

军民两用深度融合，核技术应用未来可期

——核技术行业研究报告

报告要点：

● “双碳”目标背景下，多技术并行发展核电大势所趋

能源是推进碳达峰、碳中和的主战场，核电具有环保性、经济性、高效性三大优点，是唯一可大规模替代化石燃料的清洁能源。目前压水堆是全球主流堆型，全球在运压水堆占比达73.6%，第四代核电、模块化小堆、聚变堆处于多技术并行发展态势。2023年12月，石岛湾高温气冷堆（HTR-PM）核电站商运投产，成为世界首个实现模块化第四代核电技术商业化运行的核电站；2024年2月，全球首个陆上模块化小型核反应堆“玲龙一号”外穹顶在海南昌江核电基地吊装完成。**聚变堆领域**，中国环流三号实现100万安培等离子体电流下的高约束运行模式，EAST实现403s可重复的稳态长脉冲高约束模式等离子体运行，我国磁约束核聚变技术已处于世界前列。

● 核电装机进程加速，我国核岛设备国产化水平持续提升

在运核电方面，截至2023年底，世界32个国家在运核电机组共计413台，装机容量371.5GW，我国在运核电55台，装机容量56.9GW，整体规模居世界第三位。**在建核电方面**，截至2024年2月，我国在建核电机组共25台，总装机容量约27.9GW，继续保持全球第一。预计2030年，我国在运核电装机规模有望超过美国成为世界第一；预计到2035年，我国核能发电量在总发电量中的占比将达到10%，相比2022年翻倍。**关键核岛设备方面**，我国核电主设备出产不断增长，2022年国内核电主设备累计交付54台套，维持高位。我国核电装备企业通过实施核心设备和零部件国产化攻关，主要核电堆型设备国产化率达到90%以上。

● 非动力核技术：同位素及辐射应用方兴未艾

2022年，全国从事放射性同位素和射线装置的相关单位数量共10.5万家，同比增长13.1%，5年CAGR达9.4%；全国在用放射源达16.4万枚，各类射线装置26.7万台。**非动力核技术在辐射化工、核环保领域发展势头迅猛**。钴源辐照装置和高能电子辐照加速器广泛用于各类辐射化工产品；电子辐照处理废气、废水、废物的新兴技术加速发展，中国成都建成世界第一座电子束处理烟气的工业化应用装置。

投资建议

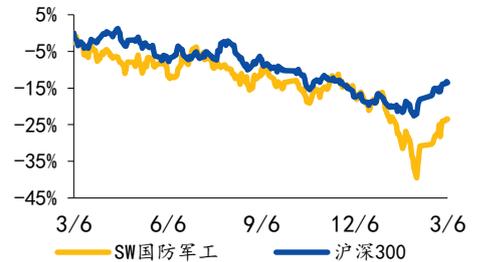
核技术与核电是解决国家能源需求、助推“双碳”目标实现、保障国家能源安全的关键科技变量，随着中国核电装备制造国产化和自主化能力的增强，核电装机规模以及核能发电量将不断提升，产业链相关公司有望充分受益，迎来快速发展期。重点布局技术垄断性强、行业垄断性好的龙头公司，我们建议关注上游材料及阀门上市公司：久立特材、中核科技、国光电气、安泰科技；中游核设备、部件上市公司：兰石重装、安泰科技；下游核电运营上市公司：中国核电、中国广核。

风险提示

宏观经济风险；行业政策调整风险；核安全风险

推荐|首次

过去一年市场行情



资料来源：Wind

相关研究报告

《国元证券行业研究-军工及新材料行业 2024 年度投资策略报告：云帆已立，静待横渡沧海》2024.01.07

报告作者

分析师 马捷

执业证书编号 S0020522080002

电话 021-51097188

邮箱 majie@gyzq.com.cn

联系人 王鹏

电话 021-51097188

邮箱 wangpeng@gyzq.com.cn

目 录

1.核能发电：核技术军技民用的典范.....	5
1.1 双碳目标背景下，发展核电大势所趋.....	5
1.2 压水堆是全球在运核电站主流堆型	6
1.3 核电产业链高壁垒，我国核电规模不断扩大.....	8
1.3.1 上游端：世界铀资源分布不均，我国多措并举保供应安全.....	8
1.3.2 中游端：核岛设备是关键，国产化水平持续提升	12
1.3.3 下游端：核电装机建设进程加速，核电发电占比有望快速提高	13
1.4 第四代核电多技术并行发展，中国 HTR、SFR 产业化进展速度快.....	18
1.5 模块化小堆是核能必争之地，开发和部署节奏加快.....	21
1.6 核聚变是未来能源终极方案，正处于关键技术探索阶段.....	24
1.6.1 世界各国积极布局，国际合作与自主研发齐头并进.....	25
1.6.2 核聚变产业链覆盖范围广，超导磁性材料是关键环节.....	28
2.非动力核技术：辐射化工及电子辐照方兴未艾	28
2.1 受益绿色化工产业发展，高附加值辐射化工彰显旺盛生命力	30
2.2 电子辐照技术在环保领域的应用发展迅速	32
3.投资建议.....	35
4.风险提示.....	38

图表目录

图 1：各主要发电方式 CO ₂ 排放量对比（克/千瓦时）	5
图 2：核裂变原理.....	6
图 3：核能发电原理（以压水堆为例）	6
图 4：各堆型冷却剂和慢化剂对应情况.....	7
图 5：全球在运堆型情况.....	7
图 6：核能发电产业链	8
图 7：核岛及常规岛	8
图 8：核燃料循环.....	8
图 9：核燃料制造过程	8
图 10：2021 年世界铀资源分布.....	9
图 11：2022 年全球铀产量（吨）	9
图 12：全球铀市场价格（美元/公吨）	10
图 13：我国铀需求量（吨）	10
图 14：乏燃料水池.....	11
图 15：乏燃料存储格架	11
图 16：2018~2022 年国内核电主设备交付数量.....	12
图 17：核电站主管道.....	12
图 18：全球主要国家在运机组容量和台数	13
图 19：我国核电装机容量及增速（万千瓦）	13

图 20: 主要核电国家的在建机组容量及台数	15
图 21: 2022 年全国各类电源发电量占比情况	17
图 22: 近 20 年全国核电累计发电量及增速	17
图 23: 近十年四大集团在运机组变化 (台)	18
图 24: 近十年四大集团在运容量变化 (万千瓦)	18
图 25: 六种堆型示意图	19
图 26: GIF 路线图 (2014 修订版)	19
图 27: 一体化小堆示意图	22
图 28: 海上核动力小型模块反应堆的动力范围	23
图 29: 部分国家的海上小型模块反应堆	23
图 30: 可控核聚变反应必须满足的三个条件	24
图 31: 可控核聚变约束途径	25
图 32: 托卡马克约束磁场基本结构	25
图 33: 新一代人造太阳“中国环流三号”	26
图 34: EAST 主要部件结构及系统	27
图 35: 中国聚变能发展路线图	27
图 36: 核聚变产业链	28
图 37: 民用核技术应用领域	29
图 38: 全国从事放射性同位素和射线装置的单位数量	29
图 39: 全国在用放射源及各类射线装置数量	29
图 40: 钴源辐照装置示意图	31
图 41: γ 射线辐照引起的高分子接枝、交联和降解过程	31
图 42: 电子加速器布局	32
图 43: 电子束的产生和特性	32
图 44: 核环保用电子加速器	32
图 45: 电子束辐照技术染料污水处理工艺	33
图 46: 电子束辐照在废水处理厂中可能的应用方式	34
图 47: 电子束辐照消毒的原理	34
图 48: 电子束辐照法烟气脱硫脱硝工艺流程图	34
图 49: 电子束烟气脱硫脱硝反应器	34
表 1: 近年来主要国家的核电发展政策	6
表 2: 全球核电站使用的主要堆型一览	7
表 3: 我国的铀矿分布情况	9
表 4: 我国对其他国家铀矿的权益投资	10
表 5: 全球核电后处理厂处理能力情况	11
表 6: 2022 年国内核电主设备出产情况	12
表 7: 中国在运核电站情况一览 (截止 2023.12.31)	14
表 8: 中国在建核电站情况一览 (截止 2024.2.28)	16
表 9: 近 2 年中国审批核电站情况一览 (截止 2023.12.31)	16
表 10: 核电行业进入壁垒	18

表 11: 六种候选堆概览.....	21
表 12: 小型模块式反应堆 (SMR) 的优点	22
表 13: 世界各国小堆发展情况	23
表 14: 核聚变的独特优势	24
表 15: 国际主要国家和地区的核聚变研究	25
表 16: 核聚变产业链相关公司	28
表 17: 辐射化工产品	30
表 18: 各类废水特点及处理效果	33
表 19: 电子束辐照法烟气脱硫脱硝优缺点	35
表 20: 核技术与核电产业链公司	35
表 21: 重点公司盈利预测	37

1.核能发电：核技术军技民用的典范

1.1 双碳目标背景下，发展核电大势所趋

能源是推进碳达峰、碳中和的主战场。中共中央、国务院《关于全面推进美丽中国建设的意见》明确提出，要力争 2030 年前实现碳达峰，为努力争取 2060 年前实现碳中和奠定基础。坚持先立后破，加快规划建设新型能源体系，确保能源安全。大力发展非化石能源，加快构建新型电力系统，要求到 2035 年非化石能源比重进一步提高。

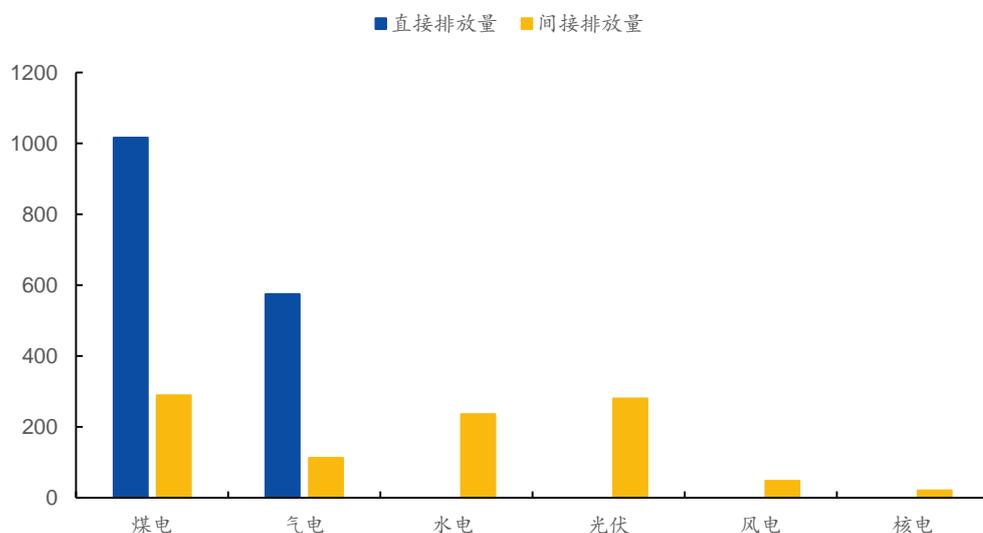
核电具有环保性、经济性、高效性三大优点，对实现双碳目标和清洁能源转型发挥不可或缺的作用。

环保性：与火电相比，核电站不会污染空气或直接排放二氧化硫、氮氧化物、温室气体，其二氧化碳的间接排放量仅为 21 克每千瓦时，是六种主要发电方式中最低的。

经济性：与风电、光伏相比，单位投资相当，但核电的运行小时数高，每年可以运行 7000 小时以上。据联合国经合组织研究报告，欧洲的核电发电成本是光伏发电的 1/5.3，风电的 1/1.8；中国的核电发电成本是光伏发电的 1/4.7，风电的 1/2.1。

高效性：1000 克标准煤、矿物油及铀分别产生约 8 千瓦时、12 千瓦时及 24 兆瓦时的电力，单位铀的发电量分别是标准煤和矿物油的 3000 倍和 2000 倍。

图 1：各主要发电方式 CO₂ 排放量对比（克/千瓦时）



资料来源：中国广核招股说明书，国元证券研究所

能源转型趋势下，世界各国重视核电发展。目前已有 70 多个国家（能源相关温室气体排放量占全球四分之三）承诺将排放量减至净零。核能发电作为唯一可大规模替代化石燃料的清洁能源，受到世界许多国家的青睐，各国政策纷至沓来，我国也提出《“十四五”现代能源体系规划》，明确提出加快推动能源绿色低碳转型，到 2025 年，核电运行装机容量达到 7000 万千瓦左右。

表 1：近年来主要国家的核电发展政策

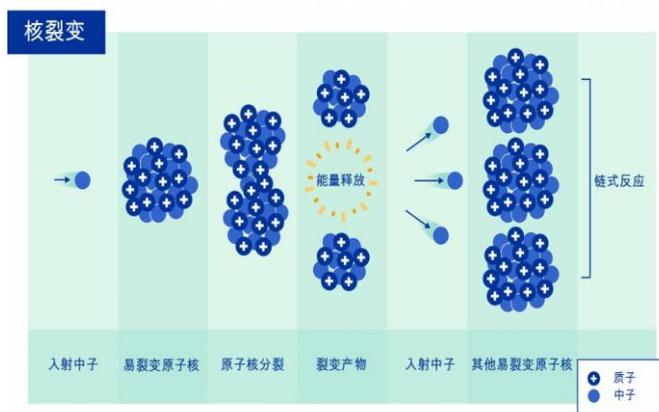
国家	出台时间	政策	政策内容
美国	2022 年 8 月	《通胀削减法案》	向气候变化和清洁能源领域投资 3690 亿美元，采用多种激励措施推动核能行业发展。
法国	2023 年 5 月	《加速核能发展法案》	取消 2015 年设定的“到 2035 年法国核电占比不超过 50% 的上限”，简化行政手续促进新反应堆的建设。
欧盟	2022 年 7 月	《欧盟可持续金融分类法案》	将核能纳入《欧盟可持续金融分类法案》。
俄罗斯	2022 年 10 月	《俄罗斯国家绿色项目分类法》	规定了包括核能项目在内不同行业的合规标准，正式承认核能是俄罗斯绿色能源的组成部分，明确其作为清洁、低碳能源的地位。
英国	2022 年 4 月	《能源安全战略》	开发 8 个新的大型核电项目，新建多座模块化小堆。到 2050 年，核电总装机容量达到 2400 万千瓦，约占预计电力需求的 25%。
中国	2022 年 1 月	《“十四五”现代能源体系规划》	明确提出加快推动能源绿色低碳转型，到 2025 年，核电运行装机容量达到 7000 万千瓦左右。

