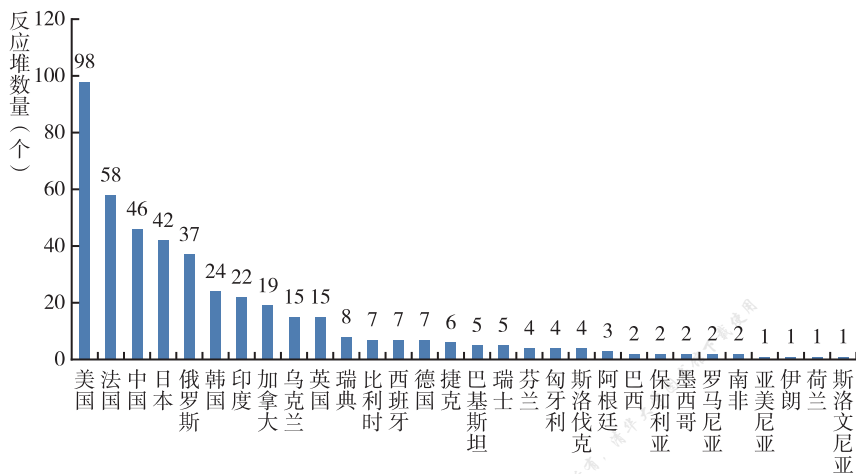


图1 世界在运反应堆分布情况

注：数据来自 IAEA，统计截至 2018 年年底，其中中国数据指我国大陆情况，由于衡量标准不同，与国内统计数字略有差别。

资料来源：IAEA。

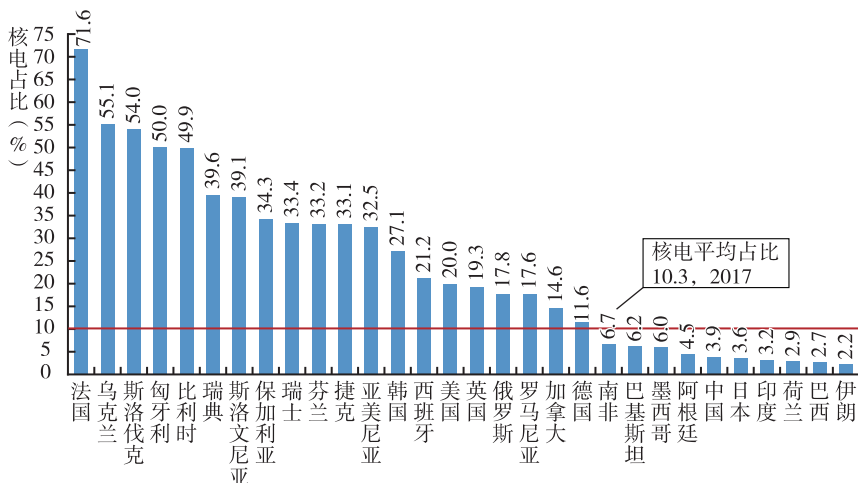


图2 各国电力结构中核电占比情况

注：数据来自 IAEA，统计数据为 2017 年情况，福岛核事故后，日本核电站停运数量较多，所以核电占比比较低。



自 2012 年以来，全球核电装机容量和发电量逐年增加，但是，在全球电力结构中，核电占比呈下降趋势。全球核电占比在 1996 年达到 17.5% 的最大值，之后一直下降到 2017 年的 10.3%。

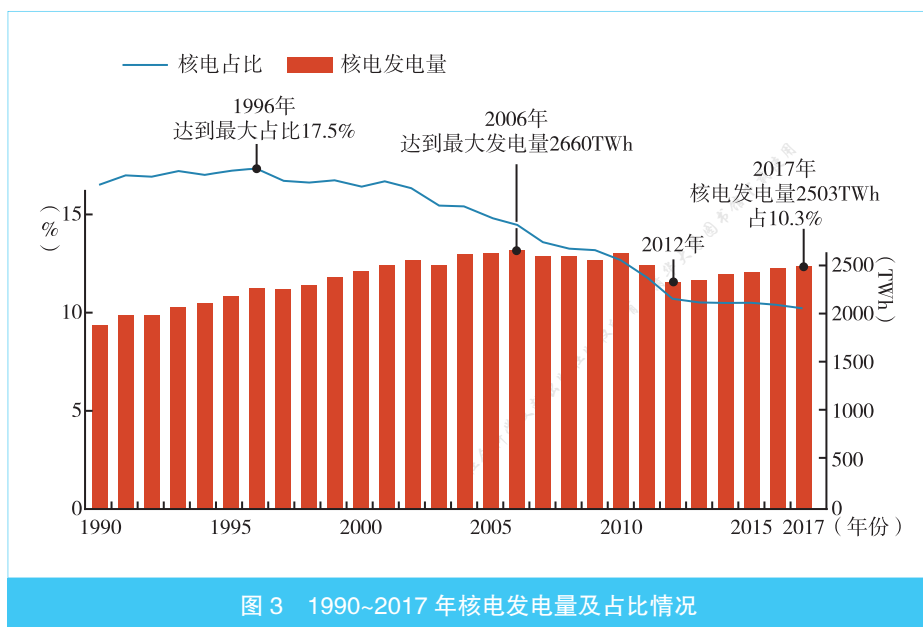


图 3 1990~2017 年核电发电量及占比情况

机组老化是在运机组面临的重要问题，尤其是在发达国家，许多机组即将面临延寿或退役的选择。目前，全球在运的核电机组多数是二代技术，通常设计寿命为 40 年，运行年龄超过 30 年、35 年、40 年和 45 年的机组分别有 298 台、175 台、95 台和 34 台，分别占在运机组的 65.64%、38.55%、20.93% 和 7.49% (如表 2 所示)。为了降低费用、保障电力安全，美国、法国、俄罗斯、加拿大等多个国家正在制定机组延寿计划，将二代机组延寿至 50 年，甚至 60 年乃至更长。

(二) 核电工程建设

截至 2018 年底，世界在建核电机组 54 台，总装机容量 5501.3 万千瓦，



表 2 机组的年龄、数量及占比情况

机组年龄	数量	占比
≥ 30 年	298	65.64%
≥ 35 年	175	38.55%
≥ 40 年	95	20.93%
≥ 45 年	34	7.49%

分布在 17 个国家或地区（见表 3）。世界各国在建核电净装机容量（Mwe）情况如图 4 所示。在建反应堆大部分为压水堆，数量占到 81.5%。世界各堆型在建装机容量（Mwe）如图 5 所示，各堆型数量占比情况见图 6。

近年来全球核电开工机组增长幅度不大，但是核电发展区域不断增加，机组延寿延缓了装机容量的快速下降。2018 年，全球有 4 台机组新开工建设，分别是土耳其的 AKKUYU 核电站 1 号、英国的欣克利角 C 电站、俄罗斯的 KURSK 核电站二期 1 号、孟加拉国的 ROOPPUR 核电站 2 号，1 台机组重启建设（韩国的新古里 6 号机组）。

在建机组中，芬兰的 Olkiluoto 3 号是全球第一台开工建设的 EPR 机组，目前已经完成了热试，并准备装载燃料。法国电力公司 EDF 从 2007 年动工兴建弗拉芒维尔（Flamanville）3 号机组，该机组采用 EPR 三代核电技术，预计投资 30 亿欧元，原计划 2013 年投运。然而在建设过程中遇到各种技术问题，其安全性受到法国原子能安全委员会（ASN）的审查。目前 EDF 透露将于 2019 年 2 月启动热态功能调试，并计划在 2019 年底装料。英国萨默塞特郡欣克利角 C 项目的两个 EPR 机组也在建设中。

采用 AP1000 技术建造的美国 Vogtle 项目 3 号机组目前第一台主泵已经安装就位，4 号机组正在安装蒸汽发生器和稳压器，两台机组计划 2021 年 9 月、2022 年 11 月建成投运。



表 3 世界各国和地区在建核电机组情况

国家	机组数量	净装机容量（MWe）
中国	11	10982
韩国	5	6700
阿联酋	4	5380
印度	7	4824
俄罗斯	6	4573
日本	2	2653
美国	2	2234
白俄罗斯	2	2220
孟加拉国	2	2160
乌克兰	2	2070
巴基斯坦	2	2028
法国	1	1630
芬兰	1	1600
巴西	1	1340
土耳其	1	1114
斯洛伐克	2	880
阿根廷	1	25
总计	54	55013

注：数据来自 IAEA，统计截至 2018 年年底，其中中国数据指我国大陆情况，由于衡量标准不同，与国内统计数字略有差别；全球总量数据中包括我国台湾在建 2 台，总装机容量 2600MWe。

目前，全球 17 个国家或地区正在建设核电站，其中白俄罗斯、阿联酋、孟加拉国、土耳其属于新的核电成员。中东、中亚等地区已经成为新的核电建设主要区域。未来全球核电建设的重点在发展中国家，尤其是中国和印度，以及一些新兴经济体国家，如非洲、南美、中东、中亚等地区的一些国家；发达国家趋于维持现有核电水平，替代老旧核电机组，或增加新的核电机组（英国）。

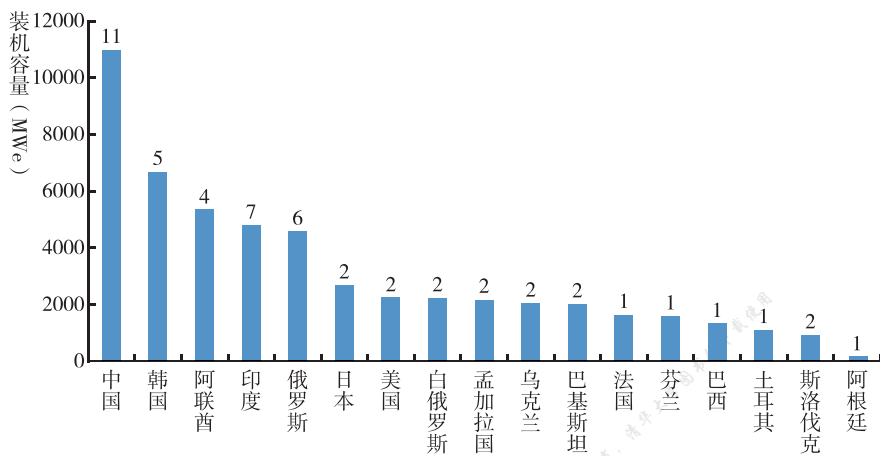


图 4 世界各国在建核电净装机容量与数量情况

注：数据来自 IAEA，统计截至 2018 年年底。

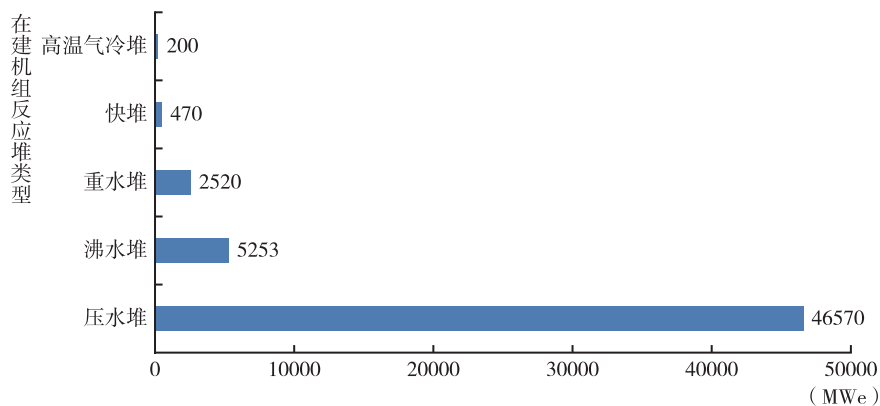


图 5 世界各堆型在建装机容量 (MWe) 情况

注：数据来自 IAEA，统计截至 2018 年年底。

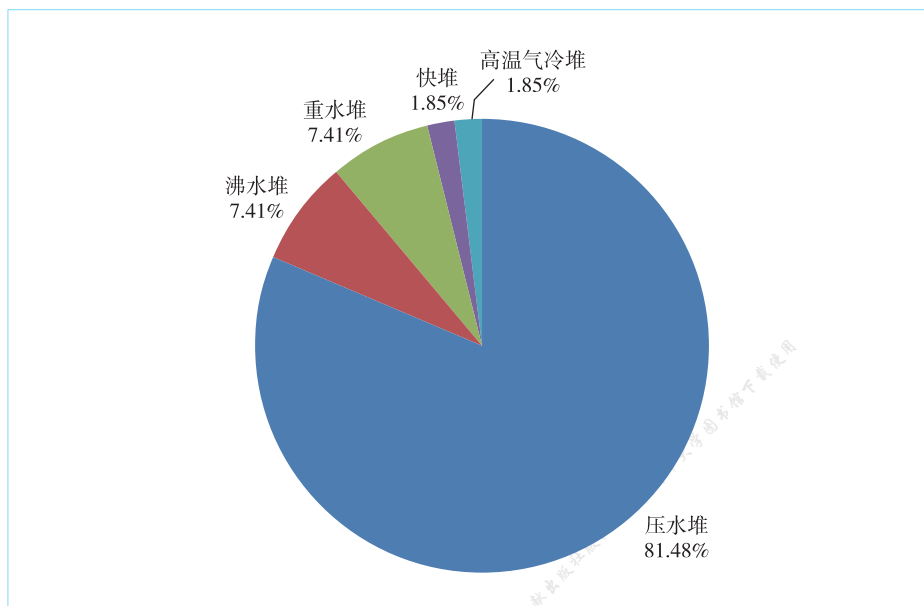


图 6 世界在建机组各堆型数量占比情况

注：数据来自 IAEA，统计截至 2018 年年底。

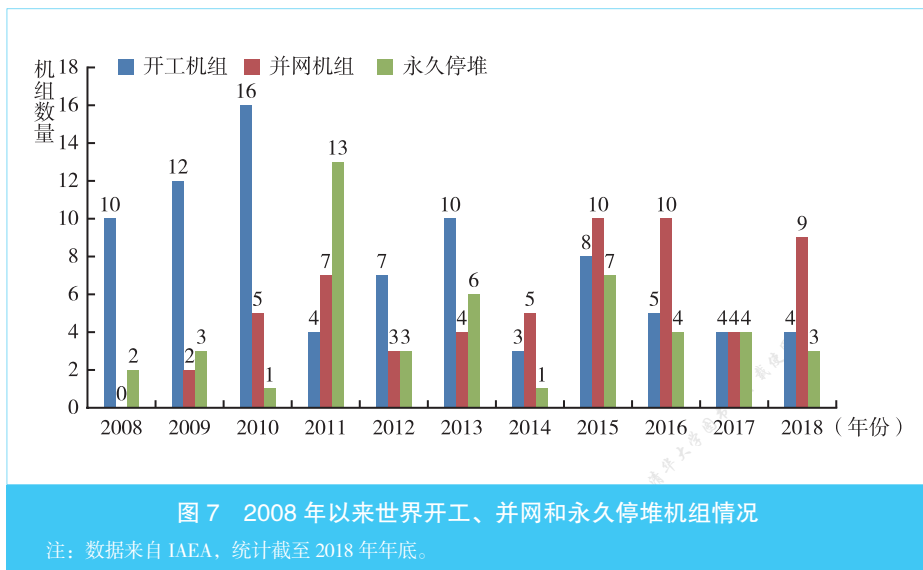
（三）各国发展政策

统计显示自 2011 年福岛核事故后，全球新开工机组为 45 台，新并网机组 52 台，永久停堆 42 台。2008~2018 年，每年新开工、并网和永久停堆机组数量如图 7 所示。2018 年世界主要核电国家发展政策概述如下。

1. 美国

美国的核电机组数、核电装机量和发电量均居世界第一。截至 2018 年年底，美国现有 98 台核电机组运行，2 台机组在建（沃格特勒 3、4 号），35 台永久关停等待退役。2018 年核发电量 807078GWh，国内核发电占比为 19.3%（约占 60% 的低碳电力输出）。

美国新总统特朗普当选后，实施以复兴化石能源与核能为核心的国内能源产业政策。特朗普 2017 年 6 月发表演讲，提出“要开始重振和扩大核能行业”，在确保技术和经济优势下继续发展核能并向海外推销，为实现“美国的



能源统治地位”铺路并将对目前的政策进行“全面审查”，以确定复苏该行业的方式。2017 年 12 月，白宫发布《国家安全战略报告》，确立了核能成为可靠并可获取的能源。报告指出：“美国将寻求确保普遍获得经济、可靠的能源，包括高效能的化石燃料、核能和可再生能源，以帮助减少贫困、促进经济增长和繁荣。美国将提高在能源领域的技术优势，包括核技术、新一代核反应堆、性能更好的电池、先进计算技术、碳捕集技术等。”

为了支持 Vogtle 核电站 AP1000 项目继续建设，2018 年 2 月特朗普总统签署法案，准许 2020 年 12 月 31 日之后投运的最多 6000MWe 核电装机容量在投运第一个 8 年内享受 1.8 美分 / 千瓦时的税收抵免。

美国核管会一直在对在运机组进行延寿与二次延寿。迄今核管会已为总计 93 台核电机组换发许可证，使这些机组能够将运行寿期延长至 60 年（其中 4 台机组已提前关闭）。核管会目前还在对 1 台机组的换发许可证申请进行评审。另外核管会正对 6 台核电机组的二次延寿申请进行评审，如果二次延寿获准，这些机组将能运行 80 年。

美国重视革新型核能技术开发与推广，以期抢占未来科技制高点。2017



年1月能源部发布的《先进堆开发与部署愿景和战略》，提出了“2050年发展愿景”和“2030年中期目标”，以及加快先进堆开发和部署的六大具体战略部署。其中指出，到21世纪30年代初，至少有两种非水冷却先进堆概念设计要达到技术成熟，具有经过验证的安全性并具有经济效益，通过美国核管会的许可评估，被允许进行建设。到2050年前后，凭借在改进安全性、成本、性能、可持续性，以及减少核扩散风险等方面的优势，先进堆将成为国内和全球核能结构中重要且不断增长的组成部分。美国能源部（DOE）以成本共担方式支持 Nuscale 等公司开发小型模块堆，计划2026年实现商业化，以适应未来分布式发电市场的需求。能源部支持泰拉能源公司开展熔盐堆开发，计划2030年开发出1100MW原型堆。

美国国内市场层面，项目业主受制于当前内外部因素（燃气发电价格、新能源成本下降、自身成本），对核电新项目建设态度不一，总体上市场比较低迷。有的业主表示将继续推进在建项目（Vogtle 核电项目），有些考虑新建成本高，监管越来越严，表示目前不会新建（Exelon 公司）；有些机组在开展延寿或申请二次延寿（佛电公司），有些老旧机组由于维护成本较高被提前关停；部分在建项目中止，一些新建项目与计划被放弃或暂缓（Summer 核电项目等）。

2. 法国

截至2018年年底，法国58台核电机组在运，1台在建，12台永久关停等待退役。2018年核发电量3930亿千瓦时，核发电比例为71.6%（见图8）。其他发电品种中，水电占12.4%、火电占7.1%、风电占5.1%、太阳能占1.8%、生物质能占1.8%等（各品种发电数据统计来自法国国家电网 RTE，见图9）。法国是世界最大的电力净出口国，每年电力出口收益超过30亿欧元。

2015年8月17日法国政府通过的《绿色增长能源转型法案》提出，要实现能源结构多样化，进一步限制化石燃料使用，使发电多元化，增加可再生能源的份额。法案制定的能源和气候目标包括：温室气体（GHG）的排放量到2030年减少40%，到2050年下降到1/4（与1990年相比）。

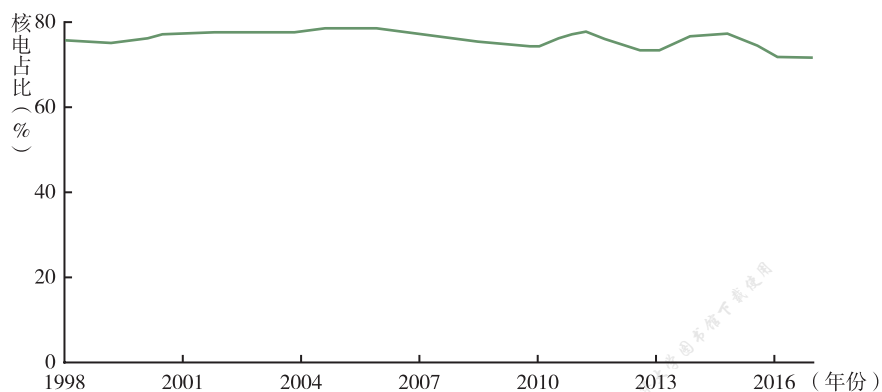


图8 法国核电比重变化情况

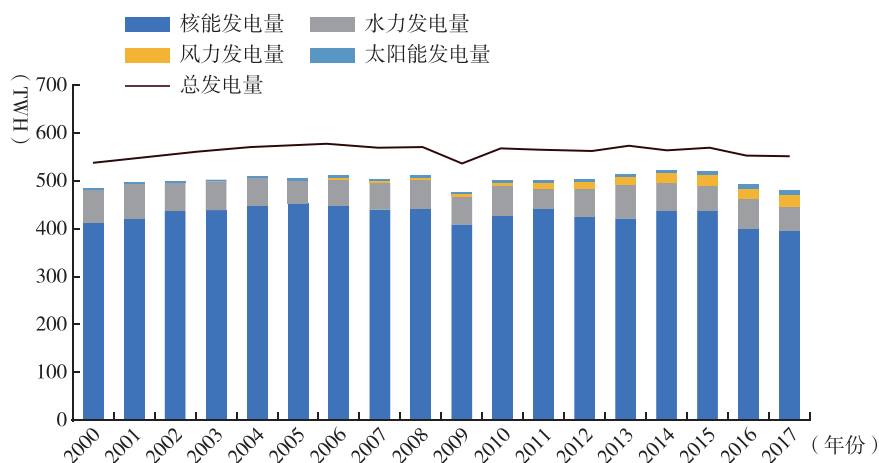


图9 法国2000~2017年各能源品种的发电量(按太瓦时计算)

最终能耗到 2030 年下降 20%，到 2050 年下降 50%（与 2012 年相比）。到 2030 年可再生能源占最终总能耗的 32%，占总发电量的 40%。到 2025 年，核能在电力结构中的份额降至 50%，限定核电装机容量在当前 63.2GW 的水平（要新建反应堆，就需要关闭旧堆）。《绿色增长能源转型法》强化了国家核安全管理局的职责，提高了存储核废料的标准和核安全信息对公众的透明度。

鉴于可再生能源目前比例非常小，核能是法国未来几年内避免任何重大能源短缺的唯一选择，核电仍是法国作为能源独立国家和欧洲最大净电力出口国的最有效保障。法国 2017 年 11 月宣布延迟减核时程；12 月，法国总统表示“核能与可再生能源，是最无碳的发电方式”。2018 年 9 月，法国总理表示 2035 年可能是核电 50% 目标的达成日期，仓促减核会造成碳排放增长、电力供应安全问题以及带来失业风险。

法国总统马克龙 2018 年 11 月表示，到 2035 年，法国目前运行的 58 座核反应堆中将有 14 座被关闭，其中 4~6 座将在 2030 年前关闭。同时强调，减小核电比重，并非放弃核电。任何现有核电站都不会完全关闭，关闭时间取决于法国能源结构的过渡状况，包括增加可再生能源和扩大同邻国电网互联能力的实施状况等。法国无法确定 2035 年后替代现有反应堆的最具竞争力的发电形式，希望保留未来对可能的新反应堆的选择权。

法国在建的 Flamanville 核电站的 EPR 反应堆热态功能调试从 2019 年 2 月开始，2019 年底装料。

3. 日本

截至 2018 年 12 月底，日本 42 台核电机组在运（其中只有 9 台处于运行状态），2 台在建，18 台永久关停等待退役。2018 年核发电量 49199GWh，年度核发电比例为 6.2%。

日本通过制定国家能源战略规划来确立本国一定时期的能源政策方向并推进相关工作。2018 年 7 月 3 日，日本政府公布了最新制定的《第 5 个能源战略规划》（*The 5th Strategic Energy Plan*），这是一份面向 2030 年以及 2050 年的日本能源中长期发展规划的政策指南和行动纲领，以构建多维、多



元、柔性的能源供需体系为目标，强调从“低碳化”迈向“脱碳化”对于实现能源转型的重要性，积极争夺能源技术的主导权。规划强调核电作为“重要的基荷电源”是实现脱碳化目标的重要选择，将继续推进核电重启，持续改进安全性，以到 2030 年实现零排放电力占 44% 的目标（其中核电占 20%~22%）。规划将地热、常规水电、核能、煤电定位为“基荷电源”（base-load power source），可以全天候低成本稳定运行。

2030 年前日本将推进核能相关技术开发：（1）改进现有轻水堆的安全性、可靠性和效率，以及严重事故应对措施；（2）与其他国家联合开展高温气冷堆的技术研发，改进并提升安全性；（3）推进开发能从根本上提升安全性、可靠性和效率的新核电技术。同时，保持战略灵活性，针对欧美国家和地区开展的小型模块堆及熔盐堆等新技术开发，国家提出长远发展愿景，私营部门发挥创造性参与国际竞争。

日本到 2050 年的发展愿景是：核能是实现脱碳化的现实选择，要推进利用更高安全性、经济性和机动性的核反应堆，开发燃料循环后端技术，解决反应堆退役和废物处理处置问题，恢复社会信任。

日本企业海外出口不顺。2018 年 11 月，东芝宣布放弃英国 NuGen 项目；12 月，三菱重工决定放弃土耳其锡诺普核电站项目；日立集团已决策退出英国地平线核电项目。

日本政府鉴于福岛事故后国内强烈反核舆论的压力，一方面，提出减少对核电的依存度，另一方面，考虑能源独立与供应安全、保持电源与电价稳定性、实现脱碳目标等多种因素，政府坚持继续发展核电，强调将核电作为“重要的基荷电源”，继续推进安全前提下的核电重启，以到 2030 年实现零排放电力占 44% 的目标。同时为实现由低碳化向脱碳化转型，核电是 2050 年能源转型的比较现实的选择。目前日本在运核电机组只有 9 台，要实现 2030 年的占比目标，新建或替换老机组不可避免，同时日本今后将开发部署具有安全性、经济性和运行效率的堆型技术，包括小型模块化堆（SMR）、高温堆在内的先进堆型。同时将继续推进核燃料循环技术路线的方针，确保对放射性废物的有效管理，消除公众质疑。



4. 俄罗斯

俄罗斯目前共有 37 座正在运营的反应堆，总装机容量 2826 万千瓦，在建机组 6 台，装机 457.3 万千瓦。2017 年核发电量 187499GWh，核发电比例为 17.79%。2000 年普京执政后，俄罗斯实施能源强国战略，充分利用能源资源大国优势，将其转化为经济发展的动力和国际影响力。2003 年，俄罗斯就出台了《2020 年能源战略》，形成了涵盖能源发展目标、科技创新、投资以及对外合作等的完整体系。2008 年则进一步强化多元出口战略。2009 年出台《2030 年能源战略草案》，强调提高能源效率，加大对核能、太阳能以及风能的开发利用力度。2014 年出台《俄罗斯 2035 年前能源战略》，强调从监管体系、基础设施建设、投资创新等综合环节入手，加强能源改革，推进国内能源市场化竞争，深化能源公司管理。《俄罗斯 2035 年前能源战略》提出对能源生产结构做出调整，降低石油产量，提高天然气、煤炭、电能产量，优化热能供应。将核发电比重从 16% 增到 22%~23%。根据 Rosatom 2015 年公布的数据，俄罗斯计划在 2035 年前建造不少于 25 台总计 2683 万千瓦的新机组。但由于近几年其国内经济和用电增长不如预期，俄罗斯核能发展计划将有所延迟或缩小规模。

俄罗斯积极研发核电技术。研发的 VVER、BN 核电技术品牌已形成多种系列型号，采用最新 VVER-TOI 技术的核电站已经开工建设，BN-800 钠冷快堆已经投运，还规划建设 BN-1200 机组，还在不断研发改进更高性能的包括铅冷快堆、高温气冷堆、聚变堆和混合堆等在内的核电技术。

俄罗斯核电出口全球领先，大力发展核电出口也是其核电政策的主要目标之一。2018 年 10 月 5 日俄罗斯和印度两国就在印度新建 6 座俄罗斯设计的核电站机组的项目签署了协议。俄印双方有意在印度新址建设 6 座由俄方设计的核电站机组，扩大在第三国的合作，并增进俄印在原子能领域除核电站建设外的协作。根据 Rosatom 公司初步统计，公司 2018 年的 10 年期海外订单额约为 1300 亿美元，如果将国内订单包括在内，则 2018 年总订单额约为 2000 亿美元。Rosatom 公司正在 50 多个国家开展项目合作。2017 年 Rosatom 公司净收益为 9674 亿卢布（142 亿美元），同比增加 10.2%。其中民用部门



2017 年净收益为 8620 亿卢布。净收益增加主要是因为俄国内市场电力销售额增加、核燃料循环前段业务的销售额增加以及海外核电建设项目收入上升。

俄罗斯还积极进行核电技术应用创新，包括浮动核电站、核动力破冰船、空间堆等。俄罗斯正在研制全球首座浮动核电站，旨在为偏远的国家和地区供电。该国首座浮动核电站“罗蒙诺索夫院士”号已经完成反应堆装料和临界，计划试运行。俄罗斯拥有世界上独一无二的核动力破冰船队。

5. 韩国

韩国共有 24 台正在运营的反应堆，总装机容量为 2249 万千瓦；正在建设 5 台，容量为 670 万千瓦；1 台永久关停等待退役。2017 年核发电量为 141098.00 GWh，发电比例为 27.1%。韩国总统文在寅上任后，计划降低韩国对煤炭和核电的依赖，强调有必要向可再生能源转型。目标是到 2030 年，将可再生能源占比从目前的 1.1% 增至 20%。2017 年 6 月，文在寅在出席永久关闭古里核电站 1 号机组仪式时宣布，韩国将废除以核电站为主的发电政策，走向“零核电”时代。为此，韩国全面终止了所有新建核电计划，不再延长核电站的设计寿命。正在建设的新古里核电站 5、6 号机组已投入 1.6 万亿韩元，工程率达 29.5%。于是，政府做出暂时停工的决定，通过舆论调查决定是否持续进行工程建设。2017 年 10 月 20 日，韩国新古里核电站 5、6 号机组公论化委员会发表舆论调查结果，决定将重启建设。新古里核电站 6 号机组于 2018 年 9 月重新恢复建设。

近年来，韩国积极推进海外核电市场开发，2009 年，韩国与阿联酋签订价值 200 亿美元的核电站建设合同，建造 4 座核电反应堆。此后，韩国陆续开拓了土耳其、约旦、罗马尼亚、乌克兰、埃及、沙特阿拉伯等国市场。除计划出口反应堆外，韩国还计划进入国际核电运营、维护和检修市场。

6. 英国

英国目前共有 15 座在运机组，装机容量为 891.8 万千瓦，1 台在建机组（欣克利角 C），30 台永久关停。2017 年核能发电量 63887.00 GWh，核发电占比 19.27%。



英国将可再生和核能领域视为能源改革的方向。为实现到 2050 年温室气体排放量在 1990 年的基础上减少 80% 这一目标，2015 年 11 月，英国表示到 2023 年英国将严格限制境内所有燃煤电厂运行，2025 年关停全部燃煤电厂，建立新的燃气发电厂，依赖核能和海上风力发电以扭转过度依赖煤炭的局面。2008 年政府发布《面临能源挑战》白皮书，确认了英国走低碳经济体的发展路线，并确立了以核能作为低碳能源结构重要组成部分的战略。英国政府表示，在保证经济性和安全性的前提下，将采用政策手段来支持新核电站的建设。随后出台和落实各项规（计）划，简化核电站审批流程、加速规划实施、对现有技术进行评估等，确保了新建核电站项目的顺利启动。由此，英国一度停摆的核电项目得到了重新启动。

政府认为到 2025 年需要 60 Gwe 的净新增发电装机容量，其中 35 Gwe 来自可再生能源。《国家核电政策声明草案》指出，尽管政府尚未确定核容量的固定目标，但预计剩余 25Gwe 中“很大一部分”将来自核能。根据政府官员表态，到 2025 年，英国将在五个厂址新建成总装机 16Gwe 的核电机组，但目标日期可能最终推迟到 2030 年。

2017 年 12 月，英国商务、能源与产业战略部（BEIS）公布《政府支持下一代核技术发展》报告，表示将大力挖掘本国核工业潜力，支持未来核电技术开发，抓住技术带来的机遇并发挥其优势，让英国成为下一代核技术的领军国。

2018 年 6 月，英国政府在其官网上发布了一份“工业战略之核领域协议”。作为现代工业战略的一部分，核领域协议将以政府与工业界之间的历史性合作伙伴关系为基础，推动清洁电力增长，并确保民用核能仍然是未来英国能源的重要组成部分。该协议提出了英国工业战略以及核领域协议在创新、人才、基础设施、商业环境和地区发展方面的举措。11 月，政府批复中国广核集团的华龙一号在英国的通用设计审查（GDA）正式进入第三阶段。

政府支持先小堆开发，计划 2018~2020 年共出资 5600 万英镑，用于评估先进小型反应堆模块的性能并加快研发进度，帮助解决英国在将来可能会出



现的能源紧缺问题。这一项目分两阶段实施。第一阶段包括使用最多 400 万英镑开展可行性研究，以及使用最多 700 万英镑进一步推进核监管机构加强评估先进核技术所需的能力建设。第二阶段将为先进模块堆研发项目提供最多 4000 万英镑的资助，并为监管机构进一步提供 500 万英镑资助。政府还组建融资专家组，为英国小堆建设项目筹集私营投资提供建议。

此外，政府分阶段启动了核创新计划，为先进核材料和制造研发、反应堆设计和工程工作、先进燃料方面的现代化安全和安保方法论的研究等提供资助。产业战略部宣布将为聚变研究提供资助，用于在卡勒姆（Culham）聚变能研究中心建立一个国家级聚变技术平台。该平台将把供应链企业汇集在一起，支持英国企业获得核聚变领域的重大科学和工程合同。

7. 其他国家

印度政府向议会通报，已对再建 12 台核电机组做出行政和财政批准。在这 12 台机组中，10 台将是印度自主品牌的 700 MWe 加压重水堆，包括中央邦 Chutka 的 2 台、卡纳塔卡邦盖加的 2 台、哈里亚纳邦戈勒克布尔的 2 台以及拉贾斯坦邦 Mahi Banswara 的 4 台。这 10 台机组将在 2031 年前全部建成。另外 2 台将是拟建于泰米尔纳德邦库坦库拉姆的俄罗斯 VVER-1000 轻水堆，即库坦库拉姆 5 号和 6 号机组。

巴基斯坦原子能委员会（PAEC）卡拉奇核电 2、3 号机组，设备已采购结束，项目正在进行主体施工工作。巴基斯坦原子能委员会与中核集团签署了恰希玛核电 5 号机组（简称 C-5 项目）商务合同。按照约定，中核集团将以华龙一号技术在巴基斯坦恰希玛建造 1 台百万千瓦级核电机组。

阿联酋由韩国承建的 4 台机组进展顺利，首堆于 2012 年开工建设，目前已基本完工，正在等待监管当局的许可，预计 2019 年装料、调试，2020 年运行。4 台机组（单机容量 135 万千瓦）建成投运后，将占全国电力供应的 25%；未来计划还要建 4~8 台百万千瓦的核电机组。

沙特近年来正在寻求能源多元化发展以减少对石油的依赖，计划到 2032 年实现 17.6GW 的核电装机。2017 年政府正式启动其首批两座核电站的核反应堆建设招标计划。目前共收到来自美国、俄罗斯、法国、韩国和中国的公

司提供的报价。沙特政府希望从2019年开始启动首个核电站建设的相关工作，总设计装机容量为2.8GW，2027年实现商运。

印尼2014年通过的政府法令中，规划到2025年将包括核电在内的新能源和可再生能源占比提高到23%，届时核电装机为2GW；2050年占比将达到31%，核电装机为8GW。值得一提的是，近年来，印尼公众对核电的支持率上升，由2011年（福岛核事故后）的49%上升到2017年的77%。印尼国家原子能机构2018年3月宣布已启动印尼实验动力堆详细工程设计路线图。这一小型模块堆已在2018年年底之前完成最终设计。

阿根廷核监管机构已批准为拉丁美洲首台核电机组——阿图查1号机组（362 MWe的加压重水堆）——换发运行许可证。该机组现代化改造项目筹备工作已经开始，改造完成后，将进入长期运行阶段。

肯尼亚正在开展核反应堆的立项可行性研究，并希望韩国提供技术援助，协助制定引进核反应堆具体计划。2018年其与韩国原子能研究院（KAERI）在肯尼亚举办了一次核能研讨会，以推动肯尼亚引进核反应堆，建立该国首座核电站。

亚美尼亚能源部表示，梅察莫尔2号核电机组延寿申请已获欧盟批准，将延寿至2026年。亚美尼亚政府已计划建设一台核电机组，以替代已经老化的2号机组。但由于融资困难，新建项目迟迟未能启动。因此，政府决定将2号机组延寿至2026年。这一计划获得俄罗斯的支持，俄将提供2.7亿美元贷款和3000万美元的资助。

乌兹别克斯坦已经制定了《2019–2029年国家原子能发展规划》，目前在俄罗斯国家原子能公司支持下，正在开展本国首座核电站的建设，按照计划将于2030年前建成发电。根据政府预测，该核电站可使乌兹别克斯坦每年节省37亿立方米的天然气。

约旦一次能源短缺，约96%的能源依赖进口。因此，其“2007~2020国家能源战略”以及升级版“2015~2025能源战略”中，核能都被列入国家能源战略的重要选项，包括发展百万千瓦的大型商用堆和中小反应堆（MSR）。目前，约旦原子能委员会与美国X-energy公司签署了一份谅解备忘录，将研究



X-energy 公司的氦 -100 高温气冷球床模块化反应堆在约旦的潜在部署。

白俄罗斯首台机组于 2013 年开工建设, 计划 2019 年 6 月开始调试工作, 属于内陆核电站。2021 年两台机组并网后, 可占全国电力供应的 38%。中、日、韩、俄参与了竞标, 最后俄罗斯原子能公司中标。

孟加拉国全国电力装机 1768 万千瓦, 主要为天然气发电, 占比为 53%; 缺少本土能源资源, 核电已被作为国家基荷能源来发展, 总理亲自参与领导, 2017 年、2018 年已先后开工两台俄罗斯原子能公司承建的 AES-2006 ($2 \times 1200\text{MW}$), 计划分别于 2023 年、2024 年开始调试工作; 未来 20 年拟陆续再建 4 台百万千瓦的核电机组。

土耳其全国能源 72% 依赖进口, 近年来能源需求上升快, 需要发展核电; 计划 2030 年布局 3 个核电基地共 12 台机组, 核电占比达到 15%。与俄罗斯合作的 Akkuyu 核电站计划建设两台 VVER V-509 机组, 首台机组已于 2018 年 4 月开工; 与日本合作的第二个核电站 Sinop 的相关工作正在推进中; 第三个核电站正在选址过程中。

在埃及, 进入 21 世纪后, 随着能源需求的增加, 核电再次被列入议事日程: 2007 年通过原子能法, 2017 年升版, 明确了发展核电的国家政策; 2016 年与俄罗斯原子能公司签订了工程总承包合同 (EPC), 并于次年生效, 计划在 El Dabaa 电站建设 4 台 VVER-1200 机组。俄罗斯将负责为该电厂提供核燃料, 建造乏核燃料容器和储存设施, 进行人才培养, 提供前 10 年核电厂运营和维护支持, 以及支持其核电本土化工作等。

