



德邦证券
Topsperity Securities

证券研究报告|行业深度

机械设备

2023年9月19日

核电行业深度系列报告：四代核电渐行渐近，可控核聚变稳步前行



证券分析师

姓名：俞能飞

资格编号：S0120522120003

邮箱：yunf@tebon.com.cn

姓名：唐保威

资格编号：S0120523050003

更多免费行业报告

并购家

www.ipoipo.cn

h.cn

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

- **安全为基，核电产业稳步发展。**由于核电的特殊属性，我国核电项目均需经国务院的核准，所以国内核电产业发展对政策及政府态度的依赖较大。核电安全性是影响政府政策导向的关键因素，我国最新核准的山东石岛湾、福建宁德、辽宁徐大堡核电项目要求“按照全球最高安全要求建设”、“确保万无一失”。核安全事故往往会造成世界范围内的核电发展停滞，如2011年福岛核事故致使世界多个国家暂缓核电项目建设，我国也宣布暂停所有核电项目的审批。目前政策保持对核电支持的导向，近年来国内核电复苏态势明显，2022年初国家发展改革委和国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》，要求积极安全有序发展核电，当年的二十大报告中延续了这一表述。国内在经历2016-2018年连续3年核电项目0核准后，2019年核电产业开始复苏，2019-2022年不断有新的核电项目得到核准，2022年获核准的核电数量更是达到10台，为2008年以后的最高峰。2023年截至7月份，我国核准核电机组数量为6台。
- **四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列。**四代核电与三代方案以及概念完全不同，它不是在第三代技术基础上的延伸，而是根本性革命性的变化。第四代核反应堆是目前正在研发的、在反应堆概念和燃料循环方面有重大创新的下一代反应堆，其主要特征是安全可靠、废物产生量小、具有更好的经济性、具备多用途功能、可防止核扩散。经过共同努力，2002年，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。中国在2006年加入GIF，已建设石岛湾20万千瓦高温气冷堆项目、2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆项目、霞浦钠冷快堆示范项目等多个四代堆项目，在多项四代核电路线上保持领先。
- **人类终极能源，可控核聚变稳步前行。**核裂变成熟度高，但产生的放射性废物处理比较困难，而且主要核燃料铀的储量相对其它元素来说并不丰富，开采和提炼又十分困难，同时因为发展史上一些大事故，让人们核电站心存余悸，甚至很多国家做出决策不再发展裂变核电站，因此原子核的裂变能并不是人类最理想的能源。核聚变具有原料资源丰富、释放能量大、放射危害小、安全性高等优势，有望成为人类终极能源。聚变堆是我国核能发展“热堆-快堆-聚变堆”战略三步走中的一环，国内研究集中在磁约束-托卡马克装置上。EAST装置是我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，其成功建设和物理实验使中国在磁约束聚变研究领域进入世界前沿，令中国成为世界上重要的聚变研究中心之一。今年7月中核五公司发布文章称其与中国第一家聚焦聚变能开发的商业公司正式签订了全高温超导核聚变装置总装合同，将承建全球首个全高温超导核聚变实验装置。
- **建议关注。**1) **佳电股份**：公司是国内首家取得核级电机设计、制造许可证的企业，产品主驱风机是四代堆-高温气冷堆一回路唯一的动力设备，在国际上处于领先水平，获得国内“重点领域首台套创新产品”认证；2) **国光电气**：公司生产的偏滤器和包层系统是ITER项目的关键部件，目前国内在该领域具有相关典型项目承建与运维经验的，只有公司一家，公司具有较明显优势；3) **兰石重装**：公司是国内首家实现国产替代的民用核级板式换热器设计生产企业，子公司中核嘉华在核燃料贮存容器细分领域具有较高的市场占有率，制造了中国首座50吨核乏燃料后处理中间试验厂的绝大多数非标设备；4) **科新机电**：公司成功承制了具有四代安全特征的华能石岛湾高温气冷堆核电站示范工程的热气导管、主驱风机冷却器等核电产品，核电产品ANT-12A型新燃料运输容器以优质性能实现替代进口，获得客户赞许；5) **江苏神通**：在核电阀门领域，公司产品优势地位突出，自2008年以来，在我国新建核电工程用阀门的一系列国际招标中，公司为核级蝶阀和核级球阀的主要中标企业，获得了这些核电工程已招标核级蝶阀、核级球阀90%以上的订单；6) **海陆重工**：多年来，公司在民用核能领域积累了丰富的制造和管理经验，并完成多个项目的国际、国内首件（台）制造任务，服务堆型包括但不限于三代堆型（华龙一号、国和一号）、四代堆型（高温气冷堆、钠冷快堆、钍基熔盐堆）以及热核聚变堆（ITER）等；7) **中国一重**：中国一重是国内最早开发生产核能设备的企业，也是国内最大的核电锻件供应商，已具备核岛一回路核电设备的全覆盖，成为全球少数兼备核岛铸锻件和核岛成套设备制造能力的重要供应商，国际先进核岛设备供应商和服务商，是国内唯一承担并已完成二代、二代加、三代、四代核电技术装备制造的企业；8) **国机重装**：具备核岛主设备制造资质和能力，成功签约全球首个聚变主机关键部件制造合同；9) **航天晨光**：放射性废物处理系统关键设备核心技术打破国外垄断，热核聚变系统完成江苏省首台（套）重大装备认定申报。