资料来源：《中国核能发展报告（2023）》，中核战略规划研究总院，人民网，国元证券研究所

1.2 压水堆是全球在运核电站主流堆型

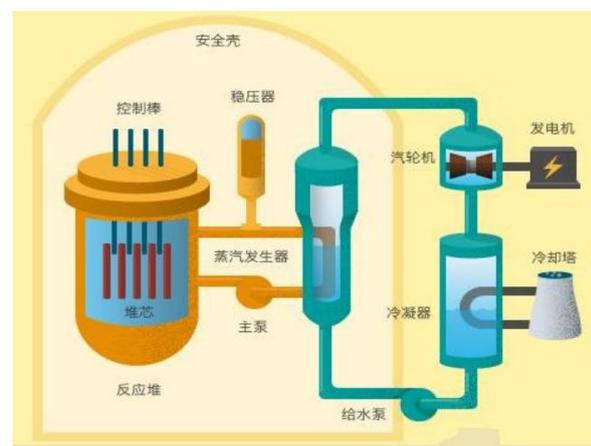
核燃料在反应堆内发生裂变而产生大量热能，高温高压的一回路冷却水把这些热能带出反应堆，并在蒸汽发生器内把热量传给二回路的水，使它们变成蒸汽，蒸汽推动汽轮机带动发电机发电。

图 2：核裂变原理



资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

图 3：核能发电原理（以压水堆为例）



资料来源：《压水堆核电站常规岛电气系统的分析研究》李莹等，国元证券研究所

一回路：反应堆堆芯因核燃料裂变产生巨大的热能，高温高压的冷却水由主泵泵入堆芯带走热量，然后流经蒸汽发生器内的传热 U 型管，通过管壁将热能传递给 U 型管外的二回路，释放热量后又被主泵送回堆芯重新加热再进入蒸汽发生器。水这样不断的在密闭的回路内循环，被称为一回路。

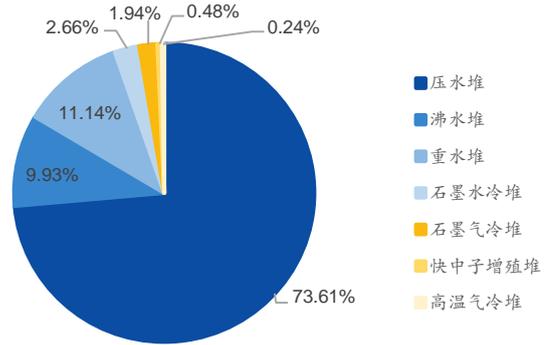
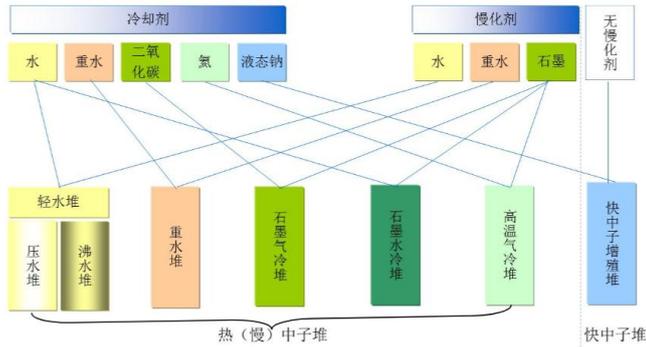
二回路：蒸汽发生器 U 型管外的二回路水受热变成蒸汽，蒸汽推动汽轮机发电机做功，把热能转换为电力；做完功后的蒸汽进入冷凝器冷却，凝结成水返回蒸汽发生器，重新加热成蒸汽。这个回路循环被称为二回路。

核反应堆：装配核燃料以实现大规模可控制裂变链式反应的装置，是核电站的核心装置。反应堆冷却剂将热量由核反应堆堆芯转移至发电机及外部环境，中子慢化剂会降低快中子的速度，生成可维持核链式反应的热中子。

商用核电反应堆一般根据反应堆冷却剂/慢化剂或中子能分类。按照冷却剂/慢化剂的不同，反应堆一般可分为轻水堆（包括压水堆和沸水堆等）、重水堆及气冷堆。按照所用的中子能量，反应堆一般可分为慢（热）中子堆或快中子堆。

图 4：各堆型冷却剂和慢化剂对应情况

图 5：全球在运堆型情况



资料来源：中国核电招股说明书，国元证券研究所

资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

表 2：全球核电站使用的主要堆型一览

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

资料来源：世界核协会，中国广核招股说明书，国元证券研究所

目前，压水堆为全球主流反应堆堆型。全球在运压水堆占有所有反应堆的占比达 73.6%，其次为沸水堆，占比 9.9%。截至 2023 年底，我国共 55 台在运核电机组，有两台重水堆（秦山三期 1 号、2 号）、一台高温气冷堆（石岛湾一期），其余均为压水堆。

1.3 核电产业链高壁垒，我国核电规模不断扩大

核电产业链包括了核燃料供给商、设备供应商、电力设计、科研、施工、安装、发电和输配电等企业，按照其在产业链中的位置可分为上游、中游和下游三个环节。

核电上游环节包括核燃料及循环、碳素及金属的制造；中游环节包括核岛、常规岛设备制造及核电辅助设备制造；下游环节主要包括核电站设计、建设及运营维护。

图 6：核能发电产业链



图 7：核岛及常规岛



灰色建筑物为核岛，圆柱体建筑物内安装了核反应堆，长方体建筑物为燃料厂房
白色建筑为常规岛，安装了汽轮机和发电机组

资料来源：《基于产业链和系统动力学的我国核电产业可持续发展影响因素探析》
王占永等，国元证券研究所

资料来源：中国核电招股说明书，国元证券研究所

1.3.1 上游端：世界铀资源分布不均，我国多措并举保供应安全

核燃料进入反应堆前的制备和在反应堆中燃烧后的处理的整个过程被称为核燃料循环，其包括核燃料进入反应堆前的制备和在反应堆中的裂变及乏燃料处理的整个过程，是核能安全可持续发展的重要基础，被喻为核能发展的“大动脉”。核燃料循环的前端包括铀矿探采、矿石加工、精炼、转化、浓缩等；核燃料循环的后端包括对放射性废物的处理、乏燃料的贮存和处置等，乏燃料经过处理后可以回收 99% 以上的铀和钚以及其他有用的放射性同位素，实现铀资源的充分利用。

图 8：核燃料循环

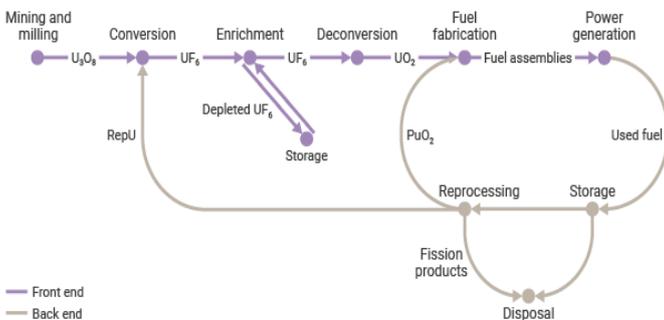
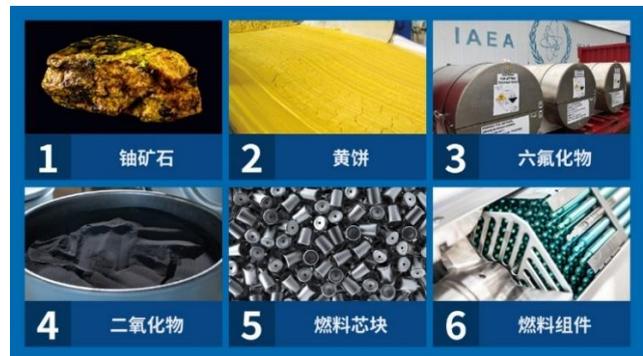


图 9：核燃料制造过程

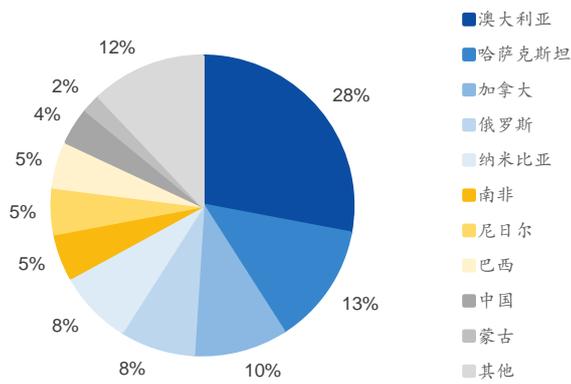


资料来源：世界核协会，国元证券研究所

资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

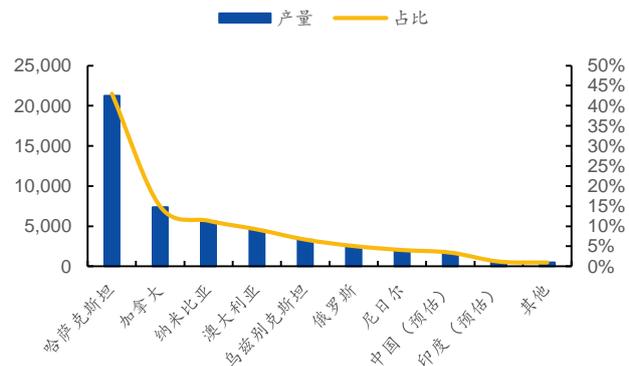
世界铀资源分布极不均匀，近八成的产量来自哈萨克斯坦、加拿大、纳米比亚和澳大利亚。2022年，哈萨克斯坦的矿山铀产量最大（占世界供应量的43%），其次是加拿大（15%）、纳米比亚（11%）和澳大利亚（9%），我国2022年铀产量约1700吨铀，占比3.4%。产铀行业市场集中度极高，2022年产量排名前10位的公司贡献了全球铀产量的90%以上。

图 10：2021 年世界铀资源分布



资料来源：世界核协会，国元证券研究所

图 11：2022 年全球铀产量（吨）



资料来源：世界核协会，国元证券研究所

我国是铀资源丰富的国家，但整体品位较低。根据世界核协会数据，截至2021年1月，中国已查明可采资源总量为22.39万吨铀，占世界铀资源的4%，排名第九。考虑到我国资源禀赋的现实因素，我国高度重视天然铀保障体系建设，强化多元多样的铀资源保障体系。我国已初步建立了国内开发、国际贸易、海外开发、储备体系相结合的“四位一体”天然铀保障供应体系。

国内开发方面，我国开采的铀矿主要位于新疆、陕西、江西、广东和内蒙古，总名义产能1600吨铀/年，由中核集团的全资子公司中核铀业有限责任公司（简称中核铀业）负责经营。

国际贸易方面，我国铀的国际来源主要是公开市场上购买的铀，进口国主要是哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、加拿大、纳米比亚、尼日尔和澳大利亚。

表 3：我国的铀矿分布情况

所在省市	开采方式	名义产能 (吨/年)	开始生产年份
新疆伊宁	原地浸出	850	1993
陕西蓝田	地下开采，堆浸	0	1993
江西抚州	地下开采，磨矿	350	1966
江西崇义	地下开采，堆浸	0	1979
广东韶关	地下开采，堆浸	200	2008
内蒙古通辽	原地浸出	200	2015
总计		1600	

资料来源：世界核协会，国元证券研究所

海外开发方面，我国对其他国家铀矿的权益投资主要由中核铀业和中广核铀业发展有限公司进行。该部分铀资源供应保障是可靠且成本相对稳定的，相比之下国际铀贸

易的波动性和供应风险性更高。此外，由于铀资源对国际航线运输量和通道占用量极低，因而通常海外开发的铀资源安全性较高。

表 4：我国对其他国家铀矿的权益投资

公司	国家	矿山	股权	开始生产年份
中核铀业有限责任公司	尼日尔	Azelik	37.2%（中核铀业）+24.8%（中兴金源）	2010，现已关闭
	尼日尔	Imouraren	25%+，更多待定	暂停
	纳米比亚	Langer Heinrich	25%	2014
	纳米比亚	Rössing	68.6%	2019
中广核铀业发展有限公司	纳米比亚	Husab	100%	2016
	哈萨克斯坦	Irkol & Semizbai	49%	2008，2009
	哈萨克斯坦	Central Mynkuduk	49%	2021

资料来源：世界核协会，国元证券研究所

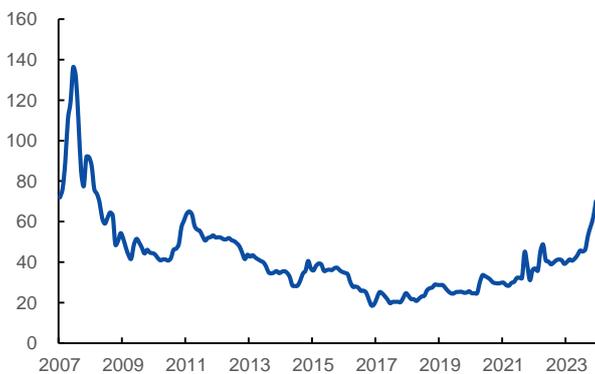
储备体系方面，天然铀供应安全性水平高，能够相对经济地构建安全的储备体系。相比于储备 1 年所需的石油费用 3 万亿，当前我国现有运行核电机组 50 余台，按照每台百万千瓦核电机组消耗天然铀 180 吨铀计算，储备一年量的天然铀需要 150 亿元人民币，储备 10 年的天然铀约 1500 亿元，远低于石油储备 1 年的成本。

价格端，天然铀供应紧缺，价格大幅攀升。近年来，由于多起突发事件如俄乌战争、全球最大的铀生产国哈萨克斯坦的大规模抗议、尼日尔政变，天然铀持续供应紧缺，铀价大幅攀升。截止 2024 年 1 月，每公吨铀价突破了 80 美元。相比于化石燃料发电，核电的燃料成本（包括铀、转化、浓缩和制造的成本）在核电站总电力成本中占比较小，通常不到 20%。

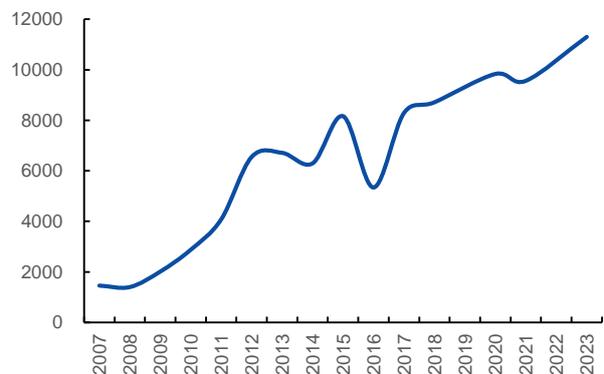
需求端，全球核电装机容量不断增加，铀需求量也随之上升。我国 2007-2023 年铀需求保持快速增长，年均复合增速为 13.7%，2023 年需求量为 1.1 万吨。根据世界核协会预测，到 2040 年，全球反应堆对铀燃料的需求预计将从目前的约 6.6 万吨铀增加至约 13 万吨铀，东亚将成为全球核电装机容量和铀需求增幅最大的地区，装机容量将增加到 1.4-2.6 亿千瓦，铀需求量将达到 2.3-4.1 万吨铀。