“波兰核电规划 (PNPP)” 2013 年获经济部批准, 2014 年经内阁会议审查通过, 2018 年升版后的规划被纳入波兰国家能源规划。该国计划 2030 年核电占比为 6%, 2040 年达到 18%, 目前正考虑将波兰北部的两个地点 Lubiatowo-Kopalino 和 Zarnowiec 作为第一批反应堆的厂址, 希望其第一座核电站于 2030 年后开始运营。波兰能源部已经制定了核能计划修正案, 将于 2019 年年底之前提交内阁。澳大利亚 Worley Parsons 公司正在为波兰首座核电站提供选址评价和取证许可服务。

越南原计划 2020 年建成首堆, 日本福岛核事故后, 公众更加关注核安



全,加之国际国内经济形势的影响,越南推迟了其核电计划。2016年经过修订的国家电力发展计划得到总理批准,计划到2030年建成4台百万千瓦机组,届时核电占比将达到10.1%。一期项目为俄罗斯原子能公司承建的Ninh Thuan1号两台机组,首堆计划2028年建成;二期项目计划为日本公司承建的Ninh Thuan2号两台机组。

尼日利亚2015年初步计划首台百万千瓦机组于2025年建成,另外还计划在2030年建成3台机组。2018年以来正在对2015年的计划进行修订和完善。

苏丹2016年通过水利电力部部长法令,计划在2031年建设2台600 MW机组的首座核电站。

马来西亚2008年计划引入核电,2011年1月成立马来西亚核电公司,作为推进其核电计划的责任单位。福岛事故后,核电计划推进无实质性进展,主要原因是公众接受问题和政府对核电的态度不明朗。

(四) 核能科技研发

1. 三代核电已经成为全球核电产业发展的技术主流。从20世纪90年代起,美国、俄罗斯、中国、欧洲、韩国、日本等主要核电国家或地区发展了三代核电技术,如AP1000、VVER-1200、VVER-Toi、HPR1000(华龙一号)、CAP1400、EPR、APR1400、ABWR、ESBWR等。目前已实现部署的三代核电技术型号有7种,已经建成的三代核电机组有12台(见表4),在建34台(见表5),约占全球在建机组数的2/3。采用AP1000技术建造的Vogtle项目3、4号机组2013年开工,目前3号机组第一台主泵安装就位,4号机组正在安装蒸汽发生器和稳压器,两台机组计划分别于2021年9月、2022年11月建成投运。法国2007年开工建设的Flamanville核电站一拖再拖,原定2018年年底开展的热试试验推迟到2019年2月进行,2019年底完成装料。

同时,核电经济性和高融资是当前制约三代技术商业化推广的主要原因,由于三代机组较二代机组考虑了更多安全性改进,许多采用三代技术的示范首堆建设一拖再拖,建造成本明显增加(如法国EPR的单位造价高达6000美元/千瓦以上),甚至中止建造计划(美国Summer项目两台机组)。提高



第三代核电的经济竞争力将是未来核电界广为研究的重点，全球核工业界在吸取首堆建设经验教训后认为，后续机组经济性能仍需进一步改善。其中延长设计寿命是一个重要手段，目前相关机构正在研究将第三代核电技术的寿命由 60 年提高至 80 年，美国甚至正在研究将第三代核电技术的寿命提高至 100 年。另外更大功率的三代机型如 VVER-1500 也在概念研究中。

表 4 三代核电技术在运情况

状态	型号	设计商	核电站或机组名称
在运 12 台	VVER-1200（2 台）	俄原公司	新沃罗涅日 2-1 号，列宁格勒 2-1 号
	APR1400（1 台）	韩国水利核电公司	新古里 3 号
	AP1000（4 台）	西屋公司	三门 1 号、2 号，海阳 1 号、2 号
	EPR（1 台）	阿海珐	台山 1 号
	ABWR（4 台）	通用-日立，东芝	柏崎刈羽 6 号、7 号，志贺 2 号，滨冈 5 号

注：海阳 2# 机组为 2019 年 1 月具备商运条件。

表 5 三代核电技术在建情况

状态	型号	设计商	核电站或机组名称
在建 34 台	VVER-1200（8 台）	俄原公司	列宁格勒 2-2 号，新沃罗涅日 2-2 号，波罗的海 1 号，白罗斯 1 号、2 号，卢普尔 1 号、2 号，阿库尤 1 号
	VVER-Toi（1 台）	俄原公司	库尔斯克 2-1 号
	APR1400（9 台）	韩国水利核电公司	新古里 4 号、5 号、6 号，新蔚珍 1 号、2 号，巴拉卡 1 号、2 号、3 号、4 号
	ABWR（4 台）	通用-日立，东芝	岛根 3 号，大间町 1 号，龙门 1 号、2 号。
	AP1000（2 台）	西屋	沃格特勒 3 号、4 号
	EPR（4 台）	阿海珐	台山 2 号，奥尔基洛托 3 号，弗拉芒维尔 3 号、欣克利角 C 1 号
	华龙一号（6 台）	中核及中广核	福清 5 号、6 号，防城港 3 号、4 号，卡拉奇 2 号、3 号

2. 小型模块化反应堆（以下简称“小堆”）发展势头良好，其多用途利用被寄予厚望。小堆由于其多用途、模块化、灵活、投资成本低等特点，近年引起全球广泛关注。全球多个国家正在加快推广应用小堆技术，并将其列入本国核能发展战略。美国将小型反应堆作为其占领核能技术制高点的重要



选择,并加大资金支持,计划到2025年前后实现小堆部署。俄罗斯“罗蒙诺索夫院士”号浮动核电站装载2台KLT-40S小堆,已经完成装料,其中1台小堆已经在测试;各装载2台RITM-200小堆的22220型破冰船有3艘,分别处于交付、下水和建造阶段。俄罗斯还计划将RITM-200小堆用于“风暴”号航母。此外,俄罗斯未来的破冰船计划使用更高性能的RITM-400型小堆。我国的HTR-PM高温堆示范电站预计2019年投运。韩国SMART小堆、阿根廷CAREM小型堆等也都由概念设计阶段步入发展实践阶段。据统计,全球有近50种小堆概念设计,技术成熟度不同(参见图10),其中以小型压水堆最为成熟。已开展工程建设的小堆技术有俄罗斯的KLT-40S、RITM-200、BREST-OD-300,阿根廷的CAREM和中国的HTR-PM。

3. 多种先进堆型在研发推进,旨在改善未来可部署反应堆的性能。俄罗斯已经起草了BN-1200快堆的开发路线图,最快可以在2027年启动快堆。西屋电气公司已经与意大利国家新技术、能源和可持续经济发展机构(ENEA)及安萨尔多核能公司签署了一项关于铅冷却快堆技术开发的合作协议,寻求合作开发基于铅冷快堆技术的下一代核电站。美国泰拉能源(TerraPower)公司在能源部资助下,与美国能源供应商“南方公司”达成合作,计划在2019年开设一个新的实验室,希望到2030年开发出熔融氯化物反应堆原型,同时该实验室将被用于测试核反应堆新材料。TerraPower的液氯设计将铀燃料和冷却剂放入同一熔盐中,当混合物流过反应堆堆芯时,裂变可以直接加热盐,然后混合物通过热交换器产生热量或电力。使用熔融氯化物,TerraPower设计的新型核反应堆可以在远比以前更高的温度下运行。同时,熔融氯化物反应器几乎不产生残余废物,理论上可以运行多年而无须添加燃料或排除废物。法国由于资金问题,正在调整用于工业示范的先进钠技术反应堆项目(ASTRID)的研究计划,考虑将反应堆的电功率从最初计划的600 MW削减到100MW~200MW。荷兰的核服务公司NRG与瑞典LeadCold公司在合作开发铅冷反应堆,对瑞典先进铅冷反应堆——SEALER——进行安全分析。这是一种小型模块化铅冷快堆,由LeadCold公司设计,使用铀-235丰度为19.9%的氧化铀燃料,采用能够实现临界的最小可能堆芯。电输出功率为3~10MWe;

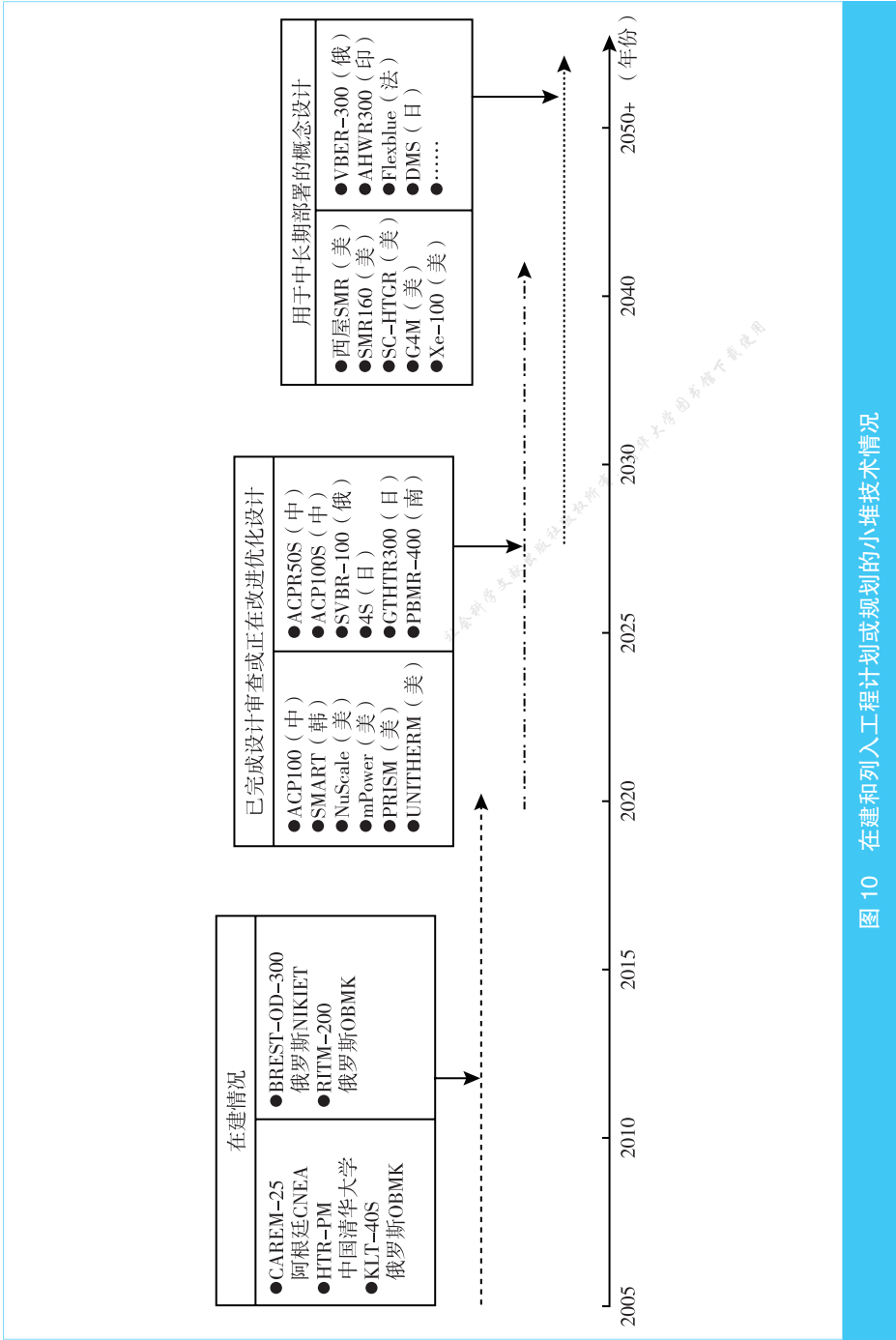


图 10 在建和列入工程计划或规划的小堆技术情况

如果满功率（90% 容量因子）运行，其堆芯寿期可达 10~30 年。在 SEALER 中，铅冷却剂的最高温度将保持在低于 450℃ 的水平，以使燃料包壳和结构材料的腐蚀甚至在几十年的寿期里成为一种可控现象。

4. 有关聚变堆的研究仍在探索实验中。国际热核聚变实验堆（ITER）计划是目前全球规模最大、影响最深远的国际核聚变科研合作项目。ITER 计划由欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国七个成员合作承担。ITER 计划于 1985 年提出，并于 1988 年开始实验堆的研究设计工作，经过十几年努力，在集成世界聚变研究主要成果的基础上，于 2001 年完成 ITER 工程设计。此后经过五年谈判，ITER 计划七方 2006 年正式签署联合实施协定，启动实施 ITER 计划。ITER 计划将历时 35 年，其中建造阶段 10 年、运行和开发利用阶段 20 年、去活化阶段 5 年。根据 ITER 组织 2016 年制订的修订计划，实验堆 2025 年将产生首束等离子体，2035 年开始氘-氚聚变实验。2017 年 11 月，ITER 组织宣布完成总施工进度（实现产生首束等离子体目标）的 50%。

5. 先进燃料元件的研发不断取得阶段性突破。2018 年 3 月，美国哈奇 1 号机组在装入耐事故核燃料先导组件之后重启运行，成为首台装入这种燃料的商业核电机组。该燃料组件是全球核燃料公司（GNF）研发的耐事故燃料先导试验组件。这批先导组件分为两类：一类使用被称为 IronClad 的铁-铬-铝燃料包壳，另一类使用带有 ARMOR 涂层的锆燃料包壳。IronClad 材料在各种工况下均具有良好的抗氧化性和“优异的材料性能”，其在高温下的低氧化速率能够提高反应堆的安全裕量。此次装入哈奇 1 号机组的 IronClad 组件有两种：一种采用燃料棒形式，但未装载燃料；另一种采用实心棒段的方式。IronClad 先导试验组件是在美国能源部（DOE）耐事故燃料计划的资助下研发的。

俄罗斯 Rosatom 首批新改良的 TVSA-T II 型核燃料组件已经在 TVEL 燃料公司下属的机械制造工厂制造，这批核燃料组件是为捷克共和国的 VVER-1000 反应堆制造的。与目前提供给捷克泰梅林核电站的 TVSA-T 型燃料组件相比，由于燃料棒的包覆层更薄以及改良后的铀芯块结构，新改良的燃料组件具有更高的铀容量，将使核电厂的运行更经济有效。燃料组件的结构现在还包括 3 种混合网格，这些网格使反应堆内部冷却剂温度的分布更均匀。另

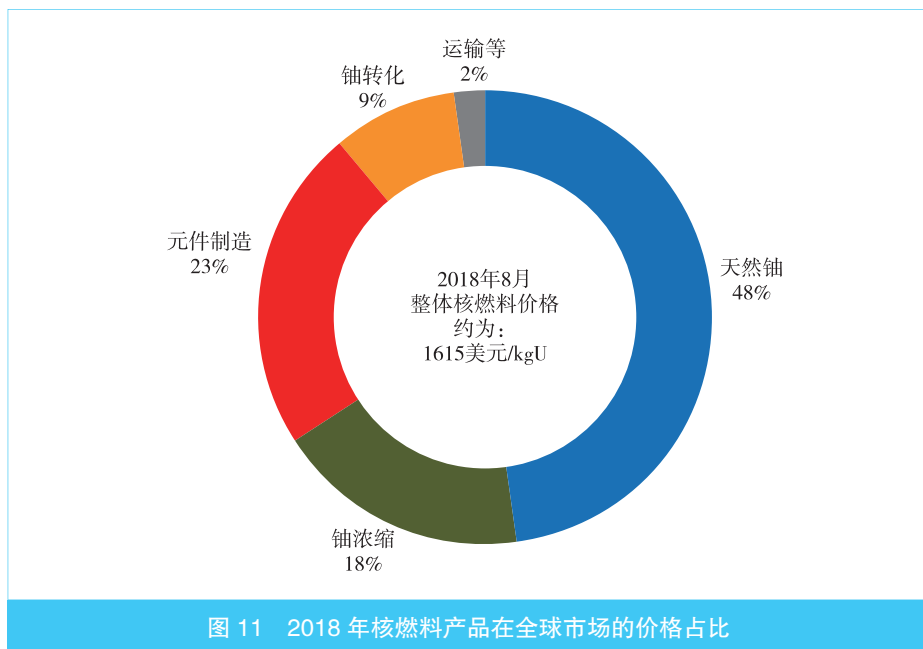


外，俄罗斯燃料公司 TVEL 正在开发用于轻水堆的耐事故燃料（ATF），研发新的燃料棒包层和新的燃料基体，并计划于 2019 年底开始测试。耐高温铬涂层应用可以防止锆与主回路中的冷却剂接触，从而减少在发生严重事故时可能产生的氢气量。俄罗斯国立核能研究大学——莫斯科工程物理学院——正在与中国清华大学合作，研究使用同位素改性钼替代锆合金制造核反应堆燃料元件的可能性，并证明了这种方式能提高核反应堆的安全性。

（五）核燃料循环产业

全球天然铀资源储量丰富，铀产量稳定，未来 10~20 年不会成为制约核电发展的因素。铀转化、铀浓缩，及核燃料制造领域未来数年仍将保持供应充分的状态。2018 年核燃料循环产业各环节供应保障能力充分，市场总体仍较低迷。

据 UxC 数据统计，2018 年 8 月核燃料整体价格约为 1615 美元/kgU。天然铀在各环节的价格占比最高，为 48%，燃料元件制造为 23%，铀浓缩为 18%，铀转化服务在燃料产品中占比最小，仅为 9%（见图 11）。



1. 天然铀

根据 2018 年底经合组织核能署 (NEA) 和国际原子能机构 (IAEA) 共同发布的《铀矿资源：产量和需求》(*Uranium Resources: Production and Demand*) (即 2018 版红皮书)，截至 2017 年 1 月，世界已探明开发成本小于 130 美元 / 千克的铀资源量大约为 614 万吨，这比 2016 年红皮书所报告的总量增长了 7.4%。目前世界天然铀资源充足，无论核能在电力需求中的未来地位如何，也无论全球气候变化怎样，都完全能够满足可以预见的未来需要。红皮书同时指出，为确保铀矿资源能够得到维护并及时投产，必须加大资金投入及专业能力建设。

2016 年，北美地区铀产量为 15018 吨，占世界总产量的 24%。巴西产量持续下降，2014 年为 55 吨，2015 年为 44 吨，2016 年没有产量。2016 年，欧盟天然铀产量为 190 吨，主要来自捷克，法国、德国和匈牙利有少量生产。欧洲非欧盟国家 2016 年铀产量为 3813 吨，尽管俄罗斯产量增加 14 吨，但其他国家产量下降，其中乌克兰产量下降 146 吨。2016 年，俄罗斯铀产量为 3005 吨，其中 1873 吨采用常规地下开采法生产，另外 1132 吨采用原地淋滤法生产。非洲三个主要产铀国，包括纳米比亚、尼日尔和南非，合计产量从 2014 年的 8238 吨降至 2016 年的 7560 吨。虽然博茨瓦纳、坦桑尼亚和赞比亚未来可能生产铀，但这取决于市场条件和安全情况。NEA 指出，这至少要等到 2030 年以后。2016 年，中东、中亚和南亚的铀产量增至 29177 吨，主要是因为哈萨克斯坦产量增长，该国 2014 年、2015 年和 2016 年产量分别为 22781 吨、23806 吨和 24689 吨。目前，哈萨克斯坦是世界最大产铀国，2016 年产量占世界的 40%。澳大利亚是大洋洲地区唯一产铀国，2014 年、2015 年和 2016 年产量分别为 5000 吨、5636 吨和 6313 吨。

2016 年世界铀需求量为 62825 吨，其中经合组织 (OECD) 需求量为 45340 吨。2018 版红皮书在基于未来核电发展规模预测调低 (相比于 2016 版红皮书) 的假设情景下，认为从长期看，未来铀需求仍将保持增长趋势。

2. 铀转化

全球铀转化市场在未来数年仍将保持供应充分的状态。二次供应对全球



市场的影响在逐渐减少，但 2035 年前仍将发挥重要作用。

一次供应方面，2017 年^①全球主要铀转化供应商六氟化铀产能为 5.81 万吨铀（ UF_6 ）/年，实际估算总产量为 3.41 万吨铀（ UF_6 ）/年（见表 6）。

表 6 2017 年全球主要铀转化供应商 UF_6 额定产能与实际产量

铀转化厂商	2017 年生产能力（吨铀/年）	2017 年实际产量（吨铀/年）	利用率
加拿大 Cameco	12500	5000	40%
俄罗斯 TVEL	11500	11000	96%
法国 ORANO	15000	7000	47%
美国 Converdyn	7000	5500	79%
中国 CNNC	12000	5500	46%
巴西 IPEN	100	100	100%
总量	58100	34100	

资料来源：UxC2018 年铀转化市场报告。

法国欧安诺集团科莫海克斯（Comurhex）一期铀转化厂 2017 年的额定产能为 1.15 万吨铀（ UF_6 ）/年，当年的实际产量约为 7000 吨铀（ UF_6 ）。加拿大矿业能源公司（以下简称加矿）可为轻水堆生产 UF_6 ，并为重水堆生产 UO_2 。2017 年 UF_6 的额定产能为 1.25 万吨铀/年，实际产量为 5000 吨铀。鉴于全球六氟化铀需求低迷且严重供过于求，美国梅特罗波利厂 2017 年的额定产能降低为 7000 吨铀（ UF_6 ）/年，实际产量为 5500 吨铀（ UF_6 ）。2017 年底，梅特罗波利厂宣布停产。俄罗斯国家原子能集团公司（以下简称俄原）的铀转化业务由俄核燃料产供集团（TVEL）实施，市场营销由俄技术装备出口公司（Tenex）负责。额定产能为 1.15 万吨铀（ UF_6 ）/年，2017 年实际产量为 1.1 万吨铀（ UF_6 ）。

二次供应方面，铀转化二次供应的来源包括美国能源部（DOE）铀库存、俄罗斯与美国之前武器级高浓铀的稀释、核电机组等商业储备、铀浓缩厂低尾料丰度运行和尾料再浓缩、铀钚循环等。2017 年，铀转化二次供

^① 2018 年数据未见相关统计报道。



供应量占全球市场的比重为 35%~50%。近些年，铀浓缩厂通过低尾料丰度运行生产销售的铀转化产品占全球市场的份额越来越大，UxC 预测，在中情景下，2018 年，西方铀浓缩厂的铀转化产品全球市场供应量约为 4100 吨（见表 7）。

表 7 中情景下 2018 年全球铀转化二次供应量与预测（吨铀 / 年）

二次供应源	2018 年	2025 年	2030 年	2035 年
俄罗斯政府及商业库存、铀浓缩厂	6200	5300	3200	2400
西方铀浓缩厂	4100	1800	1100	1300
核电机组商业库存	3100	3500	2300	1500
其他商业库存	16500			
美国政府储备	1400	500	500	1300
MOX 与铀钚再循环	3700	2300	1800	1400
总量	35000	13300	8900	8000

资料来源：UxC2018 年铀转化市场报告。

根据 UxC 中发展情景的预测，2018 年二次供应量约为 3.5 万吨铀，之后将逐年减少，2035 年全球市场的铀转化二次供应量将约为 8000 吨铀。

据 UxC 预测，到 2035 年，全球铀转化产能将约为 8 万吨铀 / 年。在中发展情境下，铀转化市场将维持供需平稳。在低发展情景下，将出现产能过剩的局面。而在高发展情景下，铀转化市场将出现供不应求的局面。未来几年，中国的铀转化市场份额将逐渐增加，并逐渐超过其余四大铀转化供应商。铀转化二次供应的占比则将逐年减少。

同样，经合组织核能署（OECD-NEA）出版的 *Nuclear Energy Data 2016* 提供了到 2035 年全球市场的铀转化供需预测，具体信息见表 8 和表 9。

表 8 全球铀转化额定产能（吨铀 / 年）

国别	转化为	2014 年	2015 年	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
俄罗斯	UF ₆	15000	15000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
美国	UF ₆	15000	15000	18000	23000	23000	23000	23000



续表

国别	转化为	2014 年	2015 年	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
法国	UF ₆	14000	14000	14000	14000	14000	14000	14000
英国	UF ₆	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
加拿大	UF ₆	8500	9700	12500	12500	12500	12500	12500
	UO ₂			2800	2800	2800	2800	2800
	金属 U	0	0	2000	2000	2000	2000	2000

资料来源: Nuclear Energy Data 2016。

表 9 全球铀转化需求 (吨铀 / 年)

国别	转化为	2014 年	2015 年	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
俄罗斯	UF ₆	W	W	W	W	W	W	W
美国	UF ₆	20137	21403	17077	19570	17974	18907	17921
法国	UF ₆	8600	8600	8600	8600	8600	8600	8600
英国	UF ₆	1514	1075	1570	1230	910	340	0
加拿大	UO ₂	1870	1875	1870	1400	1220	1340	1380

资料来源: Nuclear Energy Data 2016。

W: 不对外公开数据。

3. 铀浓缩

铀浓缩供应包括一次供应与二次供应。一次供应是商业铀浓缩供应商提供的分离功服务。二次供应包括铀浓缩产品库存 (EUP Inventory) 与后处理铀 (RepU)。

一次供应方面, 2017 年全球分离功总需求约为 5 万吨 SWU, 然而全球铀浓缩厂分离功总产能达 6 万多吨 SWU (见表 10), 全球市场分离功供大于求的局面没有改变。俄罗斯 Rosatom 占据全球市场分离功一次供应第一大份额, 为 45%, 其次是 URENCO, 占据 32.3%, 法国 ORANO 占据 12.7%, 中国 CNNC 占据 9.8%。另外还有日本、阿根廷及巴西的铀浓缩供应商, 2017 年总产能为 188 吨 SWU, 约占市场的 0.3%。



表 10 2017 年全球市场主要铀浓缩供应商产能

运营方	2017 年（吨 SWU）	市场占有率（%）
法国 ORANO	7500	12.7
URENCO	18758	32.3
俄罗斯 Rosatom	28416	45
中国 CNNC	5210	9.8
其他（日本、阿根廷、巴西）	188	0.3
总计	60072	100

资料来源：WNA, The Nuclear Fuel Report 2017。

根据 UxC 的预测，2018 年全球分离功产能约为 6.16 万吨 SWU（见表 11）。URENCO 与 Rosatom 的铀浓缩服务继续占据主导地位，共占全球市场份额的 76%。OREANO 维持中等水平。巴西、日本、阿根廷分离功产能共约 600 吨 SWU。

表 11 2018~2035 年全球主要铀浓缩供应商产能现状及中发展情景产能预测（吨 SWU）

运营方	2018 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
法国 ORANO	7500	7500	7500	7500	7500
欧洲 URENCO	13800	13400	13000	12000	10500
美国 URENCO	4800	4800	4800	4800	4800
俄罗斯 Rosatom	28100	27300	25100	24100	22100
中国 CNNC	6800	7700	12500	18000	25000
其他（日本、阿根廷、巴西）	600	600	700	700	700
总计	61600	61300	63600	67100	70600

资料来源：UxC Enrichment Market Outlook Q2 2018。

二次供应方面，相比于铀转化，分离功的二次供应量占全球市场的比重并不大。目前二次供应来源主要是因 2011 年福岛核事故以及成本原因而提前关停的核电机组持有的商业库存。另一部分来源是美国高浓铀（HEU）稀释后的低浓铀产品（LEU），后处理回收铀（RepU）与混合氧化物（MOX）燃料。

全球市场中铀浓缩二次供应的主要来源是美国能源部（DOE）库存，包



括贫铀（DU）、天然铀（NU）、低浓铀（LEU）与高浓铀（HEU）等铀产品，其中占主要部分的是美国能源部一直在缓慢稀释的 HEU。另一个铀浓缩二次供应的主要来源是以核电机组为主的商业库存。铀浓缩供应商同样也会拥有一定的铀浓缩商业库存。除此之外，铀浓缩一部分二次供应来自 MOX 燃料与后处理回收铀（RepU）。IAEA 致力于面向全球采购低浓铀产品（LEU），通过运输并存储在其位于哈萨克斯坦乌尔巴冶金厂的铀银行，为燃料元件制造安全供应浓缩 UF_6 产品。

目前，全球铀浓缩服务总供应远大于需求。根据 UxC 预测，未来铀浓缩供大于求的局面将逐渐好转。中发展情境下，铀浓缩市场将达到供需平衡。到 2035 年，只有在高发展情景下，全球铀浓缩市场才会出现供不应求的局面。市场中包括铀浓缩商及核电运营浓缩产品库存等在内的二次供应量将逐渐减少。

同样，经合组织核能署（OECD-NEA）出版的 *Nuclear Energy Data 2016* 提供了到 2035 年全球市场分离功的供需预测（见表 12 和表 13）。

表 12 全球铀浓缩额定产能（吨 SWU）

铀浓缩产能	方法	2014 年	2015 年	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
俄罗斯	离心	25000	25000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
美国	离心	3200	3700	4700	5200	9000	16600	16600
	激光	0	0	0	0	1500	4500	7000
法国	离心	6400	6900	7500	7500	7500	7500	7500
英国	离心	4900	4900	4700	N/A	N/A	N/A	N/A

资料来源：Nuclear Energy Data 2016。

表 13 全球铀浓缩需求（吨 SWU）

铀浓缩需求	2014 年	2015 年	2016 年	2020 年	2025 年	2030 年	2035 年
俄	罗 W	斯 W	W	W	W	W	W
美国	13988	15440	16159	13342	15234	13547	13159
法国	6500	6500	6500	6500	6500	6500	6500
英国	1127	785	1160	900	690	270	0

资料来源：Nuclear Energy Data 2016。

W: 不对外公开数据。



4. 燃料元件制造

全球大多数核燃料元件制造商同时也是反应堆供应商，为其设计的反应堆提供首炉和初期换料。全球的核反应堆主要是轻水堆和重水堆，因此核燃料元件制造主要服务于这两种堆型，并且以轻水堆燃料制造为主，全球市场轻水堆燃料组件供应主要分为压水堆与沸水堆燃料组件。

(1) 轻水堆燃料组件

按供应商来划分，全球主要大型轻水堆核燃料制造商有6家：法马通（Framatome）、环球核燃料公司（GNF）、西屋电气公司（Westinghouse）、产供集团（TVEL）、韩国核燃料公司（KNF）、中核集团（CNNC）。其余的还有西班牙 ENUSA 公司、日本三菱重工（Mitsubishi）、日本核燃料工业公司（NFI）、巴西核工业公司（INB）、印度核燃料联合体（NFC）、伊朗燃料元件制造厂（Fuel Mfg. Plant）以及哈萨克斯坦与中广核集团共同组建的燃料元件厂。据 UxC 报告，2018 年，全球轻水堆燃料组件总产能约为 1.3 万 MtU/a（见表 14）。

表 14 2018 年全球主要核燃料元件供应商产能现状

地区	供应商	制造厂	额定产能 (MtU/a)			燃料类型
			粉末	芯块	组件	
西欧	Framatome	Romans	1400	1000	1400	PWR
		Lingen	800	650	650	BWR/PWR
	Westinghouse	Västerås	600	600	600	BWR/PWR/VVER
		Springfields	200	200	200	PWR
	ENUSA	Juzbado	0	500	500	BWR/PWR/VVER
	西欧总产能		3000	2950	3350	
美国	Framatome	Richland	1600	1200	1200	BWR, PWR
	GNF-A	Wilmington	1200	1100	1100	BWR
	Westinghouse	Columbia	1350	1200	1200	BWR/PWR/VVER
	美国总产能		4150	3500	3500	
日本	GNF-J	Yokosuka	0	750	750	BWR
	Mitsubishi	Tokai-mura	450	440	440	PWR
	NFI	Kumatori	0	284	284	PWR
		Tokai-mura	0	250	250	BWR
	日本总产能		450	1724	1724	



续表

地区	供应商	制造厂	额定产能 (MtU/a)			燃料类型
			粉末	芯块	组件	
东欧	TVEL Fuel Co.	Elektrostal	750 ^a	750 ^a	750	VVER/BWR/PWR
		Novosibirsk	700	700	700	VVER/PWR
	Kazatomprom	Ulba Met. Plant	200 ^b	200 ^b	0 ^c	n/a
	东欧总产能		1650	1650	1450	
中国	CNNC	Yibin	1000	1000	1000	PWR, VVER
		Baotou	800	800	800	PWR
	中核总产能		1800	1800	1800	
韩国	KNF	Daejeon	700	700	700	PWR
巴西	INB	Resende	160	120	250	PWR
印度	NFC	Hyderabad	25	25	25	BWR
伊朗	Fuel Mfg. Plant	Isfahan	30	30	30 ^d	VVER
全球总产能			11965	12499	12829	

资料来源: UxC Fabrication Market Outlook 2018。

注: a 不包括 RMBK 与 FBR 反应堆、印度 PHWR 反应堆的粉末 / 芯块供应。

b 预测现有产能。

c 哈萨克斯坦计划与中广核在乌尔巴建造产能 200 MtU/a 燃料组件制造厂。

d 伊朗额外为重水研究堆生产 10 tU/a 燃料组件, 全球供应并不包括伊朗产能。

(2) 重水堆核燃料

2015 年, 全球轻水堆核燃料的需求约为 7000 tHM/a, 但产能却高达 1.38 万 tHM/a。重水堆核燃料需求约为 3000 tHM/a, 总产能为 4320 tHM/a。气冷堆核燃料市场需求约为 400 tHM/a, 总产能为 480 tHM/a。^① 整体看, 2015 年燃料元件产能大于需求。

目前, 全球共有 7 个国家拥有加压重水堆核电站和重水堆核燃料制造设施, 包括加拿大、韩国、中国、印度、罗马尼亚、阿根廷和巴基斯坦。2015 年总产能为 4320 tHM/a, 其中加拿大产能最大, 为 2700 tHM/a。其次是印度 (435 tHM/a) 和韩国 (400 tHM/a)。加拿大有两家公司在生产重水堆燃料, 即

① 世界核协会 2015 年发布的《世界核燃料报告》。

环球燃料公司 (GNF-Canada) 和加拿大矿业能源公司 (Cameco), 产能分别为 1500 tHM/a 和 1200 tHM/a。

(3) 混合氧化物 (MOX) 燃料

目前, 全球共有 3 个国家在进行商业规模的 MOX 燃料生产活动, 包括法国、印度和日本。法国阿海珐集团的梅洛克斯 (Melox) 工厂 2015 年产能 195 tHM/a, 产品已经用于法国、德国、比利时等国的压水堆。

关于未来供需情况, 根据 UxC 燃料元件市场报告分析, 未来几年全球市场将维持产能过剩的局面。到 2030 年, 全球市场燃料元件总产能将超过 1.6 万 tU/a。在高发展情景下, 全球供应燃料元件粉末的需求将超过 1.2 万 tU/a。未来十年, 阿海珐、产供集团、西屋等老牌大型供应商的产能将不会有所变化。

5. 核燃料循环后端

截至目前, 全球核电站每年卸出乏燃料约 1 万吨, 累计产生乏燃料 40 多万吨。根据 IAEA 统计,^① 全球核电厂已卸出乏燃料中, 采用湿法贮存的约有 180800tHM, 采用干法贮存的约有 56900tHM, 已处理 120300 tHM; 从研究和其他反应堆卸出的乏燃料用湿法贮存的约有 362tHM, 用干法贮存的约有 2831tHM。

全球商用乏燃料后处理能力为 5675 吨/年, 其中英国 2400 吨/年, 法国 1700 吨/年, 日本 900 吨/年, 俄罗斯 400 吨/年, 印度 275 吨/年。

2018 年 11 月, 英国索普 (Thorp) 后处理厂在处理完最后一批乏燃料后, 宣布停止后处理工作。到 21 世纪 70 年代, 该设施将用来贮存乏燃料。建造费用为 18 亿英镑 (23 亿美元) 的索普后处理厂自 1994 年投入使用以来, 已处理了来自世界 9 个国家 30 个客户的 9331 吨乏燃料。后处理工作已产生大约 90 亿英镑的收入。

法国阿格乏燃料后处理工厂于 1976 年建成以来一直在运营, 目前年均乏燃料后处理能力在 1700 吨左右, 拥有目前世界轻水反应堆乏燃料总量近一半

^① 数据为截至 2013 年年底。



的后处理能力。有总量超过 32000 吨的乏燃料在该厂进行了后处理，其中约 70% 来自法国，其他来自德国、日本等地。

日本六个所村后处理厂于 1993 年开始建造，2006 年基本建成，但在热试中出现了玻璃熔炉的出口管嘴阻塞、耐火砖脱落、高放废液泄漏等情况，热试工作中止。为此，日本核燃料公司多次向经产省申请延迟六个所村后处理厂的投运日期，而福岛核事故使这一工作再次遭受打击。2018 年 9 月，该处理厂基本完成安全审查。根据日本核燃料公司 2017 年底公布的信息，该后处理厂有望在 2021 年建成投运。届时，六个所村后处理厂将能够通过对乏燃料进行后处理，每年提取约 8 吨铀。2018 年 6 月，日本原子力规制委员会批准了东海村后处理中试厂退役计划，中试厂退役预计需要 70 年，总投资近 1 万亿日元。

在放射性废物管理环节，根据 IAEA 统计，^① 全球固态极低水平放射性废物（VLLW）已贮存约有 2356000 立方米，已处置的约有 7906000 立方米；固态低水平放射性废物（ILW）已贮存约有 3479000 立方米，已处置的约有 20451000 立方米；固态中水平放射性废物（ILW）已贮存约有 460000 立方米，已处置的约有 107000 立方米；固态高水平放射性废物（HLW）已贮存约有 22000 立方米，已处置的约有 0 立方米。全球中低放处置设施在建的有 3 个，运行的有 64 个，已关闭的有 30 个；全球高放处置设施在建的有 4 个，运行的有 6 个，已关闭的有 2 个。

目前一些国家正在推进乏燃料处理与放射性废物处置设施的开发活动。如加拿大核废物管理组织 2018 年 1 月在 Ignace 附近完成了首个 1000 米深试验性钻孔的钻探，该地区是安大略省开展调查的乏燃料深地质处置库五个候选厂址之一。美国众议院 2018 年 5 月通过《核废物政策法 2018 年修订案》第 HR3053 号法案，支持推进尤卡山处置库取证程序和在美建设乏燃料集中式中间贮存设施。瑞士联邦环境、运输、能源和通信部（DETEC）2018 年 8 月批准瑞士国家放射性废物处置合作公司（Nagra）提交的勘探性钻孔申请，该公司计划在 2019 年启动勘探性钻探，以研究潜在处置库厂址的地质条件。

^① 数据截至 2013 年年底。



日本核燃料公司计划在六所村新建一座低放废物处置设施，预计能够处置多达 4.2 万立方米低放废物。法国计划在 Meuse/Haute Marne 地区建设一座中高发废物地质处置库——工业地质处置中心（Cigeo）。芬兰核废物管理公司——波西瓦公司——表示，世界首座永久核废物处置库——安克罗地下核废物处置库——即将开始对乏燃料进行全面的最终处置试验。该废物处置库计划在 2023 年建成投运，规划目标是贮存 6500 吨乏燃料，未来预计还要增加贮存量，至少保证乏燃料在 400~500 米的地下岩洞中安全贮存 10 万年。

（六）未来发展预测

世界主要能源 / 核电机构的预测表明，核电作为可以大规模替代化石能源的清洁高效低碳能源，将来对优化世界一次能源消费结构、改善环境的作用愈加凸显，全球核电未来将持续增长，只是受制于当前政策、资金、经济等多种因素，一些机构对核电增长规模的目标预期有所调低。

根据国际原子能机构（IAEA）发布的 *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050* (2018) 系列年报，高情景下的数据显示，全球核电容量将从 2017 年的 3.92 亿千瓦增加到 2030 年的 5.11 亿千瓦，到 2040 年达到 6.41 亿千瓦，到 2050 年则达到 7.48 亿千瓦，相比于 2017 年高情景下的预测分别调低了 7.76%、10.60% 和 14.42%。除低情景下 2030 年核电容量略有增加之外，其他预测与 IAEA 一年前在《2017 年国际核电现状和前景》报告中的数据相比，均有下降（参见表 15）。

表 15 国际原子能机构（IAEA）对世界核电容量的预测（亿千瓦）

情景	预测年份	2030 年	2040 年	2050 年
低情景	2012	4.56	—	4.70
	2017	3.45 ↓	3.32	3.92 ↓
	2018	3.52 ↑	3.23 ↓	3.56 ↓
高情景	2012	7.40	—	13.37
	2017	5.54 ↓	7.17	8.74 ↓
	2018	5.11 ↓	6.41 ↓	7.48 ↓