- **风险提示：**（一）全球范围内无法预期的核事故；（二）核电政策转向保守；（三）聚变项目进展不及预期；（四）电力市场需求增长缓慢

目录 CONTENTS

01 安全为基，核电产业稳步发展

02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

04 建议关注

05 风险提示

01

安全为基，核电产业稳步发展

01 安全为基，核电产业稳步发展

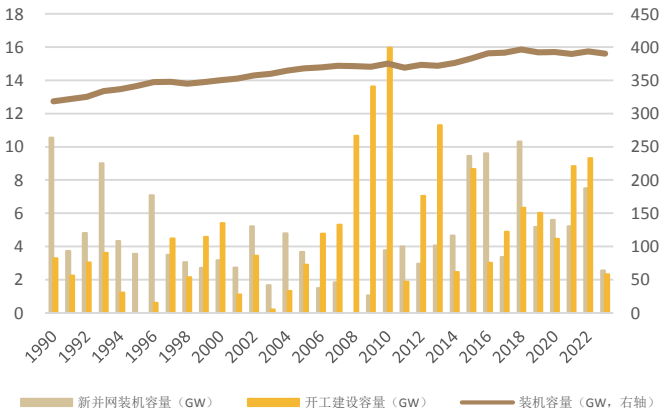
1.1 对实现“双碳”具有重要意义，全球核电平稳发展

- **核电具备多项优点，对实现“双碳”具有重要意义。**核能发电不向大气排放二氧化碳等温室气体，不排放二氧化硫、氮氧化物等有害气体，相比水电、太阳能、风电等清洁能源，核电具有占地面积较小，年发电小时数高、发电量大，对电网影响小等特点。在全球范围内，核能不仅是实现双碳战略目标的重要支柱能源，更被视为能源现代化产业的工业技术集大成者，对能源清洁低碳转型和科技转型变革具有战略性带动作用。
- **受安全事故影响较大，多年来全球核电平稳发展。**纵观全球核电自上世纪90年代以来的发展，可以发现核电总装机容量处于平稳上升的态势。1990年全球核电装机容量为318.3GW，到2022年末约为393.7GW，发展32年来核电总装机量的年均复合增速仅为0.67%。从2003年开始全球核电曾迎来快速发展期，2003年全球核电开工建设容量仅0.2GW，此后连年上升，2008年开工建设的核电容量达到10.7GW，此后连续2年均保持在10GW以上。但是2011年发生的福岛核泄漏事故中断了这一发展势头，当年新开工的核电容量仅1.9GW，关停的核电容量却达到了11.4GW。

图表：不同类型能源的特点

能源类型	特点
煤、石油、天然气	传统能源，在现今能源消耗中占比大；污染环境；不可再生
水力	无污染；受自然环境条件和季节影响
地热能、潮汐能	只能在一定条件下有限开发，较难大量使用；成本较高
风能、太阳能	不稳定，对天气依赖性较大，波动性大
生物质能	可再生，但具体技术有待研发
核电	燃料全球储量丰富，成本相对低；技术成熟；燃料能量密度高