图 12：全球铀市场价格（美元/公吨）

图 13：我国铀需求量（吨）



资料来源：IMF，国元证券研究所



资料来源：世界核协会，国元证券研究所

乏燃料后处理是核燃料循环过程的关键一环。

乏燃料是反应堆中使用完卸载出来的燃料，国际上处理乏燃料主要有直接处置和再循环两种途径。我国根据自身情况，立足长远，采用的是闭式燃料循环后处理战略，同时采用该方式的还有法国、日本、俄罗斯、印度等国。

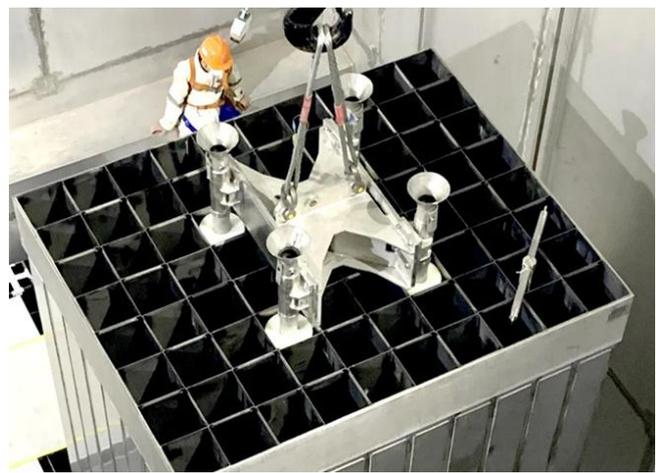
乏燃料处理过程中，乏燃料水池和乏燃料贮存格架是后处理产业链中的核心设备。

图 14：乏燃料水池



资料来源：生态环境部，国元证券研究所

图 15：乏燃料存储格架



资料来源：中国核电网，国元证券研究所

我国核电高速发展的背景下，乏燃料后处理建设进度却显得有些滞后。全球商用乏燃料后处理能力为 4660 吨/年，约相当于全球每年卸出乏燃料量的 42%。其中，法国乏燃料后处理能力为 1600 吨/年，英国为 1500 吨/年，日本为 800 吨/年。据预测，2030 年我国核电厂累积卸出乏燃料将达到 2.4 万吨，离堆贮存需求达到 1.5 万吨以上，而以我国目前的乏燃料管理能力，存在乏燃料管理压力增大、核电发展面临可持续性问题突出、核燃料循环后段需求日益迫切的实际情况。

表 5：全球核电后处理厂处理能力情况

国家	后处理厂	年处理能力 (吨/年)
法国	UP2-800、UP3 后处理厂	1600
英国	镁诺克斯后处理厂	1500
俄罗斯	玛雅克 RT-1 后处理厂	400
日本	六所村后处理厂 (尚未投运)	800
印度	加压重水堆乏燃料处理厂	360
合计		4660

资料来源：《全球乏燃料与高放废物管理现状》陆燕等，国元证券研究所

核废料后处理作为核电市场的下一片“蓝海”，已提至国家高度。在国家发改委、能源局印发的《能源技术革命创新行动计划（2016~2030 年）》中“乏燃料后处理与高放废物安全处理处置技术创新”成为核能行业技术两大创新重点之一。《“十四五”规划和 2035 远景目标纲要》提出，“安全稳妥推动沿海核电建设”和“建设乏燃料后处理厂”，更是明确了我国坚定执行闭式核燃料循环的政策。

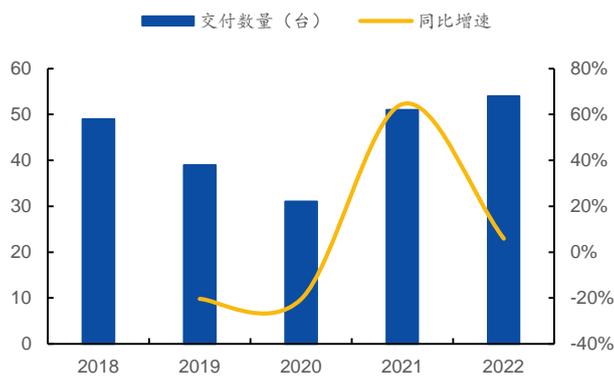
我国在后处理产能方面制定了三步走计划：一是建设每年 60 吨规模后处理中试厂，目前已完成；二是要完成每年 200 吨规模后处理示范工厂的建设；三是实现每年 800 吨的工业规模后处理能力。

1.3.2 中游端：核岛设备是关键，国产化水平持续提升

核电设备包括核岛设备、常规岛设备和辅助设备。其中，核岛设备是保障核电机组安全运行的关键，其结构复杂、专业性强、交叉施工多、技术难度大、工期要求紧、质量要求高，且必须满足核安全法规的严格要求，代表了核电站建设的技术水平；常规岛工程与普通火电工程相近。

由于核电产业的特殊性，核电工程建设市场为非完全竞争市场，行业内竞争企业数量有限。中国核建在核电站核岛建设市场处于绝对主导地位，我国已建和在建的绝大多数核岛工程由中国核建承建。常规岛和辅助设备建设市场，由于工程难度和特殊性不及核岛建设，目前国内参与竞争的企业较多，包括各大型建筑企业、火电建设企业等，市场竞争激烈。

图 16：2018~2022 年国内核电主设备交付数量



资料来源：《中国核能发展报告（2023）》，国元证券研究所

图 17：核电站主管道



资料来源：国家能源局，国元证券研究所

近年来，我国核电主设备出产不断增长。我国已具备先进核电设备规模化制造能力，且造价仅为海外同类机组价格的 60% 左右，具备明显比较优势。2022 年，我国核电装备制造企业持续推进三代核电装备制造技术改进、完善和标准化工作，通过实施核心设备和零部件国产化攻关，着力解决“卡脖子”问题，主要核电堆型设备国产化率达到 90% 以上，如“国和一号”湿绕组电机主泵和屏蔽电机主泵等一批核电关键装备首台套交付。2022 年国内核电主设备累计交付 54 台套，维持高位。

表 6：2022 年国内核电主设备出产情况

堆型	设备	交付数量
“国和一号”	蒸汽发生器	2
	堆内构件	2
	控制棒驱动机构	1
	湿绕组电机主泵	3
	屏蔽电机主泵	1
	发电机	1

	汽轮机	1
	反应堆压力容器	4
	蒸汽发生器	15
	稳压器	2
	堆内构件	2
	控制棒驱动机构	2
“华龙一号”	主泵	3
	安注箱	9
	主管道	2
	汽轮机	1
	发电机	1
	凝汽器/低加/MSR	2
	反应堆压力容器	1
“玲龙一号”		
	合计	54

资料来源：《中国核能发展报告（2023）》，国元证券研究所

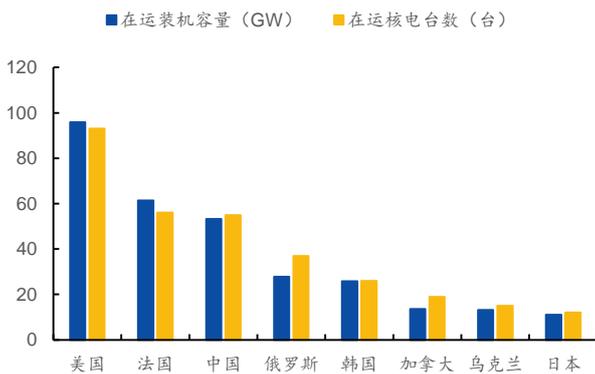
1.3.3 下游端：核电装机建设进程加速，核电发电占比有望快速提高

我国在运核电装机规模居世界第三位。据国际原子能机构统计，截至2023年12月31日，世界32个国家在运核电机组共计413台，装机容量371.5GW。其中，美国在运核电93台，装机容量95.8GW；法国在运核电56台，装机容量61.4GW；俄罗斯在运核电37台，装机容量27.7GW。

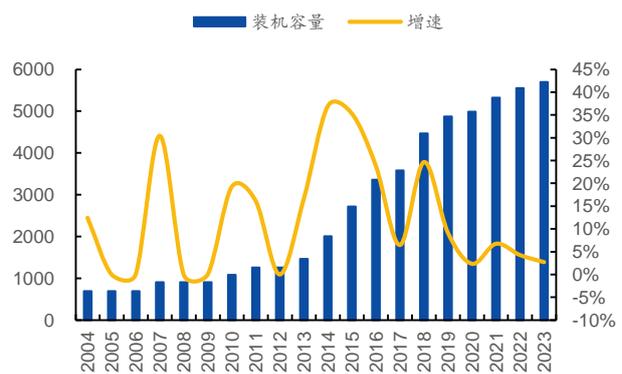
近年来我国核电装机规模和发电量均平稳增长，2023年在运装机规模56.9GW，同比增长2.5%，位居全球第三。

图 18：全球主要国家在运机组容量和台数

图 19：我国核电装机容量及增速（万千瓦）



资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所



资料来源：中国电力企业联合会，国元证券研究所

表 7：中国在运核电站情况一览（截止 2023.12.31）

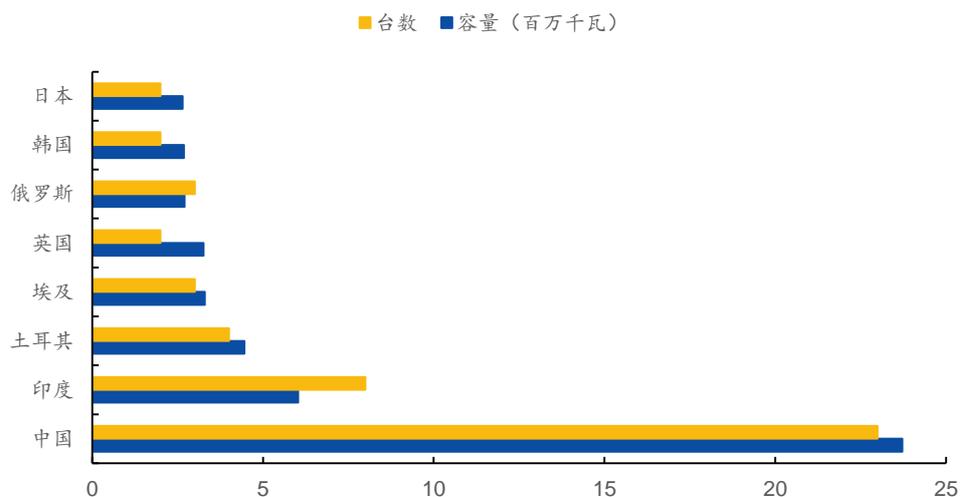
序号	核电站名称	机组	装机容量 (MWe)	堆型	技术说明	控股集团	并网日期
1	浙江秦山一期	1#	350	压水堆/CNP300	自主设计/二代	中核	1994.4.1
2	浙江秦山一期扩建 (方家山)	1#	1089	压水堆/CNP1000	自主设计/二代半		2014.12.15
3		2#	1089	压水堆/CNP1000	自主设计/二代半		2015.1.12
4	浙江秦山二期	1#	670	压水堆/CNP650	自主设计/二代		2002.4.15
5		2#	670	压水堆/CNP650	自主设计/二代		2004.5.8
6		3#	670	压水堆/CNP650	自主设计/二代		2010.8.10
7		4#	670	压水堆/CNP650	自主设计/二代		2011.12.30
8	浙江秦山三期	1#	728	重水堆/CANDU6	加拿大 AECL/二代		2012.12.31
9		2#	728	重水堆/CANDU6	加拿大 AECL/二代		2003.7.24
10	江苏田湾	1#	1060	压水堆/AES91	俄罗斯/二代半		2007.5.17
11		2#	1060	压水堆/AES91	俄罗斯/二代半		2007.8.16
12		3#	1126	压水堆/AES91	俄罗斯/二代半		2017.12.30
13		4#	1126	压水堆/AES91	俄罗斯/二代半		2018.10.27
14		5#	1118	压水堆/M310	自主设计/二代半		2020.8.8
15		6#	1118	压水堆/M310	自主设计/二代半		2021.5.11
16	海南昌江	1#	650	压水堆/CNP650	自主设计/二代	2015.11.7	
17		2#	650	压水堆/CNP650	自主设计/二代	2016.6.20	
18	福建福清	1#	1089	压水堆/M310	自主设计/二代半	2014.11.22	
19		2#	1089	压水堆/M310	自主设计/二代半	2015.8.6	
20		3#	1089	压水堆/M310	自主设计/二代半	2016.9.7	
21		4#	1089	压水堆/M310	自主设计/二代半	2017.7.29	
22		5#	1161	压水堆/ HPR1000	自主设计/三代	2020.11.27	
23		6#	1161	压水堆/ HPR1000	自主设计/三代	2022.1.1	
24	浙江三门	1#	1251	压水堆/AP1000	美国/三代	2018.6.30	
25		2#	1251	压水堆/AP1000	美国/三代	2018.8.24	
26	广东大亚湾	1#	984	压水堆/M310	法国 Areva/二代	中广核	1994.2.1
27		2#	984	压水堆/M310	法国 Areva/二代		1994.5.6
28	广东岭澳	1#	990	压水堆/M310	法国 Areva/二代		2002.5.28
29		2#	990	压水堆/M310	法国 Areva/二代		2003.1.8
30		3#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2010.9.20
31		4#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2011.8.7
32	福建宁德	1#	1089	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2013.4.15
33		2#	1089	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2014.5.4
34		3#	1089	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2015.6.10
35		4#	1089	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2016.3.29
36	辽宁红沿河	1#	1118.79	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2013.6.6
37		2#	1118.79	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2014.5.13

38		3#	1118.79	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2015.3.23
39		4#	1118.79	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2016.4.1
40		5#	1118.79	压水堆/ACPR1000	自主设计/二代半		2021.6.25
41		6#	1118.79	压水堆/ACPR1000	自主设计/二代半		2022.5.2
42	广东阳江	1#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2014.3.25
43		2#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2015.6.5
44		3#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2015.10.18
45		4#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2017.1.8
46		5#	1086	压水堆/ACPR1000	自主设计/三代		2018.5.23
47		6#	1086	压水堆/ACPR1000	自主设计/三代		2019.6.29
48	广西防城港	1#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2015.10.25
49		2#	1086	压水堆/CPR1000	改进设计/二代半		2016.7.15
50		3#	1187.6	压水堆/HPR1000	自主设计/三代		2023.1.10
51	广东台山	1#	1750	压水堆/EPR1750	欧洲/三代		2018.6.29
52		2#	1750	压水堆/EPR1750	欧洲/三代		2019.6.23
53	山东海阳	1#	1253	压水堆/AP1000	美国/三代	国家电投	2018.8.7
54		2#	1253	压水堆/AP1000	美国/三代		2018.10.13
55	山东石岛湾	1#	211	高温气冷堆/HTR-PM	自主设计/四代	华能	2021.12.14