2018 年 8 月世界核协会（WNA）发布报告称，世界核协会已制定“和谐”（Harmony）电力未来愿景，帮助满足全球日益增长的能源需求。“和谐”（Harmony）计划由包括部署低碳发电技术的一个多样化能源构成（参见图 12），使效益最大化，消极影响最小化。为了满足对可靠、廉价和清洁电力不断增长的需求，世界需要将所有低碳能源作为多种电力组合的一部分。世界核协会预计到 2050 年核能将供应 25% 的电力，这意味着需要新增 1000 吉瓦核发电能力。

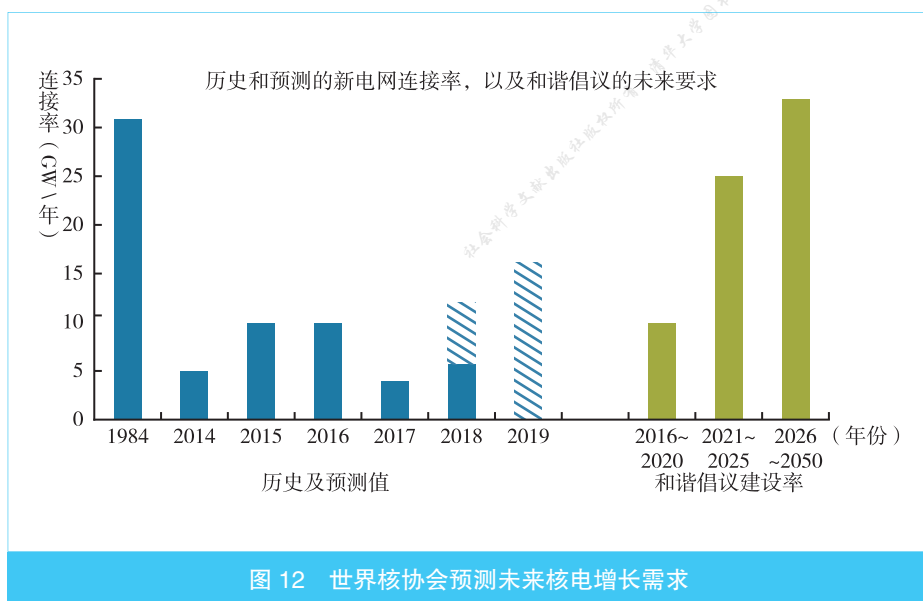
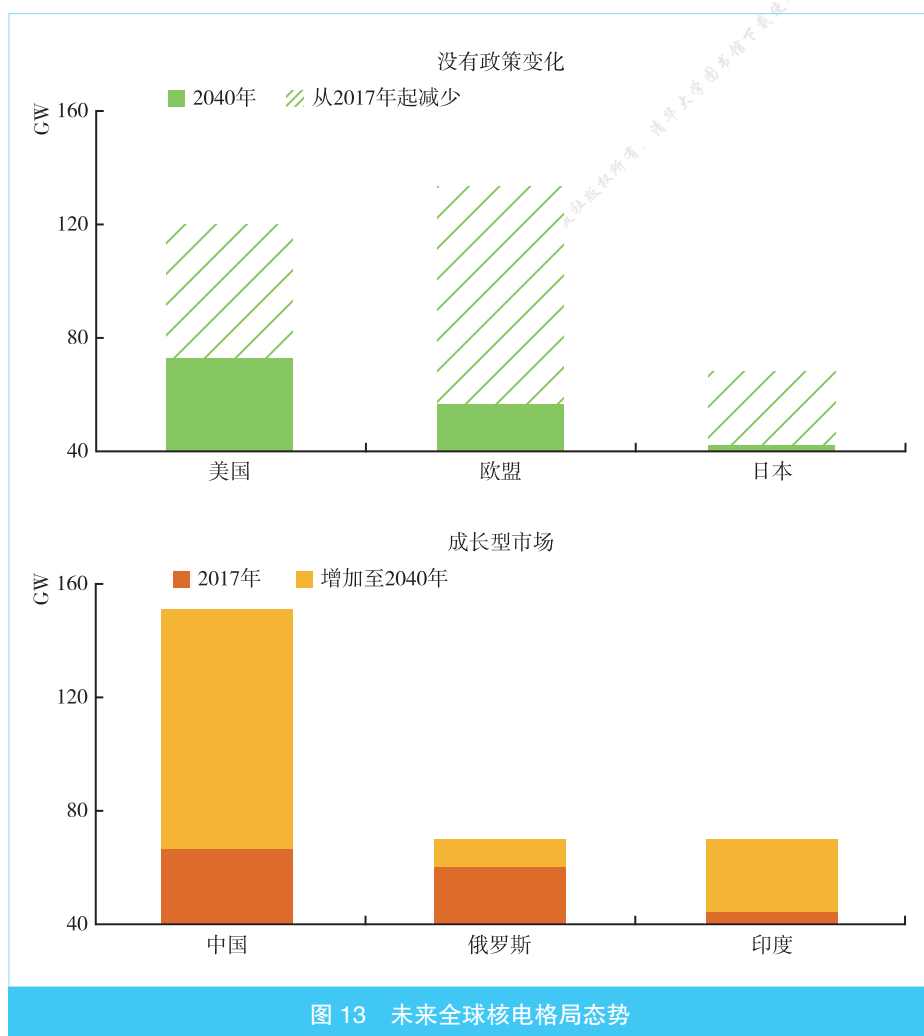


图 12 世界核协会预测未来核电增长需求

2018 年 11 月，国际能源署发布了《世界能源展望 2018》（World Energy Outlook 2018），该报告在分析全球能源市场和技术发展最新数据和能源行业发展主要问题的基础上，对全球 2040 年的能源发展前景进行了展望。报告指出，全球能源领域正在进行重大转型，从电气化的不断发展到可再生能源的扩张，石油生产的剧变以及天然气市场的全球化。各国政府的政策选择将决定未来能源系统的形态。对于核电行业，IEA 认为，核电是当前仅次于水电



的第二大低碳电源，其发电量占比将保持在 10% 左右，未来各国核电发展将走向两个方向，一方面，中国、俄罗斯、印度等国的未来核电增长潜力看好，中国核电发电量在 2030 年前有望超过美国和欧盟（参见图 13）；另一方面，发达经济体约 2/3 的核电站已运行 30 年以上，将面临大规模关停退役。对于这些核电装机，延寿或者关停的决定将对能源安全、投资和排放产生重大影响。





麻省理工学院能源倡议（MIT Energy Initiative）在 2018 年 9 月发布的报告《核能在碳约束世界中的未来》认为，在大多数地区，如果要保证 2050 年预期的能源供应，同时要降低碳排放，就需要优化现有的电力结构。如果没有核电的贡献，要达到减碳排目标成本将大幅上升。发电成本最低的组合中，核电是重要组成部分，其比例将随着核电成本下降而显著提高。目前核能在世界很多地区的发展前景不乐观，最根本的原因是成本。在近数十年中，其他发电技术变得更廉价，而新建核电站的成本则不断上升，削弱了核能的潜在贡献，也增加了低碳化的成本。针对成本问题，报告建议：（1）要更加注重应用已得到实践验证的技术和建造管理方法，提高建造和交付新核电站的成功概率；（2）要从低效、高度依赖场址的现场施工型电厂，转向更系列化制造的标准电厂；（3）应转向采用具备固有和非能动安全特征的反应堆设计；（4）应为低碳化政策创造一个公平竞争环境，允许低碳发电技术择优竞争；（5）政府应开放反应堆场址，让企业部署用于测试和针对监管执照申请的原型堆；（6）政府应资助先进反应堆设计的原型堆测试和商业化部署。

二 2018 年我国核能发展

发展核能是优化我国能源结构、建设美丽中国、应对全球气候变化的战略选择。目前，我国已经成为全球核电发展最快的国家，核能产业发展进入以三代技术为主的新时期。安全高效推进核能产业的可持续发展，是当前及今后我国核能界的重要职责和使命。

（一）核电生产运行

2018 年，我国核电机组继续保持安全稳定运行，没有发生 1 级及以上运行事件，全年核能发电量为 2865.01 亿千瓦时，^① 比 2017 年同期上升了

① 中国核能行业协会《2018 年 1-12 月全国核电运行情况》修正后数据；中电联《2018-2019 年度全国电力供需形势分析预测报告》统计数据为：2018 年核能发电量为 2944 亿千瓦时，同比增长约为 18.96%。



15.78%，约占全国累计发电量的 4.22%。截至 2018 年 12 月底，我国商运核电机组 44 台，装机容量达到 4464.516 万千瓦。

1. 商运核电机组逐年增加

2018 年，全国首次并网的核电机组有 8 台，其中 7 台机组投入商运。投运的 7 台机组分别是田湾核电厂 3、4 号机组，阳江核电厂 5 号机组，三门核电厂 1、2 号机组，海阳核电厂 1 号机组和台山核电厂 1 号机组。海阳核电厂 2 号机组 2018 年并网但当年未投入商运。

我国历年投入商运的核电机组情况见表 16。我国历年投入商运的核电机组数量及装机容量如图 14 所示，历年累计投入商运的核电机组数量及装机容量如图 15 所示。

表 16 我国商运核电机组情况

核电机组	堆型	位置	装机容量（MWe）	首次并网日期	商运日期
秦山一期	压水堆	浙江海盐	310	1991/12/15	1994/4/1
大亚湾 1 号	压水堆	广东深圳	984	1993/8/31	1994/2/1
大亚湾 2 号	压水堆	广东深圳	984	1994/2/7	1994/5/6
秦山二期 1 号	压水堆	浙江海盐	650	2002/2/6	2002/4/15
秦山二期 2 号	压水堆	浙江海盐	650	2004/3/11	2004/5/3
秦山二期 3 号	压水堆	浙江海盐	660	2010/8/1	2010/10/5
秦山二期 4 号	压水堆	浙江海盐	660	2011/11/25	2011/12/30
秦山三期 1 号	重水堆	浙江海盐	728	2002/11/19	2002/12/31
秦山三期 2 号	重水堆	浙江海盐	728	2003/6/12	2003/7/24
方家山 1 号	压水堆	浙江海盐	1089	2014/11/4	2014/12/15
方家山 2 号	压水堆	浙江海盐	1089	2015/1/12	2015/2/12
岭澳 1 号	压水堆	广东深圳	990	2002/2/26	2002/5/28
岭澳 2 号	压水堆	广东深圳	990	2002/9/14	2003/1/8
岭澳 3 号	压水堆	广东深圳	1086	2010/7/15	2010/9/15
岭澳 4 号	压水堆	广东深圳	1086	2011/5/3	2011/8/7
田湾 1 号	压水堆	江苏连云港	1060	2006/5/12	2007/5/17
田湾 2 号	压水堆	江苏连云港	1060	2007/5/14	2007/8/16
田湾 3 号	压水堆	江苏连云港	1126	2017/12/30	2018/2/15



续表

核电机组	堆型	位置	装机容量 (MWe)	首次并网日期	商运日期
田湾4号	压水堆	江苏连云港	1126	2018/10/27	2018/12/22
红沿河1号	压水堆	辽宁瓦房店	1118.79	2013/2/17	2013/6/6
红沿河2号	压水堆	辽宁瓦房店	1118.79	2013/11/23	2014/5/13
红沿河3号	压水堆	辽宁瓦房店	1118.79	2015/3/23	2015/8/16
红沿河4号	压水堆	辽宁瓦房店	1118.79	2016/4/1	2016/6/8
宁德1号	压水堆	福建宁德	1089	2012/12/28	2013/4/15
宁德2号	压水堆	福建宁德	1089	2014/1/4	2014/5/4
宁德3号	压水堆	福建宁德	1089	2015/3/21	2015/6/10
宁德4号	压水堆	福建宁德	1089	2016/3/29	2016/7/21
阳江1号	压水堆	广东阳江	1086	2013/12/31	2014/3/25
阳江2号	压水堆	广东阳江	1086	2015/3/10	2015/6/5
阳江3号	压水堆	广东阳江	1086	2015/10/18	2016/1/1
阳江4号	压水堆	广东阳江	1086	2017/1/8	2017/3/15
阳江5号	压水堆	广东阳江	1086	2018/5/23	2018/7/12
福清1号	压水堆	福建福清	1089	2014/8/20	2014/11/19
福清2号	压水堆	福建福清	1089	2015/8/6	2015/10/16
福清3号	压水堆	福建福清	1089	2016/9/7	2016/10/24
福清4号	压水堆	福建福清	1089	2017/7/29	2017/9/17
昌江1号	压水堆	海南昌江	650	2015/11/7	2015/12/25
昌江2号	压水堆	海南昌江	650	2016/6/20	2016/8/12
防城港1号	压水堆	广西防城港	1086	2015/10/25	2016/1/1
防城港2号	压水堆	广西防城港	1086	2016/7/15	2016/10/1
三门1号	压水堆	浙江三门	1250	2018/6/30	2018/9/21
三门2号	压水堆	浙江三门	1250	2018/8/24	2018/11/5
海阳1号	压水堆	山东海阳	1250	2018/8/17	2018/10/22
台山1号	压水堆	广东台山	1750	2018/6/29	2018/12/13

我国商运核电机组分布在沿海8个省份,按照首台机组并网的时间先后排序,分别是浙江省、广东省、江苏省、福建省、辽宁省、海南省、广西壮族自治区和山东省。随着海阳核电厂1号机组的投运,山东省成为我国新的

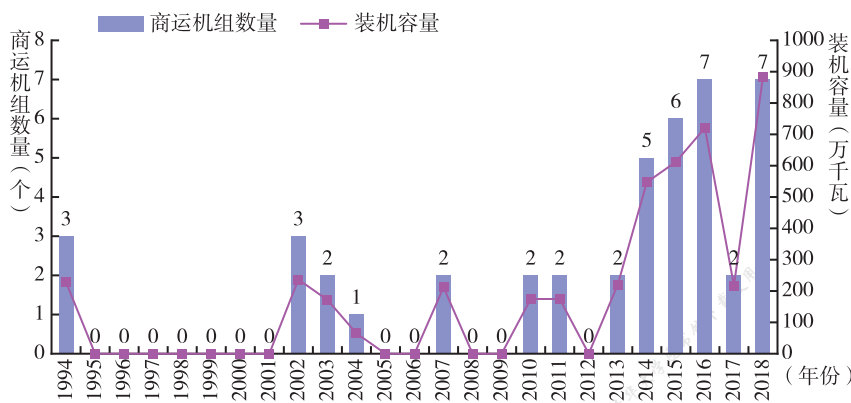


图 14 我国历年新增商运核电机组数量及装机容量

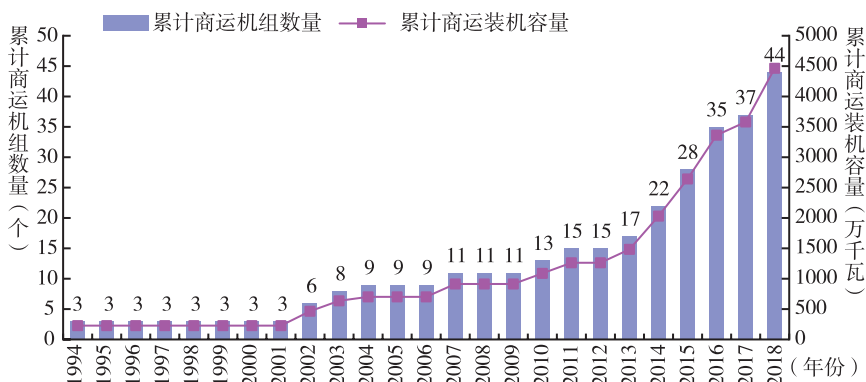


图 15 我国历年累计商运核电机组数量及装机容量

核能发电省份。2018年,我国各省份的核电装机容量与机组数量如图16所示,各省份核电装机容量占全国核电装机容量的比例情况如图17所示。

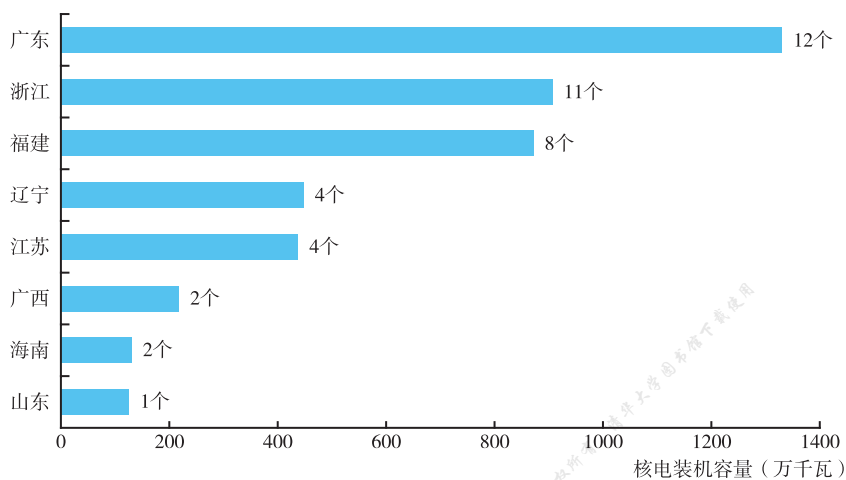


图 16 2018 年我国各省份核电装机容量与机组数量

注：图中数字表示在运机组数量。

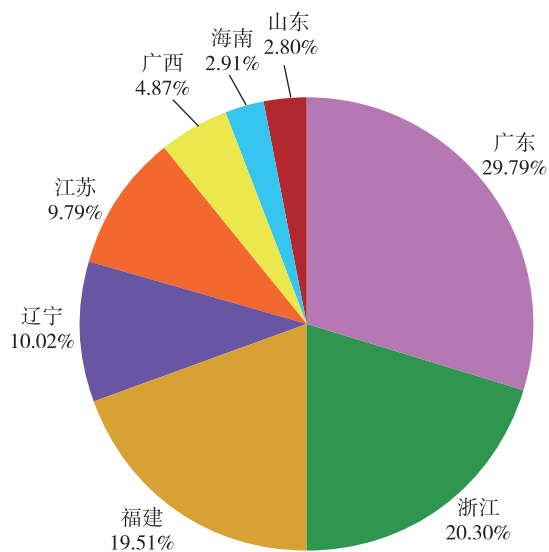
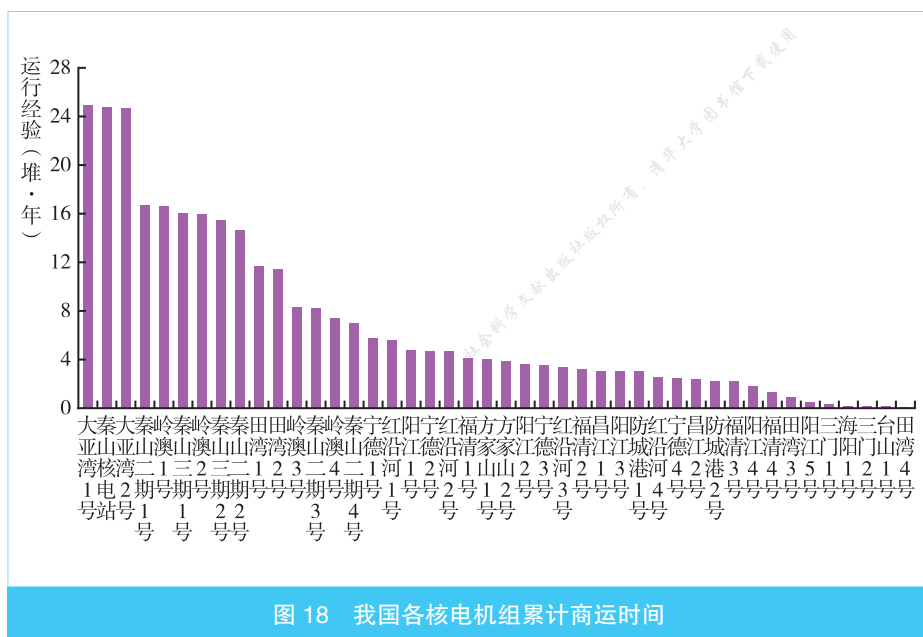


图 17 2018 年各省份核电装机容量在全国核电装机容量中的占比



2. 核电机组累积商运时间达到301.02堆·年

截至2018年12月31日,我国商运的44台核电机组,累计商运时间达到301.02堆·年。累计运行时间最高的是秦山核电基地(包括秦山核电厂、秦山第二核电厂、秦山第三核电厂和方家山核电厂),累计运行时间超过100堆·年。我国各商运核电机组累计运行时间如图18所示。



3. 全国核电发电量创历史新高

2018年,我国核能发电量为2865.01亿千瓦时,比2017年同期上升了15.78%,创造历史最高水平,占全国总发电量67914.20亿千瓦时^①的4.22%。与燃煤发电相比,核能发电相当于减少燃烧标准煤约8824.23万吨,减少二氧化

① 全国发电量数据来源于国家统计局网站。根据国家能源局2019年发布数据,2018年我国火电供电煤耗为308克标准煤/千瓦时。减排计算方法来源于我国火电行业通用计算标准,按照工业锅炉每燃烧1吨标准煤产生二氧化碳2620千克、二氧化硫8.5千克、氮氧化物7.4千克计算。



碳排放约 23119.48 万吨、二氧化硫排放约 75.01 万吨、氮氧化物排放约 65.30 万吨。

自 1994 年我国首台核电机组投运至 2018 年底，核能发电量已累计 19595.76 亿千瓦时。与燃煤发电相比，核能发电相当于减少燃烧标准煤约 6.04 亿吨，减少二氧化碳排放 15.81 亿吨、二氧化硫排放约 512.98 万吨、氮氧化物排放约 446.59 万吨。我国核电机组历年发电量及历年累计发电量情况如图 19 所示。

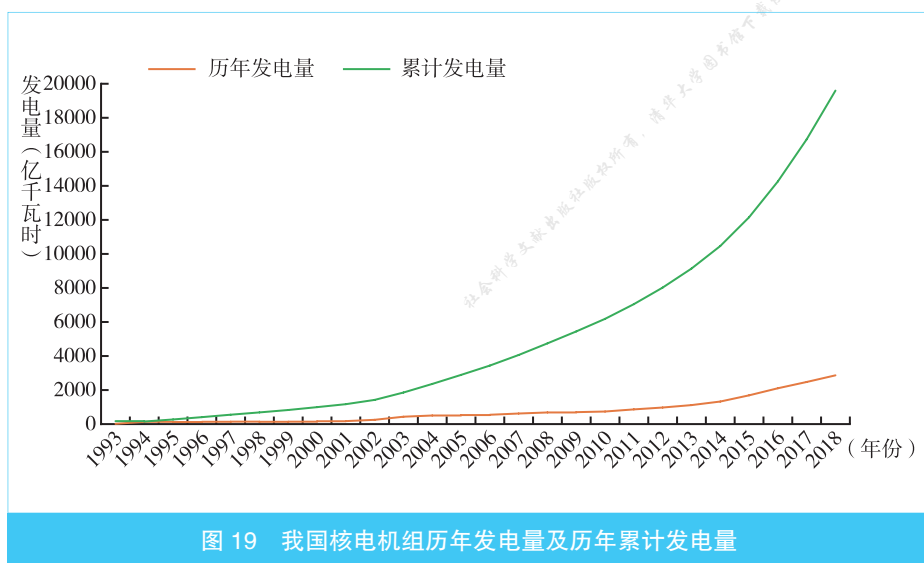
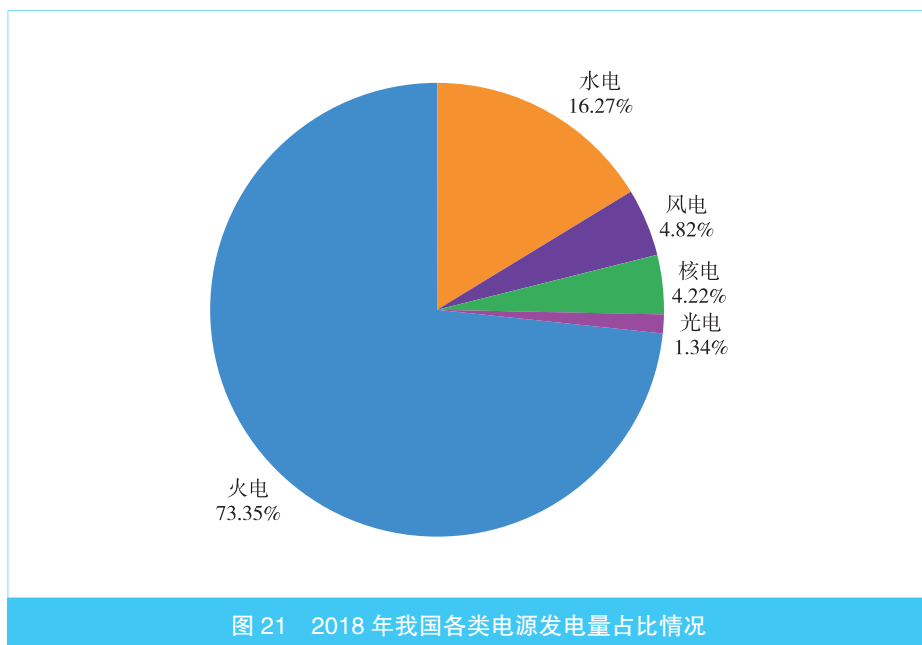
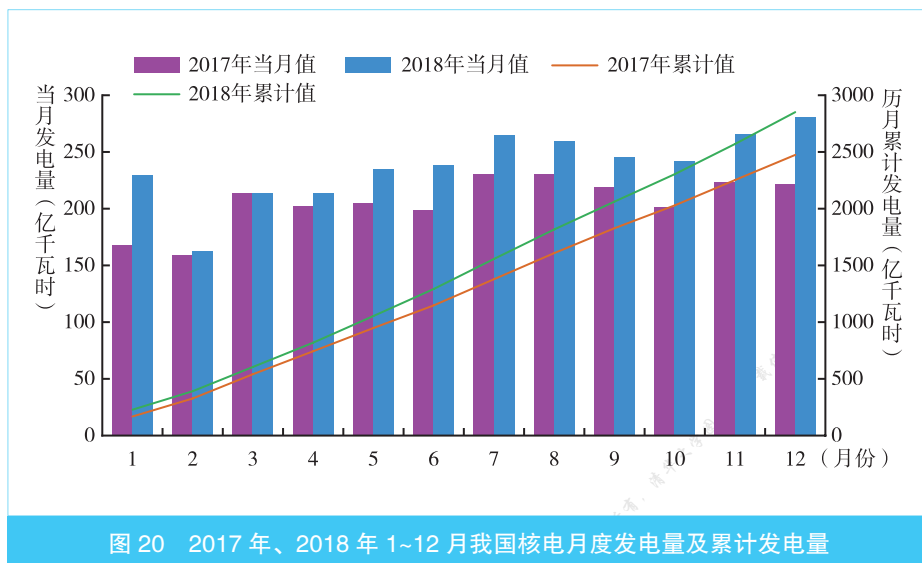


图 19 我国核电机组历年发电量及历年累计发电量

自 2010 年我国核电机组规模化投运以来，核电发电量增加较快。2010 年至 2018 年底，我国共投运核电机组 33 台，总装机容量 3551.10 万千瓦，机组数量占总投运核电机组的 75.00%，装机容量占比为 79.54%。

2018 年 1~12 月我国核电月度发电量及累计发电量如图 20 所示。虽然我国核电发电量在 2018 年创出历史新高，但是核电在电力结构中的占比仍然较低，与核电大国以及世界电力结构中核电的占比相比，我国核电占比仍然存在较大差距。2018 年，我国各类电源发电量占比情况如图 21 所示，各类电源装机容量占比情况如图 22 所示。2000~2018 年，我国电力结构变动情况如图 23 所示。



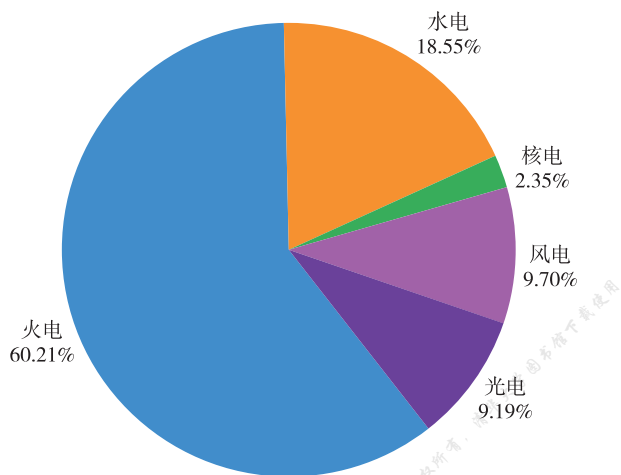


图 22 2018 年我国各类电源装机容量占比情况

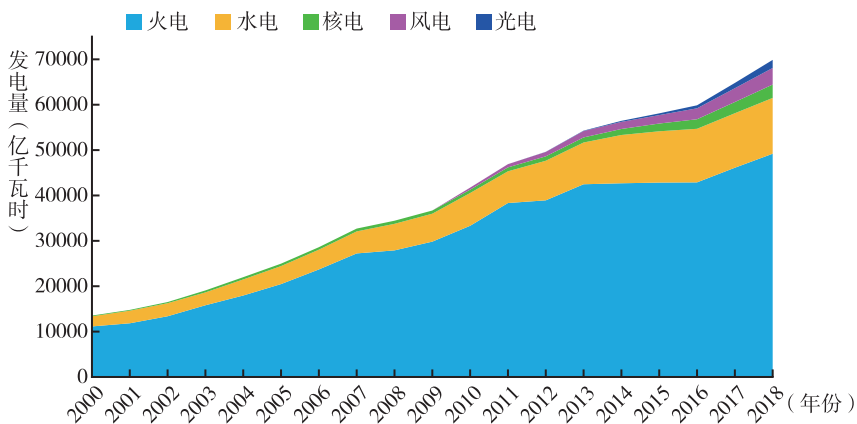


图 23 2000~2018 年我国电力结构图



2009~2018 年 10 年间，我国核能发电量与上网电量情况如表 17 及图 24 所示。

表 17 2009~2018 年我国商运核电厂发电量和上网电量^{*}

项目（单位） 核电厂 / 年度		发电量 （亿千瓦时）	上网电量 （亿千瓦时）
秦山核电厂	2009	23.62	21.95
	2010	23.24	21.69
	2011	24.98	23.33
	2012	28.44	26.59
	2013	23.03	21.59
	2014	26.23	24.41
	2015	25.71	23.94
	2016	25.80	23.97
	2017	28.14	26.16
	2018	16.25	15.09
大亚湾核电厂	2009	163.74	156.62
	2010	157.04	150.15
	2011	160.18	153.36
	2012	159.30	152.51
	2013	148.95	142.41
	2014	151.40	144.97
	2015	154.25	147.75
	2016	151.72	145.26
	2017	164.33	157.20
	2018	164.81	157.51
秦山第二核电厂	2009	99.41	92.86
	2010	119.41	112.36
	2011	146.03	136.81
	2012	201.62	188.96
	2013	203.70	191.12
	2014	202.34	189.78
	2015	202.86	190.05
	2016	208.06	195.01
	2017	211.59	198.55
	2018	208.67	195.86



续表

核电厂 / 年度		项目 (单位)	发电量 (亿千瓦时)	上网电量 (亿千瓦时)
岭澳核电厂		2009	154.67	148.25
		2010	176.59	168.47
		2011	265.09	251.53
		2012	315.13	298.62
		2013	315.48	299.15
		2014	325.53	308.85
		2015	322.78	306.03
		2016	321.30	304.33
		2017	316.09	299.38
		2018	320.37	303.86
秦山第三核电厂		2009	117.23	108.53
		2010	114.12	105.57
		2011	115.01	106.53
		2012	116.27	107.55
		2013	119.17	110.31
		2014	116.88	108.18
		2015	112.35	103.82
		2016	108.63	100.30
		2017	109.76	101.42
		2018	112.56	104.14
田湾核电厂		2009	142.67	132.81
		2010	157.02	146.71
		2011	160.72	150.16
		2012	162.41	151.9
		2013	166.86	156.10
		2014	167.67	156.92
		2015	166.17	155.61
		2016	153.73	143.54
		2017	172.80	160.71
		2018	230.65	213.43



续表

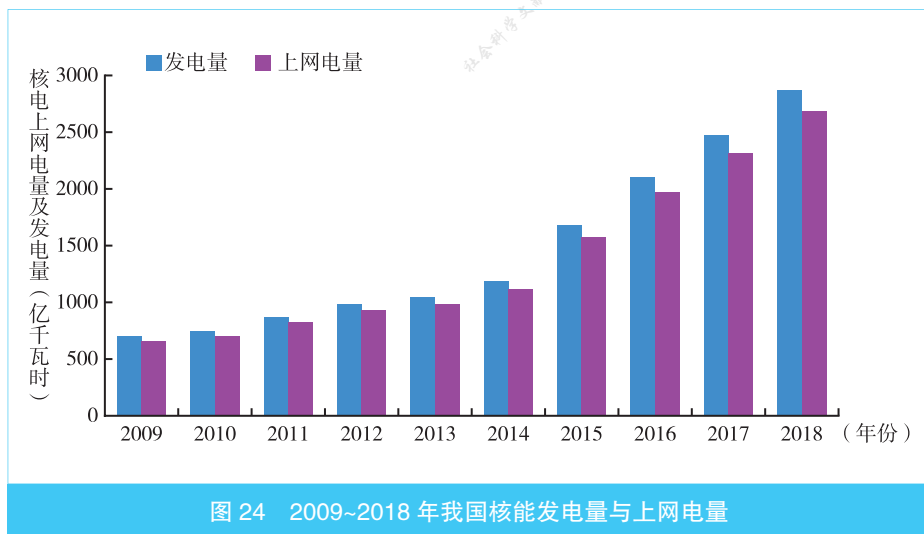
核电厂 / 年度		项目（单位）	发电量 （亿千瓦时）	上网电量 （亿千瓦时）
红沿河核电厂		2013	53.93	49.79
		2014	112.54	104.24
		2015	137.94	125.91
		2016	192.79	176.91
		2017	235.99	218.62
		2018	301.57	282.70
宁德核电厂		2013	67.20	62.20
		2014	116.24	108.02
		2015	195.85	182.26
		2016	241.29	223.36
		2017	305.08	284.70
		2018	338.26	317.32
福清核电厂		2014	10.33	9.61
		2015	83.39	76.72
		2016	156.61	144.60
		2017	248.99	232.45
		2018	305.42	286.29
阳江核电厂		2014	72.44	67.93
		2015	129.47	121.52
		2016	230.42	215.83
		2017	319.45	299.62
		2018	373.88	351.38
方家山核电厂		2014	4.20	3.96
		2015	151.68	142.63
		2016	161.15	151.52
		2017	161.07	151.51
		2018	182.90	172.34
昌江核电厂		2015	0.71	0.66
		2016	56.32	51.09
		2017	74.59	68.28
		2018	77.17	70.90



续表

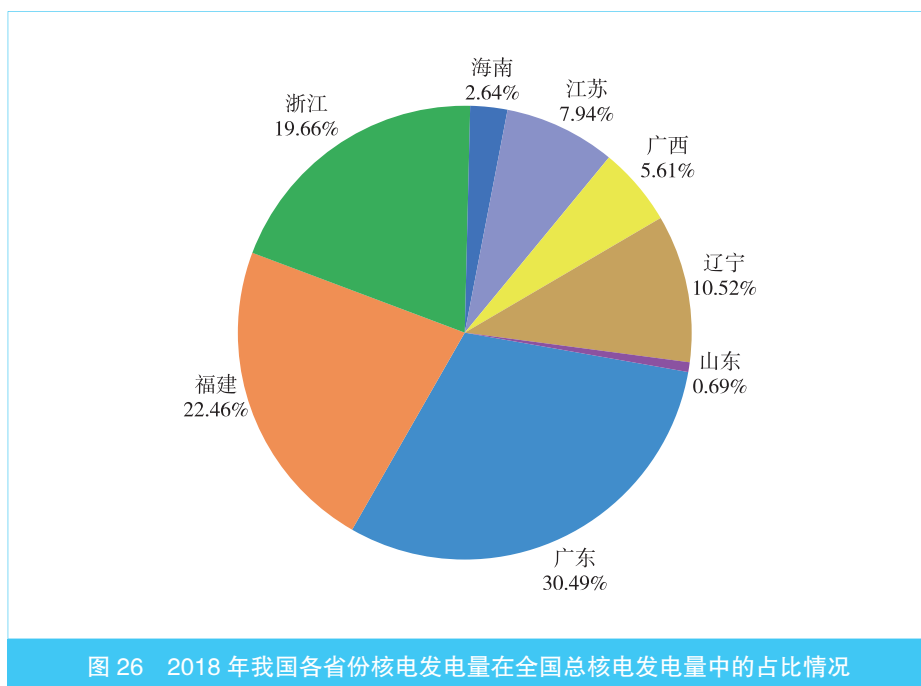
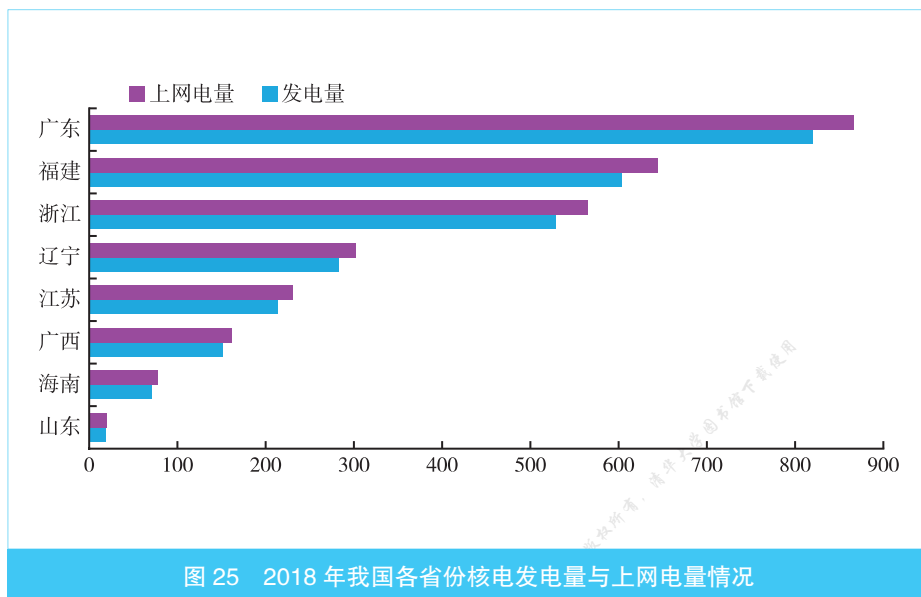
核电厂 / 年度		项目 (单位)	发电量 (亿千瓦时)	上网电量 (亿千瓦时)
防城港核电厂	2016		97.42	90.14
	2017		126.81	117.82
	2018		160.96	150.82
三门核电站	2018		44.29	41.09
海阳核电站	2018		19.94	18.49
台山核电站	2018		7.30	6.84
2018 年合计			2865.01	2688.08

注：表中数据为中国核能行业协会《2018 年 1-12 月全国核电运行情况》修正后数据；对于 2018 年新机组投入商运的核电厂，均为所属机组在 2018 年商运期间的发电量及上网电量，不包含新投运机组在试运行期间（并网后至商运前）的发电量及上网电量。



2018 年，我国各省份核电发电量与上网电量情况如图 25 所示，各省份核电发电量占全国总核电发电量的比例情况如图 26 所示，各省份核电发电量及装机容量占本省份总发电量及总装机容量的比例如图 27 所示。