图表：全球核电装机情况

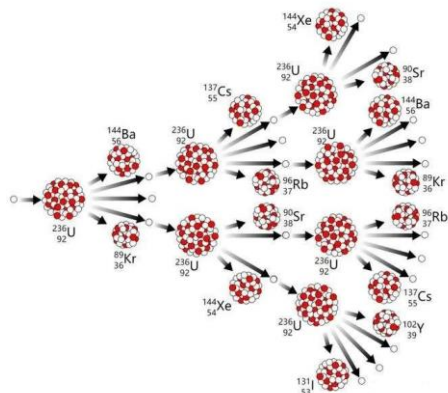


1.2 核裂变是目前核能发电运用的主要原理，压水堆为核电站主力堆型

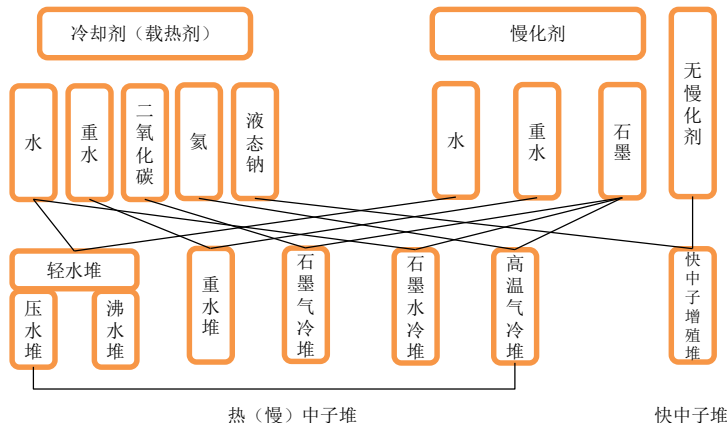
- **核裂变是目前核电站发电运用的主要原理，由中子撞击原子核产生。**核电站目前主要是利用铀原子核裂变所发出的巨大能量来发电的，核裂变是指一个质量较重的原子核通过核反应过程分裂为两个或两个以上的中等质量的原子核的过程。用中子轰击铀-235原子核，原子核分裂为2个较轻的原子核，同时产生2~3个中子，若这些中子除去消耗，至少有一个中子能引起另一个原子核裂变，使裂变自持地进行，则这种反应称为链式裂变反应。实现链式反应是核能发电的前提。
- **压水堆以安全性成为首选，通过裂变产生热源“烧开水”发电。**核电站堆型有很多种，我国的核电站技术路线也以压水堆为主。压水堆是一种首先用于舰船的核动力堆，以水为冷却剂和中子慢化剂，结构紧凑，经济性、安全性好，安全是许多国家选用压水堆的重要因素，目前是世界核电站的主力堆型。与火电厂相比，核电的“锅炉”是核反应堆(核岛)，核裂变反应发出的热量被堆芯中的水所吸收，通过一回路流经蒸汽发生器，将热量交换给二回路中的水，二回路以及后面的流程与火电厂是一样的——高温将水转化为蒸汽驱动汽轮机运转，并带动发电机发电。

➤ **压水堆以安全性成为首选，通过裂变产生热源“烧开水”发电。**核电站堆型有很多种，我国的核电站技术路线也以压水堆为主。压水堆是一种首先用于舰船的核动力堆，以水为冷却剂和中子慢化剂，结构紧凑，经济性、安全性好，安全是许多国家选用压水堆的重要因素，目前是世界核电站的主力堆型。与火电厂相比，核电的“锅炉”是核反应堆（核岛），核裂变反应发出的热量被堆芯中的水所吸收，通过一回路过热器，将热量交换给二回路中的水，二回路以及后面的流程与火电厂是一样的——高温将水转化为蒸汽驱动汽轮机运转，并带动发电机发电。