资料来源：国际原子能机构，中国核能行业协会，国元证券研究所（注：标蓝色为近3年并网的核电机组）

我国在建核电规模继续保持全球第一。截止2024年2月，世界17个主要核电国家在建核电机组共计60台，装机容量约64.1GW。其中我国在建核电机组共25台，总装机容量约27.9GW，整体规模继续保持全球第一，其中，两台为快中子堆，其余均为压水堆。印度、土耳其在建核电为8台和4台，装机容量为6.0GW和4.5GW；按堆型划分，全球在建压水堆、重水堆、沸水堆和快堆分别为49台、3台、2台和4台，装机容量分别为53.2GW、1.9GW、2.7GW和2.1GW，压水堆仍是主流。

图 20：主要核电国家的在建机组容量及台数



资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

表 8：中国在建核电站情况一览（截止 2024.2.28）

序号	控股集团	核电站名称	机组	装机容量 (MWe)	堆型	技术说明	核岛主建设单位	开工日期
1	中核	江苏田湾	7#	1265	压水堆/VVER1200	俄罗斯/三代	中国核建	2021.5.19
2		江苏田湾	8#	1265	压水堆/VVER1200	俄罗斯/三代	中国核建	2022.2.25
3		辽宁徐大堡	3#	1274	压水堆/VVER1200	俄罗斯/三代	中国核建	2021.7.28
4		辽宁徐大堡	4#	1274	压水堆/VVER1200	俄罗斯/三代	中国核建	2022.5.19
5		辽宁徐大堡	1#	1080	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2023.11.15
6		浙江三门	3#	1251	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2022.6.28
7		浙江三门	4#	1251	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2023.3.22
8		福建漳州	1#	1212	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2019.10.16
9		福建漳州	2#	1212	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2020.9.4
10		福建漳州	3#	1212	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2024.2.22
11		海南昌江示范小堆	/	125	压水堆/ACP100	自主设计/三代小堆	中国核建	2021.7.13
12		福建霞浦示范快堆	1#	682	钠冷快堆/CFR600	自主设计/四代	中国核建	2017.12.29
13		福建霞浦示范快堆	2#	682	钠冷快堆/CFR600	自主设计/四代	中国核建	2020.12.27
14	中广核	广西防城港	4#	1180	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中建二局	2016.12.23
15		广东陆丰	5#	1200	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2022.9.8
16		广东陆丰	6#	1200	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2023.8.26
17		浙江三澳	1#	1210	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2020.12.31
18		浙江三澳	2#	1210	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2021.12.30
19		广东太平岭	1#	1200	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中建二局	2019.12.26
20	广东太平岭	2#	1202	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中建二局	2020.10.15	
21	国家电投	山东海阳	3#	1253	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2022.7.7
22		山东海阳	4#	1253	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2023.4.22
23		广东廉江	1#	1253	压水堆/CAP1000	改进设计/三代	中国核建	2023.9.27
24	华能	海南昌江	3#	1197	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2021.3.31
25		海南昌江	4#	1200	压水堆/HPR1000	自主设计/三代	中国核建	2021.12.28

资料来源：中核战略规划研究总院，中核集团，国元证券研究所

2022 年以来，中国核电机组核准数量创十余年来之最。2011 年日本发生福岛核事故后，中国一度暂停了新增核电项目审批，2019 年中国核电审批再次重启，随后三年分别核准核电机组四台、四台、五台。2023 年通过审批的核电机组数量达到十台，分别于 7 月核准六台，以及 12 月再核准四台，与 2022 年持平，均创十余年来之最。按照单台“华龙一号”机组约 200 亿元的总投资计算，2023 年核准的 10 台机组投资规模高达 2000 亿元。

表 9：近 2 年中国审批核电站情况一览（截止 2023.12.31）

年度	核电站名称	装机容量 (MWe)	核电技术	所属集团	核岛建设单位	开工日期
2023 (10 台)	福建宁德 5#	1210	华龙一号/三代	中广核、大唐	中国核建	--
	福建宁德 6#	1210	华龙一号/三代	中广核、大唐	中国核建	--

	辽宁徐大堡 1#	1080	CAP1000/三代	中核	中国核建	2023.11.15
	辽宁徐大堡 2#	1080	CAP1000/三代	中核	中国核建	预计 2024 年年内
	山东石岛湾扩建一期 1#	1225	华龙一号/三代	华能	中建二局	--
	山东石岛湾扩建一期 2#	1225	华龙一号/三代	华能	中建二局	--
	广东太平岭 3#	1209	华龙一号/三代	中广核	中建二局	--
	广东太平岭 4#	1209	华龙一号/三代	中广核	中建二局	--
	浙江金七门 1#	1200	华龙一号/三代	中核	中国核建	--
	浙江金七门 2#	1200	华龙一号/三代	中核	中国核建	--
2022 (10 台)	浙江三门 3#	1251	CAP1000/三代	中核	中国核建	2022.6.28
	浙江三门 4#	1251	CAP1000/三代	中核	中国核建	2023.3.22
	山东海阳 3#	1253	CAP1000/三代	国家电投	中国核建	2022.7.7
	山东海阳 4#	1253	CAP1000/三代	国家电投	中国核建	2023.4.22
	广东陆丰 5#	1200	华龙一号/三代	中广核	中国核建	2022.9.8
	广东陆丰 6#	1200	华龙一号/三代	中广核	中国核建	2023.8.26
	福建漳州 3#	1212	华龙一号/三代	中核	中国核建	2024.2.22
	福建漳州 4#	1212	华龙一号/三代	中核	中国核建	预计 2024 年下半年
	广东廉江 1#	1253	CAP1000/三代	国家电投	中国核建	2023.9.27
	广东廉江 2#	1253	CAP1000/三代	国家电投	中国核建	预计 2024 年 7 月

资料来源：人民网，各集团官网，国元证券研究所

我国核电发电量占比还有巨大的发展空间。2022 年，我国火电占总发电量的比重高达 66.5%，而核电发电量占比仅 4.7%，与法国(62.6%)、韩国(29.6%)、美国(18.2%)、加拿大(12.9%)等主要核电国家相比仍然较低。我国近 20 年全国核电发电量增速大体上先上升后下降，20 年 CAGR 为 11.40%，2023 年，我国核电发电量 4332.6 亿千瓦时，同比增长 3.71%。

图 21：2022 年全国各类电源发电量占比情况

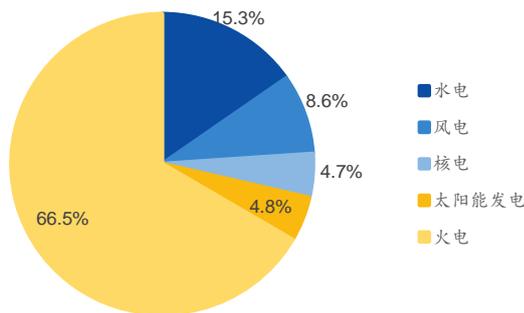
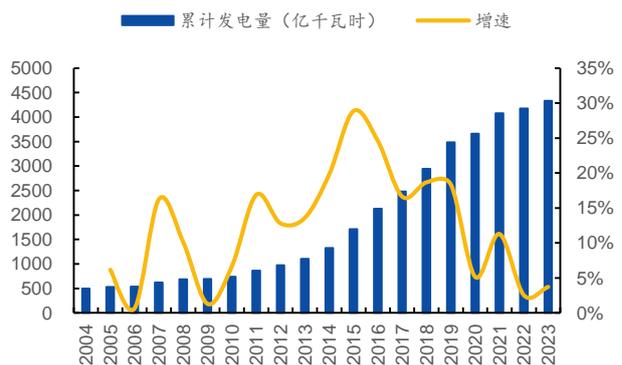


图 22：近 20 年全国核电累计发电量及增速



资料来源：《中国核能发展报告（2023）》，国元证券研究所

资料来源：中国核能行业协会，国元证券研究所

核电行业的进入壁垒包括行政壁垒、技术壁垒、人才壁垒和资金壁垒这四大壁垒。目前我国具有核电运营资质牌照的公司只有四家，即中国核工业集团公司、中国广核集团、国家电力投资集团公司和中国华能集团公司。近十年来主要的核能发电企业只有中核集团和中国广核，但近几年来国家电投和中国华能也开始有小规模的装机容量。

表 10: 核电行业进入壁垒

核电进入壁垒	壁垒情况
行政壁垒	我国政府对核电项目及业主采取核准、发放许可证、执照等方式，对投资主体进入市场进行管理。我国对核电厂的监管实施许可证制度。
技术壁垒	核电行业是技术密集型的行业，涉及核物理、化学、材料、运行、维修、性能监督、环境污染监测、辐射防护等多个领域。核电厂的建设需要综合权衡安全性、技术先进性、经济性和工程可实施性要求，符合核安全法规要求，采用成熟的技术和经过验证的技术。
人才壁垒	核电行业需要高素质的专业人员，核电设施的建设和运行，需要严格按照质量保证大纲执行，对于人员的素质提出了严格的要求。核电行业核心骨干人员培训的时间较长，需求量大。
资金壁垒	核电行业是资金密集型的行业，对选址、设计、建安、设备采购和制造调试等要求较高，建设周期长，项目资金投入较大。在福岛核事故后，国家对环保、核安全提出更高的要求，核电企业在安全、环保等相关辅助设施的投资进一步加大，提高了投资核电行业的资金壁垒。

资料来源：中国核电招股说明书，国元证券研究所

2023 年四大集团在运机组和容量分别为：中核集团：25 台，2375 万千瓦；中国广核：27 台，3056 万千瓦；国家电投：2 台，250 万千瓦；中国华能：1 台，21 万千瓦。五大发电集团中的国家电投、华能已实现核电站控股，中国大唐、中国华电和国家能源集团在核电领域也有所渗透，通过参股的模式拥有一定的核电项目或装机权益。未来五大发电集团的发力将带来新的变量和新的动能。

图 23: 近十年四大集团在运机组变化 (台)



资料来源：国家原子能机构，国元证券研究所

图 24: 近十年四大集团在运容量变化 (万千瓦)



资料来源：国家原子能机构，国元证券研究所

国内核电发展规模和节奏有望进入新常态。预计 2030 年前，我国在运核电装机规模有望超过美国成为世界第一，在世界核电产业格局中占据更加重要的地位。综合多家机构的研究成果，预计到 2035 年，我国核能发电量在总发电量中的占比将达到 10%，相比 2022 年翻倍，核电在我国能源结构中的重要性进一步提升。

1.4 第四代核电多技术并行发展，中国 HTR、SFR 产业化进展速度快

2000 年，美国能源部发起了“第四代国际论坛”(GIF)，其愿景是跨过应用中的轻水堆技术，通过与国际伙伴的合作来分享先进核能反应堆系统的研究与开发。我国于 2006 年加入 GIF，与其他成员国共同开发能获得许可、建造和运行的未来一代核能反应堆系统，这种核能系统将提供具有竞争力的价格、可靠的能源产品，且能令人满

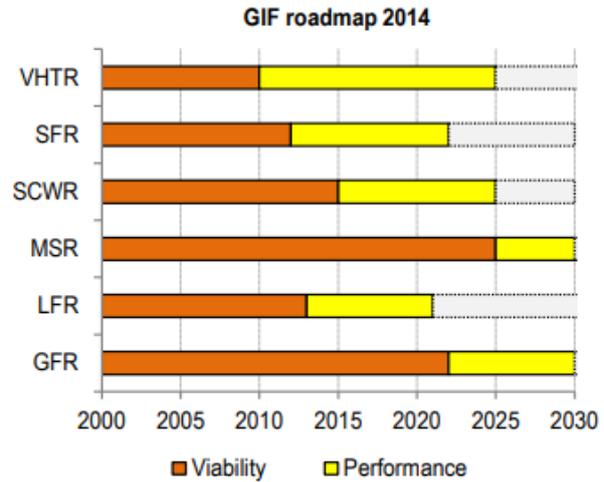
意地解决核安全、核废物、防扩散和公众认知关切。

第四代核反应堆主要特征是安全可靠、废物产生量小、具有更好的经济性，是未来核能重要的发展方向。

图 25：六种堆型示意图



图 26：GIF 路线图（2014 修订版）



资料来源：中国核能行业协会，国元证券研究所

资料来源：GIF 官网，国元证券研究所

经过共同努力，GIF 从 130 多种概念设计中遴选出气冷快堆(GFR)、铅冷快堆(LFR)、熔盐反应堆(MSR)、钠冷快堆(SFR)、超临界水冷堆(SCWR)、超高温气冷堆(VHTR)六种核能系统作为最有开发前景的第四代核能技术，并在其后发布了技术路线图，确定并规划了推动这六种核能发展所必不可少的研发工作和相关时间节点。我国对于四代堆“高温气冷堆”和“钠冷快堆”分别建设了实验堆和示范工程，是产业化进展最快的第四代核电技术。

钠冷快堆（SFR）：

钠冷快堆是以液态金属钠为冷却剂、主要由快中子引起核裂变的反应堆。快堆主要有两大优势：一是增殖，它可以将天然铀中占 99% 以上的铀-238 转化为易裂变核素钚-239，将铀资源利用率从压水堆的不到 1% 提高到 60% 以上；二是嬗变，它可以将乏燃料中的长寿命高放射性核素转化为短寿命低放射性核素，从而将核废料的放射性危害降至最小。

俄罗斯：俄罗斯开展多用途钠冷快中子研究堆、BN 系列钠冷快堆以及燃料循环专项计划的研究，主要在堆设计、新燃料以及相关装置和特种同位素生产的研发，同时俄罗斯即将实现闭式燃料循环。

美国：已在 20 世纪 40 年代建成全球首座实验快堆，已经积累了有近 50 年的运行经验，并且已具备示范快堆燃料制造能力。

日本：拥有大量运行快堆的经验，近期正携手美国开发钠冷快堆。

中国：实验快堆工程（CEFR）已具备发电能力，目前正在建设福建霞浦 CFR600 示范快堆。

超高温气冷堆 (VHTR):

VHTR 是 20 世纪 70-80 年代开发的高温反应堆的衍生物。以全陶瓷包覆颗粒燃料为特征,采用石墨作为中子减速剂,氦作为冷却剂,通过自动衰变热排除能力实现了固有安全性和工艺用热应用能力。

美国:主要开发棱柱型反应堆。美国能源部开展的“下一代核电站”(NGNP)研究项目最终选择通用公司参与的棱柱型模块式反应堆(MHTGR)作为美国超高温堆研发的目标,目前还处于研发阶段。