2018 年，我国拥有商运核电机组的 8 个东部沿海省份中，广东省核电发



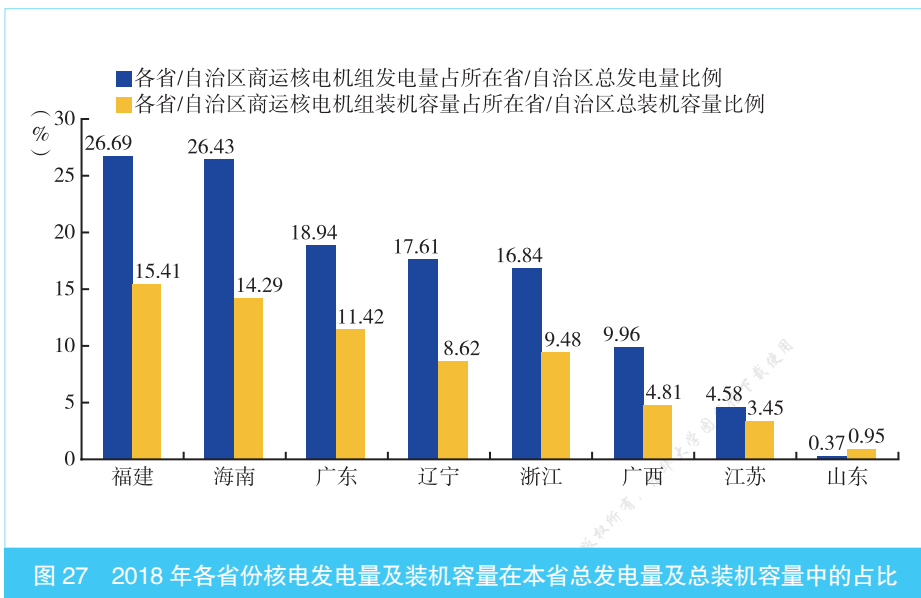


图 27 2018 年各省份核电发电量及装机容量在本省总发电量及总装机容量中的占比

电量与上网电量最多，分别为 866.36 亿千瓦时和 819.62 亿千瓦时；其次，分别是福建省、浙江省、辽宁省、江苏省、广西壮族自治区、海南省和山东省。福建、海南、广东三省的核电发电量在本省份总发电量中的占比均超过全球电力结构中核电发电量平均占比（10.3%，2017 年）。

4. 核电设备平均利用小时数情况

核电设备利用率（机组负荷因子）是指一定时期内机组的实际发电量与同一时期内额定发电量之比，用百分数表示，它既与核电设备可利用率（在 WANO 指标体系中被称为“机组能力因子”）有关，又与电网对核电输出电量的消纳状况有关。

核电设备可利用率（机组能力因子）是指一定时期内可用发电量与同一时期内额定发电量之比，用百分数表示，机组能力因子反映在优化计划停堆活动和降低非计划能量损失方面电厂管理的综合效果。

经济新常态下，电力供应能力不断提升，尤其是对清洁能源的消纳能力大幅提升，而用电增长总体放缓，电力消费结构不断调整，增长动力逐步



转化,近年来我国核电设备利用小时数呈逐年下降趋势,如图 28 所示。自 2014 年以来,核电设备平均利用小时数连续三年下降,机组参与电网调峰、应电网要求降功率甚至临停备用的情况逐渐增多,造成核电机组发电能力没有得到充分利用。自 2017 年开始,在多方面因素推动下,我国核电设备平均利用小时数实现连续两年提高,2018 年核电平均利用小时数为 7498.96 小时,^①核电设备平均利用率为 85.60%,其中 26 台核电机组设备利用率超过平均值。

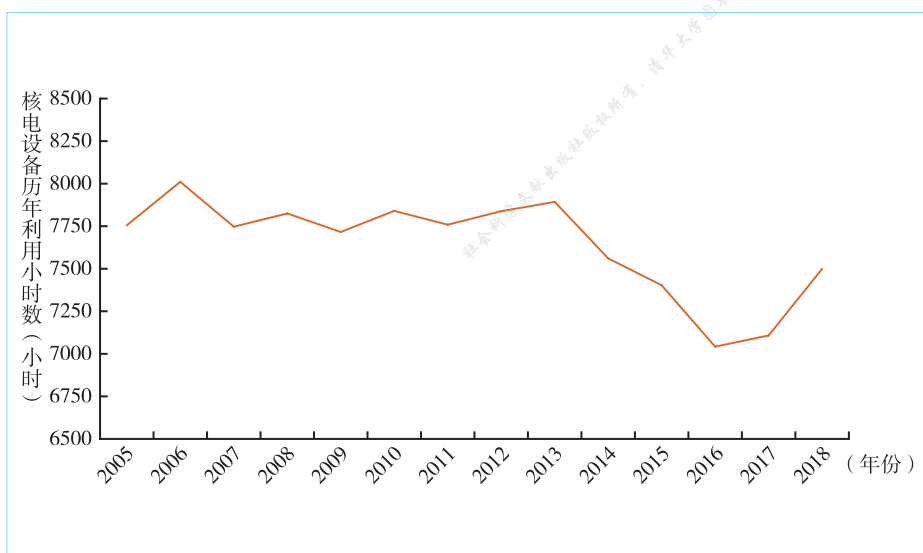


图 28 2005~2018 年我国核电设备利用小时情况

资料来源:中电联、中国核能行业协会。

2018 年,我国商运核电机组的设备利用小时数和设备利用率情况如表 18 和图 29 所示。

2009~2018 年,我国商运核电机组能力因子和机组负荷因子如表 19 所示。

^① 中国核能行业协会《2018 年 1~12 月全国核电运行情况》修正后数据。

表 18 2018 年我国商运核电机组设备利用小时数和利用率^①

核电厂 / 机组		项目	核电设备 利用小时数	核电设备 利用率
秦山核电厂	1 号机组		5241.94	59.84%
秦山第二核电厂	1 号机组		7723.08	88.16%
	2 号机组		8703.08	99.35%
	3 号机组		7707.58	87.99%
	4 号机组		7731.82	88.26%
秦山第三核电厂	1 号机组		8502.75	97.06%
	2 号机组		6958.79	79.44%
方家山核电厂	1 号机组		8544.54	97.54%
	2 号机组		8250.69	94.19%
三门核电厂	1 号机组		2412.80	98.72%
	2 号机组		1130.40	83.97%
大亚湾核电厂	1 号机组		7913.62	90.34%
	2 号机组		8836.38	100.87%
岭澳核电厂	1 号机组		7374.75	84.19%
	2 号机组		7674.75	87.61%
	3 号机组		7726.52	88.20%
	4 号机组		8053.41	91.93%
阳江核电厂	1 号机组		7541.44	86.09%
	2 号机组		8735.73	99.72%
	3 号机组		7759.67	88.58%
	4 号机组		6464.09	73.79%
	5 号机组		3926.34	95.05%
台山核电厂	1 号机组		417.14	95.02%
田湾核电厂	1 号机组		7208.49	82.29%
	2 号机组		7816.04	89.22%
	3 号机组		6105.68	79.50%
	4 号机组		234.46	99.05%
红沿河核电厂	1 号机组		8406.40	95.96%
	2 号机组		7362.42	84.04%
	3 号机组		6230.84	71.13%
	4 号机组		4955.35	56.57%



续表

核电厂 / 机组		项目	核电设备 利用小时数	核电设备 利用率
宁德核电厂	1 号机组		7400.37	84.48%
	2 号机组		7560.15	86.30%
	3 号机组		7843.89	89.54%
	4 号机组		8258.03	94.27%
福清核电厂	1 号机组		7378.33	84.23%
	2 号机组		7198.35	82.17%
	3 号机组		6844.81	78.14%
	4 号机组		6624.43	75.62%
海阳核电厂	1 号机组		1595.20	94.85%
昌江核电厂	1 号机组		6435.38	73.46%
	2 号机组		5436.92	62.07%
防城港核电厂	1 号机组		7299.26	83.32%
	2 号机组		7522.10	85.87%
合计			7498.96	85.60%

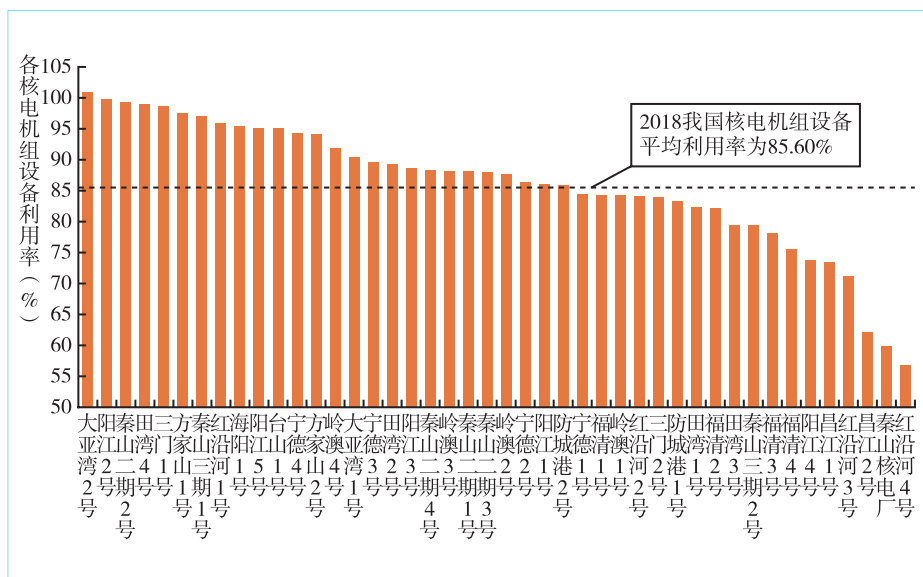


图 29 2018 年我国商运核电机组的核电设备利用率情况



表 19 2009~2018 年 10 年间我国商运核电机组能力因子与负荷因子

核电厂 / 机组		机组能力因子										机组负荷因子									
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
秦山核电厂	1 号机组	87.43	83.35	88.04	99.94	81.61	92.69	90.92	91.38	99.97	56.46	86.98	83.99	89.11	101.19	82.17	96.58	91.74	91.80	103.62	59.84
	2 号机组	91.23	89.08	99.98	83.94	86.83	99.66	78.83	86.58	99.98	89.25	90.20	88.90	99.67	83.86	86.76	100.02	79.65	87.48	101.23	90.34
秦山第二核电厂	1 号机组	99.99	92.80	86.56	99.97	85.93	75.58	98.65	87.42	88.74	99.72	99.76	93.29	86.17	100.45	86.04	75.62	99.30	88.05	89.41	100.87
	2 号机组	82.66	91.70	73.71	85.24	85.79	83.53	88.93	90.45	99.52	87.00	84.46	93.45	75.17	84.66	86.80	85.60	89.31	88.34	100.00	88.16
秦山第二核电厂	3 号机组	88.21	86.64	90.95	79.68	88.74	85.01	90.84	82.96	88.83	97.66	90.12	88.71	93.27	81.05	90.02	86.59	91.27	84.64	89.86	99.35
	4 号机组	/	/	81.60	90.10	93.50	92.00	85.60	99.81	88.42	87.93	/	/	83.12	90.65	94.63	91.14	83.53	96.92	87.96	87.99
岭澳核电厂	1 号机组	/	/	/	95.81	84.28	89.77	90.65	92.39	90.62	88.16	/	/	/	96.77	84.56	89.27	89.49	91.6	90.40	88.26
	2 号机组	90.38	93.71	91.39	93.59	82.94	90.44	86.80	99.81	89.15	87.52	89.05	92.93	91.05	91.87	82.38	88.59	86.37	99.11	84.59	84.19
岭澳核电厂	3 号机组	91.09	91.12	94.05	91.25	88.58	94.55	93.64	88.65	96.32	92.09	89.30	90.52	93.12	89.70	87.28	93.46	91.01	83.94	93.22	87.61
	4 号机组	/	/	72.06	88.45	90.11	89.42	90.10	91.62	86.99	89.32	/	98.75	71.14	86.30	88.78	87.88	88.90	89.23	84.19	88.21
秦山第三核电厂	1 号机组	/	/	99.58	80.60	88.95	90.31	90.29	87.84	91.33	98.34	/	/	98.78	78.52	88.18	88.35	88.69	80.72	85.97	91.94
	2 号机组	91.93	89.73	92.53	96.26	89.91	96.16	83.17	94.91	79.83	99.98	93.88	91.92	94.87	97.43	88.64	94.79	80.67	92.76	76.97	97.07
秦山第三核电厂	3 号机组	95.37	92.07	91.02	90.46	99.86	90.14	97.47	79.28	99.96	82.62	97.30	94.19	92.69	91.67	98.23	88.48	95.50	77.12	95.16	79.44
	4 号机组	74.12	87.02	86.55	86.78	90.70	89.83	91.07	81.87	92.05	90.05	77.84	86.92	86.16	86.72	90.60	89.64	90.81	81.59	91.10	82.29
田湾核电厂	1 号机组	80.70	82.28	87.05	87.77	89.14	91.11	88.22	87.23	99.90	92.50	85.02	82.18	86.92	87.71	89.10	90.94	88.15	85.09	95.00	89.23
	2 号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	99.04	/	/	/	/	/	/	/	/	/	79.50
田湾核电厂	3 号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
	4 号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	97.81



续表

核电厂/机组	年度	机组能力因子										机组负荷因子									
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
红沿河核电厂	1号机组	/	/	/	/	99.90	70.04	87.75	87.19	88.92	99.98	/	/	/	/	96.33	67.13	82.57	66.36	79.41	95.96
	2号机组	/	/	/	/	/	75.69	65.53	87.49	98.08	89.80	/	/	/	/	/	74.80	39.26	57.56	63.77	84.04
	3号机组	/	/	/	/	/	/	100.00	94.90	83.07	91.17	/	/	/	/	/	/	24.44	59.90	61.46	71.13
	4号机组	/	/	/	/	/	/	/	99.98	85.76	85.16	/	/	/	/	/	/	/	49.02	36.14	56.57
宁德核电厂	1号机组	/	/	/	/	99.95	57.31	88.22	98.13	83.66	88.50	/	/	/	/	98.51	56.70	85.93	76.44	79.86	84.48
	2号机组	/	/	/	/	/	99.83	80.73	86.38	98.80	89.13	/	/	/	/	/	98.66	73.72	65.46	91.11	86.30
	3号机组	/	/	/	/	/	/	94.37	80.08	95.62	92.54	/	/	/	/	/	/	81.67	68.91	88.20	89.54
	4号机组	/	/	/	/	/	/	/	99.98	84.38	99.99	/	/	/	/	/	/	/	92.47	60.63	94.27
福清核电厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	74.09	99.31	89.46	87.56	/	/	/	/	/	/	69.05	75.84	83.69	84.28
	2号机组	/	/	/	/	/	/	99.06	81.55	86.73	85.47	/	/	/	/	/	/	89.09	69.11	82.20	82.02
	3号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	81.72	86.27	/	/	/	/	/	/	/	/	66.36	78.14
	4号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	100.00	78.22	/	/	/	/	/	/	/	/	99.93	75.60
阳江核电厂	1号机组	/	/	/	/	/	99.93	79.45	81.56	99.61	88.23	/	/	/	/	/	98.78	78.86	79.16	97.10	86.09
	2号机组	/	/	/	/	/	/	99.64	77.68	87.97	99.98	/	/	/	/	/	/	99.94	77.29	84.17	99.72
	3号机组	/	/	/	/	/	/	/	91.24	86.49	91.61	/	/	/	/	/	/	/	85.11	83.00	88.58
	4号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	90.00	82.42	/	/	/	/	/	/	/	/	89.41	73.79
	5号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	99.60	/	/	/	/	/	/	/	/	/	95.05



续表

年度 核电厂 / 机组		机组能力因子										机组负荷因子									
		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
方家山核 电厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	83.68	91.23	89.52	99.60	/	/	/	/	/	/	80.03	87.11	84.98	97.54
	2号机组	/	/	/	/	/	/	93.10	86.88	85.72	98.08	/	/	/	/	/	/	89.24	81.36	83.86	94.18
三门核电 厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	99.98	/	/	/	/	/	/	/	/	/	98.60
	2号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	83.84	/	/	/	/	/	/	/	/	/	83.88
海阳核电 厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	94.28	/	/	/	/	/	/	/	/	/	94.12
台山核电 厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	/	96.47	/	/	/	/	/	/	/	/	/	94.97
昌江核电 厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	100.00	93.96	79.25	87.39	/	/	/	/	/	/	65.95	70.24	65.19	73.23
	2号机组	/	/	/	/	/	/	/	/	87.78	73.85	/	/	/	/	/	/	/	/	65.80	61.83
防城港核 电厂	1号机组	/	/	/	/	/	/	/	99.02	76.19	89.60	/	/	/	/	/	/	/	81.21	59.05	83.32
	2号机组	/	/	/	/	/	/	/	99.95	80.70	99.98	/	/	/	/	/	/	/	84.12	74.25	85.87

注：“/”为机组未投入商业运行或无统计数据。

5. 在运核电机组保持安全稳定运行

2018 年，全国核电机组继续保持安全稳定运行，取得良好业绩。44 台商运核电机组和 1 台已并网机组（海阳核电厂 2 号机组）没有发生 1 级及以上运行事件，发生 32 起 0 级运行事件（国际核事故分级表把核事故共分为 7 级，其中将对安全没有影响的事件统计为 0 级，影响最大的事故评定为 7 级，1 级到 3 级被称为核事件，4 级到 7 级被称为核事故），主要运行技术指标保持国际前列。各运行核电厂未发生较大及以上安全生产事件、环境事件、辐射污染事件，未发生火灾爆炸事故，未发生职业病危害事故。各运行核电厂放射性流出物的排放量低于国家标准限值，环境空气吸收剂量率被控制在当地本底辐射水平涨落范围内。环境监测结果表明，核电厂对周围环境没有带来不良影响。

2018 年，与世界核电运营者协会（WANO）规定的性能指标对照，我国运行机组 80% 的指标优于中值水平，70% 达到先进值。2018 年，全球满足 WANO 综合指数计算条件的 391 台机组中，53 台机组的综合指数为满分 100 分，其中我国有 12 台获得满分（我国共有 36 台机组满足 WANO 综合指数计算条件），分别是：大亚湾核电厂 1、2 号机组、秦山第二核电厂 4 号机组、岭澳核电厂 2、4 号机组，田湾核电厂 2 号机组、方家山核电厂 1、2 号机组、红沿河核电厂 1、2 号机组、宁德核电厂 3 号机组、阳江核电厂 4 号机组。

目前，WANO 评价核电机组关键业绩性能的指标有 14 项，分别是机组能力因子、非计划能力损失因子、强迫损失率、电网相关损失因子、临界 7000 小时非计划自动停堆次数、临界 7000 小时非计划停堆次数、高压安注系统性能、辅助给水系统性能、应急交流电系统性能、燃料可靠性、化学指标、集体辐照剂量、工业安全事故率和承包商工业安全事故率。

（二）核电工程建设

2018 年，我国在建核电工程整体上稳步推进，各在建核电项目在安全、质量、进度、投资、技术、环境保护等方面均得到有效控制。AP1000 和 EPR 全球首堆建成投产，核电建设全面进入三代技术时代。全年新投产核电机组 7 台，分别是阳江核电厂 5 号机组，海阳核电厂 1 号机组，三门核电厂 1、2 号



机组，台山核电厂 1 号机组，田湾核电厂 3、4 号机组。

截至 2018 年 12 月底，我国在建核电机组 13 台，总装机容量 1403 万千瓦，在建的核电机组包括红沿河核电厂 5、6 号机组，福清核电厂 5、6 号机组，阳江核电厂 6 号机组，海阳核电厂 2 号机组，台山核电厂 2 号机组，防城港核电厂 3、4 号机组，田湾核电厂 5、6 号机组，石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程和霞浦示范快堆工程。根据中国电力企业联合会《2018 年全国电力工业统计快报》，2018 年核电建设工程投资完成 437 亿元（2017 年完成 454 亿元），同比下降 3.8%。国内在建核电项目情况如表 20 所示。

表 20 国内在建核电项目（截至 2018 年 12 月 31 日）

序号	核电机组	堆型	额定容量 MWe	开工时间	备注
1	辽宁红沿河二期 5 号	压水堆 ACPR1000	1118.79	2015.03.29	二代改进型
2	辽宁红沿河二期 6 号		1118.79	2015.07.24	
3	福建福清 5 号	压水堆华龙一号	1150	2015.05.07	华龙技术示范
4	福建福清 6 号		1150	2015.12.22	
5	广东阳江核电厂 6 号	压水堆 ACPR1000	1086	2013.12.23	二代改进型
6	山东海阳一期 2 号	压水堆 AP1000	1250	2010.06.20	三代自主化依托项目
7	广东台山一期 2 号	压水堆 EPR	1750	2010.04.15	引进法国
8	广西防城港二期 3 号	压水堆华龙一号	1180	2015.12.23	华龙技术示范
9	广西防城港二期 4 号		1180	2016.12.24	
10	江苏田湾三期 5 号	压水堆 M310 改进	1118	2015.12.27	二代改进型
11	江苏田湾三期 6 号		1118	2016.09.07	
12	山东石岛湾 1 号	高温气冷堆	211	2012.12.09	国家重大科技专项
13	福建霞浦示范快堆	钠冷快堆	600	2017.12.29	快堆示范工程
合计	13 台机组，1403 万千瓦				

1. 在建机组 2018 年建设情况

（1）阳江核电厂 5、6 号机组

1）项目概况

阳江核电厂位于广东省阳江市东平镇，是国家“十一五”规划重点能源建设项



目，采用我国自主品牌的压水堆核电技术——CPR1000——及其改进型技术，连续建设6台百万千瓦级核电机组，是目前我国一次核准机组数量最多和规模最大的核电项目。阳江核电站1、2号机组采用了CPR1000，3、4号机组采用了CPR1000+技术，5、6号机组采用基于CPR1000+技术改进的ACP1000技术。具体情况见表21。

表 21 阳江核电厂 5、6 号机组项目概况

业主单位	阳江核电有限公司
主要股东	中国广核电力股份有限公司、广东核电投资有限公司、广东省粤电集团有限公司、中广核一期投资基金有限公司
厂址	广东省阳江市东平镇沙环村
机组机型	ACP1000
设计功率	1086MWe
开工日期	5号机组：2013年09月18日 6号机组：2013年12月23日
计划完工日期	5号机组：2018年11月15日 6号机组：2019年07月15日

2) 2018 年项目进展

具体见表22。

表 22 阳江核电厂 5、6 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
5号机组	开始装料	2018.04.20
	首次临界	2018.05.16
	首次并网	2018.05.23
	具备商运条件	2018.07.12
6号机组	冷试	2018.10.23

(2) 红沿河核电厂 5、6 号机组

1) 项目概况

辽宁红沿河核电站位于瓦房店市红沿河镇，是国家“十一五”期间首



个批准建设的核电项目，是中国首次一次核准 4 台百万千瓦级核电机组标准化、规模化建设的核电项目，是东北地区第一座核电站。厂址规划容量为 6 台百万千瓦级压水堆核电机组，一次规划，分期建设，一期工程建设 4 台 CPR1000 型核电机组。红沿河核电一期工程于 2007 年 8 月开工建设，目前均已投入商运；二期工程（5、6 号机组）作为同一厂址的扩建工程，采用 ACPR1000 技术方案，扩建两台百万千瓦级机组。具体情况见表 23。

表 23 红沿河核电厂 5、6 号机组项目概况

业主单位	辽宁红沿河核电有限公司
主要股东	中广核核电投资有限公司、中电投核电有限公司、大连市建设投资集团有限公司
厂址	辽宁省瓦房店市红沿河镇东岗村
机组机型	ACPR1000
设计功率	1118.79MWe
开工日期	5 号机组：2015 年 03 月 29 日 6 号机组：2015 年 07 月 24 日
计划完工日期	5 号机组：2020 年 05 月 31 日 6 号机组：2021 年 01 月 31 日

2) 2018 年项目进展

截至 2018 年 10 月底，二期工程一级进度关键里程碑已完成 20 项（共计 39 项），累计完成率 51.3%，二级（支付）里程碑已完成 219 项（共计 400 项），累计完成率 54.8%。工程总投资完成 140.79 亿元，累计完成率 49.75%。5 号机组核岛土建工程总体完成约 98.5%，核岛安装完成约 54.2%；常规岛土建工程总体完成约 95.3%，常规岛安装完成约 10.7%；系统调试完成约 5.1%。6 号机组核岛土建工程总体完成约 94.5%，核岛安装完成约 29.4%；常规岛土建工程总体完成约 83.8%，常规岛安装完成约 1.1%；主要 BOP 配套工程土建总体完成约 77.9%，安装完成约 17.8%（参见表 24）。

（3）田湾核电厂 3~6 号机组

1) 项目概况

田湾核电厂位于江苏省连云港市连云区宿城乡，规划容量为 8 台百万千



表 24 红沿河核电厂 5、6 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
5 号机组	反应堆压力容器（RPV）完成引入就位	2018.04.08
	主变安装开始	2018.05.09
	联合泵站（PX）5 号机组部分安装开始	2018.06.09
	三台蒸汽发生器（SG）完成引入就位	2018.06.10
	稳压器（PRZ）完成引入就位	2018.08.07
	核岛主设备全部到货并完成就位	2018.08.07
	核岛仪控系统 KCP1 调试可用	2018.08.23
	汽轮机组低压缸安装开始	2018.08.31
	一回路主管道焊接完成	2018.10.06
6 号机组	反应堆厂房预应力张拉开始	2018.06.14
	除氧器完成吊装就位	2018.07.04
	反应堆厂房环吊安装完成并调试可用	2018.09.02
	常规岛主行车安装完成并调试可用	2018.10.13
	蒸汽发生器（SG1/SG2）到货	2018.11.02
	首台蒸汽发生器（SG1）引入就位	2018.11.11

瓦级压水堆核能发电机组，统一规划，分期建设。1~4 号机组为俄罗斯 VVER-1000 压水堆核电机组，均已建成投产。5、6 号机组为 M310 改进型核电机组，正在建设中，计划分别于 2020 年底和 2021 年 6 月投入商业运行。田湾核电厂 7、8 号机组工程规划建设 2 台百万千瓦级压水堆核电机组及其配套辅助设施，采用三代核电技术 VVER-1200 机型，计划于 2020 年 12 月 31 日开工浇灌第一罐混凝土，建设周期 65 个月，两台机组间隔 10 个月，计划分别在 2026 年 5 月 31 日和 2027 年 3 月 31 日建成投产。3~6 号机组情况见表 25。

2) 2018 年项目进展

具体见表 26。



表 25 田湾核电厂 3~6 号机组项目概况

业主单位	江苏核电有限公司
主要股东	中国核能电力股份有限公司、上海禾曦能源投资有限公司、江苏省国信资产管理集团有限公司
厂址	江苏省连云港市连云区田湾
机组机型	VVER-1000（3、4 号机组）、M310 改进型（5、6 号机组）
设计功率	1126MWe（3、4 号机组）、1118MWe（5、6 号机组）
开工日期	3 号机组：2012 年 12 月 27 日 4 号机组：2013 年 09 月 27 日 5 号机组：2015 年 12 月 27 日 6 号机组：2016 年 09 月 07 日
计划完工日期	3 号机组：2018 年 02 月 27 日 4 号机组：2018 年 12 月 27 日 5 号机组：2020 年 12 月 31 日 6 号机组：2021 年 10 月 07 日

表 26 田湾核电厂 3~6 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
3 号机组	具备商运条件	2018.02.15
4 号机组	首次装料	2018.09
	首次临界	2018.09.30
	首次并网	2018.10.27
	具备商运条件	2018.12.22
5 号机组	核岛厂房预应力施工完成	2018.11
	常规岛发电机定子已经就位	
	汽轮机外 3 台低压外缸均已焊接完成	
	PX 泵房吊车已可用	
6 号机组	常规岛主行车可用	2018.11.22
	除氧器已就位	
	环吊可用	2018.11.30
	压力容器保温支架完成	
	设备闸门已完成焊接、提升	



（4）三门核电厂 1、2 号机组

1）项目概况

三门核电项目是国务院于 2004 年 7 月 21 日批准建设的我国首个三代核电自主化依托项目。三门核电工程采用西屋公司 AP1000 技术建设，由美国西屋公司（Westinghouse Electric Co.）和绍尔工程公司（Shaw Group Inc.）联合体及国家核电技术公司负责实施工程设计、设备供货、工程建造和项目管理。

详情见表 27。

表 27 三门核电厂 1、2 号机组项目概况

业主单位	三门核电有限公司
主要股东	中国核能电力股份有限公司、浙江浙能电力股份有限公司、中电投核电有限公司、华电福新能源股份有限公司、中核投资有限公司
厂址	浙江省三门县
机组机型	AP1000
设计功率	1250MWe
开工日期	1 号机组：2009 年 04 月 19 日 2 号机组：2009 年 12 月 15 日
计划完工日期	1 号机组：2013 年 11 月 30 日（合同时间） 2 号机组：2014 年 09 月 30 日（合同时间）

2）2018 年项目进展

具体见表 28。

表 28 三门核电厂 1、2 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
1 号机组	开始装料	2018.04.25
	一体化顶盖吊装就位	2018.05.03
	首次临界	2018.06.21
	首次并网	2018.06.30
	首次满功率运行	2018.08.14
	具备商运条件	2018.09.21



续表

机组	工程节点	完成时间
2 号机组	完成热试	2018.01.31
	开始装料	2018.07.05
	首次临界	2018.08.17
	首次并网	2018.08.24
	具备商运条件	2018.11.05

（5）海阳核电厂 1、2 号机组

1）项目概况

海阳核电厂位于海阳市留格庄镇原冷家庄和董家庄，地处三面环海的岬角东端，占地面积 2256 亩。海阳核电项目规划建设 6 台百万千瓦级核电机组，并预留两台扩建场地，一期工程 1、2 号机组是 AP1000 核电机组，也是我国三代核电自主化依托项目。详见表 29。

表 29 海阳核电厂 1、2 号机组项目概况

业主单位	山东核电有限公司
主要股东	中电投核电有限公司、山东省国际信托有限公司、烟台蓝天投资控股有限公司、中国国电集团公司、中国核能电力股份有限公司、华能核电开发有限公司
厂址	山东省海阳市大辛家
机组机型	AP1000
设计功率	1250MWe
开工日期	1 号机组：2009 年 09 月 24 日 2 号机组：2010 年 06 月 20 日
计划完工日期	1 号机组：2014 年 05 月 31 日（合同时间） 2 号机组：2015 年 03 月 31 日（合同时间）

2）2018 年项目进展

具体见表 30。



表 30 海阳核电厂 1、2 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
1 号机组	开始装料	2018.06.21
	首次临界	2018.08.08
	首次并网	2018.08.17
	首次满功率运行	2018.09.18
	具备商运条件	2018.10.22
2 号机组	完成热试	2018.05.26
	开始装料	2018.08.08
	首次临界	2018.09.29
	首次并网	2018.10.13
	首次满功率运行	2018.11.30

（6）台山核电厂 1、2 号机组

1）项目概况

广东台山核电厂位于广东省台山市赤溪镇，台山厂址规划建设 4 台 175 万千瓦压水堆机组，并留有后续两台百万千瓦机组扩建余地。其中，一期工程采用 EPR 三代核电技术，建设两台单机容量为 175 万千瓦的压水堆核电机组，是继芬兰奥基洛托 3 和法国弗拉芒维尔 3 项目之后，全球第三个开工建设的 EPR 项目。1 号机组于 2009 年 11 月 18 日开工建设，2 号机组于 2010 年 4 月 15 日开工建设。详见表 31。

表 31 台山核电厂 1、2 号机组项目概况

业主单位	台山核电合营有限公司
主要股东	中国广核电力股份有限公司、广东核电投资有限公司、法国电力国际公司、台山核电产业投资有限公司、EDF（中国）投资有限公司
厂址	广东省台山市赤溪镇
机组机型	EPR
设计功率	1750MWe
开工日期	1 号机组：2009 年 11 月 18 日 2 号机组：2010 年 04 月 15 日
计划完工日期	1 号机组：2017 年 06 月 30 日（合同时间） 2 号机组：2017 年 12 月 31 日（合同时间）



2) 2018 年项目进展

具体见表 32。

表 32 台山核电厂 1、2 号机组 2018 年工程节点		
机组	工程节点	完成时间
1 号机组	开始装料	2018.04.10
	首次临界	2018.06.06
	首次并网	2018.06.29
	具备商运条件	2018.12.14
2 号机组	完成冷试	2018.07.03

(7) 福清核电厂 5、6 号机组

1) 项目概况

福清核电厂位于福建省福清市三山镇前薛村的岐尾山前沿，东、南、西三面环海，东北侧与陆地连接。福建福清核电有限公司成立于 2006 年 5 月 16 日，项目规划建设 6 台百万千瓦级压水堆核电机组，一次规划，分期连续建设。1~4 号机组采用二代改进型核电机组，5、6 号机组采用自主知识产权第三代核电技术“华龙一号”。5 号机组于 2015 年 5 月 7 日开工建设，6 号机组于 2015 年 12 月 22 日开工建设，福清核电项目将全面验证“华龙一号”先进核电技术，完善自主三代核电的标准体系和品牌，为后续“华龙一号”核电工程建设和运营提供经验和借鉴。详见表 33。

表 33 福清核电厂 5、6 号机组项目概况	
业主单位	福建福清核电有限公司
主要股东	中国核能电力股份有限公司、华电福新能源股份有限公司、福建省投资开发集团有限责任公司
厂址	福建省福州市福清市三山镇前薛村
机组机型	华龙一号（5、6 号机组）
设计功率	1150MWe（5、6 号机组）
开工日期	5 号机组：2015 年 05 月 07 日 6 号机组：2015 年 12 月 22 日
计划完工日期	5 号机组：2020 年 07 月 08 日 6 号机组：2021 年 04 月 30 日



2) 2018 年项目进展

具体见表 34。

表 34 福清核电厂 5、6 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
5 号机组	220 千伏倒送电完成	2018.03
	主管道冷热段焊接完成	2018.05
	上部堆内构件首次入堆完成	2018.11
	常规岛凝汽器具备汽轮机安装条件	
	泵房 B 列实现进水	
6 号机组	内穹顶吊装完成	2018.03
	龙门吊可用	2018.10
	主泵泵壳全部吊装就位	2018.11
	压力容器就位	2018.12
	内穹顶封顶完成	
	常规岛汽机运转层混凝土浇筑完成	

(8) 防城港核电厂 3、4 号机组

1) 项目概况

防城港核电站位于广西壮族自治区防城港市企沙半岛东侧，是我国在西部地区和少数民族地区开工建设的首个核电项目。防城港核电站规划建设 6 台百万千瓦级核电机组，其中一期工程采用 CPR1000 技术，建设两台单机容量为 108 万千瓦的压水堆核电机组。防城港核电站一期工程 1 号机组于 2010 年 7 月 30 日开工建设，2016 年 1 月 1 日正式投入商业运行；2 号机组于 2010 年 12 月 28 日正式开工建设，2016 年 10 月 1 日投入商业运行。防城港核电二期工程采用具有我国自主知识产权的三代核电技术——华龙一号，其中 3 号机组于 2015 年 12 月 23 日正式开工建设，4 号机组于 2016 年 12 月 24 日开工建设。详见表 35。



表 35 防城港核电厂 3、4 号机组项目概况

业主单位	广西防城港核电有限公司
主要股东	中广核集团有限公司、广西投资集团有限公司
厂址	广西壮族自治区防城港市光坡镇
机组机型	CPR1000（1、2 号机组）、“华龙一号”（3、4 号机组）
设计功率	1086MWe（1、2 号机组）、1180MWe（3、4 号机组）
开工日期	3 号机组：2015 年 12 月 23 日 4 号机组：2016 年 12 月 24 日
计划完工日期	3 号机组：2021 年 10 月 31 日 4 号机组：2022 年 06 月 30 日

2) 2018 年项目进展

具体见表 36。

表 36 防城港核电厂 3、4 号机组 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
3 号机组	穹顶吊装	2018.05.23
	环吊可用	2018.10.24
4 号机组	穹顶现场拼接开始	2018.05.28

(9) 石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程

1) 项目概况

华能山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程（以下简称示范工程）是在我国“863 计划”科技项目清华大学 10MWe 球床高温气冷实验堆基础上的产业化项目，是华能集团联合中国核工业建设集团公司、清华大学建设的我国具有自主知识产权的核电工程，项目于 2006 年 2 月被列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020）》中的十六个重大专项。2008 年 2 月 15 日，国务院常务会议批准了《高温气冷堆核电站重大专项总体实施方案》，重大专项进入启动实施阶段。详见表 37。



表 37 石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程项目概况

业主单位	华能山东石岛湾核电有限公司
主要股东	中国华能集团公司、中国核工业建设集团公司、清华控股有限公司
厂址	山东省荣成市石岛管理区宁津街道办事处辖区
机组堆型	高温气冷堆
设计功率	211MWe
开工日期	2012 年 12 月 09 日
计划完工日期	2017 年 12 月 09 日

2) 2018 年项目进展

2018 年,石岛湾核电厂高温气冷堆核电站工程设计与技术研发基本完成,土建工作基本结束,安装工作全面铺开。设备制造方面,除第二台蒸汽发生器正在制造外(计划 2019 年 3 月交货),其他设备基本完成制造(详见表 38)。系统调试工作按计划开展,现场水、电、气等相关系统均已调试可用,正在进行氦净化系统、氦供应与贮存系统等调试工作。首次装料批准书申请文件审评工作按计划进行,2018 年 9 月通过了核材料进场许可证现场核准。燃料元件已累计加工完成 63.5 万个。截至 2018 年 10 月底,共计 65 名操纵员通过取照考试,首批 43 名高级操纵员通过取照考试。

表 38 石岛湾核电厂高温气冷堆核电站 2018 年工程节点

机组	工程节点	完成时间
石岛湾高温气冷堆	2 号堆压力容器顶盖及上部构件安装完成	2018.03.31
	2 号堆燃料装卸系统安装完成	2018.05.30
	1 号堆陶瓷堆内构件安装完成	2018.07.03
	循环水系统具备通水条件	2018.08.15
	常规岛二回路水系统具备化学清洗条件	2018.09.30

(10) 霞浦示范快堆工程

1) 项目概况

示范快堆项目位于福建省宁德市霞浦县长表岛。600MWe 示范快堆工程



是我国核能“三步走”发展战略的第二步必须突破的一项重要技术，对于推进核燃料闭式循环、促进我国核能可持续发展和地方经济建设具有重要意义。示范快堆工程采用单机容量 60 万千瓦的钠冷快中子反应堆，计划于 2023 年建成。详见表 39。

表 39 霞浦示范快堆工程项目概况

业主单位	中核霞浦核电有限公司
主要股东	中国核能电力股份有限公司、福建福能股份有限公司、华能核电开发有限公司、中国长江电力股份有限公司和宁德市国有资产投资经营有限公司
厂址	福建省宁德市霞浦县长表岛
机组堆型	钠冷快堆
设计功率	600MWe
开工日期	2017 年 12 月 29 日

2) 2018 年项目进展

霞浦示范快堆 1 号工程处于土建阶段,2018 年 5 月汽机厂房浇筑第一罐砼,大件码头具备使用条件; 6 月反应堆厂房 0.0 米板施工完成, 11 月 5 米板施工完成, 目前正在进行 9.5 米板施工。12 月, 蒸汽发生器厂房许可证条件获得批复; 第一批预装设备 3 台氩气衰变罐运抵工程现场并吊装就位。

2. AP1000 全球首堆工程建设情况

(1) AP1000 技术引进背景

三代核电自主化决策,是在 2003~2007 年做出的。当时,我国核电产业经过 30 多年的发展,已经具备一定的基础。2002 年底,原国家计划发展委员会依据国民经济快速发展和应对全球气候变化的需要,向国务院上报了《关于适度发展核电,开展核电自主化工作的请示》,得到了国务院领导的肯定。

国务院成立了国家核电自主化工作领导小组,由曾培炎同志任组长,先后召开了 12 次领导小组会议,并 4 次向国务院常务会议汇报。在领导小组的领导下,几百位专家经过两年多的深入工作,经过深入调研和充分论证,2006 年底向党中央报告了三代核电国际招标结论:美国西屋公司联队的 AP1000 方案在技术先进性与成熟性、潜在的经济性、技术转让条件和与中方