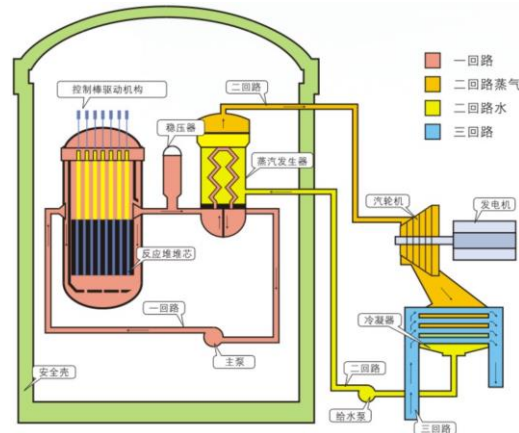
图表：核裂变反应示意图



图表：多种多样的反应堆堆型



图表：压水堆核电站发电的工作原理



01 安全为基，核电产业稳步发展

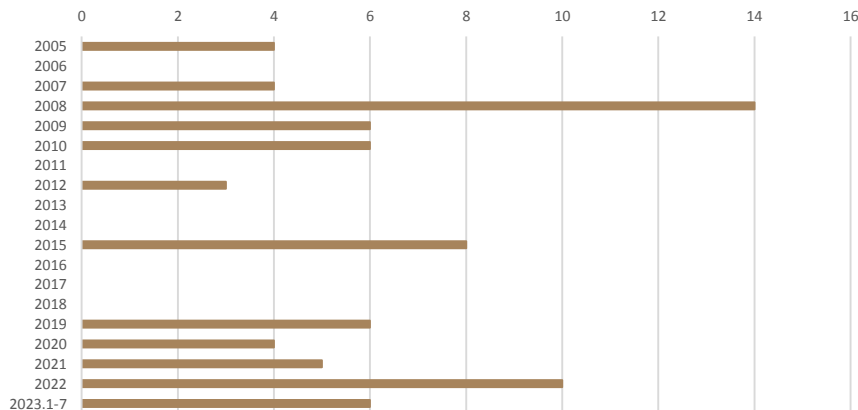
1.3 对政策依赖程度大，我国目前政策支持核电发展

- **安全是核电产业发展的根本前提，核电对政策依赖程度大。**由于核电的特殊属性，我国核电项目均需经国务院的核准，所以国内核电产业发展对政策及政府态度的依赖较大。核电安全性是影响政府政策导向的关键因素，我国最新核准的山东石岛湾、福建宁德、辽宁徐大堡核电项目要求“按照全球最高安全要求建设”、“确保万无一失”。核安全事故往往会造成世界范围内的核电发展停滞，如2011年福岛核事故致使世界多个国家暂缓核电项目建设，我国也宣布暂停所有核电项目的审批。
- **政策保持对核电支持的导向，近年来国内核电复苏态势明显。**2022年初国家发展改革委和国家能源局印发《“十四五”现代能源体系规划》，要求积极安全有序发展核电，当年的二十大报告中延续了这一表述。根据我们统计，“十一五”规划做出“积极发展核电”的表述后，核电每年开工数量从2006年的2台增长到2010年的9台，核准数量也在2008年达到14台；2011年受到福岛核泄漏事故影响，当年的核准及开工项目均为0，此后核电发展较为平缓，尤其是2016-2018年连续3年核电项目0核准。直到2019年，核电产业再度复苏，2019-2022年不断有新的核电项目得到核准，2022年获核准的核电数量更是达到10台，为2008年以后的最高峰。2023年截至7月份，我国核准核电机组数量为6台。

图表：不同时期我国核电政策表述

文件	时期	内容
“十一五”规划	2006-2010	积极发展核电
“十二五”规划	2011-2015	在确保安全的前提下高效发展核电
“十三五”规划	2016-2020	以沿海核电带为重点，安全建设自主核电示范工程和项目，积极开展内陆核电项目前期工作
“十四五”规划	2021-2025	安全稳妥推动沿海核电建设，建设一批多能互补的清洁能源基地，非化石能源占能源消费总量比重提高到20%左右