日本:拥有研究运行 HTTR 试验堆的大量经验,并掌握高温制氢技术。

俄罗斯:主要开展超高温堆燃料制造技术研究。

中国:主要开发球床型反应堆。中国已于 2021 年底建成全球首座球床模块式高温气冷示范堆核电站(石岛湾高温气冷堆核电站),实现并网发电。

超临界水堆 (SCWR)

SCWR 是一种高温高压水冷堆,在水的热力学临界点(374°C, 22.1MPa)以上运行。一般地说,SCWR 的概念设计可分为两大类:一类最初由日本提出、最近由欧洲原子能共同体合作提出的压力容器概念;另一类是由加拿大提出的压力管概念,一般称为加拿大超临界水堆。SCWR 的主要优点是热力效率高,且有可能简化厂房,从而提高了经济性。

日本:在超临界水冷堆方面开展过大量系统性工作。

加拿大:研究目前由加拿大核能实验室(CNL)牵头,多所科研机构 and 大学共同参与。

欧盟:研究由德国卡尔斯鲁厄研究院(KIT)牵头,其他十余个欧洲研究机构参加。

中国:目前的超临界水堆设计方案已基本具备国际评审条件。

熔盐堆 (MSR):

熔盐堆是以熔盐作为冷却剂的反应堆。熔盐具有高温、低压、高化学稳定性、高热容等非常理想的反应堆热量传输特性,可建成常压、紧凑、轻量化和低成本的反应堆;熔盐堆运行只需少量的水,即使在干旱地区也能够高效发电;熔盐堆输出温度可达 700°C 以上,既可用于发电,也用于工业生产和高温制氢、吸收二氧化碳制甲醇等,缓解气候问题和环境污染,实现核能综合利用。

俄罗斯:正由国家原子能集团公司的博奇瓦尔无机材料研究所开展熔盐堆燃料及乏燃料处理技术的研发,主要包括氟化钷和次锶系元素氟化物的制备、氟化锂和氟化铍混合熔盐的制备以及氟的安全防护。

美国:在 1965 年已建成并满功率运行 8MW 熔盐实验堆(MSRE),后来停止运行;目前,美国和加拿大两国核监管机构已完成一体化熔盐堆(IMSRR)的联合技术评审。

中国:我国 20 世纪就开展过熔盐堆的研究,包括“820 工程”“728 工程”,并在 1971 年建成冷态熔盐堆,目前主要由上海应用物理研究所牵头开展钍基熔盐堆的研究,有机所、高研院、金属所等参与,已在甘肃武威实现了机电安装以及功率调试。

铅冷快堆 (LFR):

GIF 确定的 LFR 概念包括三个参考系统：一是额定功率为 600MWe 的大型系统 (ELFR, 欧盟)；二是额定功率为 300MWe 的中型系统 (BREST-300, 俄罗斯)；三是额定功率为 10-100MWe 的小型可运输系统 (小型安全可运输的自主反应堆 SSTAR, 美国)，其特征是堆芯寿命很长。

美国：已于 21 世纪初重启铅冷快堆研发计划。美国阿贡国家实验室、劳伦斯伯克利国家实验室和洛斯阿拉莫国家实验室联合开展 SSTAR 项目，主要研究小型模块化设计；在 SSTAR 基础上，美国阿贡国家实验室开展 SUPER-STAR 项目，主要研究小型自然循环铅冷快堆，并处于国际领先地位；美国西屋公司开展铅冷示范快堆 (DLFR) 项目研究，主要验证示范快堆技术的可行性。

俄罗斯：主要实施“突破”计划，目前已基本掌握快堆、氟化物燃料和后处理关键技术，且正在设计和建造 BREST300 铅冷快堆及燃料循环设施。

中国：我国已拥有三座启明星系列零功率装置，已分别于 2005 年、2016 年和 2019 年实现临界。

气冷快堆 (GFR):

GFR 的参考概念是一种堆芯出口温度达 850°C 的 2400MWh 反应堆。如此高的堆芯出口温度使间接燃气—蒸汽联合循环能够由三个中间热交换器来驱动。但也需要燃料能够在为实现快堆堆芯的良好中子经济性所必需的高功率密度下持续工作。这是在开发 GFR 系统的过程中遇到的最大挑战。GFR 面临的第二大挑战是确保在所有预期的运行工况和事故工况下都能排除衰变热。

截至目前，国际上还没有建造过真正的气冷快堆，美国开展了 300MW 示范电厂和 1000MW 商业电厂的初步设计；气冷快堆实验堆国际上的研究主要由法国牵头，其他四个欧洲国家参与。我国在气冷快堆方面还没有系统开展工作。

表 11：六种候选堆概览

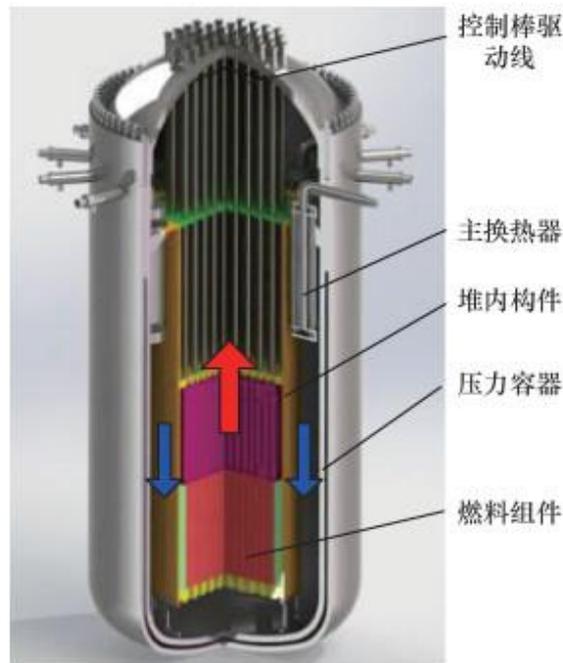
类型	中子运作形式	冷却剂	运作温度 (°C)	燃料循环	发电量 (MW)
超高温气冷堆 (VHTR)	热中子	氦	900-1000	开放式	250-300
超临界水堆 (SCWR)	热/快中子	水	510-625	开/封皆可	300-700, 1000-1500
钠冷快堆 (SFR)	快中子	钠	550	封闭式	30-150, 300-1500, 1000-2000
气冷快堆 (GFR)	快中子	氦	850	封闭式	1200
铅冷快堆 (LFR)	快中子	铅	480-800	封闭式	20-180, 300-1200, 600-1000
熔盐堆 (MSR)	热/快中子	氟化物/熔盐	700-800	封闭式	1000

资料来源：GIF 官网，国元证券研究所

1.5 模块化小堆是核能必争之地，开发和部署节奏加快

根据 IAEA 标准，电功率小于 300MWe 的反应堆被划分为小堆。因小堆具有对电网等级要求不高，用途广泛等特点而受到关注。

图 27：一体化小堆示意图



资料来源：《小型一体化全功率自然循环压水堆 NHR200-II 技术特点及热力市场应用分析》郝文涛等，国元证券研究所

小堆是在成熟的压水堆基础上经过多项重大技术改进而发展起来的，有如下主要特征：(1) 采用一体化压水堆结构设计；(2) 模块式高效直流蒸汽发生器；(3) 小型屏蔽电机泵；(4) 非能动安全系统的新设计；(5) 模块化设计和施工。

表 12：小型模块式反应堆（SMR）的优点

优点	具体描述
模块化	当前的大型核电站的建设需要大量的现场工作将组件组装到运行的核电站中。而中小型反应堆只需很少的现场准备，并大大减少大型机组通常需要的漫长施工时间。并且随着能源需求的增加，可以逐步添加额外的模块。
低投入资金	SMR 可以减少核电站所有者的资本投资。模块化组件可以降低施工成本和工期。
选址灵活	SMR 可以为基础设施提供电力，而且 SMR 可以替代或升级老化/退役化石燃料电厂。
高效率	SMR 可以与其他能源（包括可再生能源和化石能源）结合使用，以整合资源、提高效率，并产生多种能源终端产品，同时增强电网稳定性和安全性。
安全	大多数中小型反应堆将建在地下以增强安全性，防止自然灾害导致意外发生。部分 SMR 可在不加注燃料的情况下长时间运行，生命周期结束时返回工厂进行燃料卸载，有助于减少核材料的运输和处理。

资料来源：美国能源部，国元证券研究所

现有的小型堆设计中，压水堆技术仍占据主导地位。中国、美国、俄罗斯、阿根廷、韩国、英国等均提出了各自小型压水堆设计方案，其中绝大部分处于设计或评审阶段。中国 ACP100、阿根廷 CAREM 等部分堆型已进入建设阶段，俄罗斯在海上浮动堆领域处于领先水平。

图 28：海上核动力小型模块反应堆的动力范围



图 29：部分国家的海上小型模块反应堆

On-Shore Deployment		Off-Shore Deployment	
KLT-40S	RITM-200M	ACPR-50S	SHELF
Design Status: Full Commercial Operation since May 2020 in the Akademik Lomonosov Floating NPP	Design Status: 6 prototype reactors were manufactured and installed on icebreakers (2 ones are in the process of testing)	Design Status: Completion of conceptual/ program design, preparation of project design.	Design Status: Detailed design underway

资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

资料来源：国际原子能机构，国元证券研究所

下一代反应堆技术独特的安全性等优势在小堆领域具备独特应用价值。中国在高温气冷、钍基熔盐等小型堆领域，俄罗斯在液态金属冷却小型堆领域，美国和加拿大在微堆、熔盐小型堆等领域开发进展处于前列。

表 13：世界各国小堆发展情况

国家	小堆发展情况
美国	重点开发多种一体化小型压水堆，分别是 NuScale 公司的 VOYGR、B&W 技术公司的 mPower、Holtec 国际公司的 SMR-160。此外，还有以 GE 公司 BWRX-300 为代表的小型模块化沸水堆。其中，NuScale 已与多国签署合作协议。
俄罗斯	兼顾陆上、海上小堆发展。2020 年，装载两台 KLT-40S 的罗蒙诺索夫院士号浮动核电站已经完成满功率运行。采用 RITM-200 小堆技术的两艘破冰船已投入使用，RITM-200M 陆基核电站和 RITM-200M 浮动式核电站项目稳步推进。此外 RITM-400、ABV-6E 和 VBER-300 等多个小堆型号正在开发中。
阿根廷	CAREM-25 原型堆于 2014 年 2 月正式开工建设，计划于 2026 年临界。
韩国	SMART 小堆标准设计于 2020 年获批准。
英国	Rolls-Royce SMR 小堆预计 2026 年开始首堆建造。

资料来源：中国核能行业协会，国元证券研究所

我国的小堆技术发展迅速，目前国内共有中核集团、中广核集团、国电投集团、中科院、清华大学等单位的 10 种小堆已收录在 IAEA《小型模块化反应堆技术进展（2022 版）》手册里。其中，水冷型小堆 7 种，非水冷型小堆（高温气冷堆、熔盐堆）3 种。

国内各轻水冷却型小堆设计已完成可研或初步设计。其中，陆上小堆主要有发电（含热电联供）和供热两类预期应用，中核集团 ACP100（“玲龙一号”）是第一个实际部署在建的小型模块化轻水堆，海南昌江多用途模块式小型堆科技示范工程正在建设中，采用一体化反应堆、非能动的安全系统和模块化设计，装机容量 125MWe。另外，ACP100S、ACPR50S 等海上浮动堆也采用了小型压水堆路线，考虑了热、电、淡水联供和孤岛供能等多种预期应用。清华大学 HTR-10、HTR-PM 高温气冷堆已投入运行。中科院上海应用物理研究所 TMSR-LF1 钍基熔盐堆正处于调试关键期。

1.6 核聚变是未来能源终极方案，正处于关键技术探索阶段

核聚变是指在一定条件下（超高温、高压），由质量较小的原子核互相聚合生成新的质量更重的原子核，同时释放出巨大能量的过程。核聚变类型包括氘-氘聚变、氘-氚聚变、氚-氚聚变、氘-硼和氘-氦聚变，其中，氘-氦聚变是最容易获得聚变能的方式，也是实现可控核聚变的最为可行的发展路线。与核裂变能相比，核聚变能具有燃料来源丰富、能量效率、绿色环保、安全性高等优势，是人类未来理想终极能源的首要选择。

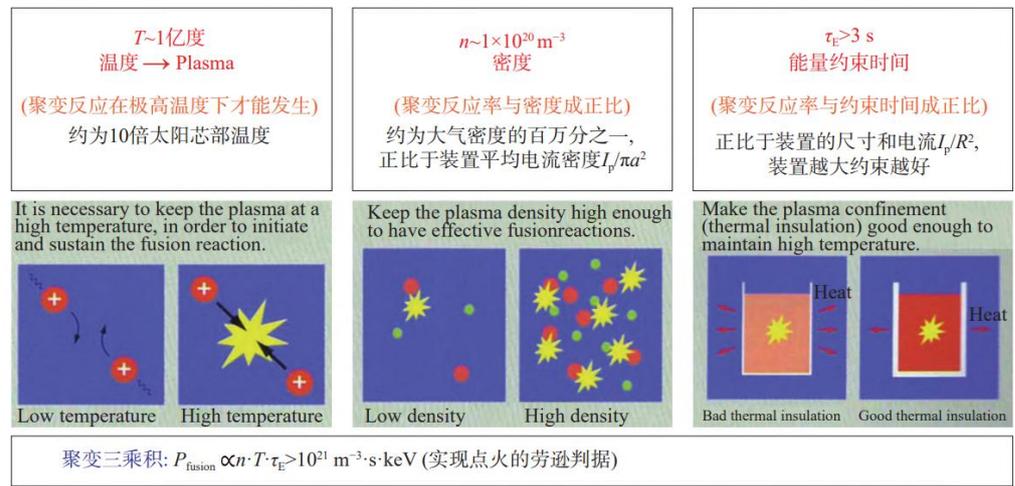
表 14：核聚变能的独特优势

类型	中子运作形式
燃料来源丰富	氘在每升海水中含有 0.03 克，经过聚变反应可以产生 300 升汽油燃烧后释放出的能量，全球海水中就有超过 45 万吨氘；氦则可以利用聚变产生的中子与丰富的天然锂反应产生，这些燃料可供人类使用数百万年之久。
能量效率高	1g 铀 235（核裂变燃料）产生的核裂变能量相当于 1.8t 汽油，而 1g 氘氦（核聚变燃料）产生的核聚变能量相当于 8t 汽油，比铀裂变高出 4 倍以上。
绿色环保	核聚变燃料属于轻元素序列，其原料和产物很少具有放射性，即使放射性元素氦其半衰期也只有短短的 12.43 年左右；反应过程不产生污染环境的氯化物和硫化物，不排放二氧化碳。
安全性高	核聚变只能在严格的操作条件下发生，超出这个条件（例如在事故或系统故障的情况下），等离子体将自然终止，并在对反应堆造成任何持续损害之前熄灭。