合作的共赢条件等方面均有明显的优势。

2006年12月,中美两国政府签署了合作备忘录,2007年7月,企业签署了总金额为4亿美元的技术转让合同和27亿美元的核岛设计和部分主设备采购合同。AP1000技术引进成为我国能源领域最大、最完整的一次技术引进。

2006年2月9日,国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》,确定了包括“大型先进压水堆及高温气冷堆核电站”在内的16个国家科技重大专项。同月,国务院批准由国家核电牵头实施大型先进压水堆核电站重大专项,在引进AP1000的基础上形成具有自主知识产权的CAP1400核电技术并建设示范工程。

2011年3月11日,日本福岛核电站发生重大核事故。国务院及时做出了“立即组织对中国核设施进行全面安全检查、切实加强正在运行核设施的安全管理、全面审查在建核电站、严格审批新上核电项目”四项决定。经过一年多的安全检查和研究论证,2012年5月和10月,国务院两次常务会议分别审议通过了《核设施安全检查报告》、《核安全规划》、《核电安全规划(2011-2020)》和《核电中长期发展规划(2011-2020年,调整)》等四个文件,明确了“按照全球最高安全要求新建核电项目,新建核电机组必须符合三代安全标准”等核电发展原则和要求。

(2) 首堆建设厂址概述

三门核电站位于浙江省台州市三门县境内,坐落在健跳镇猫头山半岛上,北距杭州市171公里,东邻宁波市83公里,西靠台州市51公里,南离温州市150公里。三门核电厂址自然条件优越,三面环海,西侧有山体形成的自然屏障,厂区地坪标高12米,占地面积3000亩左右。三门核电厂址的安全性体现在以下两方面。

1) 三门核电厂地区不具备发生大海啸的条件。三门核电厂地区海域位于宽缓的大陆架上,厂址区100千米内海域水深为0~100米,不具备发生大海啸的水深条件(1000米以上);三门核电厂区域没有大的地质断裂带,不具备发生大海啸的地表断裂条件;三门核电厂区域不存在发震构造,不具备发生大海啸的高强度地震条件;三门核电厂沿海自公元708年有地震历史记载



以来,没有地震海啸或疑似地震海啸灾害的记载,三门核电厂区域不存在发生地震海啸的地质条件及受远海地震海啸影响的可能性,琉球至台湾的第一岛链、冲绳海沟和宽缓的大陆架是浙江沿海核电厂址天然的海啸屏障。

2) 三门核电厂的地质条件和抗震设计。以三门核电厂址为中心、以 25 千米为半径的近区域范围内不存在发震构造;三门核电厂址 5 千米附近的陆域(含海岛)部分不存在能动断层;三门核电站实际厂址的极限安全地震(SL-2)为 0.15g,而三门核电站设计选用的安全停堆地震(SSE)为 0.3g,具有较大的安全裕度;三门核电厂址属于极硬质岩石场地,地质条件非常好,进一步保障了三门核电厂的抗震能力。

(3) 首堆建设工程项目管理模式介绍

三门核电一期工程项目管理模式(见图 30)采用业主负责总体项目管理、核岛总包、常规岛和 BOP 少合同的模式。三门核电有限公司作为业主,对整个三门 AP1000 核电项目进行总体项目管理,对核岛总承包商以及常规岛和 BOP 承包商进行监督管理和协调。国家核电工程有限公司作为核岛总承包商,负责核岛建设。西屋联合体负责核岛设计及部分重要设备供货。业主将常规岛和 BOP 拆分为设计、主要设备、建安等几大合同包委托给数个承包商,并打包采购其余的设备和服务。业主负责常规岛和 BOP 工程的设计管理、采购和建造管理及协调。业主委托总体院对全厂设计进行管理和协调。业主对全厂的工程施工提供支持。

(4) 首堆建设工程重大节点回顾

1983 年 6 月,由华东电管局、浙江省电力局、华东电力设计院等单位组成的核电选址小组,在当地政府有关部门配合下,踏勘了杭州湾及三门湾以北的浙东沿海 12 个位置,经反复比较,最后决定将包括三门县健跳在内的两个厂址作为初步可行性研究对象。

1989 年 8 月,确定三门健跳为预选厂址。

2000 年 10 月,上报了三门核电项目建议书,同时开展了可行性研究报告的编制工作。

2001 年 2 月,组建三门核电项目筹备处,代行企业法人职责。

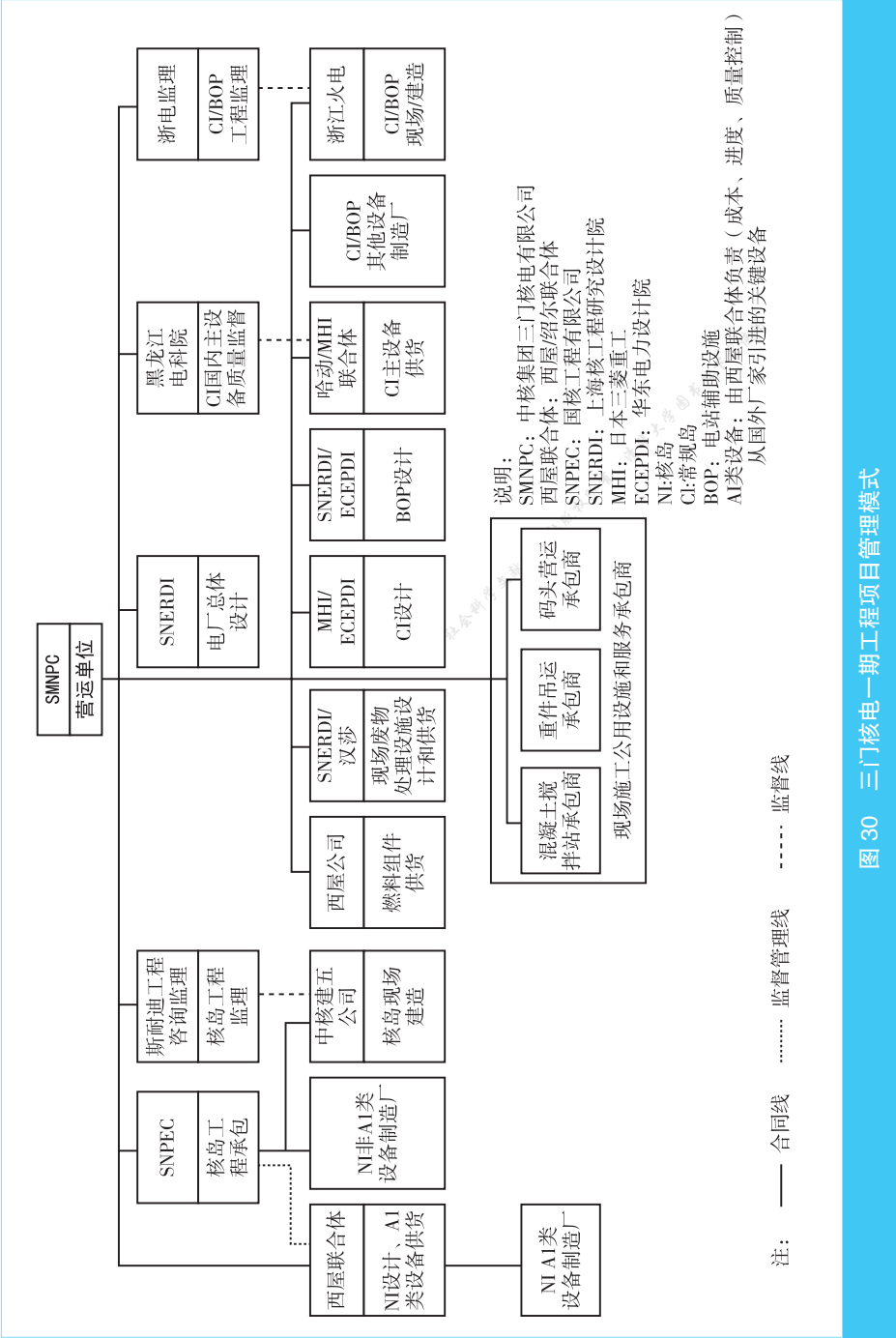


图 30 三门核电一期工程项目管理模式



2001 年 5 月，中核集团公司完成了项目建议书的补充上报工作。在浙江省的大力支持下，现场“四通一平”工程于 2001 年底被批复立项。

2004 年 7 月 21 日，国务院批准三门核电项目一期工程立项建设。9 月 1 日，国家发改委正式批复三门核电一期工程项目建议书，同意浙江三门百万千瓦级核电工程立项并开展可研工作，批准三门核电厂址规划容量为 6 台百万千瓦级压水堆核电机组，一期工程建设 2 台机组。

2007 年 7 月 24 日，三门核电有限公司与西屋联合体在北京签署核岛设计及部分主设备采购合同，AP1000 机组因其非能动技术路线与模块化施工的建设方法脱颖而出，落户三门核电。

2009 年 4 月 19 日，三门核电一期工程正式开工。

2009 年 12 月 15 日，2 号机组核岛开工。

2010 年 3 月 27 日，1 号机组 CA01 模块吊装就位。

2010 年 5 月 16 日，2 号机组常规岛开工。

2013 年 11 月 23 日，1 号机组核岛屏蔽厂房实现封顶。

2014 年 8 月 25 日，2 号机组核岛压力容器吊装就位。

2016 年 5 月 26 日，1 号机组冷试顺利完成。

2017 年 6 月 27 日，1 号机组热试工作全部结束。

2017 年 12 月 1 日，2 号机组 4 台主泵首次达到 100% 转速。

2018 年 4 月 25 日，三门核电 1 号机组开始装料；4 月 29 日 13 点 37 分，三门核电 1 号机组 157 组全新的燃料组件全部安全装载入反应堆堆芯，人、机、料、法、环等各方面准备充分，全过程安全质量可控。

2018 年 6 月 30 日，三门核电 1 号机组首次并网成功；9 月 21 日凌晨 3 点 57 分，完成 168 小时满功率连续运行考核，三门核电 1 号机组具备商业运行条件。

2018 年 7 月 8 日，三门核电 2 号机组首次装料顺利完成；8 月 24 日，首次并网成功；11 月 5 日晚 9 点 47 分，2 号机组具备商业运行条件。

3. EPR 全球首堆工程建设情况

(1) EPR 技术引进背景

引进 EPR 技术建设台山核电站，是中国政府从国家能源战略高度做出的

重要决策，也是中法能源合作领域的里程碑式事件。

2007 年年初，第三代核电技术招标结束后，国家安排中广核继续与法国企业进行 EPR 三代核电技术引进谈判。

2007 年 8~9 月，在中方与 AREVA 就引进两台 EPR 机组的供应及相关合同谈判进入最为关键的阶段时，中广核决定尝试将厂址从阳江改到台山。在充分论证的基础上，广东省政府最终同意了“阳台置换”方案，上报并获得国家批准。

2007 年 11 月 26 日，在中法两国元首见证下，中广核与 AVERVA 集团、法国电力公司分别签订了《关于合作建设广东台山核电项目 1、2 号机组的总体协议》、《中广核集团公司和阿海珐关于铀矿的投资协议》和《中广核集团公司与法国电力公司合资经营台山核电合营有限公司合同》。

(2) 首堆建设厂址概述

台山核电厂址位于珠江口西侧出海口，地形开阔，三面环山，东临黄茅海，规划建设 6 台百万千瓦级核电机组。

(3) 首堆建设工程项目管理模式介绍

台山核电一期工程是中法两国能源领域的最大合作项目，由中国广核集团、EDF 和粤电集团共同投资组建的台山核电合营有限公司负责建设和运营。台山核电合营有限公司负责台山核电站一期工程的资金筹措、建设、运营和管理，并承担最终的核安全责任，在设计、设备制造、建安施工和调试等各环节集中了中法两国核工业的优势力量。

台山核电站一期工程采用中外合作、共同设计、共同建设的模式，并实现全面技术转让。核岛设计供货中，中方承担的设计工作和供货份额超过 50%，核岛主设备国产化制造比例将达 50%。常规岛设计供货由中方牵头的联合体承担。常规岛汽轮发电机组制造中，中方份额达到 2/3。台山核电站一期项目工程管理、建安施工、工程调试和生产运营全部自主化。主要参建单位包括 9 家。

1) 中国广核集团（简称中广核），是台山公司的控股方，其各专业化公司和共用技术平台通过技术支持或服务合同的方式参建本项目。中广核工程有限公司和深圳中广核设计有限公司全面参与本项目的工程设计、设备采购、



调试和主体工程监理工作。中广核核电运营有限公司、中广核研究院有限公司、苏州热工研究院有限公司等成员单位提供相关的业务支持。

2) 法国电力公司(简称 EDF), 是台山公司的第二大股东, FA3 的建设单位, 向本项目派遣有经验的人员, 提供相关技术支持。

3) AREVA NP(现为法马通, EDF 子公司), 核岛设计采购联合体 NI EP 合同的牵头方。

4) ALSTOM(现 GE-ALSTOM), 常规岛汽轮发电机组设计供货联合体 TG 合同的技术牵头方。

5) 东方电气集团, 常规岛汽轮发电机组设计供货联合体 TG 合同的牵头方, 同时负责部分核岛主设备的制造。

6) 上海电气集团, 负责部分核岛主设备的制造。

7) 中国核工业建设股份有限公司, 所属成员公司中核华兴负责 1 号核岛土建施工、中核二三负责核岛安装。

8) 中国建筑集团有限公司, 所属成员公司中建二局负责 2 号核岛土建施工和常规岛土建施工。

9) 中国能源建设集团有限公司, 所属成员公司广东火电总公司负责常规岛安装, 广东电力设计研究院负责常规岛土建和安装的详细设计。

(4) 首堆建设工程重大节点回顾

2008 年 8 月 26 日, 台山核电站一期工程核岛负挖正式开始。

2009 年 10 月 26 日, 台山核电站 1 号机组核岛第一罐混凝土浇筑。

2011 年 10 月 23 日, 台山核电站 1 号机组核岛穹顶成功吊装就位。

2012 年 6 月 3 日, 台山核电站 1 号机组压力容器(RPV)实现引入就位。

2013 年 12 月 17 日, 台山核电 1 号机组 NCC(核回路管道冲洗)开始。

2014 年 8 月 15 日, 台山核电 500 千伏开关站可用。

2014 年 10 月 30 日, 台山核电 1 号机组泵站进水一次成功。

2016 年 1 月 27 日, 台山核电 1 号机组冷态功能试验完成。

2016 年 6 月 15 日, 台山核电 1 号机组安全壳打压试验(CTT)完成。

2017 年 4 月 1 日, 台山核电 1 号机组热试升温升压阶段工作开始。

2017年7月27日，台山核电1号机组非核冲转一次成功。

2018年4月16日，台山核电1号机组首次装料工作完成。

2018年6月6日，台山核电1号机组核反应堆首次达到临界状态。

2018年6月29日，台山核电1号机组首次并网发电成功。

2018年7月3日，台山核电2号机组冷试开始。

2018年12月7日，台山核电2号机组首炉核燃料到场。

2018年12月10日，台山核电2号机组热试开始。

2018年12月23日17:00，台山核电1号机组完成168小时示范运行，具备商业运行条件。

4. AP1000、EPR全球首堆工程建设经验

回顾 AP1000、EPR 全球首堆工程建设的历程，有以下主要经验。

第一，较好的核电产业基础为首堆工程建设提供产业支撑。经过 30 多年的实践，我国在核电技术研发、工程设计、设备制造、工程建设、运营管理等方面打下了较好的基础，初步形成了核电产业体系，培养和锻炼了一批核电专业人才，积累了丰富的经验。在没有成熟电站可供借鉴的情况下，三门 AP1000、台山 EPR 全球首堆工程的建设，得益于我国核电产业整体实力的巨大进步。

第二，核电业主与政府部门高效协同为首堆工程建设提供组织保障。面对首堆工程建设中需要政府部门协调解决的事项，核电业主与政府主管部门、地方政府积极沟通，高效解决项目建设中遇到的难题，为首堆工程顺利推进提供了组织保障。

第三，较强的核电工程建造能力是首堆工程建设的施工技术基础。我国是目前世界上在建核电机组最多的国家，核电工程建造队伍经过 30 多年的发展，全面掌握了 30 万千瓦、60 万千瓦、100 万千瓦装机容量，涉及各种堆型的核心建造技术，形成了核电站建造的专有技术体系，核电工程建造能力全面加强。此外，从三代核电技术招标开始，我国即开展了 EPR、AP1000 建造技术研究，开发并应用了多项先进的施工管理技术。

第四，良好的国际合作为首堆工程建设集聚全球智慧。三门 AP1000、台山 EPR 工程自开工以来，中美、中法各方分别在设计、建造安装、调试等各



个建设环节通力合作，保障了工程建设各阶段目标的顺利实现，共同推进了三门 1 号机组、台山 1 号机组分别成为 AP1000、EPR 全球首堆。

（三）核能科技创新

科技创新对我国核工业的发展具有重要意义，对建设核科技强国战略起着重要的推动作用。我国在先进反应堆、核燃料循环产业领域的科技创新取得了重要进展。在先进反应堆方面，大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大科技专项取得重要成果，华龙一号在设备研制、工程创新方面取得重要进展，在国内外顺利推进，小型反应堆的研发和应用积极推进，第四代核能系统的研发与落地正在加紧布局，聚变堆技术创新取得一定成果。

1. 大型先进压水堆CAP1400

（1）总体概述

CAP1400 是在国家重大专项的支持下，由国家电力投资集团（国家核电技术公司）牵头实施，国内 100 多家单位联合开发，形成的具有自主知识产权的大型先进压水堆型号，是国家重大专项自主创新的标志性成果。

（2）2018 年重大专项主要课题进展

2018 年，国家重大科技专项 CAP1400 完成 15 个重大专项课题立项，完成 18 个重大专项课题正式验收。其中，“CAP1400 非能动堆芯冷却系统性能试验和验证研究”、“CAP1400 熔融物堆内滞留（IVR）研究及试验”和“CAP1400 非能动安全壳冷却系统性能研究及试验”等 3 个试验验证课题通过了国家能源局组织的正式验收，至此压水堆专项六大试验课题全部通过正式验收。六大试验是核电重大专项支持设立的基础类重大验证课题，属于支撑论证三代非能动核电关键系统运行及重要设备性能的机理研究，涵盖了非能动堆芯冷却系统、非能动安全壳冷却系统、堆芯熔融物堆内滞留、反应堆结构水力模拟、堆内构件流致振动、蒸汽发生器关键部件等六个方面 13 项关键试验。六大试验课题的顺利实施，全面提升了我国核电技术的基础研究和试验研究能力，建立健全了与试验相关的质保体系，有效填补了我国三代核电技术试验空白。

具体如表 40 所示。



表 40 2018 年重大专项主要课题进展

序号	重大专项课题基本情况	评审通过时间
1	CAP1400 非能动安全壳冷却系统性能研究及试验：由上海核工院牵头，该课题于 2011 年获批正式立项。从关系式验证、程序验证、现象学研究等方面对近 700 个工况的试验数据进行了全面而深入的分析，相关研究成果已应用于 CAP1400 示范工程。该课题实施建成了综合性能、水分配、水膜热态、壳内冷凝等一批试验台架，形成了开封、海阳、上海、北京四个试验基地，取得了一批具有自主知识产权的科技成果，包括专利 14 项、技术秘密 11 项、软件著作权 15 份，及学术论文 60 篇	4 月 26 日
2	CAP1400 熔融物堆内滞留（IVR）研究及试验：2011 年获批正式立项，主要成果包括：首次实现碳钢材料与加热铜块之间的完美结合，针对真实压力容器表面特性和安全壳地坑水质开展了试验研究，获得了 CHF 试验数据；全面研究了堆芯熔化、下移进程及压力容器下封头熔池行为，解读下封头熔池结构形成机理，确定了对应情况下压力容器壁面热流密度；采用确定论与概率论相结合的分析方法对 CAP1400 IVR 有效性进行了全面、系统的评价；优化了严重事故管理导则及堆内构件，进一步提高了 IVR 有效性。该课题研究成果已应用于 CAP1400 示范工程，支撑了 CAP1400 的安全审评。该课题实施取得了一批具有自主知识产权的科技成果，包括试验装置 3 套、专利 14 项、技术秘密 6 项、计算分析软件 2 项及论文 9 篇	4 月 20 日
3	CAP1400 非能动堆芯冷却系统性能试验和验证研究：2011 年正式立项，包括 AP600/AP1000 试验结果及分析程序适用性研究、整体试验台架 ACME 设计研究及建造调试、整体性能试验研究、非能动堆芯冷却系统安全分析程序的评价验证研究 4 个子课题。主要创新成果包括，建成了国内首个大型先进反应堆非能动冷却试验平台（ACME），达到同类技术的国际领先水平；国内首次按照国际规范 RG-1.203 的要求和流程，系统地开展了 CAP1400 非能动堆芯冷却系统容量设计、PIRT 评价、台架比例设计、性能试验和验证研究，达到国际先进水平，在新物理现象发现和分析模型等方面处于国际领先水平；通过对 ACME 试验数据的深入分析，揭示了非能动堆芯冷却中关键现象的形成机理、影响因素和演变规律；对小破口失水事故分析模型进行了改进和验证，对小破口失水事故进行了最为广泛的试验和验证研究，包括各种破口谱、纵深防御系统影响、非凝结气体影响、鲁棒性试验和超设计基准事故。该课题研究形成了一批具有自主知识产权的科技成果，包括试验装置 1 套、技术报告 203 份、专利 15 项、技术秘密 7 项、学术论文 27 篇	1 月 16 日
4	严重事故分析及应急决策支持技术研究：该课题由国家电投集团科学技术研究院有限公司牵头完成，基于严重事故分析程序，结合核电厂严重事故管理导则和极端破坏缓解导则，采用先进模拟技术及计算机可视化方法，开发出一套核电厂严重事故进程模拟与应急决策支持系统及事故后三维模拟系统。以上系统主要用于核电厂严重事故后实时和超实时模拟及事故发展趋势和后果的预测，为场内应急决策提供支持。课题同时开展了倾斜平板局部临界后传热特性研究及严重事故下堆芯熔融物与冷却剂相互作用实验研究，为核电厂严重事故进程模拟与应急决策支持系统提供技术支撑	8 月 15 日



续表

序号	重大专项课题基本情况	评审通过时间
5	核电厂安全壳内热量无时限非能动导出系统关键技术研究：由国家电投集团科学技术研究院有限公司牵头完成，通过开展核电厂安全壳内热量无时限非能动导出系统关键技术研究，形成无时限系统的设计方法，给出详细的设计方案；搭建无时限单项和综合性能试验台架并获得试验数据，掌握系统启动和运行规律，验证设计方案的合理性，为 AP/CAP 系列核电站或其他三代电站的安全壳无时限长期冷却技术研发与应用提供技术支撑	8 月 14 日
6	大型先进压水堆核电站设计仿真与分析评价平台：2013 年 1 月正式立项，该平台研制范围涵盖了先进堆芯及燃料计算、事故分析、概率安全分析评价、设备设计、工艺系统设计、电气和仪表设计、厂址评价与经济分析、常规岛设计等 8 个专业平台及 1 个基础支撑平台。该课题将先进计算机集成技术与核电站设计分析工具相结合，具备高效的仿真设计分析流程、完善的数据管理机制、集成的仿真设计环境、可重用的知识管理体系架构功能，基本形成了有自主知识产权的 CAP1400 核电厂设计分析评价一体化平台。课题申请专利 8 项，已获得授权 2 项，获得软件著作权 38 项，技术秘密 21 项，成果鉴定 8 项，论文 30 篇，技术报告 497 份	8 月 9 日
7	反应堆严重事故缓解技术研究：该课题由国核华清（北京）核电技术研发中心有限公司牵头完成。该课题针对福岛事故对核安全理念、事故管理规程和缓解手段等方面带来的冲击，开展了严重事故的缓解研究、非能动堆芯应急冷却系统中的硼酸控制研究、失水事故条件下国产新锆合金安全性能研究、乏燃料水池严重事故处置关键技术研究、安全壳长期过滤排放技术研究、SiC/SiCf 复合材料的辐照效应研究，其成果为我国压水堆核电站严重事故缓解技术提供了技术支撑	7 月 25 日
8	关键设备设计分析技术研究：该课题由国核华清（北京）核电技术研发中心有限公司牵头完成，通过发挥产学研协同创新优势，精心组织，历时五年对反应堆压力容器、安全壳、蒸汽发生器、核级阀门等关键设备设计分析过程中的技术难点进行了深入研究，形成了多项实验装置、软件、数据库、专利、技术秘密、论文、报告等，培养了一批核电人才，提高了我国在相关领域的技术水平，促进了行业技术发展。课题部分成果已在新堆型设计中得到应用	4 月 19 日
9	严重事故机理及现象学研究：该课题由国核华清（北京）核电技术研发中心有限公司牵头完成。该课题在消化吸收 AP1000 严重事故预防及缓解设计技术和分析工具的基础上，综合国际最近研究进展和研究成果，通过理论分析、数值模拟和试验研究，深入理解严重事故发生的机理和相关重要现象，建立试验研究平台，在已有分析程序基础上开发了具有自主知识产权的严重事故分析计算模块和程序，研究概率安全评价在严重事故中的应用，为我国已有二代加及未来非能动和高功率压水堆核电站严重事故预防措施和事故缓解对策的分析和评价提供理论依据、分析工具和试验数据	1 月 17 日



续表

序号	重大专项课题基本情况	评审通过时间
10	CAP1400 反应堆压力容器研制：2013 年 1 月正式启动，由国家电投上海核工院自主设计，中国一重、国核运行等单位联合实施，攻克了国和一号反应堆压力容器设计、关键锻件制造工艺及反应堆压力容器制造等关键技术，全面掌握了国和一号反应堆压力容器设计制造技术，实现了国和一号反应堆压力容器自主设计和自主制造，获得授权专利 5 件（发明专利 4 件），形成技术秘密 1 项、研究报告 11 份、工艺规程及企业技术标准 9 项	12 月 4 日
11	CAP1400 蒸汽发生器研制：2014 年 1 月正式立项，开展了 CAP1400 蒸汽发生器群孔高效成型及检测技术、关键焊接技术、制造缺陷诊断及评价技术等 7 大方面的研究。该课题成功研发了满足 CAP1400 要求的蒸汽发生器椭圆形封头，形成了超大型异型椭圆形封头的上旋转碾压拉伸成型锻造技术和超大型异型椭圆形封头强冷淬火技术；成功研发了满足要求的蒸汽发生器锥形筒体锻件，实现了长直段锥形筒体制坯合理、变形均匀和控制精确的仿形锻造；成功研发了满足蒸汽发生器管板锻件，形成特大饼形锻件淬火冷却浮筒排气技术，解决了工件淬火窝气引起的冷却效果不佳问题；首次在主设备群孔加工测量领域运用 CCD 推扫测量技术，大大提高了蒸汽发生器群孔的测量精度和测量重复性；形成超窄间隙厚壁激光填丝焊接技术，超窄间隙厚壁激光填丝焊缩短主环缝 50% 以上的焊接时间，并节约近 60% 的焊接填充材料。掌握了制造的关键技术，提升了我国核电设备制造的总体水平，使我国具备了 CAP1400 蒸汽发生器的自主制造能力。该课题取得专利、技术秘密、论文、企业标准等知识产权成果 52 项，形成技术报告 417 篇、试验件和样机等 23 套	8 月 7 日
12	常规岛关键设备自主设计和制造：由上海成套院牵头，突破了大型半速汽轮机末级长叶片设计制造技术瓶颈，成功开发出拥有自主知识产权的 1710 毫米、1800 毫米、1828 毫米和 1905 毫米四种末级长叶片，并完成末级长叶片性能及安全性试验验证；掌握了核电汽轮机低压焊接转子关键技术，完成焊接转子研制；完成了具有自主知识产权的 CAP1400 汽轮发电机、汽水分离再热器（MSR）的开发；研发了主给水泵、凝结水泵和循环水泵及常规岛控制系统；建成大型汽轮机焊接转子、末级长叶片等一系列关键设备及部件的设计、制造和试验研究平台和基地。该课题申请专利 55 项（发明专利 26 项），已获得专利授权 45 项（发明专利 16 项），登记软件著作权 11 项，研究制定国家标准 2 项，形成企业标准 75 项，发表学术论文 29 篇	7 月 19 日
13	爆破阀设备鉴定技术研究：该课题由中核科技牵头，旨在解决鉴定过程中的方法问题，全面掌握爆破阀的设备鉴定技术和方法，完成爆破阀设备鉴定试验，形成爆破阀设备鉴定规范，为爆破阀产品的工程化应用提供技术支撑	7 月 6 日



续表

序号	重大专项课题基本情况	评审通过时间
14	核电蒸汽发生器 690 合金 U 形管研制和应用性能研究：由宝钢特钢有限公司牵头，2011 年正式立项。课题全面掌握了 690 合金传热管的设计制造要求，建立了 690 合金传热管的综合评价体系，实现了蒸汽发生器 690 合金传热管的国产化，大幅度降低了设备的工程造价，提升了我国在高档合金管材生产上的技术和装备水平，有效提高了核电建设的经济性，填补了国内空白。课题的主要创新成果有：形成了 690 合金传热管的均匀腐蚀、应力腐蚀等试验方法及长期应用性能评价体系，积累了丰富的国产和进口 690 合金传热管性能数据，提升了后续蒸汽发生器传热管老化评估和服务能力；利用 EPR 晶间腐蚀方法和适宜的点腐蚀试验方法相结合，建立快速评价 690 合金传热管制造工艺能力的方法，为工程应用提供了有效支撑；薄壁管的疲劳和腐蚀疲劳试验评价技术；690 合金传热管微动磨损试验方法。课题成果已成功应用于国产化 CAP1000 标准设计、CAP1400 示范工程等工程项目中，有效推动了蒸汽发生器传热管的国产化进程。该课题取得专利 11 项、技术秘密 2 项，形成技术报告 93 篇、学术论文 9 篇	6 月 1 日
15	CAP1400 核电站数字化仪控系统工程样机研制：2014 年获得国家能源局批准立项实施，由国核自仪牵头，联合上海核工院、国核电力院等单位组成科研团队，完成了一套满足 CAP1400 需求、具有自主知识产权的数字化仪控系统工程样机，全面掌握了核电站数字化仪控系统验证技术、测试技术、安装调试技术和维修技术等，建立了完整、配套、先进的核电站数字化仪控系统技术创新研发体系和平台	6 月 1 日
16	核电泵、阀、电气设备及测量仪表研制：该课题共完成 25 项核电设备和装置的研制，搭建了 7 个多学科产学研平台、1 个行业专家技术咨询平台，形成了主泵变频器、调节阀等 7 个供货基地和核电密封件联合研究中心等 3 个再创新基地，掌握了关键技术，取得了一批具有自主知识产权的科技成果，申请专利 80 项（授权 56 项），取得技术秘密 4 项，生产 76 台（套）样机，进行成果鉴定 20 项，形成行业 / 企业标准 60 余项。研究成果已实现在 CAP1400 示范工程及其他核电站工程项目中的应用	4 月 12 日
17	CAP1400 控制棒驱动机构研制：该课题由上海第一机床厂有限公司牵头完成，掌握了控制棒驱动机构线圈、驱动杆、电源系统的关键工艺和试验等核心制造技术，解决了 CAP1400 控制棒驱动机构制造技术中的薄弱点，完成了控制棒驱动机构关键部件验证试验，建立了稳定的国内原材料供货渠道，具备了 CAP1400 控制棒驱动机构自主化能力，摆脱了国外技术及关键原材料的限制	4 月 10 日
18	AP1000 核电燃料元件格架条带冲制技术研究：该课题由中核包头核燃料元件股份有限公司牵头，联合上海核工程研究设计院有限公司及国核宝钛锆业股份有限公司共同完成。通过该课题的实施，全面掌握了 AP1000 核燃料组件格架条带冲制模具研制、冲制工艺及条带检测等关键技术，优化了格架焊接工艺，建成了满足年产 400 组 AP1000 燃料组件需求的格架条带生产线，实现了 AP1000 燃料组件格架条带国产化的目标	7 月 13 日

（3）2018 年重大专项标准制定、专利申请情况

国家能源局印发《大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大专项档案管理



实施细则》，有助于核电重大专项档案管理，确保专项档案的安全性、真实性、可靠性、完整性和可用性，促进了国家科技信息资源的长期保存和有效共享。

2018 年度国家电投集团编制完成多项 AP/CAP 国家/行业标准的制定工作，其中，国家标准（GB）2 项、能源行业标准（NB）22 项、电力行业标准（DL）1 项。2018 年度，国家重大科技专项 CAP 系列技术（包括 AP）获得 46 项授权专利，如表 41 所示。

表 41 2018 度获得授权的专利名称（AP/CAP 系列）

序号	专利名称	序号	专利名称
1	符合国内核电厂使用需求的检修电话系统	24	一种应用于核电站的辐射屏蔽结构
2	核反应堆的非能动安全注射系统	25	一种插拔式升降止挡装置
3	圆环结构金属构件摩擦系数的测试装置	26	一种核电站的直流式蒸汽发生器
4	一种钢筋锚固装置及安装方法	27	一种增材制造的核电站稳压器喷雾器旋水芯
5	一种简化模拟燃料组件	28	一种核电厂起重机单根钢丝绳断裂试验装置
6	一种新型的自动定位的管套管的连接方式	29	一种分段式水闸门密封气囊和密封圈交叉部位的密封结构
7	一种核燃料元件包壳锆合金钛合金复合管及其制备方法	30	辅助测试扩散氢作用下合金管在高温水中腐蚀行为的装置
8	一种用于压水堆燃料元件栅格和燃料棒振动性能测试的试验元件	31	一种电厂循环水冷却系统、冷却方法及应用
9	一种竖直安装的压水堆核电厂燃料组件抓取试验工具	32	一种钢梯洞口防水节点
10	一种水平安装的压水堆核电厂燃料组件抓取试验工具	33	基于 FPGA 的核电站多样性保护系统硬件架构
11	一种移动式空气热阱	34	一种基于 FPGA 的 SOE 系统实现 SOE 的方法
12	一种用于 SCS 单元试件拉压试验的加载装置	35	数字化控制系统
13	一种用于保护堆外捕集器的保护装置	36	一种电流输出自我诊断电路
14	一种高性能纤维布包裹单片波纹钢板—钢管束防护装甲	37	核电多样化驱动系统验证装置及其验证方法
15	一种高性能纤维布包裹单片波纹钢板—胶体防护装甲	38	一种仪控系统验证方法
16	一种高性能纤维布包裹连续波纹钢板—胶体防护装甲	39	核电站 DCS 仿真建模方法
17	一种带分段独立水箱的非能动双层安全壳	40	基于 FPGA 的数据处理单元
18	一种带上下连通侧向水箱的非能动双层安全壳	41	开关量输出自我诊断电路
19	一种高性能纤维布包裹单片波纹钢板—多孔金属防护装甲	42	核电站马达控制系统的控制方法
20	一种用于核电厂乏燃料水池水平位置可调式水下照明装置	43	高温高压阀用波纹管及其组件
21	一种 C 形管束热交换器支撑条的固定结构	44	核电虚拟 DCS 仿真平台人机接口架构
22	一种可电动调节的触摸交互控制盘台	45	可切换的压力差压变送器及使用方法
23	一种非能动余热排出系统	46	核电站压力容器检查机械手所用关节轴承的预紧工装及预紧方法



(4) 软件开发方面

① COSINE 软件取证进展顺利，堆芯子通道程序已经正式提交核安全局取证。完成堆芯物理分析程序、中子动力学程序自评价，预计 2019 年年底前可正式提交核安全局取证。

② 开发热交换器性能评估软件。

(5) 设备研制方面

具体的设备制造方面进展顺利。2018 年中国二重承制的 CAP1400 主管道（冷弯工艺）全部制造完成，具备出厂发运条件，吉林昊宇研制的 CAP1400 主管道（热弯工艺）热段 A 成功完成弯制，CAP1400 先导组件一阶段锆材 SZA-4/6 生产圆满完成，CAP1400 首台全范围模拟机交付使用，首台国产化 AP1000 屏蔽主泵制造成功。

2018 年，重大专项研发形成了多个创新样品，如表 42 所示。

表 42 2018 年 CAP1400 的多个创新样品

序号	创新产品名称
1	CAP1400 核电站数字化仪控系统 1 : 1 工程样机
2	AP1000 核电厂主控室内漏试验装置
3	蒸汽发生器二次侧冲洗装置
4	核电站异物检查与清除装置
5	堆外中子剂量计数据分析平台
6	CAP1400 钢制安全壳

2. 高温气冷堆重大专项示范工程

(1) 总体概述

我国高温气冷堆技术研发始于 20 世纪 70 年代，2003 年 10MW_e 的 HTR-10 实现满功率并网发电运行。2008 年 2 月，国务院常务会议批准了《高温气冷堆核电站重大专项总体实施方案》，高温气冷堆重大专项正式启动实施，周期为 2009 年到 2020 年，共 11 年。目前，高温气冷堆重大专项示范工程设计与技术研发全部完成。



(2) 2018 年主要进展

2018 年, 高温气冷堆重大专项共申请发明专利 10 项, 实用新型专利 5 项, 授权发明专利 2 项, 授权实用新型专利 6 项。

①高温气冷堆示范工程关键设备制造取得重大突破。8 月, 佳电股份承制的示范工程首台主氦风机顺利完成制造并交付现场。9 月, 首台蒸汽发生器完成气压试验, 具备出厂交付安装条件, 10 月, 完成出厂验收, 标志着高温气冷堆示范工程关键设备的研发制造难题已全面攻克。蒸发器制造过程中, 华能集团组织清华大学与哈电重装等参研各方, 戮力攻关, 先后攻克了 30 余项关键工艺技术, 为高温气冷堆设备的国产化做出了重要贡献。

②高温气冷堆重大专项课题研究取得重要进展。2018 年, 以高温气冷堆核电站示范工程为依托的《高温堆金属堆内构件制造技术研究》《高温气冷堆新燃料元件运输与贮存容器研制》等 2 项成果获得中国核能行业协会科学技术奖二等奖。重大专项课题研究方面, 主蒸汽隔离阀制造技术与炭堆内构件制造技术等 2 项课题获正式验收, 高温气冷堆乏燃料贮存系统地车设计与制造技术、高温气冷堆核电站示范工程燃料元件生产线建设与高温气冷堆核电站 1E 级低压开关成套设备的研制等 3 项课题获预验收。2018 年, 在国家科技重大专项国拨经费的支持下, 启动“高温堆示范工程可靠运行技术研究”“高温堆示范工程调试关键技术研究”“高温堆示范工程关键设备老化防腐措施技术研究”等 3 个科研项目。同时, 华能集团自主开展了“高温气冷堆氦气系统阀门维修技术研究”“高温气冷堆地车维修技术研究”“HTR-PM 核级电缆老化研究”“HTR-PM 技术监督标准及实施大纲的研究开发”“高温气冷堆核电机组二回路热力系统关键技术研究”“HTR-PM 一回路高温金属部件在役监督技术研究”“高温气冷堆核电站凝结水精处理关键技术研究”“高温气冷堆核电站腐蚀控制工程全寿命周期关键技术监督研究”等 8 个研究项目。华能集团内部科研课题“高温气冷堆石墨粉尘去污技术研究”完成全部研究任务, 顺利结题。

3. 大型先进压水堆华龙一号

(1) 总体概述

华龙一号 (HPR1000) 是中核集团和中广核集团立足于我国核电 30 年的



设计、建造和运行经验，自主研发的安全、可靠、经济的先进压水堆核电技术，是在国家领导人的亲切关怀下，经过有关部门的组织协调和华龙技术团队、业内专家历时 5 年的共同努力，在中核集团和中广核自主研发堆型基础上融合而成的先进压水堆核电技术。华龙一号发展历程如图 31 所示。