资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

实现可控核聚变反应必须满足三个条件：高温、高密度、能量约束。目前实现可控核聚变的两个困难是在数亿度的温度下点火和对长期约束的稳定控制。能量增益因子 Q 是聚变反应中输出能量和输入能量之比，当 Q=1，聚变反应所释放的功率等于维持反应所需的加热功率，称为收支平衡，一般认为商业聚变堆至少需要 Q 值达到 10。

图 30：可控核聚变反应必须满足的三个条件



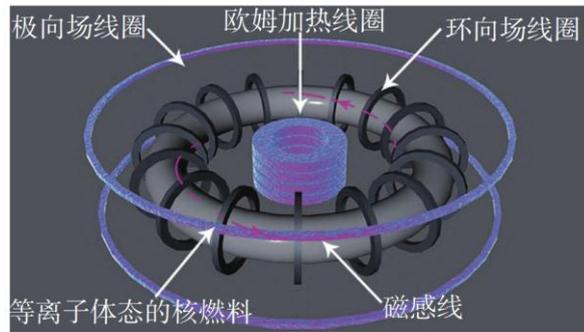
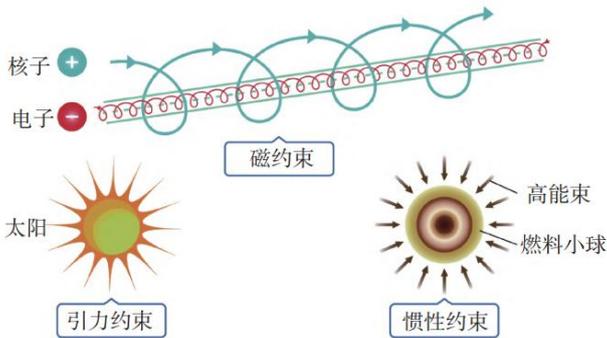
资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

核聚变约束途径包括引力约束（如太阳）、惯性约束（激光约束、粒子数约束、Z 箍缩驱动及弹丸弹射等）、磁约束（如仿星器、磁镜以及托卡马克等）。在三类约束方式中，引力约束无法在地球上实现，惯性约束难以实现持续的聚变功率输出，因此，磁约束核聚变是实现聚变能开发的有效途径。

根据磁场位形的不同，磁约束核聚变装置可分为托卡马克、磁镜、仿星器、球形环、紧凑环、直线箍缩、环箍缩等多种类型。其中，托卡马克通过在环形真空室中构造出一个闭合的螺旋磁场，完成对高温等离子体的约束，聚变燃料在周而复始的运动中完成核聚变反应，基于托卡马克装置的磁约束核聚变是目前最有希望实现聚变能和平利用的途径。

图 31：可控核聚变约束途径

图 32：托卡马克约束磁场基本结构



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

1.6.1 世界各国积极布局，国际合作与自主研发齐头并进

ITER（国际热核聚变试验堆）由欧盟、美、俄、中、日、韩国、印度七方联合实施，2001 年完成工程设计，2007 年开始建设，预计 2025 年完成。非核试验计划 2026 年开始，持续 10 年，随后氦氘运行于 2035 年开始，到 2045 年结束。国际主要国家和地区都制定了详细的聚变能源发展路线，一方面积极参与 ITER 计划的建造和实验，吸收 ITER 技术和经验；另一方面，各国建设和发展自己的下一代聚变商业示范堆（DEMO）装置，并开展与 ITER 配套的相关研究。

表 15：国际主要国家和地区的核聚变研究

国家/地区	核聚变项目	概况
欧盟	ITER、JET	JET 于 2021 年 12 月通过氘氘聚变反应产生了脉冲宽度 5s、能量输出 59MJ 的等离子体。与日本合作建设 JT-60SA、IFMIF 等研究设施、成员国建设 DONES、DTT、JULE-PSI 等设施，攻克 ITER 不能解决的聚变堆工程技术问题。
美国	FPNS、MPEX、EXCITE	在惯性约束、托卡马克、仿星器、Z 箍缩等方式都有投入，其中托卡马克在美国聚变基金中占据较大比例。
日本	ITER、JT-60SA	技术路线以托卡马克为主，通过 ITER 计划、BA 计划与欧洲紧密合作，并行部署 ITER、JT-60SA、聚变中子源、DEMO 研发、包层研发、仿星器、高功率激光。
俄罗斯	ITER、T-15MD	开展长脉冲燃烧等离子体物理研究，布局混合堆概念 DEMO-FNS，开展材料等聚变技术研发，2055 年建造聚变电站。
韩国	ITER、KSTAR、K-DEMO	推动 DEMO 到 2030 年建成，聚变电站于 2040 年建造。韩国是世界上第一个为聚变能源发展制定法律基础的国家。
印度	ITER、SST-2	同时开展 ITER 工程建造、实验工作和建造国内的 SST-2，DEMO 预计于 2037 年建成，聚变电站计划于 2049 年左右建成，并且实现 2060 年建造两个 1GW 的聚变电站。

资料来源：《聚变发展现状及展望》李林蔚等，国元证券研究所

我国的受控核聚变研究始于 20 世纪 50 年代中期，经过 60 余年的努力，目前磁约束核聚变技术的研究已处于世界前列。磁约束托卡马克装置主要包括核工业西南物理研究院的 HL 系列装置和中国科学院等离子体物理研究所的 EAST 装置。

(1) 中国环流器系列 (HL)

中国环流器系列(HL)核聚变装置由中核集团西南物理研究院建设。1984 年建成 HL-1，标志着我国核聚变研究由原理性探索进入到规模化实验研究阶段；2002 年建成 HL-2A，是我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置，等离子体电子温度达到 5500 万度；2020 年 12 月，HL-2M 建成并首次放电，2022 年 10 月，HL-2M 等离子体电流突破 100 万安培，创造了我国可控核聚变装置运行新记录；2023 年 8 月，中国环流三号首次实现 100 万安培等离子体电流下的高约束运行模式，标志着我国磁约束核聚变装置运行水平迈入国际前列。

图 33：新一代人造太阳“中国环流三号”



资料来源：新华网，国元证券研究所

(2) 合肥超环 (HT-7) 和东方超环 (EAST)

所有托卡马克的终极目标是将氘氚聚变原料加热到点火点或更高的温度，并加以控制地持续尽可能长的反应时间，以追求连续的聚变能量输出。即使采用导电性良好的铜作为导体绕制线圈，由于电流巨大线圈不可避免地存在发热问题，从而限制了磁约束核聚变的长时间稳态运行。由于超导体具有零电阻效应，且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，能够有效改善长脉冲稳态运行，20 世纪后期，科学家们开始把超导技术用于托卡马克装置。

中国科学院等离子体物理研究所 1990 年引进苏联 T-7 装置，并升级为 HT-7 装置(合肥超环)；2006 年，自主研发并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST (东方超环)，标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代，向着实现稳态核聚变能源方向发展。EAST 是由 Experimental (实验)、Advanced (先进)、Superconducting (超导)、Tokamak (托卡马克) 四个单词首字母拼写而成，具有“全超导托卡马克实验装置”之意。

图 34: EAST 主要部件结构及系统



资料来源：中国科学院等离子体物理研究所，国元证券研究所

EAST 装置具有三大科学目标：1MA 等离子体电流、1 亿度高温等离子体、1000s 运行时间。近年来 EAST 实验屡获突破，先后于 2010 年运行 1MA 等离子体电流、2018 年首次获得 1 亿度高温等离子体、2021 年实现 1056s 长脉冲高参数等离子体运行，三大科学目标已经分别独立完成。2023 年 4 月 12 日，EAST 成功实现了 403s 可重复的**稳态长脉冲高约束模式等离子体运行**，创造了托卡马克装置高约束模式运行新的世界纪录。

(3) 中国聚变工程实验堆 (CFETR)

中国磁约束聚变能的开发分为 3 个阶段：第一阶段，力争在 2025 年推动中国聚变工程试验堆立项并开始装置建设；第二阶段，到 2035 年建成中国聚变工程实验堆，调试运行并开展物理实验；第三阶段，到 2050 年开始建设商业聚变示范电站。

图 35: 中国聚变能发展路线图



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

CFETR（中国聚变工程实验堆）是中国自主设计和研制并联合国际合作的重大科学工程，作为从ITER到DEMO示范堆的过渡阶段，2017年在合肥正式启动，目前工程设计已基本完成。2019年，中国科学院等离子体物理研究所正式启动聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT，“夸父”）项目，主要建设内容为超导磁体研究系统和偏滤器研究系统，CRAFT全面建成后将是最高参数和最完备功能的磁约束核聚变研究平台，保证未来聚变工程堆建设和关键部件研发的顺利进行。

CFETR第一阶段主要开展长脉冲稳态等离子体运行和燃烧等离子体研究，以此实现200MW的聚变功率；第二阶段主要围绕商用聚变示范堆（DEMO）开展相关验证性试验，同时实现1GW的聚变功率。

1.6.2 核聚变产业链覆盖范围广，超导磁性材料是关键环节

核聚变产业链覆盖范围较广，上游原材料包括有色金属（钨、铜等）、特种气体（氦、氖）、特种钢材、磁性材料、超导材料等；中游组件、装备包括包层第一壁、偏滤器、真空室、真空杜瓦、控制系统、超导磁线圈等；下游聚变机组运营包括聚变装置、发电机组。

图 36：核聚变产业链



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国元证券研究所

表 16：核聚变产业链相关公司

项目	分系统/部件	相关上市公司
ITER	超导材料	西部超导（688122），白银有色（601212）
	不锈钢部件	久立特材（002318）
	第一壁	国光电气（688776）
	偏滤器	安泰科技（000969），国光电气（688776）
	钨材料	厦门钨业（600549）
	真空杜瓦	航天晨光（600501）
大型聚变装置（EAST、HL、CFETR）	结构材料	广大特材（688186）
	偏滤器	安泰科技（000969）
	氦工厂	国光电气（688776）

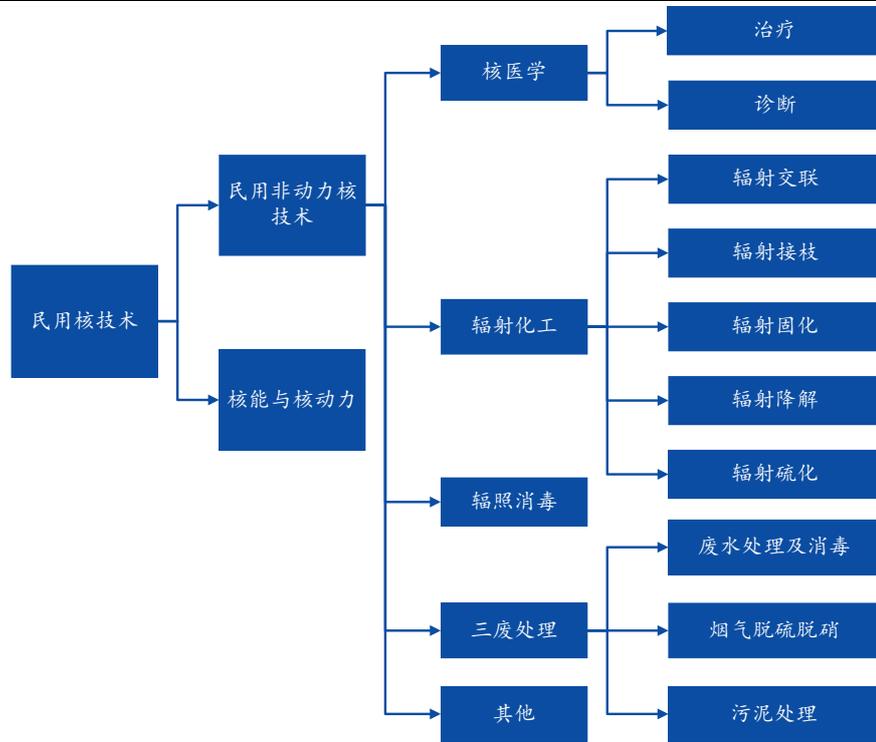
资料来源：Wind，公司公告，国元证券研究所

2.非动力核技术：辐射化工及电子辐照方兴未艾

非动力核技术是除核武器与核电之外的放射性应用研究技术，是现代科学技术发展的重要组成部分，是重要尖端的技术之一，广泛应用于工业、农业、医学、环保、安

全等诸多与人们生活密切相关的领域。国际原子能机构（IAEA）指出：“就应用的广度而言，只有现代电子学和信息技术才能与同位素及辐射技术相提并论。”

图 37：民用核技术应用领域



资料来源：《辐射加工在国民经济中的应用及发展前景》刘树德，《电子加速器辐射加工原理、应用及检测研究》王强等，国元证券研究所

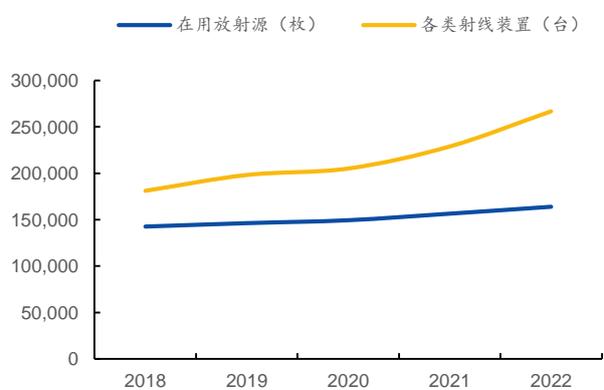
我国民用核技术稳步发展，全国从事放射性同位素和射线装置的单位数量逐年增加。截止 2022 年 12 月 31 日，全国从事放射性同位素和射线装置的相关单位数量共 10.5 万家，同比增长 13.1%，5 年 CAGR 达 9.4%。其中，生产、销售、使用放射性同位素的单位 0.97 万家，仅生产、销售、使用射线装置的单位共有 9.5 万家。2022 年底全国在用放射源达 16.4 万枚，各类射线装置 26.7 万台。

图 38：全国从事放射性同位素和射线装置的单位数量

图 39：全国在用放射源及各类射线装置数量



资料来源：国家核安全局，国元证券研究所



资料来源：国家核安全局，国元证券研究所

我国非动力核技术产业规模有待进一步发展壮大。美国将核技术应用列为优先支持的 22 项重大技术发展方向之一，其核技术应用产值已达 6000 亿美元，约占 GDP 的 3%。我国核技术应用产值从 2015 年的 3000 亿元（约占 GDP 的 0.4%），到 2022 年底已接近 7000 亿元（约占 GDP 的 0.57%），年均增长 15% 以上。其中，工业应用产值占比超过 50%，医用核技术产值占比约 20%。但总体而言，与发达国家相比，我国非动力核技术应用产值占比低，产业仍存在较大潜力和发展空间。

2.1 受益绿色化工产业发展，高附加值辐射化工彰显旺盛生命力

辐射化工是利用电离辐射作用于物质产生的化学变化（化合、分解、交联、聚合、接枝、固化、降解等）来实现材料改性的一种新的加工方法。辐射化工产品附加值高，应用面广，涉及通信、电子、电力、交通、石油化工、航空航天等诸多国民经济重要领域，近十几年来，随着世界范围产业结构的升级和环保意识的增强，辐射化工作为一种高效、节能、无污染、易控制的绿色化工产业受到世界的普遍重视，显示出旺盛的生命力。

辐射化工包括辐射交联、辐射固化、辐射硫化、辐射降解及辐射接枝改性。

辐射交联是利用电子束辐射在分子聚合物长链之间形成化学键，从而使聚合物的物理性能、化学性能获得改善并有可能引入新性能的技术手段。利用辐射交联技术生产的一大类产品是具有特殊“记忆效应”的热收缩材料，另一大类产品是辐射交联的电线电缆。

辐射固化是一种借助照射方法实现化学配方由液态转化为固态的加工过程。具有固化速度快、表面均一、能耗低、不使用化学溶剂等优点，是一种环保的固化方法，几乎涵盖所有的印刷工艺。

辐射硫化是高能电子束在橡胶基体中激活橡胶分子，产生橡胶大分子自由基，使橡胶大分子交联，形成三维网状结构。它避免了传统的化学热硫化由于使用的交联剂在基材内部分布不均而造成交联不均匀，以及温度梯度的影响造成的材料性能下降的缺点，非常适合用于载重汽车轮胎、密封圈以及长期使用于户外的橡胶产品。

辐射降解是指在辐射作用下，高分子聚合物发生主链断裂的情况。辐射降解技术主要应用于废旧塑料的处理及橡胶制品的再生利用。

辐射接枝改性是研制各种性能优异的新材料，或对原有材料进行辐射改性的有效手段之一。由于辐射接枝不需要向体系添加引发剂，可得到非常纯的接枝聚合物，是合成医用高分子材料的有效方法。

表 17：辐射化工产品

反应类型	应用领域	主要产品
辐射交联	热收缩制品	通讯电缆附件
	电线、电缆被覆	电力电缆附件
	材料交联	电力绝缘热收缩管
	聚乙烯发泡材料	电力母排
	工程塑料改性	石油保护管等
	PTC 材料及温控电热带	通讯、电力深井交联聚乙烯电缆等

辐射聚合	高分子环保材料	辐射聚合絮凝剂
	聚合复合材料	木塑复合材料制品
	聚合涂料	增稠剂
	纺织印染助剂	粘合剂
	医用硅橡胶	医用硅橡胶管
辐射接枝	高吸水性卫生材料	高吸水树脂
	特种功能膜	辐射接枝电池隔膜
辐射降解	废弃物再利用	聚四氟乙烯超经粉
	天然纤维素的再利用	屋顶防水卷材、制取工业酒精
辐射固化	涂层固化	摩托车外层涂料
	复合材料	木地板涂料、塑面金属板材等

资料来源：《辐射加工在国民经济中的应用及发展前景》刘树德，国元证券研究所

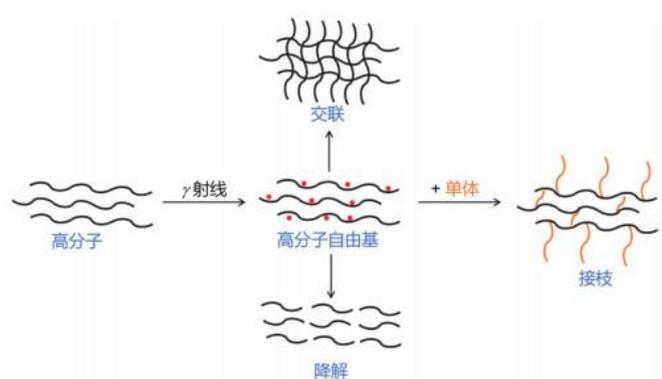
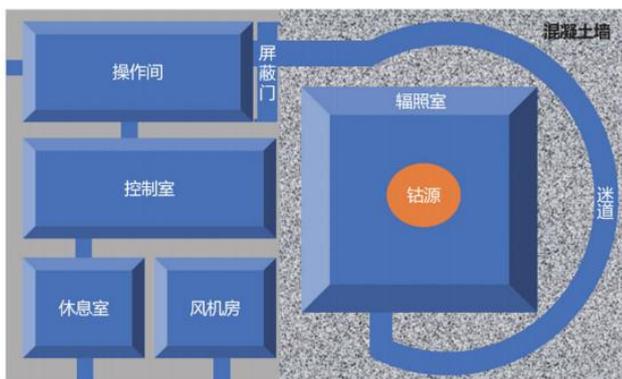
辐射化工用的设备主要有 2 类，分别为钴源辐照装置和高能电子辐照加速器。

钴源辐照装置：其利用放射性同位素钴 60 源放射出的 γ 射线进行辐照加工。它主要是由基本建设和各种工艺系统组成。基本建设主要有辐照室、预辐照大厅、控制室等组成。工艺系统主要是源的升降系统，物品的运输系统、控制系统、水处理系统和安全连锁系统等组成。

高能电子辐照加速器：利用高电压将电子枪产生的电子进行加速，赋予电子以一定高的能量如 0.5Mev~3Mev，使电子具有一定的强度，如 20mA。然后将这一电子束直接打在被加工的物品上进行辐照加工，也可以将电子束转变成 X 射线进行加工。其主要设备是电子加速器，束下装置和控制系统。

图 40：钴源辐照装置示意图

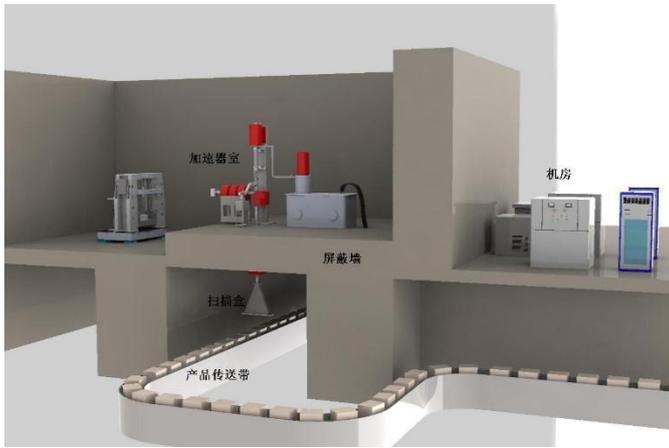
图 41： γ 射线辐照引起的高分子接枝、交联和降解过程



资料来源：《钴-60 源与辐射技术》林廷睿等，国元证券研究所

资料来源：《钴-60 源与辐射技术》林廷睿等，国元证券研究所

图 42：电子加速器布局



资料来源：国家原子能机构核技术研发中心官网，国元证券研究所

图 43：电子束的产生和特性



在电子加速器的高压、真空、绝缘环境中,无规则运动的电子进行定向运动,获得较高能量和速度,产生高能电子束流,简称电子束(EB)。

资料来源：《电子束辐照处理废水研究及进展》沈云鹏等，国元证券研究所

2.2 电子辐照技术在环保领域的应用发展迅速

核技术在环保领域可以有效处理“三废”（废气、废水、废物），如烟道气脱硫脱硝、去除挥发性有机物、各类型废水处理、处理污泥以减少致病微生物有机体、固体废弃物处理等。与传统方法比，具有效率高、可变废为宝、操作简便等优点。

我国在辐射处理废气、废水、废物等方面，虽然起步较晚但发展迅速。世界上第一座电子束处理烟气的工业化应用装置在中国成都建成。中广核达胜在广东建成国内第一个工业规模的电子加速器辐照处理印染废水工程项目已于 2020 年 6 月份正式投入运营，采用 7 台电子加速器联机运行，设计处理能力达到 30000m³/d。2020 年 7 月中广核达胜加速器技术有限公司联合新疆川宁生物科技有限公司，在新疆伊犁建设完成了我国第一个电子束无害化处理抗生素菌渣示范工程，设计处理抗生素菌渣 100t/d，为电离辐照在固体废弃物领域的应用开辟了新方向。

图 44：核环保用电子加速器

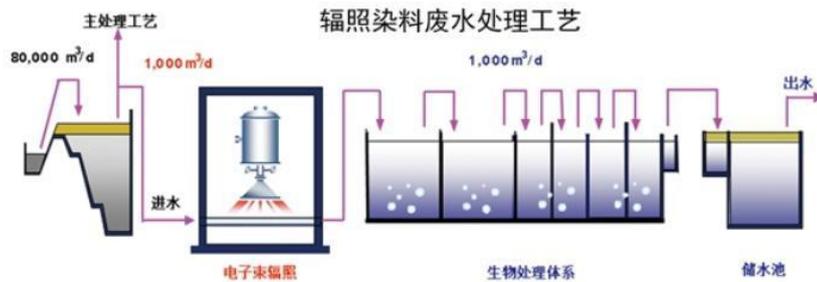


资料来源：国家原子能机构，国元证券研究所

电子辐照技术用于废水处理及消毒：

电子束辐照技术，既可以用作预处理，破坏有机污染物的结构，提高其生物降解性，以利于后续的生物处理；也可以作为深度处理，进一步氧化分解二级处理出水中残留的有机污染物，以满足排放标准或回用要求；同时，电子束辐照技术通过与传统的废水处理工艺相结合，可以形成技术可行、经济合理的废水处理新方法。

图 45：电子束辐照技术染料污水处理工艺



资料来源：国家原子能机构，国元证券研究所

电子束辐照处理废水具有六大优点：①**高效**：电子束辐照与污染物的作用时间短、效率高；②**低碳**：无需使用化学药剂，或仅使用少量化学药剂；③**安全**：不使用放射性核素，不产生放射性，关闭电源后就没有辐射，具有良好的安全性；④**可靠**：电子加速器性能稳定、使用寿命长；⑤**活性物种多样**：辐照反应体系中同时存在氧化性物种与还原性物种；⑥**应用方式灵活**：电子束辐照可与其他物理、化学方法联合使用，具有“协同效应”。

与传统的高级氧化过程（Advanced Oxidation Processes, AOPs）相比，电子束辐照技术不仅涉及到 $\cdot\text{OH}$ 的氧化作用，还涉及到 $\cdot\text{H}$ 和水合电子的还原作用，以及射线的直接作用，电子束辐照处理废水技术处理能力更强大。

电子束辐照技术对印染废水、造纸废水、含氰（腈）废水、重金属废水的处理都有较好的效果。

表 18：各类废水特点及处理效果

水种类	特点	处理效果
印染废水	排放量大、色度高、成分复杂，除染料外，还含浆料、各种助剂等。	降解染料分子，具有较好的脱色和降解效果，而且具有很好的脱色效果，且不存在“返色”现象。
造纸废水	含有多种污染物，COD 和色度较高，属于难降解工业废水。	作为预处理手段，可提高造纸废水的可生化性，去除可吸附有机卤素，显著降低废水的毒性。
含氰（腈）废水	氰化物毒性极强，废水中的氰化物可分为有机氰化物和无机氰化物。	电子束辐照降解氰化物，主要降解产物为氰酸盐（ CNO^- ）和氨氮（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）。
重金属废水	废水中的重金属一般不能分解破坏，只能转移其存在位置和转变其物化形态。	通常有两种途径：①直接利用电子束辐照，将废水中溶解态重金属离子还原为不溶的重金属单质或化合物，进而沉淀去除；②利用辐射技术制备或改性吸附材料，提高对重金属离子的吸附选择性，进而吸附去除。

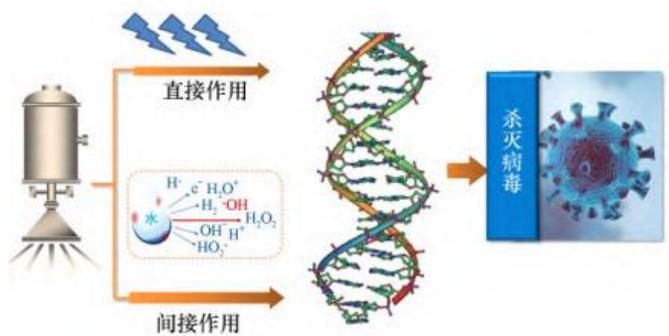
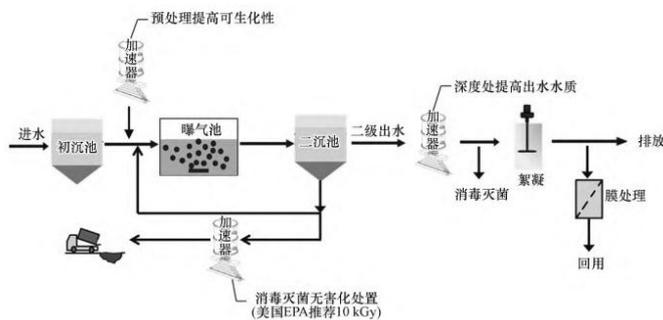
资料来源：《电子束辐照处理废水研究及进展》沈云鹏等，国元证券研究所

废水消毒方面，电子束辐照直接作用，以及电子束辐照作用于水后产生的活性粒子，能够改变或破坏微生物的 DNA、RNA 及细胞组织，因此，辐照技术可用于生物诱变育种，也可用于病毒/病原菌的灭活。

电子束辐照消毒不用添加额外的化学药剂，消毒效果好，是一种非常有前景的水消毒技术。利用电子束辐照对城市污水处理厂生物处理出水进行消毒，吸收剂量一般为 1.5~2.0kGy 时，可彻底灭活总大肠杆菌和粪大肠杆菌，同时还可以去除污水中残留的有毒有机污染物。

图 46：电子束辐照在污水处理厂中可能的应用方式

图 47：电子束辐照消毒的原理



资料来源：《电子束辐照处理废水研究及进展》沈云鹏等，国元证券研究所

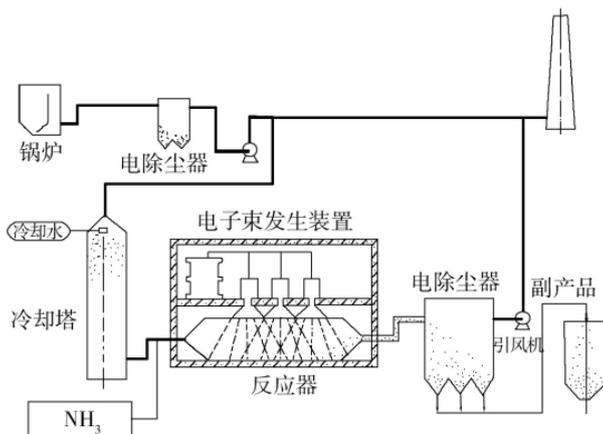
资料来源：《电子束辐照处理废水研究及进展》沈云鹏等，国元证券研究所

电子辐照技术用于烟气脱硫脱硝：

电子束辐照法脱硫是一种脱硫新工艺，经过 20 多年的研究开发，已从小试、中试和工业示范逐步走向工业化。其主要特点是：过程为干法，不产生废水废渣；能同时脱硫脱硝，可达到 90% 以上的脱硫率和 80% 以上的脱硝率；系统简单，操作方便，过程易于控制；对于不同含硫量的烟气和烟气量的变化有较好的适应性和负荷跟踪性；副产品为硫酸铵和硝酸铵混合物，可用作化肥。