（2）2018 年主要进展

2018 年，华龙一号在设备研制、示范工程创新施工、通用设计审查 / 设计认证等方面取得重要成绩与突破。

1) 设备研制与科技创新方面

①自主设计制造的反应堆压力容器水压试验一次取得成功。2018 年 3 月 15 日、8 月 16 日、9 月 26 日，巴基斯坦卡拉奇 3 号机组、福清 6 号机组、防城港 3 号机组反应堆压力容器出厂水压试验一次成功，各项试验指标均符合设计要求。

②具备独特的二次支承功能的堆内构件通过验收。2018 年 3 月 15 日，福清 5 号核电机组堆内构件通过验收。华龙一号堆内构件满足国内外最先进的核电法规标准，还具备独特的二次支承功能，当遇到极端事故时，能够有效地防止堆芯跌落，避免熔融反应堆，杜绝放射性物质从压力容器中泄露，显著降低核事故发生后对自然环境的影响。

③具有广泛适用性的棒控棒位系统研发成功。4 月 12 日，第三代核电技术使用的棒控棒位系统通过验收，该系统适用于动态和静态两种棒电源系统，可以直接应用于华龙一号、玲龙一号、二代加等核电堆型，通过适应性修改还可以应用于 AP1000、EPR 等核电工程，具有广泛的适用性。特别是新型棒位测量和智能化等新技术的应用，使棒位设备现场调试时间缩短为 2 天以内，提高了核电厂的经济效益。

④华龙一号主管道克服多项技术难题，完成研制。福清 6 号机组主管道具有化学成分要求严格、弯管及管嘴角度不易控制、焊接要求严格等特点，生产单位二重装备解决了不锈钢异形锻件晶粒度控制、弯制尺寸精度（角度、弯管壁厚）控制、超长管件热处理变形控制等多项技术难题。2018 年 7 月 20 日，华龙一号示范项目防城港 3 号机组主管道完成全部制造工作，顺利发运。

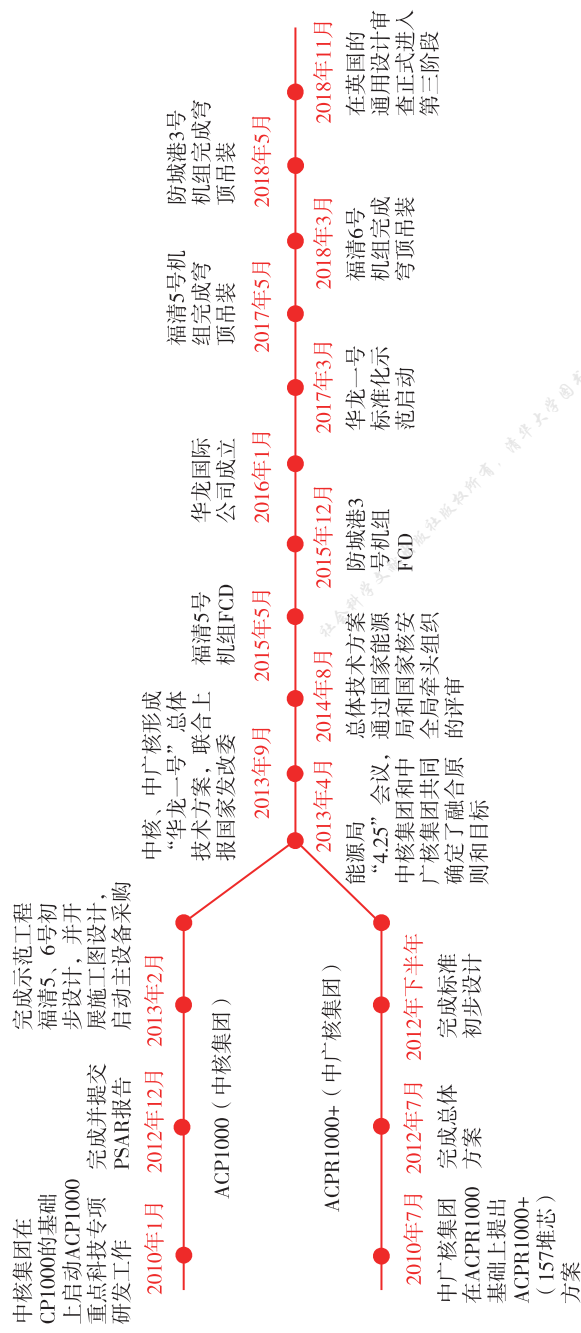


图 31 华龙一号发展历程



3号机组主管道为三代锻造主管道，由烟台台海玛努尔核电设备有限公司承制，历时18个月，制造周期创纪录。制造过程中质量、进度均得到有效控制，并顺利通过联合验收。

⑤华龙一号防城港核电示范项目全部核级水泵顺利完成鉴定，福清5号机组完成首台主泵新型复合材料推力轴承全部试验。华龙一号福清5号机组完成首台主泵新型复合材料推力轴承全部试验。华龙一号防城港核电示范项目核级水泵鉴定工作全部顺利完成，国产化率达到100%。全部核级水泵设计均选用了第三代核电安全标准，需要重新进行研发鉴定试验，涉及88台设备、16台样机，且每台泵组需进行等9大类试验鉴定，以及抗震分析等诸多计算类鉴定项目，多个鉴定试验项目为国内首次开展。2018年5月，哈电动装研制的新型复合材料推力轴承，在福清5号机组首台主泵全流量试验中顺利通过全部试验，并通过专家鉴定会鉴定。新型复合材料推力轴承优于采用巴氏合金材料的推力轴承，具有完全的自主知识产权，填补了国内空白，达到国际领先水平，可在新建机组上推广应用。

⑥华龙一号核岛主设备用大型液压阻尼器研制成功。5月23日，核动力院和相关厂家联合研制的华龙一号核岛主设备用大型液压阻尼器成功通过专家技术鉴定，打破国外技术垄断。

⑦华龙一号DCS研发获得重要进展，和睦系统DCS拟用于英国核电项目，龙鳞系统DCS平台通过鉴定并正式发布。以我国自主三代核电技术华龙一号示范工程——广西防城港核电3、4号机组——建设为依托，中广核配合参与英国对华龙一号的通用设计审查，和睦系统拟应用于中广核英国投资核电项目。2018年9月1日，中核集团自主研发的华龙一号龙鳞系统DCS重要设备安全级显示单元正式通过中国核能行业协会组织的专家鉴定，具备“数字化、高可靠、一体式”的特点，总体技术达到国内先进水平，部分关键技术指标国际领先。2018年12月6日，龙鳞系统DCS平台正式发布。该平台适用于多种反应堆控制系统，拥有完全自主知识产权，已通过最高等级功能安全认证，部分关键指标达到国际领先。龙鳞系统能满足M310、华龙一号等堆型的应用要求，也可推广应用于研究堆、小堆、动力堆等多种其他反应堆控制系

统,符合最新、最全、最严格的国际和国内标准要求,能够保证极端自然条件下的正常工作,满足三代核电要求。

⑧华龙一号全球首台全范围模拟机研制成功,接受出厂验收并交付使用。8月27~31日,华龙一号全范围模拟机接受出厂验收,各项指标满足性能要求,通过第一阶段出厂验收,为华龙一号首批核电厂操纵员培训、考试和取照奠定了基础,同时也为华龙一号“走出去”提供了有力的技术支撑。华龙一号全范围模拟机由中核武汉核电运行技术股份有限公司自主研制,按照福清核电5号机组主控室1:1比例复制,采用了中核武汉具有完全自主知识产权的最新一代仿真开发平台RINSIM 2.0、反应堆物理、热工水力、严重事故软件及其他工艺系统仿真软件,具备操纵人员M0-M1阶段培训条件。

⑨中广核打造出“数字华龙”。2018年11月14日,中广核集团在第二十届中国国际高新技术成果交易会上展示了“数字华龙”科技成果。数字华龙可在建设一座实体电站的同时,同步交付一座数字电站。在基础应用方面,数字华龙通过云平台、物联网、移动平台、大数据、人工智能、信息安全、能力开放平台等技术的深化应用,使管理和生产标准化、流程化,最终实现智能化,使核电企业的经营管理更加简单、高效。

⑩华龙一号一体化堆顶结构研制成功。2018年3月,由中国核动力研究院设计院自主研发的福清5号机组一体化堆顶结构,在四川科新机电股份有限公司顺利完成堆顶结构载荷试验。2018年7月,华龙一号海外首堆巴基斯坦卡拉奇2号核电机组一体化堆顶结构载荷试验圆满完成。一体化堆顶结构是我国自主研发、制造和供货的国产第三代核电关键设备,具备完整自主知识产权,满足国内外先进核电法规标准,填补了多项核电领域中的技术空白。一体化堆顶实现了设备一体化和功能集成式设计,减少了反应堆换料时压力容器开扣盖操作工序,节省反应堆换料时间,提高了反应堆的经济性,同时还兼顾了对CRDM的定位、支承、抗震保护、通风散热等重要功能,保障了核电运行过程中的安全。

2) 华龙一号示范工程创新施工,反应堆厂房采用新的技术方法,提前实



现封顶。

华龙一号海外示范工程反应堆厂房采用开顶主设备预引入法，提前实现结构封顶。2018年4月24日，华龙一号海外首堆巴基斯坦卡拉奇核电K2机组内层安全壳穹顶结构提前实现封顶，这是该工程采用“主设备预引入”工法取得的又一成果。主设备预引入的施工方法降低主设备安装的作业难度，有效缩短了华龙一号建设工期。9月5日，华龙一号卡拉奇3号机组反应堆压力容器采用开顶法预引入安装工艺吊装就位，压力容器的翻转方案不再是翻转支架配合翻转抱环，而是采用了一个新型的翻转架。实施新的方案可以减少现场吊装工具的安裝操作时间。5月23日，华龙一号示范项目防城港3号机组采用智能建造技术，提前8天实现穹顶吊装。中广核创新使用了三维建模等智能核电建造技术，提升了施工管理的智能化水平，对穹顶吊装过程进行沙盘推演，提前发现吊装难点和预判风险，制定解决方案，确保了穹顶精准就位，一次吊装成功。

3) 设计审查 / 技术认证方面

华龙一号英国通用设计审查（GDA）正式进入第三阶段。英国当地时间11月15日上午，中广核发布声明称，英国核能监管办公室和英国环境署当天发布联合声明，宣告我国三代核电技术华龙一号在英国的通用设计审查第二阶段工作完成，正式进入第三阶段。另外，英国布拉德韦尔B项目拟采用华龙一号技术，前期工作进展顺利，厂址适应性评价及可研工作正在进行中。

华龙一号（EUR）认证已获准进入第三阶段。2015年10月9日，欧洲核电用户组织（European Utilities Requirement, EUR）正式接受华龙一号EUR认证申请。2018年9月13日，经EUR组织管理委员会第194次会议批准，我国三代核电技术华龙一号EUR认证项目进入第三阶段，共计11家EUR成员公司作为章节审查单位参加了本次会议。目前所有在欧洲核电市场中参与投标的核电技术，都已通过EUR认证或正在进行EUR认证审查，能否通过EUR的认证，是决定华龙一号技术方案能否进入欧洲电力市场的重要一环。根据项目进度计划，华龙一号EUR认证分为四个阶段。

华龙一号多国技术认证（MDEP）实施情况：MDEP（Multinational Design



Evaluation Programme) 为经合组织核能署(OECD/NEA) 框架下, 多国核安全监管当局进行核电厂设计安全评价与监管经验交流以及协调核安全监管立场的平台。2018年3月和9月, 华龙一号工作组召开两次会议, 制定了2018~2019年工作计划, 并在NNSA牵头组织下, 向多国核安全监管机构介绍了华龙一号技术方案、华龙一号安全评审及监管情况; 2018年10月23~24日在法国巴黎召开了第34次技术指导委员会会议, 会议报告了对华龙一号等评价的进展, 通过了多份共同立场和技术报告。通过MEDP机制, “华龙一号”展现了自身技术水平, 增进了各成员国监管当局对“华龙一号”堆型的了解和建设兴趣, 有利于华龙一号“走出去”战略的实施。

4. 小型反应堆创新研发与示范项目推进

2018年小型反应堆研发与示范项目推进工作继续取得积极进展。

(1) 供热堆等陆上小型堆 2018 年主要进展

① NHR200- II 低温供热示范工作开展前期工作

国家能源局组织召开北方地区核能供暖专题会, 会议同意中广核联合清华大学开展国内首个核能供暖示范项目的前期工作, 深入开展规划选址、用地用水、应急方案、公众沟通等论证工作, 积极推进项目实施。中广核联合清华大学, 采用成熟的NHR200- II低温供热堆技术, 建设了我国首个小型核能供暖示范项目。

② “燕龙” 泳池式低温供热堆初步设计完成, 完成系列工程应用报告, 供热演示项目全部研发任务按节点完成。2018年8月, “燕龙” 泳池式低温供热堆初步设计完成, 标志着泳池式低温供热堆示范工程取得重要进展。2018年5月完成了徐大堡泳池式常压低温供热堆示范工程初可研、可行性研究报告; 6月, 完成了徐大堡泳池式供热堆示范工程选址阶段两评报告第一次审评; 8月, 提前圆满完成项目初步设计工作, 提交内部文件54册, 外部文件63册, 并通过评审; 9月, 完成了“燕龙” 泳池堆示范工程初步安全分析报告编制并提交中国核电工程有限公司河北分公司。2018年12月, 中核集团泳池堆城市供热可行性研究及演示项目智能化DCS验证成功, 反应堆历时30分钟平稳达到满功率运行状态, 标志着中核集团泳池堆供热演示项目全部研发任务按节



点完成。此次 DCS 数字化升级工作是 2018 年泳池堆供热演示项目开展的重要子项，目的是为反应堆运行和供热一体化平台设计提供技术支持。

③玲龙一号示范工程初设审查完成。2 月 8~10 日，采用自主品牌“玲龙一号”技术（ACP100）的海南昌江小堆示范工程完成初步设计审查工作，并通过了初步设计文件（核岛、常规岛范围）的专家审查，专家认为“玲龙一号”初步设计范围、深度满足要求，采用法规标准合理，安全分析、分级原则符合国家核安全法规、导则和标准要求，在借鉴成熟的压水堆核电厂设计基础上，电厂总参数合理可行，小堆示范工程设计上有较多创新。

④ HAPPY200 项目完成概念设计

为响应国家“北方地区清洁供热”及能源局建设核能供热示范项目的要求，国家电投中央研究院研发了 200MWt 微压供热堆（HAPPY200）。2018 年完成了概念设计，并进一步开展了工程实施可行性及供暖、供汽兼顾的技术方案研究。

⑤国家电投发起成立全国首家核能供暖产业联盟

7 月 5 日，由国家电投联合一重、哈电集团、哈尔滨工业大学和哈尔滨工程大学发起的核能供暖产业联盟启动仪式在哈尔滨举行。核能供暖产业联盟旨在落实中央推进北方地区冬季清洁取暖的精神，聚集央企与黑龙江省产学研资源，开发安全高效的核能供暖技术，推进核能供暖产业应用，推动实现北方地区清洁供暖。该联盟是由国家电投联合核能供暖科研单位、设计制造单位、高等院校、应用单位等具有独立法人资格的机构共同建设的面向全国、全行业的，以企业为主体、以市场为导向、政产学研用一体化的公益性非法人组织，具有开放性、服务性、中立性和行业前瞻性。

（2）用于海上平台的小型堆 2018 年取得的进展

①中核集团携手烟台共推海上清洁能源综合供给平台及泳池堆项目

2018 年 1 月 19 日，中核集团与烟台市人民政府签署《海上清洁能源综合供给平台及泳池式低温供热堆项目合作协议》。按照协议约定，双方将加速推进海上清洁能源综合供给平台及泳池式低温供热堆项目在烟台市开发和



建设,助推烟台市建设核电装备千亿级产业集群。2018年11月,烟台浮动式核能示范工程完成初可研报告编制,并通过专家审查。

② ACPR50S 海上浮动堆完成系列试验和评审

在研发层面,2018年8月中广核完成了ACPR50S实验堆NSSS初步设计,主设备已开展详细设计,安全级DCS、海洋条件下力学分析、反应堆舱屏蔽等关键技术取得重要突破,完成部分验证性实验;中船重工701所完成船平台及二回路初步设计,转入详细设计。在项目层面,2018年7月项目“两评”报告顺利通过国家核安全局组织的技术审评;10月项目“初可研报告”通过中咨公司组织的专家评审和审查收口;11月28日,中广核研究院ACPR50S反应堆压力容器锻件首件通过检查验收;12月,项目反应堆压力容器、堆内构件、短套管主锻件已完成制造,运抵制造厂进行机加工,稳压器主锻件正在制造,蒸汽发生器、主泵已签订主锻件采购合同。此外,2018年12月中广核组织召开国家能源海洋核动力平台技术研发中心2018年年度工作会议,就海上堆安全监管、安保标准、主设备制造监管报备、关键设备在役检查、系泊技术方案等问题提出了具体的建议。

③由国家电投上海核工院承担的中船重工HHP25(HA01项目)反应堆及一回路范围内的系统、设备、安全分析等设计工作完成,初步安全分析报告相关章节初步汇编完毕。

(3) 其他有关小型堆的研发活动

①CAP小堆取得重要进展。国家电投上海核工院研发的660MW_t紧凑型热电联供小堆,具备热电水联供等多功能用途,可兼顾陆上和海上应用场景,适用于陆上旧小火电替代市场,同时可应用于大船,也可填补大功率压水堆的国际市场空白。2018年完成660MW_t小型堆总体技术方案研究/概念设计,并启动了深化概念设计和相关专题研究。

②小堆核应急领域项目获国际原子能机构(IAEA)立项。国家电投上海核工院申报的《小堆应急计划区划分准则和方法研究——以CAP200为例》项目成功获得IAEA合作研究项目的立项。该合作项目旨在制定小型堆应急计划



区确定的准则和方法,包括小堆设计和安全特征方面的评价、场外应急安排的必要性评估、小堆应急计划区的大小等。

5. 其他先进堆型或系统

(1) 钠冷快堆

中国实验快堆全范围仿真机进行了硬件检查及对点检查,进入复装测试阶段。示范项目一回路主循环钠泵原型样机制造完成;涉钠设备综合试验设施成功完成首次进钠,实现了从安装到调试的重要过渡,全面调试工作正式启动。

示范快堆工艺技术在方法学、核心软件和安全分析技术等方面的研发工作全部完成。2018年,示范快堆工艺技术研究分别在方法学、核心软件开发及安全分析技术等方面获得了重大突破,已完成全部研发任务。关键系统验证研究分别在堆芯核设计、一回路实验验证、监控系统验证及钠气溶胶技术研发等方面取得了重要进展;关键设备设计与验证研究完成了主要设备的方案设计和技术设计,相关部门开展了以部件试验和功能试验为主的验证工作,并启动了工程样机制造。

示范快堆工程核主管道及主管道裤形三通研制成功,并被应用于福建霞浦快堆核电示范工程项目。关于国内首台60万千瓦第四代核电快堆核主管道及主管道裤形三通,相关部门已正式签署产品供应协议。核主管道及主管道裤形三通是快堆核电工程的核心部件之一,整个研发过程进行了全流程试验,采用了创新的“减材制造”工艺,使原材料利用率达到80%左右,较传统锻造工艺提高70多个百分点,加工周期减少约2/3的时间。

(2) 钍基熔盐堆

中科院上海应用物理研究所于2011年承担了中科院战略性先导科技专项“钍基熔盐堆核能系统(TMSR)”。上海应用物理研究所牵头开展TMSR能源系统的研发,以工业应用为目标,面向“一带一路”、节能减排与能源可持续发展等国家重大战略需求,开展以钍基熔盐堆(TMSR)为核心的新型低碳复合能源系统相关技术研发、实验验证与工程示范。

2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆选址确定。2018年,2MWt液态燃料钍

基熔盐实验堆(TMSR-LF1)明确选址甘肃省武威市民勤县红砂岗工业区,落地甘肃省武威市民勤县红砂岗镇。2018年3月,甘肃省住房和城乡建设厅官网公布了《关于钍基熔盐堆核能系统实验平台项目规划选址的公示》和《关于钍基熔盐堆核能系统实验平台配套项目规划选址的公示》。11月26日生态环境部批复《2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆环境影响报告书(选址阶段)》,11月30日国家核安全局批复《2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆场址安全分析报告》并颁发《2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆场址选择审查意见书》(国核安证字第1831号)。这是TMSR实验堆工程安审工作的第一个里程碑,标志着2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆选址工作全部完成。

2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆项目初步设计完成,开始设备采购。在4月12日组织召开TMSR-LF1设计方案国际专家咨询会的基础上,中科院完成工程初步设计;根据6月7~8日初步设计专家评审会意见,完成了初步设计优化,形成总体性文件、系统设计说明书、计算书、设备规格书、设备清单、系统逻辑图、建筑及设备图纸等339份设计文件,可支撑开展后续的建造许可证申请技术审评、关键设备采购和施工图设计工作。之后,全面启动TMSR-LF1施工图设计和关键材料、设备加工制造工作,就镍基合金材料、堆内构件(含金属、石墨)、控制棒系统、熔盐泵、主容器、换热器、核测系统、控制与保护系统等已陆续与厂家签订合同,关键设备将于2019年2月陆续完成施工图联合设计后进入加工制造阶段。

上海应用物理研究所在上海嘉定园区建设了钍基熔盐堆综合仿真实验平台,目标是建成缩比仿真堆(TMSR-SF0)、关键设备试验台架,为实验堆许可申请提供有效的实验证据。TMSR-SF0关键设备于2018年9月陆续加工制造完成,并通过了严格质量控制的出厂验收。10月10日,主容器吊装落位,项目全面进入工程总体安装阶段,先后完成堆舱落位及隔热层安装、主容器定位、堆内金属构件安装、一回路设备安装和准直、一回路管道焊接及热处理等系列关键性工作,于2019年1月底完成总装。

(3) 铅基快堆

科技部2019年2月14日下文批准中国科学院核能安全技术研究所(简



称核安全所)代表中国,加入第四代核能系统国际论坛组织(GIF)铅基堆工作组,牵头国内铅基堆相关活动,协调组织其他单位参与国际合作。

2018年4月25日,中科院核安全所牵头国内百余家行业领先单位,成立铅基堆核能产业创新战略联盟。联盟立足自主创新,通过集聚企业、政府部门和社会资源,建立联盟成员与相关企业、政府部门之间的铅基堆产业创新交流平台,推动我国铅基堆核能产业标准、评价、质量检测规范体系的完善,形成铅基堆核能创新产业优良生态链条,推动中国先进核能发展,力争为国家能源战略需求和国民经济发展做出重要贡献。

2018年11月23日,中科院核安全所牵头成立国际小型铅基堆联盟CASLER(International Co-operative Alliance for Small LEad-based Fast Reactors)。CASLER联盟成员单位包括中国、欧盟、俄罗斯、日本、韩国等十余个先进核能研发热点国家(或地区),核安全所任主席单位。联盟致力于推动铅基堆等小型液态金属堆的国际前沿技术合作和资源共享,共同解决铅基堆面临的技术挑战,与国内外相关单位共同推动世界范围内小型液态金属堆的发展。

2018年,系列创新小堆项目获立项支持。科技部重点研发计划“兆瓦级超小型液态金属冷却空间核反应堆电源”项目立项,这是科技部在小型反应堆方面的首个重点研发计划项目。该项目由中科院核安全所主持,国内11家单位参与,持续时间为2019~2021年,项目主要开展创新空间堆电源方案设计及关键技术研究。同时,中科院重点部署项目、先导专项立项支持超小型先进核能系统“核电宝”在空间及深海的应用预研,将针对地月空间港及深海智能装备的能源动力需求,开展超小型核电源的概念设计及关键技术前期预研。

3月15日,国际铅基快堆技术发展研讨会在深圳召开,其间中广核研究院与意大利ANSALDO核能公司签署了关于铅基快堆关键技术研发和系统设计的合作谅解备忘录。

2018年,中广核在铅基快堆型号研发、关键技术与设备研发、软件研发等方面取得了一系列研究成果。中广核自主开发的先进核能智能优化云设计



平台可实现铅基快堆多目标优化设计,极大地简化研发设计流程;包括氧传感器、净化及去 Po 技术在内的铅铋工艺关键技术获得突破;熔炼法制备高强度氧化物弥散强化钢技术、中国铅基快堆用奥氏体不锈钢包壳等技术研发,在铅基快堆材料耐腐蚀和抗辐射技术方面取得关键进展;完成铅基快堆主泵、主换热器、堆内换料机原理样机设计制造及铅铋环境下的实验;中广核集团完成包括材料研发、设备研发和验证等系列实验平台的设计和建造,其中 9 个实验台架已经被写入 IAEA 液态金属冷却快堆系统(LMFNS)数据库。依托中广核已有的软件和硬件研发平台及关键技术研究的突破,中广核集团启动了 CLFR 系列铅基堆的研发和设计工作。

(4) 聚变堆

1) 我国聚变技术主要进展

我国首批聚变堆结构材料标准自 2018 年 9 月 9 日起施行。由中国国际核聚变能源计划执行中心牵头组织、中国科学院核能安全技术研究所编制的抗中子辐照钢标准《聚变堆用抗辐照低活化马氏体结构钢板》(HJB 1016-2018)正式发布,标志着我国在抗中子辐照钢的工程化应用方面已走在世界前列,为该材料的工业化生产和应用奠定了基础。

我国环流器二号 A(HL-2A)装置运行参数获得重要突破。在 HL-2A 装置上成功实现了双输运垒条件下的高比压放电,获得了归一化比压大于 3 ($\beta_N > 3$) 的等离子体。这也是我国目前达到的最高纪录。比压是等离子体压强和磁压强的比值,是磁约束聚变堆反映经济性能优劣的关键参数。在这样的先进放电模式下,该装置同时实现了对聚变堆安全运行十分重要的准静态高约束(QH)模。这些实验结果标志着我国磁约束聚变研究水平的一个大提升,对进一步开展聚变能源开发具有重要意义。

利用 3D 打印技术实现聚变堆包层第一壁样件的试制与分析。中国科学院以中国抗中子辐照钢(以下简称“CLAM 钢”)为原料,利用 3D 打印技术实现了聚变堆关键部件——包层第一壁样件——的试制并对其组织和性能进行了研究分析。

东方超环(EAST)首次实现 1 亿度运行,为高参数稳态运行奠定基础。



中国科学院等离子体物理研究所的东方超环加热功率达到 10 兆瓦，等离子体储能增加到 300 千焦，等离子体中心电子温度首次达到 1 亿度，运行近 10 秒。2018 年度东方超环物理实验持续 4 个多月，面向未来聚变堆先进稳态运行模式的发展和长脉冲运行下的关键科学技术问题，重点开展了高功率加热下稳态运行模式条件下等离子体电流分布调控、近堆芯物理机制和边界杂质控制研究的系列实验。东方超环取得的这些实验成果为未来国际热核聚变实验堆运行和正在进行的中国聚变工程实验堆（CFETR）工程和物理设计提供了重要的实验依据。

中国科学院等离子体物理研究所在 EAST 上利用三维旋转磁扰动场控制偏滤器靶板热负荷研究取得新进展，采用环向旋转的外加磁扰动场在 EAST 上开展了边界局域模控制实验研究。通过磁扰动谱型扫描，发现在保持抑制效果的情况下，还可以将分裂结构的局域粒子流分布沿靶板环向做较大范围移动，表明随时间变化的扰动场有利于粒子流和热流在整个靶板上的均化，避免靶板局部过热。研究结果对于在磁约束聚变装置中，利用三维磁扰动控制靶板瞬态热负荷的相关技术发展和物理解释具有重要的推动作用。

中国环流器二号 A（HL-2A）成功实现硬 X 射线成像系统投入实验运行并首次获得结果。在中法合作框架下，中法双方于 2017 年提出在中核集团核工业西南物理研究院中国环流器二号 A（HL-2A）装置上发展一套可进行高时空分辨和高能量分辨的硬 X 射线成像系统，该系统能测量高能超热电子的演化，是在核聚变装置上开展电流驱动、控制和高能粒子实验研究的重要诊断系统，可以提供丰富的关键物理数据，助力科研人员分析“把脉”实验现象。经过中法专家将近一年的努力，该诊断系统被安装至 HL-2A 装置上，成功完成系统联调。在 2018 年中法联合实验周期间，来自法国原子能委员会可控核聚变研究所的专家团和该院专家共同在装置上开展了联合实验。该成像系统首次测量到了能量高达 200keV 的高能电子的演化行为，获得了兆瓦级低杂波加热的功率沉积和高能电子分布。该诊断系统为国内首套先进的超热电子成像诊断系统，对于未来聚变燃烧等离子体中的高能电子行为研究、电流剖面控制和长脉冲运行具有重要意义。该项联合实验在中法聚变联合实验中



心框架下开展，也是中欧聚变合作的重要研究课题之一。

低混杂波电流驱动技术有大的突破。中核集团核工业西南物理研究院中国环流器二号 A（HL-2A）利用先进的主动—被动天线（PAM）实现了无感电流全驱动，在高约束模（H-mode）条件下，耦合系数达 98% 以上。并用先进的高时空分辨和高能量分辨的硬 X 射线成像系统（即碲化镉相机）获得了无感驱动的电流分布。这些先进技术对于未来聚变燃烧等离子体中的高能电子行为研究、电流剖面控制和长脉冲运行具有重要意义。

2）我国承担的国际热核聚变实验堆（ITER）采购包取得重要进展。2018 年年初，中核集团核工业西南物理研究院与东方电气集团广州重型机器股份有限公司和贵州航天新力铸锻件股份有限公司联合成功研发了 ITER 首个全尺寸包层屏蔽模块原型件；该院联合成都国光电气股份有限公司承建的 ITER 真空室内部件热氦检漏设备通过验收，并在该设备上完成了 ITER 包层屏蔽模块全尺寸原型件的世界首次热氦检漏，测试结果显示各项性能指标达到要求，为建立未来托卡马克装置大型真空室内部件的热氦检漏试验标准提供了重要的基准，已正式申报“核聚变堆高温承压部件的热氦检漏方法”国际标准，结果得到 ITER 国际组织专家和国际同行的高度认可，表明我国已成功掌握聚变堆的高热负荷与中子屏蔽核心技术。6 月 9 日，该院联合国内多家企业组成的中国团队完成的 ITER 磁体支撑首批产品在贵州遵义正式交付，运往位于法国的国际热核聚变实验堆现场，成为进入厂房并进行安装的首批基础性部件，该子项目完成了从材料到制造工艺的系列认证，以及 ITER 磁体支撑采购包的生产制造任务，取得了多项关键技术的重大突破。7 月 26 日上午，由中国科学院等离子体物理研究所承担研制的 ITER 计划首个超导磁体系统部件——馈线采购包 PF4 过渡馈线——竣工仪式成功举办，意味着我国在核聚变工程核心技术领域真正实现了全球领跑。中国科学院等离子体物理研究所攻克了众多技术难点，在高温超导电流引线、超导接头、低温绝热、低温高压绝缘等核心技术方面取得了诸多国际领先成果。8 月 9 日，中广核工程有限公司牵头的 ITER 核级压力容器蒸汽冷凝罐（VST）设计供货项目在法国卡德拉奇 ITER 现场完成最终产权交接。这标志着我国企业首次中标的国际热核聚变实验反应堆核级压力容器设



计供货项目正式收官，这意味着我国企业设计供货的 4 台核级压力容器 VST 设备及相关文件完成全部质量审查，设备及文件状态完全满足合同技术要求。

（四）核燃料循环产业

核燃料循环产业是核能发展的大动脉，属于高科技战略性产业，涉及化工、冶金、材料、电子等多个学科和领域。核燃料循环产业包括铀矿勘查、铀矿采冶、铀纯化转化、铀浓缩、燃料元件、乏燃料后处理、放射性废物处理处置等环节。

我国拥有世界上只有少数国家才具有的完整核工业科技工业体系。20 世纪 80 年代，我国核电产业开始起步和规模化发展。为了适应核电发展需求，核燃料产业不断推进深化改革、科技创新和自主化能力提升，按照核能发展规划配置产能，始终保障了我国核电当前和长远的发展需要。加强铀资源保障能力建设，已经构建了较为可靠的铀资源供应体系；在铀纯化转化、铀浓缩、燃料元件等环节形成了可靠的本土化供应能力，产业能力大幅提升，在关键环节实现了技术升级换代；乏燃料管理体系不断完善，放射性废物得到安全管理。核燃料循环产业为核电安全、高效、可持续发展提供了坚实的基础。

2018 年，我国核燃料产业生产运行保持稳定，部分环节产业能力进一步增强，市场化、国际化步伐进一步加大，科技研发取得积极进展，竞争力不断提升，核燃料产业科研生产活动安全、受控。

1. 天然铀勘查采冶

1.1 铀矿勘查

（1）铀矿勘查取得积极进展，进一步提升了铀资源保障能力

铀矿资源类型众多，其中砂岩型、花岗岩型、火山岩型和碳硅泥岩型（四大类型）铀矿占了全国铀矿资源总量的 91.9%，其他类型铀矿占 8.1%（见图 32）。截至 2018 年底，我国已查明铀矿资源分布于新疆、内蒙古和江西等 23 个省（自治区），已经落实了 6 个万吨至 10 万吨级铀矿资源基地。

2018 年，国内铀矿勘查以北方盆地砂岩型铀矿为主攻类型，以伊犁盆地

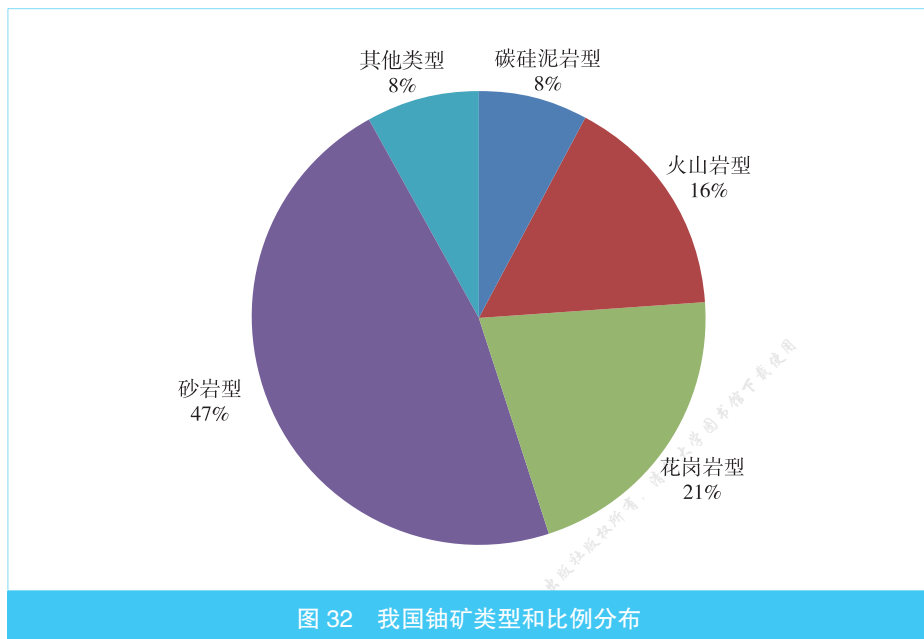


图 32 我国铀矿类型和比例分布

南缘、鄂尔多斯盆地东北部、二连盆地中东部和松辽盆地西南部等铀矿资源大基地为重点，全年共完成钻探工作量约 50 万米，新发现工业铀矿孔 217 个。

①砂岩铀矿找矿取得新突破。其中哈达图铀矿床埋藏浅、品位高、已查明资源超万吨；巴彦乌拉铀矿床因芒来地段资源规模持续扩大，有望发展为特大型铀矿床；松辽盆地南部大林万吨级铀矿产地控制程度进一步提高，矿体连续性得到了查证；伊犁盆地洪海沟铀矿床已落实为特大型铀矿床。②硬岩型铀矿老矿山深部和外围找矿取得新进展。甘肃龙首山菱岭西和江西相山鹏姑山等地段发现厚大工业铀矿体；广东诸广南长排地区深部矿体连续性得到查证，资源规模持续扩大。③新区探索取得新发现。准噶尔盆地东部、鄂尔多斯盆地南部、塔里木盆地北缘等地区均揭露到工业铀矿化，有望发现新的铀矿产地，有效缓解了铀矿勘查后备基地不足的突出问题。

（2）勘查技术逐步升级，部分勘查装备自主化取得新突破

2018 年全年，我国在北方沉积盆地和南方硬岩地区预测了 20 多片一级成矿远景区，支撑扩大二连、通辽等大基地资源，拓展了铀矿找矿新区、新



类型和新空间。启动了云平台 and 大数据找矿计划，高光谱技术被首次应用于砂岩铀矿勘查领域，航空电磁、三维地震和无人机航测新技术在铀矿勘查和多矿种资源调查中显示出积极成效。

小型化遥感信息处理设备和可移动式航空放射性测量校准装置研制取得重要进展，自主研制的放射性资源三维计算软件有望替代传统人工模式，模块化—自动化泥浆处理装置推进了铀矿勘查向绿色发展，土壤化探和新型测井仪器显著提升了深部找矿精度，放射性测井安全和防护使用技术难题得到有效解决。

（3）铀矿勘查开发政策进一步完善

2018 年，在自然资源部积极推动下，固体矿业权叠置政策落地，推动了煤炭、油（气）矿业权内禁止设置铀矿权问题的解决，为纳岭沟矿床和大营矿床开发奠定了基础。

（4）加强国际合作

2018 年，我国积极推进了铀矿勘查开发技术服务“走出去”及国际合作。深化与沙特合作，保质、保量完成了铀钍资源调查评价项目 7 万米钻探任务以及合同规定的各项野外工作，圈定了多处靶区，有望落实铀、钍、铀、钍、稀土大型矿床。与约旦原子能委员会、约旦铀业公司实现了互访，双方签署了铀资源开发合作谅解备忘录。进一步加强了与俄罗斯、澳大利亚等国家在铀矿勘查技术领域的国际合作与交流。此外，新落实国际原子能机构项目 3 项，实施国家外专局项目 7 项，积极派遣技术专家参加国际原子能机构多领域的活动。

1.2 铀矿采冶

（1）国内铀矿采冶项目保持安全稳定运行

中核集团作为国内铀资源开发的主体，加快建设了集约化、规模化、数字化、智能化的千吨级绿色铀矿大基地，随着蒙其古尔一期、二期，内蒙古巴彦乌拉、钱家店、钱家店扩建等北方地区地浸“五大工程”的全面建成，基本形成了以北方绿色地浸砂岩矿山为主体、以南方硬岩矿山为补充的产业发展格局，中国本土铀矿供应能力逐渐提升。2018 年各铀矿采冶工程项目按计

划保持安全稳定生产和运行。中广核集团新疆萨瓦甫齐铀矿项目处于探转采阶段,环评报告已获得生态环境部受理,预计2019年下半年申请项目核准。

(2) 地浸采铀不断迈向精细化,数字化矿山建设取得新进展

2018年,我国进一步提升了地浸采铀工艺水平:地浸采铀超深地浸钻孔结构和成井工艺取得新突破,向深部第二开发空间迈进;针对西北某地区地浸难题研发了新型浸出技术,单孔抽液量和铀浓度获取了较理想的参数;研发了低渗砂岩铀矿化学增渗及解堵工艺技术,保持了地浸生产的连续稳定运行。

截至2018年,我国北方地浸铀矿山基本实现无人值守,井场和水冶生产实现自动化远程控制,智能预警、网络实时监测取得新进展;研究提出新时代硬岩标杆铀矿山改造技术方案,针对关停硬岩矿山设计了安全环保领域的自动化监控报警系统和视频监控系统。集成创建了先进高效、具中国特色的千吨级铀矿大基地整套工程应用技术体系,不仅为国内千吨级矿山建设提供了技术样板,也为“一带一路”走出去提供了工程技术解决方案。

(3) 成功拓展铀钍共伴生矿技术

成功打通独居石制备铀、钍、稀土工业化技术流程,氧压浸出工艺使钼浸出率实现翻番,研究成果已应用于独居石项目和洁源铀业技术改造项目。

(4) 继续加强国际合作

铀资源红皮书《2018年铀:资源、生产和需求》指出,全球已查明开采成本低于130美元/千克铀的铀资源总量为614.22万吨铀,比上一版红皮书公布的数量增加7.4%;已查明开采成本低于260美元/千克铀的铀资源总量为798.86万吨铀,比上一版红皮书公布的数量增加4.5%。我国铀资源开发积极发挥两种资源、两个市场的作用,积极推进了铀资源海外开发及铀贸易。

继续深入推进海外铀资源开发。截至2018年12月,中核集团在尼日尔、纳米比亚、津巴布韦和蒙古国拥有生产项目1个,维护项目1个,矿山前期准备项目1个,勘探项目2个,其中尼日尔阿泽里克铀矿项目是中国第一个海外铀资源投资开发项目,纳米比亚罗辛矿收购协议已经完成签订。中广核



集团在中亚、北美、大洋洲、非洲等全球富铀地区完成了资源布局，控股收购了纳米比亚湖山铀矿、澳大利亚 EME 公司，参股哈萨克斯坦谢米兹拜伊铀公司、加拿大 Fission 公司，与乌兹别克斯坦地矿委均股成立中乌铀公司。相关资源情况见表 43。

表 43 我国企业控股开发的海外铀资源项目情况

单位：吨铀

项目名称	股东	资源量	设计年产量	2018 年产量	运回国内量
阿泽里克	中核国际（中核集团香港上市公司）持股 37.2%、中非基金持股 24.8%、尼日尔国家矿业公司持股 23%、尼日尔政府持股 10%、韩国资源公司持股 5%	13692	678	0	累计 699
湖山	54% 中广核 36% 中非基金 10% 纳米比亚国矿公司	248446	5500	3570	累计 3520
澳洲能源金属公司	66.45% 中广核	26023	/	0	0

注：澳洲能源金属公司旗下项目目前尚没有进入可行性研究阶段。

积极参股国际铀资源公司。截至 2018 年底，中核集团已经完成收购帕拉丁公司 LH 控股公司 25% 的股权和 LH 项目公司 25% 的债权。中广核集团先后参股收购了哈萨克斯坦谢米兹拜伊铀公司和加拿大 Fission（裂变的铀业）公司（见表 44）。

表 44 我国企业海外收并购项目情况

单位：吨铀

项目名称	股东	权益资源量	设计年产能	2018 年产量	2018 年运回国内量
LH	中核海外占股 25%	12300	2000	480	467
裂变铀业公司	19.92% 中广核	10816	/	0	0
谢米兹拜伊合伙企业	49% 中广核 51% 哈原工	剩余 29175	1400	1149	累计 7398

注：裂变铀业公司目前尚没有进入可行性研究阶段，暂不能确定年产量。



2. 核燃料加工

（1）铀转化能力持续提升，新一代铀浓缩离心机实现升级换代

铀转化方面，2018年12月，二七二铀业铀转化工程项目顺利通过现场竣工验收，这标志着我国“一南一北”两个铀纯化转化基地中的南方基地正式建成，国内核燃料产业布局结构得到进一步优化，为满足我国核能事业现阶段发展需求、保障我国核燃料循环体系健康发展提供了有力支撑。

铀浓缩方面，2018年11月19日，由中核集团自主研发、具有完全自主知识产权的我国新一代铀浓缩离心机大型商用示范工程通过国家竣工验收。这标志着我国铀浓缩离心机实现了升级换代，具备大规模商用条件，铀浓缩整体技术水平、经济性将进一步提升。

（2）核燃料加工生产线保持安全稳定运行，在建项目稳步推进

我国核燃料元件的制造能力经过多年的建设，已经形成了南北两个核燃料制造基地。可以提供压水堆、重水堆、高温气冷堆等多种类型燃料组件，满足核电发展需求。中广核集团在哈萨克斯坦正在建设200吨的AFA-3G压水堆核燃料组件厂，2018年已完成主工艺和辅助系统厂房及系统设计，详细设计已获得政府批准，设备及零部件采购和制造正按计划执行，计划最早2020年底可正式投产。2018年，国内在运核燃料加工生产线保持安全稳定运行，保障了我国核电发展需求，具体产能如表45所示。

表 45 我国核燃料生产能力

组件类型		812 厂	202 厂	合计
压水堆	AFA 3G 组件（吨铀/年）	800	200	1000
	AP1000 组件（吨铀/年）	/	400	400
	VVER 组件（吨铀/年）	50		50
重水堆（吨铀/年）		/	200	200
高温气冷堆（个球/年）		/	30 万	30 万

注：中广核集团在哈萨克斯坦建设的200tU/a组件厂，由哈萨克斯坦国家原子能工业公司控股。



（3）自主品牌核燃料组件正在加快发展

压水堆燃料组件方面。秦山一期核电站核燃料（CF1）实现了我国自主核燃料供应的起步，近年来，国内相关集团加大开发力度，在建设自主品牌高性能压水堆燃料元件方针的指引下，取得积极进展。其中，中核集团自主研制的先进核燃料元件 CF3，目前进入第三循环考验，更先进的 CF4 燃料组件已经启动研发。中广核集团自主研发设计的 4 组 STEP-12 核燃料组件正在开展第二循环考验；2017 年 12 月，另外 4 组改进型 STEP-12 先导组件及 4 组 CZ 空管阻流塞组件制造完毕，并于 2018 年 2 月全部装入岭澳一期 2 号机进行入堆辐照考验。国家电投依托国家重大科技专项主持研发的我国首个全锆骨架 14 英尺高性能燃料组件 SAF-14 已于 2016 年 12 月完成定型组件研制，目前正开展入堆先导组件制造和入堆安全评价工作，预计 2020 年入堆开展辐照考验。同时国家电投积极拓展 SAF 系列燃料型号，适用于 12 英尺堆芯的燃料型号 SAF-12 和供热堆的燃料型号 SAF-s6 目前已完成了方案设计。

先进燃料元件方面。中核集团瞄准国际最新技术方向，与世界各国开展了研发竞赛——同步开展环形燃料元件和 ATF 燃料元件的研究工作，目前均已圆满完成第一阶段研究工作。2018 年 11 月 20 日，由中核集团自主研制、拥有自主知识产权的我国首套全尺寸压水堆环形燃料组件试验件成功下线。2018 年 11 月 26 日，中核集团完成全球首次环形燃料零功率物理实验，走在世界前列。目前正在开展环形燃料元件设计、制造和先导组件入堆安审准备工作。2017 年 8 月 25 日，中核集团实现第一阶段先进耐事故材料（碳化硅、FeCrAl）入堆辐照考验，目前正在进行辐照后检验工作，同时正在开展第二阶段耐事故材料（FeCrAl、涂层）入堆辐照考验准备工作，目前已完成耐事故燃料元件概念设计，计划于 2020 年前完成芯块（高铀密度、FCM）和燃料短棒入堆辐照及检验工作。上述工作为提升我国核电站安全性提供了有力保障，为增强中国核燃料在世界的话语权奠定了良好基础。中广核集团已经编制形成具有自主知识产权的 ATF 性能分析软件，完成 ATF 包壳材料辐照小样品制备以及正常和事故工况下 ATF 燃料



分析模型研究,部分 ATF 材料样品已启动辐照考验工作,后续还将逐步开展燃料小棒/小组件中子辐照工作,ATF 元件正在从概念、材料研究逐渐转向工程示范研究。国家电投开展了 ATF 燃料锆合金包壳管耐磨损抗氧化表面涂层的基本原理研究和方案设计,完成了材料试制和堆外关键性能考核,完成了安全性、经济性和相容性分析,后续计划开展工程化样管试制及其辐照考验。开展了高性能 ATF 燃料单晶 UO_2 的试制,正在开展锆基复合燃料芯块的材料试制和性能考核。

先进核燃料材料方面。我国已经实现了 AFA-3G 燃料组件所需 M5TM 锆合金管材本土化生产加工;已经形成完整的 AP1000 燃料 Zirlo 合金生产链,包括海绵锆生产、合金熔炼、条带和管材制造等全部生产工艺。

我国自主研发生产、改进的 Zr-4 合金(低锡 Zr-4)可满足燃耗低于 $40\sim 45\text{GW}\cdot\text{d/t}$ 燃料组件的要求。拥有自主知识产权的 N36 锆合金首批次工程化包壳管材于 2018 年 9 月 2 日通过产品和个性鉴定,产品制造工艺和质量稳定可靠,符合相关要求,为“华龙一号”CF3 组件保障供应奠定了基础。10 月 31 日,中核二七二铀业核级海绵锆铪中试验证项目成功,进一步完善了我国核级海绵锆铪生产工艺技术。国家电投完成了自主化吸收体材料的全新概念设计,形成了高价值、耐水腐蚀的稀土陶瓷类控制棒吸收体材料,以及低成本、耐水腐蚀的可燃毒物吸收体材料,完成了材料初步试制和性能测试,关键性能实现显著提升,后续计划开展辐照考验。

3. 核燃料循环后段

核燃料循环后段包括乏燃料管理与放射性废物管理等环节。一般而言,1 台百万千瓦压水堆核电机组每年可产生 20~25 吨乏燃料,卸出的乏燃料经过在堆水池冷却几年后需要运离反应堆水池贮存。从全球来看,乏燃料的管理可分为直接处置和后处理两种方式。我国坚持核燃料闭式循环政策,提高铀资源利用率,同时减少放射性废物的最终处置量。针对放射性废物,我国实行分类管理,针对不同种类放射性废物采取不同的管理手段。

(1) 乏燃料管理

截至 2018 年 12 月底,我国压水堆核电站累计产生乏燃料 4989tHM。为



了实现乏燃料安全有效管理，保障核电站运行安全，我国积极推进乏燃料运输、贮存等环节能力建设，不断完善核燃料循环“大动脉”体系。

为了加快推进核燃料后段产业市场化、专业化发展，依托中核集团全产业链能力优势，2017年年底，国内成立了第一家以乏燃料管理、核设施退役治理、放射性废物处理处置等为主要业务的专业化核环保公司——中核环保有限公司，为国内核设施退役治理、乏燃料管理、放射性废物管理提供了重要支撑。中广核集团、国电投集团都积极加入我国核燃料循环后段科研生产体系能力建设中，分别依托现有下属专业化公司建立了研究、工程设计、生产运营专业队伍，为核电站乏燃料管理、中低放射性废物处理处置安全管理提供重要支撑。

不断完善乏燃料贮存体系。乏燃料离堆贮存按照技术路线可以分为干法贮存和湿法贮存。目前，我国压水堆乏燃料离堆贮存主要采取湿法贮存，截至2018年底，我国具备湿法贮存能力1300tHM，正在建设湿法贮存能力1200tHM。为了缓解部分核电机组乏燃料贮存压力，加强技术和能力储备，我国也正在建设干法贮存能力。我国唯一的商业重水堆核电站秦山三期，其乏燃料贮存采取干法贮存，现有的干法贮存设施可以满足该核电站全寿期运行产生的乏燃料贮存需求。我国在运、在建和拟建的压水堆贮存能力如表46所示。

表 46 我国压水堆乏燃料离堆贮存能力情况

贮存设施	贮存方式	贮存能力（tHM）	备注
中试厂	湿法	1300	在运
示范厂	湿法	1200	在建
大亚湾核电站	干法	400	在建
田湾核电站	干法	150	在建
秦山二期核电站	干法		正在开展前期工作

继续推进乏燃料运输体系建设。为了适应今后大规模乏燃料运输的要求，我国正在组织推进公路—海运—铁路联合的乏燃料运输体系建设。2018年，

国家确定了联运主通道,明确了红沿河核电站核电码头作为海铁中转码头,各核电站码头作为节点码头;正在成立由专业航运公司与核工业企业合资合作的乏燃料运输专业船公司,基本完成了乏燃料运输专用船舶设计工作;为满足 2020 年以后乏燃料大规模运输的需要,中核集团签订了 10 台乏燃料运输容器的采购合同,其中 7 台为国外进口容器,3 台为国产容器;中广核集团签订了 7 台高燃耗乏燃料运输容器采购合同。

国内乏燃料容器自主研发方面,由中核集团最新研发成功的具有自主知识产权的装备已获得国家核安全局容器设计许可证和容器制造许可证,相关制造工作已经开始。由中广核集团自主研发的高燃耗乏燃料金属运输容器已经完成比例容器的制造和验证试验,并同步开展核安全审评工作。

2017~2018 年,中核集团通过公路运输方式将大亚湾核电站 5 个容器共计 130 组乏燃料运输到后处理中试厂贮存,保障了核电厂安全稳定运行。

有序推进乏燃料后处理能力建设,进一步加强乏燃料后处理科研工作,支持乏燃料后处理关键技术、设备和工艺研发。

(2) 放射性废物处理处置

为加强对放射性废物的安全管理,我国制定了新版的《放射性废物分类》,自 2018 年 1 月 1 日起施行,1998 年发布的原《放射性废物的分类》(HAD401/04)同时废止。按照新的放射性废物分类方式,将放射性废物分为极短寿命放射性废物、极低水平放射性废物、低水平放射性废物、中水平放射性废物和高水平放射性废物等 5 类,其中极短寿命放射性废物和极低水平放射性废物属于低水平放射性废物范畴。5 类放射性废物对应的处置方式分别为贮存衰变后解控、填埋处置、近地表处置、中等深度处置和深地质处置(见图 33)。

我国低放废物采取近地表处置,目前我国建设运营着三座低放处置场,分别是西北处置场、广东北龙处置场、四川飞凤山处置场。2018 年,西北处置场共接收废物 1.72 万立方米,完成处置 1.7 万余立方米,并正在进行扩容计划;飞凤山处置场共接收处置废物 1.17 万立方米。表 47 为各放射性废物处置场情况。

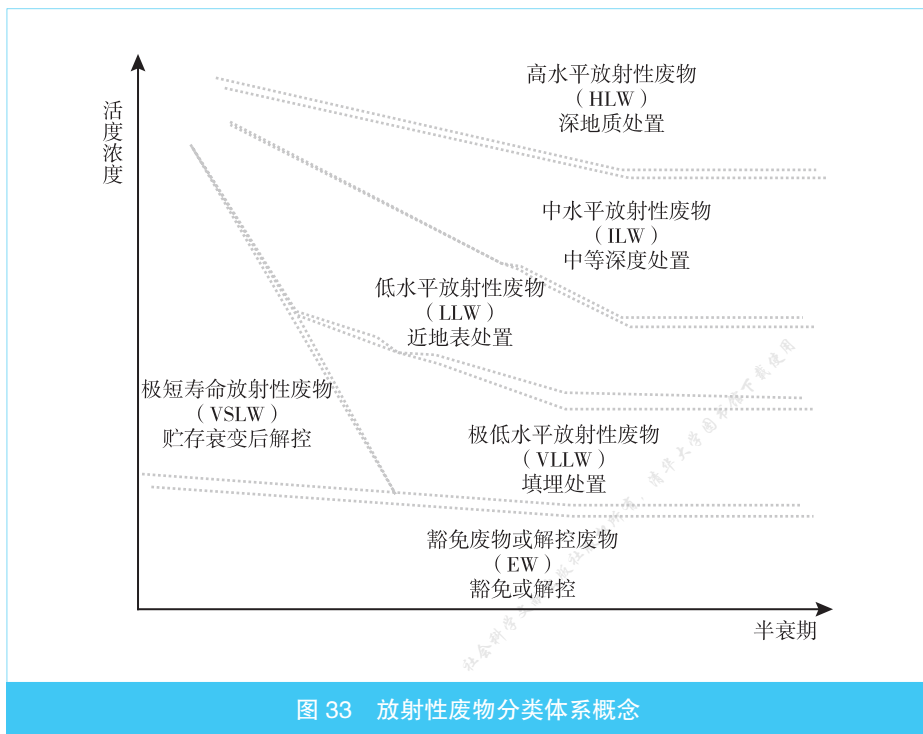


表 47 我国低中放废物处置场情况

	西北处置场	北龙处置场	飞凤山处置场
持证单位	中核清原环境技术工程有限责任公司	广东大亚湾核电环保有限公司	中核清原环境技术工程有限责任公司
规划设计容量	200000 立方米	80000 立方米	180000 立方米
已建成容量	20000 立方米	8800 立方米	40000 立方米
已接收废物总量	12000 立方米	3000 立方米	/
已接收废物活度	4.53E+13Bq	3.48E+13Bq	/

注：数据截止到 2018 年 12 月底。

近年来，我国要求新建核电项目要配套建设低放废物处置设施，有力地推动了处置能力的建设。

中放废物主要为 α 废物及长寿命废物，目前我国已经开始研究建设中等



深度废物处置场,相关工作正在推进中。

针对高放废物,我国采取的是深地质处置技术路线。目前已经明确了“处置库选址、地下实验室研究和处置库建设”的“三步走”研发战略;在工程屏障材料、核素迁移机理、工程建设技术等方面取得了积极进展;高放废物地质处置地下实验室项目申报审批已经取得重要进展。

(五) 核电装备制造

通过重大专项的实施、工程设计的实践及经验积累,国内已形成覆盖核电主设备、泵阀、控制系统、大锻件等关键设备和原材料的全供应链体系,三代核电综合国产化率达到85%以上,能满足每年新开工建设8~10台核电机组的需求。

1. 2018年中国核电装备制造总体情况

2018年中国核电装备的自主化和国产化能力不断提升,关键制造技术创新和重大工程装备制造成果丰硕,一批具有自主知识产权的关键设备成功完成制造及验收,包括全球首台华龙一号福清5号堆内构件、稳压器、汽轮机和发电机,首台出口海外的华龙一号卡拉奇2号汽轮机和发电机,中广核华龙一号示范项目防城港3号蒸汽发生器等,以及国家科技重大专项、全球首台球床模块式高温气冷堆蒸汽发生器和主氦风机等。国家科技重大专项CAP系列核电设备研制方面,CAP1400主管道制造完成,首台国产化AP1000屏蔽主泵制造成功。核电装备用大锻件、U形管和焊材等原材料制造技术水平也不断提高,均已基本实现了国产化目标。

2018年国内核电主设备交付49台套,以二代加和华龙一号为主,占比90%。具体见图34和表48。

2. 2018年中国核电装备制造主要成果

(1) 核电关键设备研制成果

1) 三代核电关键设备

——反应堆压力容器

2018年11月29日,中国一重承制的华龙一号防城港二期3号机组核反

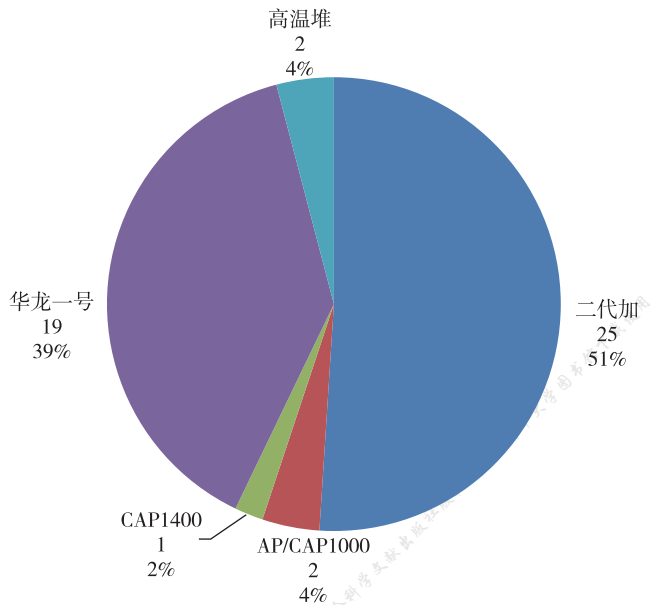


图 34 2018 年国内交付主设备堆型分布情况

表 48 2018 年国内核电主设备生产情况

堆型	设备	交付数量
二代加	压力容器	3
	蒸汽发生器	9
	稳压器	2
	堆内构件	2
	控制棒驱动机构	2
	主泵	3
	汽轮机	2
	汽轮发电机	2
AP/CAP1000	压力容器	1
	主泵	1
CAP1400	压力容器	1



续表

堆型	设备	交付数量
华龙一号	压力容器	4
	蒸汽发生器	4
	稳压器	2
	堆内构件	1
	主泵	4
	汽轮机	2
	汽轮发电机	2
高温气冷堆	控制棒驱动机构	1
	蒸汽发生器	1
合计		49

注：主要统计了上海电气、东方电气、哈尔滨电气和中国一重的生产数据。

应堆压力容器完成制造并交付现场。制造企业攻克了 M170 大直径螺栓螺距加工、大尺寸厚壁径向支承键组焊、镍基材料安全端组焊、CRDM 密封焊变形控制等技术难关，实现了压力容器关键路径所有主锻件大面积堆焊、主环缝、马鞍焊缝、安全端焊缝等焊接工序质量检验一次合格，水压试验一次成功。

2018 年 12 月 4 日，由上海核工院自主设计，中国一重、国核运行等单位联合实施的大型先进压水堆核电站重大专项“国和一号（CAP1400）反应堆压力容器研制”课题顺利通过国家能源局组织的正式验收。课题攻克了国和一号反应堆压力容器设计、关键锻件制造工艺及反应堆压力容器制造等关键技术，全面掌握了国和一号反应堆压力容器设计制造技术，实现了国和一号反应堆压力容器自主设计和自主制造。

——蒸汽发生器

2018 年 8 月 6~7 日，由上海核工程研究设计院有限公司牵头，联合上海电气核电设备有限公司、上海电气上重铸锻有限公司、东方电气（广州）重型机器有限公司等共同承担的大型先进压水堆及高温气冷堆核电站重大专项“CAP1400 蒸汽发生器研制”课题，通过了由国家能源局组织的正式验收。课题组掌握了 CAP1400 蒸汽发生器相关制造技术，包括群孔高效成型及检测技



术、关键焊缝性能、焊接技术、管束组件关键制造及检测技术、制造缺陷诊断及评价技术、大锻件制造和传热管应用性能技术等，突破了大型特厚结构复杂锻件的制造技术、管束装配、群孔高效检测、镍基合金双热丝等离子堆焊技术、超窄间隙厚壁激光填丝焊技术等瓶颈。

2018 年，东方电气（广州）重型机器有限公司和哈电集团（秦皇岛）重型装备有限公司承制的多台华龙一号蒸汽发生器（用于福清 6 号机组、防城港 3 号机组、巴基斯坦卡拉奇 3 号机组）完成制造。制造企业攻克了水平支承连接板焊接、管子管板胀接、防振条安装、最终焊缝局部热处理中防传热管变形等技术难点，开发了管板深孔快速检测及自动化记录技术、不可达区域防振条位置的涡流检测技术、管束防振条固定技术、带限位结构管束穿管技术、上部组件倒扣安装技术、疏水孔竹节式全深度机械胀接工艺技术、一次侧接管安全端镍基合金环焊缝超声自动扫查技术和管板内圆弧区堆焊层专用超声检测技术等。

上海电气核电设备有限公司承接了法国 FRAMATOME 公司分包的南非 KOEBERG 项目的 6 台蒸汽发生器。该合同是中国首次完全商业化出口的核岛主设备，是 FRAMATOME 在非中国核电市场项目上与中国企业合作的核电主设备首单，是国内首次完全按照 ASME 质保体系要求执行、由第三方 ANI 监造并颁发 NPT 钢印证书的项目。目前 6 台蒸汽发生器分别在进行液压胀、支撑板安装或内套筒顶盖装焊等工序，首台产品预计 2019 年底完工。

——堆内构件

2018 年 4 月 10 日，上海第一机床厂有限公司承制的福清 5 号机组堆内构件完成设备制造并发运至核电站现场。作为核电反应堆的堆芯“龙骨”设备，华龙一号堆内构件由 236 类、13487 个零件组成，高度达 11.036 米，最大直径为 4.188 米，重约 160 吨。设备制造过程中形成焊接、材料、检测、工艺等重大技术创新 18 项，取得 10 项发明专利。

另外，上海第一机床厂有限公司牵头，联合东方电气（武汉）核设备有限公司共同承担的核电重大专项“CAP1400 堆内构件制造技术研究”课题已完成。课题组攻克了 CAP1400 导向筒制造技术（激光焊）、CAP1400 支承柱

组件制造技术(激光焊)以及堆内构件对中技术及检测工艺(激光对中)等难题。目前上海第一机床厂有限公司承担的 CAP1400 示范工程堆内构件正在研制过程中,已完成上部堆内构件上支撑组件焊接、下筒体组件焊接等工作,计划 2020 年完工。

——控制棒驱动机构

2018 年 3 月 22 日,四川华都核设备制造有限公司制造的福清 5 号机组 ML-B 型控制棒驱动机构通过出厂验收。设备通过了 1500 万步热态寿命试验和 0.3g 抗震试验,各项指标均满足并优于三代核电站设计指标。

2018 年 4 月 9~10 日,上海第一机床厂有限公司牵头的国家科技重大专项“CAP1400 控制棒驱动机构研制”课题通过了国家能源局组织的正式验收。课题组突破了耐高温磁轭线圈、钴基堆焊双齿钩爪、驱动杆精密加工等关键制造技术,成功制造了 CAP1400 控制棒驱动机构样机 1 套,控制棒驱动杆 2 根,控制棒驱动机构电源系统样机 2 台。CAP1400 控制棒驱动机构样机通过了寿命试验考核,实际步跃 900 余万步、超行程 1900 余次、释棒延迟时间小于 96 毫秒。

——核主泵

①轴封主泵:2018 年 5 月 10 日,哈电集团哈尔滨电气动力装备有限公司承制的福清 5 号机组反应堆冷却剂泵成功发运。华龙一号是由我国自主研发的第三代核电技术,反应堆冷却剂泵是华龙一号核反应堆的心脏。哈电安装在自主建造的全流量试验台架上顺利完成了主泵的各项试验,自主研发的新型复合材料轴瓦顺利通过了全厂断电(SBO)试验,机械密封等部件全部实现了国产化。

②湿绕组主泵:上海电气凯士比核电泵阀有限公司承制的 CAP1400 50HZ 湿绕组电机主泵样机目前正在进行相关试验,至 2018 年 11 月,已验证了热屏、转子保护套等部件的改进效果:泵组效率明显提高,运行振动值有较大降低;解体检查情况良好,符合设计预期;安装防反转装置后,将进行进一步验证。

③屏蔽主泵:2018 年 9 月 11 日,由沈阳鼓风机集团核电泵业有限公司和哈电集团哈尔滨电气动力装备有限公司共同承制的首台 AP1000 屏蔽电机主



泵在沈鼓核电顺利完成全部产品试验和试验后拆检工作，试验数据显示主泵各项性能参数均满足主泵设计规范书要求，整体拆检各项指标均满足相关要求。制造企业在引进、消化、吸收 AP1000 屏蔽电机主泵技术的基础上，开展了多项关键制造技术的国产化攻关，完成了 ASME 取证、工艺验证、关键零部件制造等里程碑任务节点，实现了完整的国产化制造和自主化制造目标。

——稳压器

2018 年 4 月 30 日东方电气（广州）重型机器有限公司承制的福清核电站 5 号机组稳压器完成制造并发运。设备制造企业掌握并优化了关键制造工艺。如电加热元件与套管焊接及无损检测技术；电加热元件套管与封头冷装及焊接防变形技术；接管安全端与防热冲击套管焊接技术；安全端全盲式环槽加工技术等。

2018 年 11 月 19 日，哈电集团（秦皇岛）重型装备有限公司承制的卡拉奇 2 号机组稳压器发运。设备制造企业掌握了封头内壁堆焊、封头电加热器套管冷装孔加工、电加热器套管冷装、电加热元件焊接等关键技术，并实现了电加热元件及电缆国产化。

2018 年 12 月，由东方电气（广州）重型机器有限公司承制的国和一号机组稳压器完成总装，现进入水压准备阶段。该设备主锻件、电加热器、喷雾头等三代稳压器关键材料均实现了国产化。设备制造企业解决了电加热器套管的冷装及焊接、电加热器与电加热器套管的焊接、隔热套管的焊接等技术难题，该设备计划于 2019 年完工。

——PRS 换热器

2018 年 2 月 2 日，国产首套华龙一号福清 5 号机组 PRS 换热器在东方电气（广州）重型机器有限公司顺利发运。设备制造企业掌握并优化了关键制造工艺。如带坡口、填丝的管子管板封口焊技术；框架组件装焊、防变形控制及机加技术；免除消应力处理管子管板全深度液压胀技术等。

——常规岛主设备

2018 年 7 月 18~19 日，由上海成套院牵头，联合东方电气、哈尔滨电气、上海电气等单位共同承担的重大专项“常规岛关键设备自主设计和制造”课

题通过国家能源局组织的正式验收。课题取得 1500MW 级饱和蒸汽半转速汽轮机研制、核电汽轮机 1800 毫米等级末级长叶片研制、核电汽轮机大型低压焊接转子研制、1500MW 级半速汽轮发电机研制、大型核电机组 MSR 研制、大型核电汽轮发电机组控制技术研究等一系列成果。

2018 年,在汽轮机和汽轮发电机等设备研制上,国内三大电气集团也取得了一系列成果。

上海电气承制的卡拉奇 K2 汽轮机低压部分采用了焊接转子的制造技术。核电汽轮机低压焊接转子依托常规火电转子焊接技术进行设计和优化,具有完全自主知识产权。该转子采用深窄间隙焊接技术,由八个锻件、七条焊缝组成,其最大外径为 3060 毫米,转子重量达 296.5 吨。配合低压焊接转子的应用,1710 毫米末级叶片也在 K2 机组中完成了产业化应用和产品制造。

哈尔滨电气在 AP1000 核电汽轮机引进技术的基础上,研发出与华龙一号堆型相匹配的大容量半转速核电汽轮机及其辅助系统,该机型具有完全的自主知识产权,打破了技术支持方的技术壁垒并实现了出口不受限的目标。采用先进的多级小焓降反动式叶型、简化型高压缸、水平侧向进汽低压缸以及试验完备的 1800 毫米末级动叶等多项创新结构和技术,为大容量核电汽轮机的自主化研制提供了技术支持。

东方电气采用自主研发的核电 1500MW 级半转速汽轮机、发电机技术,完成了华龙一号福清核电 5 号汽轮发电机组主要设备的制造、交付任务,完全满足现场施工进度要求。

2) 高温气冷堆关键设备

——蒸汽发生器

2018 年 9 月 29 日,由清华大学核研院设计、哈电集团(秦皇岛)重型装备有限公司承制的国家科技重大专项——球床模块式高温气冷堆蒸汽发生器——完成主体制造,10 月 31 日通过验收。高温堆蒸汽发生器的研制历时近十年,攻克了大直径法兰密封面加工、大直径马鞍形接管厚壁低合金钢焊接、跑道型大开孔加工、镍基合金管子管板胀接和焊接、换热管对接、厚壁低合



金钢窄间隙焊接等 30 多项关键工艺技术，形成 237 份工艺规程，完成 2 项国家重大专项课题，10 项技术通过核能行业协会技术鉴定，部分成果达到国际先进水平，从设计、材料、工艺各个环节都实现了完全的自主创新。

——主氦风机

2018 年 8 月，哈电集团佳木斯电机股份有限公司和上海电气鼓风机厂联合研制的高温气冷堆核电站首台主氦风机顺利完成制造并交付现场。设备研制突破了大型立式机组的转速范围和结构型式，采用电磁轴承支撑，使用电气贯穿件贯穿压力边界，具有高可靠性、高维修性，是我国在先进核能核心装备技术上的重大突破。

（2）关键材料国产化成果

1) 大锻件

2018 年，上重铸锻公司承接的宁德 6 号（华龙一号）压力容器项目大锻件实现成套交付。项目自 2017 年 7 月正式投料制造，历时 16 个月，突破了从 51 吨（进口接管锻件）至 439 吨（容器法兰—接管段筒体锻件）不同吨位下钢锭化学成分的均匀性控制和杂质元素的控制技术，变截面厚壁锻件（锻件最大直径 5230 毫米，最大壁厚 630 毫米）控形控性锻造技术，厚壁容器锻件均质化热处理技术。全部检验及评定项目一次性合格，7 件评定件全部通过评定，整个项目共 12 件锻件成功交付。

2) 反应堆压力容器用密封环

2018 年，宁波天生密封件有限公司生产的密封环产品成功应用于 CAP1400 重大专项依托工程的反应堆压力容器水压试验和 AP1000 依托工程三门核电站的热试。应用于秦山一期 30 万千瓦核电机组的“O”形密封环至今已历经 3 个换料周期。“C”形密封环至今已应用于设备出厂水压试验和核电站运行，在方家山、福清、防城港、田湾、恰希玛等核电站实现应用。

2018 年 2 月，苏州宝骅密封科技股份有限公司生产的“C”形密封环通过了由中国机械工业联合会与中国通用机械工业协会组织的带料运行前评审；2018 年 4 月，在阳江 5 号机组成功实现了带料运行商用。“O”形密封环产品

也已经应用于高温气冷堆、钠冷快堆等项目。

3) 核级焊材

在重大专项研发成果深入应用的基础上,2018年国内核级焊材供应商(如四川大西洋焊接材料股份有限公司等)持续开展焊材国产化研究,低合金钢、316L型不锈钢和双相不锈钢等焊接材料已在华龙一号、示范快堆等核电站的核岛主设备上应用。

针对部分关键原材料仍未完全国产化、智能制造应用水平仍待提高、国内同行企业缺乏技术交流等问题,建议在推进卡脖子的原材料国产化工作、探索和推进与行业相适应的智能化制造方式、增强行业内沟通交流等方面,以企业为主体并充分发挥行业协会、高等院校和科研院所的作用,加速推动装备制造技术进步,支撑核能行业安全高效发展。

(六) 核能行业管理与安全保障

核能的开发利用给人类发展带来了新的动力,同时核能发展也伴生着核安全风险和挑战,重大核事故会给国家和社会带来不可估量的后果,因此维护核安全关乎国土安全、人民健康、生态环境、社会稳定、经济发展。中国是核能与核技术利用大国,在核事业发展进程中,始终坚持从国情出发,借鉴国际良好经验,发布战略规划,健全核能行业管理体系,制定核能安全法律法规,确保核能安全有序发展。

1. 核能立法工作概述

1.1 核能法律法规体系现状

我国的核能法律法规体系呈金字塔结构,依次为国家法律、行政法规、部门规章和强制性标准、导则以及技术参考文件,从上到下的内容也越来越具体,以此为国家核能管理相关工作提供法律准绳,从法制上有力保障了国家核安全,维护了社会公众的安全与健康,保护了生态环境,促进了核行业的发展与进步。目前,我国核能法律法规体系构成如表49所示。



表 49 核能法律法规体系表

序号	名称	备注
法律2部		
1	《中华人民共和国核安全法》	2017年9月1日颁布， 2018年1月1日起实施
2	《中华人民共和国放射性污染防治法》	2003年6月28日颁布， 2003年10月1日起实施
行政法规10项		
1	《放射性废物安全管理条例》	2011年颁布
2	《放射性物品运输安全管理条例》	2009年颁布
3	《民用核安全设备监督管理条例》	2007年颁布，2016年修订
4	《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》	2005年颁布，2014年修订
5	《核两用品及相关技术出口管制条例》	1998年颁布，2007年修订
6	《核出口管制条例》	1997年颁布，2006年修订
7	《核电厂核事故应急管理条例》	1993年颁布，2011年修订
8	《放射性药品管理办法》	1989年颁布，2017年修订
9	《核材料管制条例》	1987年颁布
10	《民用核设施安全监督管理条例》	1986年颁布

在核能领域，还有一些国务院发布的规范性文件，虽然不是行政法规，但具有行政法规的性质。例如：《国务院关于核事故损害赔偿问题的批复》（国函〔2007〕64号）、《国家核应急预案》（国务院2006年发布实施、2013年修订）、《国务院关于严格执行我国核出口政策有关问题的通知》（国发〔1997〕17号）、《关于我国中、低水平放射性废物处置的环境政策》（国发〔1992〕45号）等。

与上述法律法规相配套，我国核能行业主管部门国家国防科工局、国家能源局，核安全监督管理部门国家核安全局，以及国务院其他有关部门，在各自的职责范围内，还发布了100多个部门规章，对核电、核燃料、核技术应用产业的发展，对核安全、核安保、核应急、核保障等领域的管理和监督等做出了规范。

1.2 核能法律法规体系的完善

《原子能法》是统领我国原子能领域的基础性法律。制定《原子能法》，

是促进原子能事业健康、可持续发展的需要；是贯彻总体国家安全观，确保原子能研究、开发和利用安全的需要；是树立负责任大国形象、有效履行国际义务的需要；也是完善我国涉核法规体系的需要。我国原子能立法工作已持续多年。1984年，在我国核电发展刚刚起步的时候，在中央领导批示下，我国《原子能法》立法工作就正式起步。但由于核工业管理体制频繁变化等原因，《原子能法》迟迟未能出台。2014年，习近平总书记对涉核领域立法工作做出重要批示。为落实习近平总书记重要批示，国家国防科工局积极推动《原子能法》立法工作，并将其列入国务院立法工作计划和十三届全国人大常委会立法规划第一类项目。2018年9月20日，司法部向全国各单位和各界人士公开征求对《原子能法（征求意见稿）》的意见。

此外，为适应我国核电发展的需要，国家能源局起草了《核电管理条例（征求意见稿）》；为进一步规范和加强我国核安保工作，国家国防科技工业局起草了《核安保条例（征求意见稿）》，已先后向社会公开征求意见，目前正在进一步修订中。

2. 管理核能的政府机构与职责

核能管理关联范围广、覆盖面大，涉及多个国家部委。国务院核工业主管部门、国务院能源主管部门及其他有关部门在各自职责范围内负责原子能研究、开发和利用活动的规划管理、协调指导；国务院核安全监督管理部门负责核安全的独立监督管理。我国负责核能行业管理与安全监管的政府部门主要有国家国防科技工业局、国家能源局、生态环境部（国家核安全局）。

2.1 国家国防科技工业局

国家国防科技工业局（中国国家原子能机构）是国务院核工业主管部门。其主要职能包括核军工科研生产、核科技研发、核燃料循环、核退役治理、防扩散和核进出口管制、核国际合作、核安保、国家核事故应急、军工核设施安全监督管理，以及国家原子能机构的有关工作。主要支撑单位有核应急响应技术支持中心、国家核安保技术中心、核技术支持中心、西南核设施安全中心等。

2.2 国家能源局

国家能源局是国务院能源主管部门。主要职能包括负责拟订核电发展规



划、准入条件、技术标准并组织实施，提出核电布局和重大项目审核意见，组织协调和指导核电科研工作，组织核电厂的核事故应急管理工作。主要支撑单位有中国核电发展中心。

2.3 国家核安全局

国家核安全局为独立于核能发展部门的核安全监管机构。主要职能包括负责核安全和辐射安全的监督管理。拟定同核安全、辐射安全、电磁辐射、辐射环境保护、核与辐射事故应急等有关的政策、规划、法律、行政法规、部门规章、制度、标准和规范并组织实施。牵头负责与核安全工作协调机制有关的工作。负责核设施核安全、辐射安全及辐射环境保护工作的统一监督管理。负责核安全设备的许可、设计、制造、安装和无损检验活动的监督管理，负责进口核安全设备的安全检验。负责对核材料管制与实物保护的监督管理。负责对核技术利用项目、铀（钍）矿和伴生放射性矿的辐射安全和辐射环境保护工作的监督管理。负责辐射防护工作。负责对放射性废物处理、处置的安全和辐射环境保护工作的监督管理。负责对放射性污染防治的监督检查。负责对放射性物品运输安全的监督管理。负责对输变电设施及线路、信号台站等电磁辐射装置和电磁辐射环境的监督管理。参与核事故应急处理，负责辐射环境事故应急处理工作。参与核与辐射恐怖事件的防范与处置工作。负责反应堆操纵人员、核设备特种工艺人员等人员的资质管理。组织开展辐射环境监测和核设施、重点辐射源的监督性监测。负责核与辐射安全相关国际公约的国内履约。主要支撑单位有生态环境部华北、华东、华南、西南、西北、东北核与辐射安全监督站，生态环境部核与辐射安全中心，生态环境部辐射环境监测技术中心等。