图 48：电子束辐照法烟气脱硫脱硝工艺流程图

图 49：电子束烟气脱硫脱硝反应器



资料来源：《电子束辐照氨法烟气脱硫脱氮技术的研究》宋艳杰，国元证券研究所

资料来源：国家原子能机构，国元证券研究所

表 19：电子束辐照法烟气脱硫脱硝优缺点

优缺点	
优点	能够实现在一套烟气处理装置内同时进行脱硫脱氮过程，并且反应迅速，脱除效率较高，适合处理高浓度的二氧化硫（SO ₂ ）和氮氧化物（NO _x ），对烟气条件的变化和锅炉负荷变动的适应性比较强。
	所产生的副产品是硫酸铵和硝酸铵，可以直接作为化肥使用，因此不产生废弃物。
	属于干法处理工艺，所以没有废水产生，不需要排水处理装置，不存在腐蚀问题。
	该法的工艺过程不需使用催化剂，不存在催化剂中毒的使用寿命和更新等问题，可以节约运行经费。
	工艺过程简单，主要设备为冷却塔、反应器、加速器及静电除尘器。
	电子束辐照法烟气脱硫脱氮技术设备的结构对烟气条件的变动适应性强，控制容易。
缺点	耗电较大，故运行费中的电费占的比例较高。对于大型火电机组，烟气净化装置运行的电力消耗大致为机组发电功率的 2.0% 左右。
	运行时需采用防护措施，以防止辐射对人体造成的损害。
	处理后烟气中还存在排放微量氨（NH ₃ ）、硫酸（H ₂ SO ₄ ）和一氧化二氮（N ₂ O）的可能性，有待进一步确证。
	生成的硫酸铵和硝酸混合物中，除含有未反应的硫酸或酸性硫酸铵，还含有副产物氨基磷酸系化合物。酸性肥料吸湿性大、输送装卸困难，氨基磷酸系化合物影响植物的发芽和生长，应予除掉。

资料来源：《电子束辐照法烟气脱硫脱氮技术的研究》宋艳杰，国元证券研究所

电子辐照技术用于污泥处理：

目前常用的污泥方法主要有焚烧法、垃圾掩埋法和海洋处置法，此类方法均存在价格昂贵、耗能高、受自然条件限制并造成二次污染等问题。辐射处理技术作为一种新型污泥预处理方法，可有效提高污泥脱水性，改善污泥生化性，可与生物堆肥或污泥厌氧消化联合处理污泥污染问题。

污泥由电子束装置进入辐照区，经 2kGy 左右的吸收剂量辐照后，加入一定量的添加剂混合均匀，在 40~50 摄氏度下发酵 2~3 天，即可作为无害化生物固体无限制使用。与 γ 射线相比，虽然电子束的穿透能力相对较弱，但剂量率高且方向集中，能量利用率高，生产能力更强。此外，从辐射安全与防护角度来看，电子束穿透能力较弱，易屏蔽，只要电子束能量低于 10MeV，污泥经辐照后也不会产生感生放射性。

非动力核技术建议关注上市公司：中广核技，沃尔核材，中金辐照。

3. 投资建议

能源是推进碳达峰、碳中和的主战场，核电具有环保性、经济性、高效性三大优点，是唯一可大规模替代化石燃料的清洁能源。目前，第四代核电、模块化小堆、聚变堆处于多技术并行发展态势。我们认为，核技术与核电是解决国家能源需求、助推“双碳”目标实现、保障国家能源安全的关键科技变量，随着中国核电装备制造国产化 and 自主化能力的增强，核电装机规模以及核能发电量将不断提升，产业链相关公司有望充分受益，迎来快速发展期。

表 20：核技术与核电产业链公司

产业链	细分领域	相关上市公司
上游	核燃料及循环	宝钛股份，西部材料，东方锆业
	乏燃料后处理	安泰科技，中核科技

	超导材料	西部超导
	不锈钢管	久立特材
	控制棒	西部材料
	阀门	中核科技, 国光电气
中游	压力容器	兰石重装
	专用泵	国光电气
	主管道	融发核电
	核聚变配套设备	安泰科技
	核废料处理装备	航天晨光
下游	核电建设	中国建筑, 中国核建
	核电运营	中国核电, 中国广核
	非动力核技术应用	中广核技, 沃尔核材

资料来源: Wind, 国元证券研究所

重点布局技术垄断性强、行业垄断性好的龙头公司, 我们建议关注**上游材料及阀门上市公司**: 久立特材、中核科技、国光电气、安泰科技; **中游核设备、部件上市公司**: 兰石重装、安泰科技; **下游核电运营上市公司**: 中国核电、中国广核。

中核科技:

公司主要业务为工业用阀门的研发、生产、销售及服务。主要产品种类包括闸阀、截止阀、止回阀、球阀、蝶阀、调节阀、隔膜阀等。目前公司能制造碳钢、不锈钢、超低碳不锈钢、合金钢、蒙乃尔、钛等特殊合金材料的阀门, 能够承接各类大工程阀门的订单。作为阀门行业的龙头企业, 公司拥有十五家集商贸、机械制造、生物技术、核辐射利用等子公司的大型企业。

2022 年公司实现营业收入 15.00 亿元, 同比下降 3.69%, 毛利率 20.35%, 实现归母净利润 1.72 亿元, 同比增长 43.13%。2023 年前三季度实现营收 11.17 亿元, 同比增长 36.39%, 归母净利润 1.30 亿元, 同比增长 208.78%。

国光电气:

公司主营业务是真空及微波应用产品研发、生产和销售。公司的主要产品是微波器件、核工业设备及部件和其他民用产品。公司系国家高新技术企业、四川省企业技术中心、四川省博士后创新实践基地和国家定点军用微波电真空器件“两厂两所”之一, 拥有一系列自主研发、生产真空产品及微波电子器件的核心技术。

2022 年公司实现营业收入 9.11 亿元, 同比增长 54.38%, 毛利率 35.03%, 实现归母净利润 1.66 亿元, 同比增长 0.66%。2023 年前三季度实现营收 5.78 亿元, 同比下降 18.64%, 归母净利润 0.54 亿元, 同比下降 57.81%。

安泰科技:

公司是中国钢研旗下新材料领域的核心产业平台和科技创新主体, 主营业务包括高端粉末冶金材料及制品产业、先进功能材料及器件产业、高速工具钢产业和环保工程及装备材料产业。公司产品主要包括: 难熔钨钼精深加工制品、特种雾化制粉、超硬工具材料、稀土永磁材料及其制品、非晶及纳米晶材料等。

2022 年公司实现营业收入 74.06 亿元，同比增长 17.05%，毛利率 16.35%，实现归母净利润 2.11 亿元，同比增长 21.97%。2023 年前三季度实现营收 60.45 亿元，同比增长 5.71%，归母净利润 1.95 亿元，同比增长 14.44%。

兰石重装：

公司主要业务为传统能源化工装备、新能源装备、工业智能装备以及节能环保装备的研发、设计、制造、检测、检维修服务及工程总承包。公司主要产品为重型压力容器、核电设备、锻压设备、环保设备、板式换热器、技术服务、工程总包，公司是国内压力容器制造龙头企业之一。

2022 年公司实现营业收入 49.80 亿元，同比增长 23.37%，毛利率 14.00%，实现归母净利润 1.76 亿元，同比增长 43.35%。2023 年前三季度实现营收 31.10 亿元，同比增长 1.44%，归母净利润 1.37 亿元，同比下降 5.50%。

中国核电：

公司主要从事发电、输电、供电业务；通用设备修理；智能输配电及控制设备销售；输配电及控制设备制造；技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；清洁能源项目投资、开发；输配电项目投资、投资管理。目前，公司在运及在建电源项目均为核电、风电、光伏等清洁低碳能源，在“2030 年碳达峰，2060 年碳中和”的背景下，将发挥更大作用，具有更大发展空间。

2022 年公司实现营业收入 712.86 亿元，同比增长 13.70%，毛利率 45.63%，实现归母净利润 90.10 亿元，同比增长 9.66%。2023 年前三季度实现营收 560.89 亿元，同比增长 6.43%，归母净利润 93.27 亿元，同比增长 16.10%。

中国广核：

公司的主营业务为建设、运营及管理核电站，销售该等核电站所发电量，组织开发核电站的设计及科研工作。公司的主要产品是电力。公司经营范围为以核能为主的电力生产、热力生产和供应，相关专业技术服务，核废物处置，组织实施核电站工程项目的建设及管理；组织核电站运行、维修及相关业务；组织开发核电站的设计及科研工作；从事相关投资及进出口业务。

2022 年公司实现营业收入 828.22 亿元，同比增长 2.66%，毛利率 33.25%，实现归母净利润 99.65 亿元，同比增长 2.06%。2023 年前三季度实现营收 598.42 亿元，同比增长 2.44%，归母净利润 97.00 亿元，同比增长 10.36%。

表 21：重点公司盈利预测

公司代码	公司名称	昨收盘（元）	总市值（百万元）	EPS			PE		
				2022A	2023E	2024E	2022A	2023E	2024E
688776	国光电气	81.45	8827.83	1.53	1.21	2.06	53.16	67.44	39.49
603169	兰石重装	5.48	7158.48	0.13	0.18	0.24	40.69	30.38	22.72
000969	安泰科技	8.21	8626.97	0.20	0.24	0.30	40.87	33.79	27.66
601985	中国核电	8.97	169383.07	0.48	0.55	0.60	18.80	16.31	14.88
003816	中国广核	4.05	204519.38	0.20	0.22	0.24	20.52	18.04	16.89

资料来源：Wind，国元证券研究所（注：收盘价截至 2024.3.6）

4. 风险提示

宏观经济风险：

近年来，受国内宏观经济增速放缓和经济进入“新常态”的影响，全社会用电量增速放缓，直接影响到发电企业的生产经营和盈利能力，部分核电机组也受到一定程度影响。根据国内现行政策法规，核电作为清洁能源，相较于火电具有优先上网权，但是，若未来我国全社会用电需求增速低于装机容量增速，行业整体利用小时压力有可能传导到产业链公司，从而对公司盈利能力产生不利影响。

行业政策调整风险：

国务院、国家发改委等相关政府部门根据国内不同时期的行业现状及发展目标调整核电及核技术应用发展的政策，如果相关政府部门降低核电及核技术支持程度、或调整核监管的具体政策及规定，行业公司的发展战略、发展速度、业务状况、财务状况和经营业绩可能会受到不利影响。

核安全风险：

与其他行业不同，核反应堆内包含大量的放射性物质，有可能在一定的情况下对人员、环境及社会造成放射性危害。在世界范围内的核安全事故，尤其是导致严重放射性污染或辐射的事故，也可能造成国内及其他国家或地区的政策调整，从而影响行业发展。

投资评级说明:

(1) 公司评级定义		(2) 行业评级定义	
买入	预计未来 6 个月内, 股价涨跌幅优于上证指数 20%以上	推荐	预计未来 6 个月内, 行业指数表现优于市场指数 10%以上
增持	预计未来 6 个月内, 股价涨跌幅优于上证指数 5-20%之间	中性	预计未来 6 个月内, 行业指数表现介于市场指数±10%之间
持有	预计未来 6 个月内, 股价涨跌幅介于上证指数±5%之间	回避	预计未来 6 个月内, 行业指数表现劣于市场指数 10%以上
卖出	预计未来 6 个月内, 股价涨跌幅劣于上证指数 5%以上		

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力, 以勤勉的职业态度, 独立、客观地出具本报告。本人承诺报告所采用的数据均来自合规渠道, 分析逻辑基于作者的职业操守和专业能力, 本报告清晰准确地反映了本人的研究观点并通过合理判断得出结论, 结论不受任何第三方的授意、影响。

证券投资咨询业务的说明

根据中国证监会颁发的《经营证券业务许可证》(Z23834000), 国元证券股份有限公司具备中国证监会核准的证券投资咨询业务资格。证券投资咨询业务是指取得监管部门颁发的相关资格的机构及其咨询人员为证券投资者或客户提供证券投资的相关信息、分析、预测或建议, 并直接或间接收取服务费用的活动。证券研究报告是证券投资咨询业务的一种基本形式, 指证券公司、证券投资咨询机构对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析, 形成证券估值、投资评级等投资分析意见, 制作证券研究报告, 并向客户发布的行为。

一般性声明

本报告由国元证券股份有限公司(以下简称“本公司”)在中华人民共和国内地(香港、澳门、台湾除外)发布, 仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。若国元证券以外的金融机构或任何第三方机构发送本报告, 则由该金融机构或第三方机构独自为此发送行为负责。本报告不构成国元证券向发送本报告的金融机构或第三方机构之客户提供的投资建议, 国元证券及其员工亦不为上述金融机构或第三方机构之客户因使用本报告或报告载述的内容引起的直接或间接损失承担任何责任。本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息, 但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的信息、资料、分析工具、意见及推测只提供给客户作参考之用, 并非作为或被视为出售或购买证券或其他投资标的的投资建议或要约邀请。本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期, 本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。本公司建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况, 以及(若有必要)咨询独立投资顾问。在法律许可的情况下, 本公司及其所属关联机构可能会持有本报告中所提到的公司所发行的证券头寸并进行交易, 还可能为这些公司提供或争取投资银行业务服务或其他服务。

免责条款

本报告是为特定客户和其他专业人士提供的参考资料。文中所有内容均代表个人观点。本公司力求报告内容的准确可靠, 但并不对报告内容及所引用资料的准确性和完整性作出任何承诺和保证。本公司不会承担因使用本报告而产生的法律责任。本报告版权归国元证券所有, 未经授权不得复印、转发或向特定读者群以外的人士传阅, 如需引用或转载本报告, 务必与本公司研究所联系。 网址: www.gyzq.com.cn

国元证券研究所

合肥	上海
地址: 安徽省合肥市梅山路 18 号安徽国际金融中心 A 座国元证券	地址: 上海市浦东新区民生路 1199 号证大五道口广场 16 楼国元证券
邮编: 230000	邮编: 200135
传真: (0551) 62207952	传真: (021) 68869125
	电话: (021) 51097188