3. 核能管理活动

3.1 核电发展

大力实施核电消纳行动计划。出台《清洁能源消纳行动计划（2018–2020年）》，2018年核电机组利用小时数保持较高水平，预计2019年核电基本实现安全保障性消纳；2020年核电实现安全保障性消纳。

持续提升核电安全水平。2018年5月国家发改委牵头四部门联合印发了

《关于进一步加强核电运行安全管理的指导意见》，全面加强核电机组的安全质量管理，确保安全质量可控在控。完成 13 个核电基地“安全管理提升年”专项行动回头看检查，督促问题整改落实。推动电源、冷源、消防和防人因 4 个领域行业安全 3 年行动计划研究制订工作，进一步建立安全隐患排查机制，加强安全管理。

扎实推进核电自主创新。2018 年核电重大专项工作稳步推进，印发《国家能源局综合司关于发布 2018 年度核电重大专项科研设施及验证平台开放共享试点平台的通知》，选出 4 处科研设施及验证平台试点向社会开放共享。

扎实开展核电行业管理。2018 年，组织完成 58 批次核电厂操纵人员考试，审核通过 470 位操纵人员取照资格、862 位操纵人员换照资格；实施核电消防安全监管，完善消防管理体系，委托开展消防设计和最终验收审查，印发《核电厂初步设计消防专篇内容及深度规定》《核电厂消防工程竣工验收管理办法》《运行核电厂消防安全管理实施细则》等 3 份文件；继续开展核电科普宣传和公众沟通工作，为核电发展营造良好环境。

3.2 核与辐射安全

核与辐射安全是指对核设施、核活动、核材料和放射性物质，采取必要和充分的监控、保护、预防和缓解等安全措施，防止由于任何技术原因、人为原因或自然灾害造成事故，并最大限度地减少事故情况下的放射性后果，从而保护工作人员、公众和环境免受不当的辐射危害。

全面推动核安全法宣贯实施。2018 年为“核安全法实施年”。国家核安全局编制核安全法实施年工作方案，结合日常监管工作，组织举办媒体座谈、专题讲座、专项培训和知识竞赛等形式多样的普法活动宣贯核安全法。推动核设施营运单位落实核安全责任，完善质保体系和安全措施，加强核安全文化建设，落实核安全法有关要求。进一步完善技术法规标准体系顶层设计，升版《“十三五”法规标准制修订规划》，召开法规标准审查会 10 次，审议法规标准 63 项次，发布核安全法规标准 18 项。

着力促进核安全政策规划实施。开展《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及 2025 年远景目标》中期评估，掌握规划实施进展，调查实



施过程中的主要问题，编制评估报告上报国务院。加强核与辐射安全管理和技术政策研究，聚焦运行核设施、新型反应堆和网络安全等监管重点领域和关键问题，研究保障核设施运行安全改革措施，印发《浮动核动力装置设计中所选择的外部事件（试行）》。

严格开展核设施安全监督管理工作。一是加强运行核设施安全监管。以运行安全为重点，加大核电厂和研究堆的经验反馈力度，对核电厂、研究堆典型事件开展6次独立评价，积极推进风险指引型监管，强化同行评估，确保28台运行核电机组换料大修期间安全稳定。二是做好新设计核电厂安全监管工作。严格开展AP1000、EPR首堆装料审评监督，颁发台山1号机组，三门1、2号机组，海阳1、2号机组首次装料批准书，实现了全球EPR、AP1000首批项目装料运行。编制华龙一号重要安全问题技术见解，开展高温气冷堆核电站示范工程运行许可证审评。三是依法严格开展研究堆安全监管。开展典型研究堆运行事件独立评价，制定监管要求并督促营运单位落实，加强对钍基熔盐堆等新型反应堆的安全审评监督。2018年全年45台运行核电机组安全业绩良好，未发生一级及以上事件或事故，11台在建核电机组质量受控，研究堆和核燃料循环设施保持良好安全记录。

有效提升辐射安全监管水平。加强核技术利用安全监管，建设了高风险移动源在线监控系统，搭建了实时显示高风险移动源状态信息、国家和各省数据共享共通的在线监管平台，以信息化手段有力防范放射源事故发生。推进第二次全国污染源普查伴生放射性矿普查，完成了山西、贵州、湖南、四川四省八市伴生放射性矿普查试点以及各省全部初测和详查工作，形成超出1Bq/g的伴生放射性矿开发利用企业名录。规范放射性物品运输管理，完善放射性物品运输程序制度，推动乏燃料公海铁联运运输体系建设，优化乏燃料运输容器等审批许可，确保了运输活动合规开展，提升了运输安全水平。加快放射性废物安全管理办法标准制修订，发布《低、中水平放射性固体废物近地表处置安全规定》（GB9132）等5项国家标准。加强乏燃料后处理安全准则和排放要求研究等技术准备工作，开展风险分析和隐患排查，加强现场监督检查，有力保障了后处理设施运行安全。强化电磁辐射环境监管，制修订

电磁辐射环境标准 5 项，努力提升电磁模式预测有效性验证及独立校核能力。2018 年全年放射源辐射事故发生率持续降低，全国辐射环境水平保持在天然本底涨落范围内。

持续优化核安全设备和特种人员监管。严格开展了核安全设备监管，组织编制民用核安全设备监造管理要求和执法手册，完善许可动态管理机制，加强事中事后监管。开展进口核安全设备专项排查、核级泵持证单位专项检查，严肃处理违规问题。2018 年全年共审批 113 项国内单位和 23 项境外单位许可申请事项，审批口岸报检、开箱文件 438 批。完善人员资质与培训管理，修订无损检验人员、焊接人员管理规定，制定《民用核设施操纵人员执照管理办法》，优化特种人员资格管理。2018 年全年共批准 1399 人操纵人员执照申请、2437 项次无损检验人员资格申请、8094 项次焊接人员资格申请、545 人注册核安全工程师注册申请。

加快推进核与辐射安全监管能力建设。国家核与辐射安全监管技术研发基地一期工程初步建成，新建大气辐射环境监测自动站 96 个，在建 110 个，国控网大气辐射环境监测自动站实时数据获取率稳定在 98% 以上，为建成全面覆盖、要素齐全、数据精准、运转高效的国控网络打下了坚实基础。强化核设施监督性监测，完成海阳、三门核电厂等监督性监测系统最终验收。强化应急体系和能力建设，督导各核电集团推进应急支援能力建设，指导监督站组织 6 省辐射事故综合应急演练，省级辐射事故应急演练实现全覆盖，提高了应急演练实战化水平。

夯实核与辐射安全基础保障。一是加强精神文明建设，总结提炼并大力弘扬“核安全事业高于一切、核安全责任重于泰山、严谨细实规范监管、团结协作不断进取”的核安全精神，为核与辐射安全监管队伍确立了思想标尺和价值准则，提高了监管队伍的凝聚力、执行力和战斗力。二是加强公众沟通，组织制修订《核与辐射安全监管信息公开方案》，组织开展“4·15”全民国家安全教育日、“6·5”环境日等活动，指导《中国环境报》刊发核与辐射安全专版 43 期，加强核安全科普宣传，及时回应社会关切。三是加强核安全文化建设，着力健全核安全文化培育机制，分领域推进行业核安全文化建设，



将核安全文化融入日常监督检查。发挥核能行业协会的作用，开展核电领域核安全文化同行评估，推动企业将核安全文化融入生产、经营、科研和管理的全过程。

3.3 核安保

核安保是指防止、侦查和应对涉及核材料和其他放射性物质或相关设施的偷窃、蓄意破坏、未经授权的接触、非法转让或其他恶意行为。核安保工作事关国家安全，十分重要。

国防科工局在北京召开 2018 年全国核安保工作会。会议总结分析了当前我国的核安保现状及面临的形势，对下一步工作进行了部署。一是从总体国家安全观的角度，深刻领会核安保工作的重要性；二是完善核领域法律体系建设，推动核安保工作法制化规范化发展；三是加强自主创新，提升核安保能力；四是培育核安保文化，提升我国核安保软实力。

成功举办“风暴-2018”核安保综合演练。为贯彻落实习近平主席全球核安全峰会讲话精神，推进核安保演练实战化、制度化、规范化，切实提升我国核安保突发事件应对能力和水平，我国首次举办了实兵对抗与桌面推演相结合的综合演练，为核安保演练的实战化、规范化、制度化发展打下了良好基础。

3.4 核应急

核应急是为了控制核事故、缓解核事故、减轻核事故后果，保护公众、工作人员和环境，而采取的不同于正常秩序和正常工作程序的紧急行为，是各方协同、统一开展的应急行动。核应急关系重大、涉及全局，对于保护公众、保护工作人员、保护环境、保障社会稳定、维护国家安全具有重要意义。

完善核应急预案体系建设。在 2017 年核应急预案摸底调查的基础上，加强了对全国各级核应急组织核应急预案制修订情况的监督指导和备案工作，完善了核应急预案管理数据库建设，实现了预案动态化管理。国家批复了浙江三澳核电项目一期工程、海南昌江核电厂 3~4 号机组、辽宁徐大堡核电厂池式供热堆示范工程等厂址区域核应急方案，以及大亚湾核电基地乏燃料、

尼日利亚高浓铀微堆乏燃料等公路运输应急预案；组织开展了浙江秦山核电基地场外应急预案专家审查。

加强核应急演习工作。印发全国 2018 年核应急演习计划并加强统筹指导，全国各级各单位共开展演习 55 次。编制了《省级核应急场内外联合演习规范》，中核清原公司开展乏燃料运输事故应急演练，广东省完成第十次核事故应急演习暨阳江核电站场内外联合演习评估。作为举办国，与国际原子能机构响应中心联合举办了 ConvEx-2e 国家公约二级双边演习。

积极促进核应急技术研究工作。针对当前急需，促成了国外核应急管理和技术体系研究、核应急标准体系研究等技术基础科研项目立项。开展了海洋核动力平台、跨区域应急、内陆核电站应急等核应急基础研究，提出核应急管理工作要求。落实了高分、北斗卫星等先进技术手段在核应急工作中应用。中国辐射防护研究院、西南科技大学联合开展了核能开发科研项目的研究，开展了核应急智能机器人、海洋辐射监测技术研究等项目的研究。

推动中国核应急救援队建设。继续按照“五个一流”（设计、设备、标准、效果、纪律）的要求推动项目建设。面临军队改革、核集团合并等现实困难，组织协调了 5 家建设单位开展建设工作，按计划完成节点有关工作。

（七）核能国际合作

2018 年，是我国改革开放 40 周年。博鳌亚洲论坛、上海合作组织成员国元首理事会、新一届中非合作论坛、首届中国国际进口博览会四大主场外交活动举世瞩目；“一带一路”建设，构建人类命运共同体得到越来越多国家的认同和参与。

中国核工业的发展成长一直紧密伴随着我国改革开放的历史进程。新时代，中国正在推动更高水平的对外开放，促进开放型世界经济的构建，给中国企业走向世界带来了重大战略机遇。中国核工业秉持开放合作、互利共赢的基本原则，克服贸易保护主义抬头的影响，在产业链合作、核科技创新、铀资源贸易开发、核安全等领域取得了新的突破。



1. 核电国际合作

1.1 加大国内核电市场开放力度

中国核电市场的大门始终对外敞开，与俄罗斯、法国等世界核能先进国家的国际合作贯穿着我国核电发展的历史进程，大亚湾 1~2 号机组、岭澳 1~2 号机组和田湾 1~4 号机组都是我国核电市场对外开放合作的重要标志。

2018 年，在坚持“互利共赢”合作原则的基础上，我国核电市场的对外开放又取得了重大成果。6 月 8 日，在两国元首见证下，中俄双方签署了田湾 7~8 号、徐大堡新厂址、示范快堆等一揽子合作政府和企业间共 7 份文件，项目金额超过 200 亿元人民币，总造价超千亿元人民币。根据合同约定，中俄将在田湾和徐大堡厂址合作建设 4 台 VVER-1200 型三代核电机组，双方将在中国示范快堆项目中开展设备供货和技术服务合作。一揽子协议的签订标志着中俄核能合作达到历史新高，两国务实合作的科技含量和水平有效提升，两国利益进一步深化融合。

1.2 海外在建核电项目顺利推进

(1) 巴基斯坦 K2 项目

2018 年 4 月 24 日，华龙一号海外首堆巴基斯坦卡拉奇 K2 机组反应堆厂房内层安全壳穹顶结构顺利封顶，实际工期比国内同类电站施工工期缩短约 12 天。4 月 26 日，K2 机组主管道冷热段焊接工作圆满完成。10 月 28 日，K2 机组预应力工程比计划提前 3 个月完成。

(2) 巴基斯坦 K3 项目

2018 年 4 月 25 日，K3 机组核岛环吊环梁、环轨顺利吊装就位。8 月 23 日，K3 机组第三台蒸汽发生器成功吊装就位，三台蒸汽发生器吊装仅用时 6 天，创造了世界核电建造史的蒸汽发生器吊装最快纪录。9 月 5 日，K3 机组压力容器成功吊入反应堆厂房。9 月 29 日，K3 机组成功实现穹顶吊装。

(3) 英国一揽子核电项目

中广核集团参股的欣克利角 C（HPC）项目建设总体按计划推进，合同采购总体处于收尾阶段；现场施工方面，12 月 4 日，完成了 1 号机组核岛筏基浇筑第一罐混凝土的里程碑计划。布拉德维尔 B（BRB）项目和塞斯维尔 C

（SZC）前期准备工作正在按计划推进。

（4）阿尔及利亚项目

阿尔及利亚 B-1、B-2 项目相继完成 101 子项电仪设备安装、数字化控制系统（DCS）安装、屏蔽冷却系统冷却套管安装、靶件智能转运装置安装等关键节点，为全面系统调试工作赢得了时间。

1.3 海外核电市场开发取得积极进展

加大了华龙一号海外市场开拓力度。中核集团与巴基斯坦新签署 1 台百万千瓦核电机组合同——巴基斯坦 C5 项目，标志着华龙一号再次落地海外；阿根廷压水堆项目完成 9 轮合同谈判，基本具备签署条件；约旦华龙一号项目已签署合作框架协议。华龙一号在英国的通用设计审查（GDA）正式进入第三阶段，预计 5 年左右完成全部审查，将为后续正式部署布拉德维尔 B 项目奠定坚实基础。

新堆型为核电国际市场注入了新动力。国家电投通过高层推动、双边互访等方式，积极在土耳其、南非等市场重点推介具有自主知识产权的我国三代核电品牌——国和一号（CAP1400）。中核集团加大了高温气冷堆出口推动力度，约旦高温气冷堆项目签署合作框架协议，获得约旦政府全力支持；沙特阿拉伯、阿联酋等国家的高温气冷堆合作协议得到落实；印尼高温气冷实验堆项目取得积极进展。

推动海外示范项目落地。针对有核技术研发应用需求的国家加强了核研究中心建设，促进了示范效应的形成。阿尔及利亚 B-3 项目除合同价款外的主合同条款及技术附件达成一致；塔吉克斯坦核研究中心合作协议取得进展。泰国微堆项目于 2018 年 7 月完成初步设计报告、第一次工程设计报告，均获泰方认可。

2. 产业链国际合作

2.1 对欧产业链合作取得新进展

中核集团与德国、法国等国家放射性废物管理机构续签合作备忘录，加强了高放废物地质处置领域的国际合作；与法国欧亚诺集团签署商用后处理大厂项目小合同，2019 年将力争尽早签署商务合同。中广核集团与英国罗尔



斯-罗伊斯公司和英国铀浓缩公司（URENCO）在仪控和浓缩铀供应领域的合作有序推进。进博会期间，中广核旗下相关公司分别与法马通、英国傲创、法国斯蒙克斯等公司签署项目合同及合作协议，涉及智能及高端装备以及新兴技术等。

2.2 核电装备出海取得新突破

我国核电装备企业，以海外核电项目为依托，积极推动高端核电装备“走出去”，不断提升中国制造的国际影响力。

巴基斯坦华龙一号全球首堆装备供货顺利推进。哈电集团承制的卡拉奇 K3 项目蒸汽发生器于 2018 年 4 月 1 日完成制造并已交付现场，11 月 19 日卡拉奇 K2 项目稳压器成功发运，反应堆主冷却剂泵正进行出厂试验和清理包装。西仪公司为卡拉奇 K2、K3 项目生产的最后一批辐射监测系统设备发货。核动力院完成卡拉奇 K2 项目堆芯冷却监测系统（CCMS）功能性能试验。

海外核电装备出口能力在国际合作中不断夯实。我国核电装备企业积极扩展与法国法马通、美国西屋、韩国斗山、西班牙恩萨等国际知名核电企业在核电设备方面的国际产能合作，实现优势互补。上海电气核电设备有限公司承接法国法马通公司分包的南非 KOEBERG 项目 6 台蒸汽发生器，标志着我国首次实现核岛主设备的完全商业化出口。在 HPC 项目上，共计 21 家中国企业通过资格预审，还有 25 家企业正在资格审查中，12 家企业获得 HPC 合同或者分包合同。中英法企业共计签署约 10 份合作备忘录或框架合作协议。其中，东方电气分别同法马通公司和美国 GE 公司签订了英国欣克利角 C 核电项目核岛设备与常规岛设备采购订单，将为英国欣克利角 C 核电项目提供核岛设备重型支撑及两台汽轮机的低压外缸。中核控制研发的非安全级 DCS 产品 NicSys 2000 出口阿尔及利亚，应用于 B1、B2 改造项目。

借助专业领域国际展会积极推介核电技术和装备。3 月，中核集团、中广核集团、国家电投集团等核工业企业携华龙一号、高温气冷堆、泳池式低温供热堆、和睦系统等多项核科技创新成果参展第十五届中国国际核工业展，受到各方关注。6 月，中国核工业企业在法国世界核能博览会展示了华龙一号、数字化仪控系统、核机器人等重大科技产品，吸引了来自世界各国核电领

域专业人员的关注。

核电技术服务领域不断扩大。中国核电工程公司于2018年4月中标英国欣克利角核电站废气排放设备总承包项目。中辐院顺利完成巴基斯坦K2、K3项目通风系统HEPA过滤器和碘吸附器验收试验技术服务合同，恰希玛核电站废物焚烧项目合同顺利推进，新签K2、K3项目环境事故后果评价及堆芯损伤评价软件订货合同。

2.3 海外铀矿资源投资合作取得新进展

2018年以来，国际市场天然铀价格处于“筑底”阶段，已低于近70%铀矿企业的生产成本，海外优质铀资源投资面临良好的战略机遇。我国铀资源开发发挥两种资源、两个市场的作用，积极推进铀资源海外开发及铀贸易。

积极谋划海外优质铀资源布局。中广核集团在中亚、北美、大洋洲、非洲等全球富铀地区完成了资源布局，截至2018年12月，已在海外控制铀资源量超过30万吨，2018年中广核海外在产项目设计产能6700吨铀/年，实际产量超过3900吨。中国铀业加强与纳米比亚、澳大利亚、加拿大、哈萨克斯坦优质项目洽谈合作，统筹罗辛、LH、欢乐谷项目，重点推进罗辛项目并购。2018年11月26日中国铀业与力拓公司正式签署罗辛项目股权收购协议，以较好的条件获取了新的优质铀资源和产能。成功交割后，中核集团掌控的海外铀资源将由7.13万吨增加到26.33万吨，控制产能由850吨铀/年增加至近4700吨铀/年，实现重大突破。

积极拓展铀矿勘查海外市场。深化与沙特合作，完成沙特Ghuthayra地区音频大地电磁（AMT）测量项目野外数据采集任务；沙特铀钍资源调查评价项目保质、保量全面完成了7万米钻探任务以及合同规定的各项野外工作量，圈定了多处靶区，有望落实铀、钍、铀、钍、稀土大型矿床；沙特海水提铀项目按计划实施，铀矿加工实验室项目、国家数据库项目等取得积极进展。中国铀业与约旦原子能委员会、约旦铀业公司实现了互访，双方签署了铀资源开发合作谅解备忘录。进一步加强了与俄罗斯、澳大利亚等国家在铀矿勘查技术领域的国际交流合作。

铀资源贸易行业再添新军。国家电投集团下属国核铀业取得开展天然铀



进口所需的全部资质，结合自身需求制定了天然铀采购策略和计划，并与国际上的天然铀生产、销售企业建立了广泛的联系，建成了稳定的供应渠道，未来将通过与国际天然铀供应商签订中长期协议及现货合同的方式保障集团核电项目所需的天然铀。

3. 核科技创新国际合作

先进核能技术国际协同创新结出新硕果。2018年，核西物院承担制造的国际热核聚变实验堆磁体支撑首批产品在贵州遵义正式交付，全球首台国际热核聚变实验堆真空室内部件热氦检漏设备通过验收。中法联合研制的硬X射线成像系统在中国环流器二号A（HL-2A）装置上投入实验运行并首次获得结果，该诊断系统为国内首套先进的超热电子成像诊断系统，对于未来聚变燃烧等离子体中的高能电子行为研究、电流剖面控制和长脉冲运行等具有重要意义。8月9日，由中广核工程有限公司牵头的国际热核聚变实验反应堆核级压力容器蒸汽冷凝罐（VST）设计供货项目完成最终产权交接。第四代核能技术国际合作继续深入，中国核能行业协会组织的国际铅基快堆技术发展研讨会、GIF方法学培训研讨会顺利召开。

核科技创新国际科技合作持续推进。沙特铀钍资源调查评价项目第三次成果交流研讨会、中俄铀矿床类型和勘查方法对比研讨会等学术交流会相继召开。中国铀业受IAEA委托承办“原地浸出实例国际研讨会（从勘探到关闭）”，圆满完成巴基斯坦原地浸出采铀在职培训项目。中核环保承办中国—经合组织核能署核设施退役与放射性废物管理国际论坛，与英国国际贸易部共同召开“中英核环保技术交流会”和“中英核设施退役研讨会”，与意大利安萨尔多核电公司、法国纽维亚公司等企业退役治理领域的互换项目合作持续推进。

积极争取国际核行业标准话语权。核工业标准化所代表中国承担国际标准化组织核能、核技术及辐射防护标准化技术委员会反应堆分委员会（ISO/TC85/SC6）秘书处的具体工作。核动力院牵头制定的《压水堆核电厂一回路系统主设备及管道保温层设计规范》，中核运行牵头制定的《核电厂冰塞冷冻隔离技术导则》和《红外光谱法测量重水浓度》三项核电国际标准在国际



标准化组织（ISO）成功立项。上海核工院《核电厂－安全重要仪表和控制系统－地震停堆系统推荐性设计准则》成功在 IEC（国际电工委员会）立项。

核科技创新国际合作网络持续扩大。中核集团与中国国家原子能机构，大不列颠及北爱尔兰联合王国商务、能源与产业战略部在伦敦签署通过中英联合研发与创新中心开展民用核研发合作谅解备忘录。中核集团相继与俄罗斯杜布纳联合原子能研究所、加拿大国家核实验室签署合作备忘录，深化与法国 EDF 的核科技创新合作，继续推动中加先进重水堆研发、中比 MOX 核燃料研发、中欧放射性废物处置等技术和项目合作。IAEA 核与辐射应急准备与响应能力建设中心正式落地中辐院。

积极参与国际组织会议，提升国际影响力。中核集团参加 WANO 东京中心理事会会议，WANO 上海中心阶段方案获得理事会通过，上海中心建设获得各方高度认同和支持。中国核电接受 WANO 对公司进行的首次重点领域评估，获得了评估组的良好评价。由中辐院牵头的国际原子能机构第四个核与辐射应急准备与响应能力建设中心落户中国。中广核集团先后出席 WANO（世界核运营者协会）巴黎中心第 73 届、第 74 届理事会，在英国伦敦出席 WNA（世界核协会）主办的 2018 年度世界核能大会，并与 WNA 理事、主要核燃料供应商进行会谈。上海核工程研究设计院在 2018 年 3 月和 8 月先后承办了 IAEA 加强核电厂安全、运行和寿期服务能力地区研讨会，及先进核电厂建设管理的挑战和机遇技术会议，同时作为 ASME 锅炉和压力容器标准第三卷委员会中国国际工作组的主席单位，牵头组织 ASME BPV III 中国国际工作组会议。

行业质量管理成果摘取国际奖项。江苏核电申报的《降低 1/2 号机组烟囷取样装置故障率》《缩短核电站核级电缆采购周期》，海南核电申报的《减少 DEH 与 DCS 通讯故障次数》《降低 JDT 消防系统报警次数》等四项 QC 成果获 2018 年国际质量管理小组大会金奖。

4. 核安全国际合作

不断拓展核安全国际合作广度。参加《乏燃料管理安全与放射性废物管理安全联合公约》缔约方第六次审议大会，圆满完成履约任务，7 项良好业绩获得国际社会充分肯定。落实习近平主席“推广国家核电安全监管体系”“实



施加强放射源安全行动计划”倡议要求，主办亚欧会议第五届核能安全研讨会，在中美核安全对话等重要机制中发挥积极作用，推进核电厂多国设计评价机制（MDEP）“华龙一号”工作组工作，全面宣传“华龙一号”设计建造和审评监督经验，通过了多份共同立场和技术报告。加强与阿联酋、巴基斯坦、越南等“一带一路”国家的核安全合作，稳步推进与美、俄、法等核电发达国家合作，与 16 个“一带一路”国家签订合作协议 18 份。

践行大国承诺，中国支持尼日利亚微堆低浓化改造。2018 年 6 月，中国和尼日利亚政府签署了《关于从尼日利亚共和国返回中国制造的高浓铀微中子源反应堆材料到中华人民共和国的谅解备忘录》。8 月，国际原子能机构、尼日利亚及中国政府签订《国际原子能机构、尼日利亚共和国政府和中华人民共和国政府关于在保证研究堆低浓铀供应方面提供援助的协定》。在国家原子能机构等有关部委的支持与领导下，10 月 20 日，中核集团顺利向尼日利亚出口低浓铀新燃料；11 月 27 日，使用低浓铀燃料的尼日利亚微堆达到满功率运行。在实施尼日利亚微堆低浓化项目期间，中国国家原子能机构、外交部、生态环境部、公安部、商务部、海关总署等国家有关部委和地方相关部门，国际原子能机构、美国、俄罗斯、捷克、英国、挪威等给予了大力支持。

大力促进国际合作，核安保示范中心的国际影响力不断提高。2018 年中国积极开拓了与欧盟、日韩等亚太地区周边国家的合作。全年举办国际核安保培训研讨活动 10 次，来自 41 个国家的 312 名国外学员参加了培训；接待外宾访问 20 余批近 550 人次；首次获颁国际上有一定影响力的 NTI“核安保知识传播与经验推广突出贡献”奖。同时，加强核安保课程开发，全年新开发核安保培训教材 12 种；组织开展各类国内核安保培训及技术交流活动 50 余次，培训学员约 1100 人次，接待国内来访 130 批约 1900 人次。

拓展核应急国家交流与合作。中国国家原子能机构和巴基斯坦原子能委员会于 2018 年 10 月 25 日在北京共同签署《中国国家原子能机构和巴基斯坦原子能委员会关于在核应急管理系统与应急准备和响应领域开展合作的谅解备忘录》，中巴核应急合作取得标志性成果。2018 年 10 月在我国举办“打

击核恐怖主义全球倡议公共事件应急响应和准备研讨会”，参加“打击核恐怖主义全球倡议核应急研讨会暨桌面推演”，以及“2018 年度执行与评估小组会议”。

三 形势与展望

党的十九大报告关于加快生态文明体制改革、建设美丽中国等一系列阐述，彰显了以习近平同志为核心的党中央对于人类文明发展规律、经济社会发展规律的最新认识，提出了必须树立社会主义生态文明观，践行绿水青山就是金山银山的理念，推动能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。核能作为我国现代能源体系的重要组成部分，在助力生态文明建设、推动可持续发展、确保国家能源安全、实现我国能源转型、提升经济发展质量效益、提升中国在全球能源治理中的话语权、兑现大国承诺等方面具有重要的作用与地位。

（一）我国清洁能源产业稳步壮大，核能在能源转型中的作用不断提高

随着国际社会对保障能源安全、保护生态环境、应对气候变化等发展问题的日益重视，加快能源的清洁化、低碳化发展，已成为世界各国的普遍共识和一致行动。认真贯彻党的十九大精神，加快能源转型和结构调整，扩大清洁能源开发利用，推动绿色发展，已成为我国新时代能源革命的重要任务。

中国已经成为全球第一大能源生产国和消费国，也是当前乃至未来全球能源清洁化、低碳化转型的最大贡献者。2017 年，中国在可再生能源方面的投资总额达 1260 亿美元左右，占全球绿色能源投资的 45%。截至 2018 年年底，中国大陆全口径发电装机容量 19 亿千瓦，其中非化石能源发电装机占比提高到 40.8%。2018 年，全国新增发电装机容量达 1.2 亿千瓦，其中新增非化石能源发电装机占比为 73%。

核电作为清洁能源发电中的重要一员，在我国能源转型中地位不断提高。2018 年我国核电发电量为 2865.11 亿千瓦时，约占全国累计发电量的 4.22%，



比 2017 年上升了 15.78%，在非化石能源发电量中的占比达到 15.83%。考虑到风电、光伏发电等可再生能源的间歇性、波动性，核电在维持电力系统安全稳定、加强能源多元化保障方面也发挥着重要作用。

“十三五”时期是我国实现碳排放达峰目标的关键期。根据《能源生产和消费革命战略（2016–2030）》，到 2020 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2015 年将下降 18%，非化石能源占一次能源消费的比重将达到 15%；到 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年将下降 60%~65%，非化石能源占一次能源消费比重将达到 20% 左右，二氧化碳排放将在 2030 年前后达到峰值并争取尽早达峰。核能在推进我国能源结构向清洁低碳转型、努力实现上述目标方面将发挥不可或缺的作用。

（二）我国电力需求仍将不断增长，核电仍有很大发展空间

今后十余年是我国现代化建设承上启下、全面实现建成小康社会和现代化目标的关键阶段。一方面，我国经济总量将持续扩大，人均能源消费水平将不断提高，继续工业化、新型城镇化、“一带一路”建设、京津冀协同发展、长江经济带发展等对能源保障提出了更高的要求，能源刚性需求将长期存在。另一方面，我国经济发展进入新常态，经济结构不断优化，新旧增长动力加快转换，粗放式能源消费将发生根本转变，我国能源发展将进入从总量扩张向提质增效转变、由传统化石能源向非化石清洁能源转型的新阶段，加快推进能源革命将是我国的一项长期战略任务。

清洁替代和电能替代是能源变革的必由之路。随着工业、建筑、交通等各部门的电气化、自动化、智能化发展，清洁电力的优势将逐步显现，电能在终端用能结构中的占比将持续提升。根据相关研究，电能在终端用能结构中的占比将从 2015 年的 21% 提高至 2035 年的 32%~38%，2050 年有望增至 47% 左右。到 2035 年，全社会用电量预期目标为 11.4 万亿千瓦时，其中非化石能源发电在总发电量中的比重将由目前的 26.65% 提高到 50%。

核电具有清洁低碳、能量密度大、换料周期长、高负荷因子、供给可靠性高等特点，在“两个替代”和能源生产与消费革命的转型中具有突出优势。

作为目前唯一可以大规模替代化石能源的稳定低碳能源，核电将与风电、光伏发电等清洁能源形成互为补充、协同发展的局面。

（三）核电消纳有待继续保障，进一步开放竞争的电力市场对核电提出了新的要求

核电带基本负荷实现安全保障性消纳，有利于最大限度地发挥核电环保减排的优势，促进清洁能源利用。近年来，包括核电在内的清洁能源消纳问题受到国家高度重视。国家发展改革委、国家能源局先后印发了《保障核电安全消纳暂行办法》《清洁能源消纳行动计划（2018–2020年）》。在一系列措施推动下，2018年我国核电设备平均利用小时数为7498.96小时，设备平均利用率为85.60%，均实现两年连续增长。但与《清洁能源消纳行动计划（2018–2020年）》提出的“2019年核电基本实现安全保障性消纳、2020年核电实现安全保障性消纳”的要求相比，部分省区还要付出更大的努力。

2015年新一轮电力体制改革以来，我国电力市场化改革逐步加快，在增量配电改革、电力现货市场建设、交易机构股份制改革等方面都取得了积极进展。2018年全年市场化电量达到2.1万亿千瓦时，占全社会用电量的比例达30%，比上年提高4个百分点。随着改革推进，市场化因素将在电力系统中占据更重要的地位，核电参与市场化交易的进程也将加快。依据《关于有序放开发用电计划的实施意见》，国家鼓励核电参与电力市场竞争和开展辅助服务交易，核电上网电价将面临更为直接的市场竞争。在争取落实国家保障核电安全消纳政策、保障核电上网电量的同时，核电企业需要加快适应进一步开放竞争的电力市场的新要求，从技术改造更新、降低造价、提高安全运行能力等各方面积极采取应对措施。

（四）三代核电的批量化、规模化建设，将推动核电经济性持续提升

2018年，我国首批三代核电项目（三门核电、海阳核电、台山核电）陆续建成并投入商运，其中三门核电1号机组、台山核电1号机组分别是



AP1000 全球首堆和 EPR 全球首堆。为了满足更高的安全标准和 60 年设计寿命的要求，三代核电采用了更高性能的设备、材料和更高安全水平的系统设计，同时由于首堆工程的一系列技术引进费用、研发费用以及工程建设中的设计变更、工期延误等因素，工程费用大幅增加，三代核电首批依托项目单位造价明显高于二代改进型核电。

随着三代核电首批项目建成，系统设计、关键设备制造、施工建造、调试等各阶段的技术、工艺流程均得到验证和固化，后续三代核电的关键设备国产化、标准化具备了良好的基础；同时国内外 6 台“华龙一号”机组工程建设经验持续反馈，后续工程设计不断优化，近期批量化建设的三代核电项目造价可大幅降低，远期规模化建设的三代核电项目在单位造价和上网电价上能够逐步接近二代改进型核电的水平。

（五）自主掌握核心技术对我国更为关键，核能发展仍需大力投入和协同创新

与发达国家相比，我国核电发展起步较晚，但通过自主创新和引进、消化、吸收、再创新，较快地掌握了世界先进核电技术。自主三代华龙一号、国和一号的研发成功，标志着我国在由“二代技术”向“三代技术”的跨越中取得了重大进展。与此同时，我国高温气冷堆示范工程已进入全面安装阶段，预计 2020 年投入运行；快堆示范工程已开工建设；小型模块化反应堆、四代反应堆和聚变堆研发都取得了重要进展。我国核电自主创新能力迈上了新台阶，但是我国核电科技创新能力还不能满足全面自主发展的要求。与核电强国相比，核级泵阀、数字化仪控系统、关键零部件和基础材料等核心技术依然存在短板，受制于人的局面尚未得到根本改变；在先进核能系统的研发上，多为跟随模仿，原始性、前瞻性创新少。当前，国际上贸易保护主义抬头，美国能源部发布《美中民用核合作政策框架》，调整了对我国技术出口、设备和部件出口、材料出口的政策。全球经济与贸易环境发生的剧烈变化，将给我国核电国际合作带来新的挑战。

习近平总书记指出：“核心技术是国之重器，最关键最核心的技术要立足



自主创新、自立自强。市场换不来核心技术，有钱也买不来核心技术，必须靠自己研发、自己发展。”核能技术政治敏感性强，核领域关键核心技术是要不来、买不来、换不来的。世界核能技术在持续快速发展，在核能技术水平上我国仍有待进一步提高。我国应发挥后发优势，瞄准世界核能科技前沿，加大投入，通力合作，加强创新体系建设，强化基础研究，突出关键技术、核心技术的自主创新，为实现核电强国的目标提供有力支撑。

（六）核能全产业链稳步发展，但部分环节亟须加快推进

经过 30 多年的发展，我国已成为拥有自主三代核电技术并形成全产业链比较优势的国家。在核燃料供应方面，我国核燃料产能已跻身世界第一阵营，可以满足国内核电和核电“走出去”对各种型号燃料的需求；在核电装备制造方面，形成了每年新开工建设 8~10 台核电机组的主设备制造能力，百万千瓦级三代核电机组关键设备和材料的国产化率已达 85% 以上；在核电工程建设方面，全面掌握了压水堆等多种堆型的核电建造技术，具备同时开工 30 台核电机组的建设能力。过去的一年，在核电发展的带动下，我国核能全产业链继续保持稳步发展。但受国内外市场环境的影响，我国核燃料产业、核电装备制造、核电工程建设领域都面临许多挑战。其中，核燃料循环后段、放射性废物处置能力不足，亟须加快推进。

核燃料产业是高科技战略性产业，是核工业发展的基石，是核电发展的“粮仓”。经过 60 多年的发展，我国已经建立起只有少数几个国家才拥有的比较完整的核燃料循环体系，保障了核燃料的可靠供应。但是，随着核电的快速发展，乏燃料产生量、放射性废物产生量持续增加，对核燃料循环后段、放射性废物处置能力提升提出了新的更高的要求。党中央、国务院对乏燃料后处理、放射性废物处置高度重视，有关政府部门正在积极协调沟通，紧锣密鼓开展工作，加强规划和政策引导，推动重大项目实施；有关企业正在加强创新发展，协同发展，加快产业科技攻关，推进产业高水平发展，补齐产业链发展短板，努力实现核能产业全面、协调、可持续发展。



（七）核能与地方经济融合发展成为核能发展新常态，公众沟通与核科普宣传尤为重要

从北到南，我国已建成辽宁红沿河、山东海阳、山东荣成、江苏田湾、浙江海盐、浙江三门、福建宁德、福建福清、广东大亚湾、广东台山、广东阳江、海南昌江、广西防城港等 13 个核电基地。在核电厂所在的地区，核电不但成为地方经济的重要组成部分，为提升当地经济实力、推动经济高质量发展做出了突出贡献，并且拉动了当地科技、产业、社会、人文、旅游、商业与服务业等各方面的进步与发展，得到了当地社会公众的广泛认可和支持。这些核电基地与当地经济社会深度融合发展，已经成为共同创造共同繁荣、共同进步共享利益的命运共同体。

随着我国生态文明建设的深入推进，公众对于“绿水青山就是金山银山”的认识逐步增强。而福岛核事故导致公众对核电安全的疑虑有所增加，公众接受度日益成为核电发展必须面对的重要问题。因此，核电企业必须更加重视核安全，重视信息公开及与公众沟通，并积极承担社会责任，重视与地方经济的融合发展，以获得公众的理解和支持。实现与地方利益共享、融合发展，是今后核电发展的必然要求。如何结合周边发展规划与地方协同实现产业共融，如何保护当地公众切身利益，实现对群众利益的合理补偿，如何尽可能提供就业机会和服务让周边公众与核电发展共赢共享等，成为今后核电发展中必须妥善解决的问题。

融合发展与良好的公众沟通密不可分。核电作为一种高度复杂的现代科技，具有事故概率极低、但一旦发生事故危害巨大的特点。由于核知识的专业性和复杂性，公众对核电的安全性不易理解，容易产生疑虑和误解。基于此，核电的公众沟通必须首先在科普宣传上下功夫，提高社会公众对核安全的认知。同时，核电是国家作为建设美丽中国重要措施之一而发展的战略性新兴产业，也希望在各级政府积极支持下，各方通力合作，不断提高公众沟通工作水平，建立起有利于核电发展的良好社会环境。

综合国际能源署（IEA）、中国工程院等机构的预测，我们判断：2030 年



前，我国核电发电量将有望超过美国和其他国家；核电在我国发电量中的占比将从现在的 4.2% 上升到 2035 年的 10% 左右。我国核电发展的总趋势没有变化，核电仍然是我国能源清洁化、低碳化发展的理性、现实的选择。展望未来，核能必将在我国优化能源结构、保障能源供应安全，改善空气质量、助推美丽中国建设，优化电源布局、缓解能源输送压力，促进经济发展、带动科技进步等方面发挥更大的作用。

社会科学文献出版社版权所有，清华大学图书馆下载使用