图表：国内近年来核电机组核准数量（台）

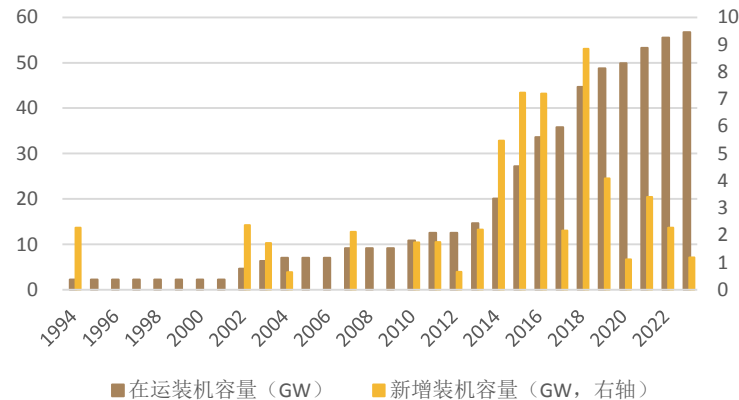


01 安全为基，核电产业稳步发展

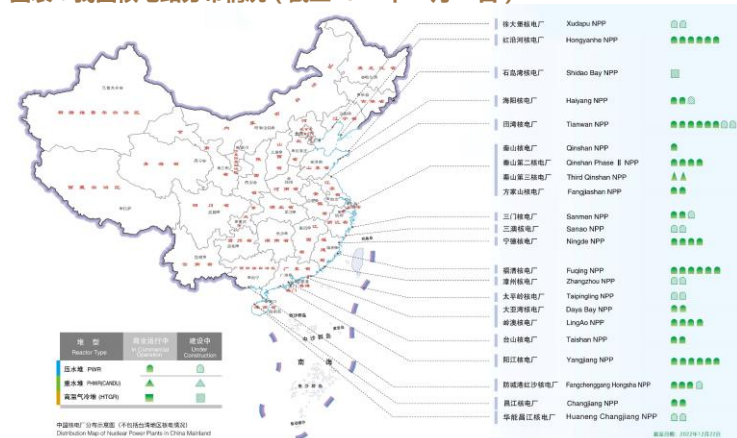
1.4 中国在建机组装机容量全球第一，主要核电堆型设备国产化率达90%以上

- **核电发展30年，在建机组装机容量全球第一。**浙江海盐是中国大陆核电的发源地，自从我国大陆第一座核电厂——秦山核电厂1991年末并网发电以来，国内核能发电的应用已经走过30多年历史。截至2022年底，我国商运核电机组53台，总装机容量约55.6GW，仅次于美国、法国，位列全球第三，核电总装机容量占全国电力装机总量的2.2%；全年核电发电量为4177.8亿千瓦时，同比增加2.5%，约占全国总发电量的4.7%，核能发电量居全球第二；我国在建核电机组23台，总装机容量2549万千瓦，在建机组装机容量继续保持全球第一。
- **核电站主要在沿海地区分布，主要核电堆型设备国产化率达90%以上。**我国大陆投运的核电机组分布在沿海8个省区，从北至南依次为辽宁省、山东省、江苏省、浙江省、福建省、广东省、广西壮族自治区和海南省。2022年国内核电主设备累计交付54台套，交付数量创近五年新高，其中“国和一号”湿绕组电机主泵和屏蔽电机主泵，示范快堆1号机组堆芯支承、热交换器、新组件装载机、提升机等一批首台套核电关键装备实现交付，我国核电装备自主化和国产化能力进一步提升，主要核电堆型设备国产化率达90%以上。

图表：中国核电装机发展情况



图表：我国核电站分布情况（截至2022年12月22日）



02

四代核电渐行渐近，国内相关技术 走在世界前列

02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.1 核裂变打开核能利用大门，第四代核电站渐行渐近

- **核裂变现象的发现促进核能利用发展，苏联建成世界第一座核电站。**1938年德国科学家奥托·哈恩发现了核裂变现象，此后因战争的原因，核研究被提上了议事日程。1942年12月2日费米在芝加哥实现了世界上第一次受控的自持链式反应，被人称为“登上了原子能新大陆”。从1941年开始，美国着手建立用于第一颗原子弹爆炸式链式反应，曼哈顿计划的辉煌以1945年在阿拉莫斯的首爆为标志，随后在广岛和长崎上空进行了爆炸。1954年前苏联建成世界首座核电站，1961年美国建成世界第一座商用核电站，此后核电又经几十年的发展，压水堆已做到电功率最大可达1450MW；热能/电能转换效率从28%提高到33%；每年运行时间可稳定在70%以上。其使用效率及经济性已达到或超过燃煤电站。
- **核电站历经70余年发展，第四代核电站渐行渐近。**自1951年12月美国实验增殖堆1号(EBR1)首次利用核能发电以来，核电站技术方案大致可分为四代。第一代属于原型堆核电站，主要目的是为了通过试验示范形式来验证其核能在工程实施上的可行性；第二代主要是实现商业化、标准化、系列化、批量化，以提高经济性；第三代各国各有不同看法，代表有美国AP1000，法国EPR，我国华龙一号等；第四代核能系统概念（有别于核电技术或先进反应堆）由美国在上世纪90年代末提出，随后美、法、日、英等国家组建了“第四代核能系统国际论坛(GIF)”，GIF计划总目标在2030年左右向市场推出能够解决核能经济性、安全性、废物处理和防止核扩散问题的第四代核能系统(Gen-IV)。

图表：世界核能发展的主要进程

时间	事件
1938	哈恩等发现重原子核裂变
1942	费米实现链式反应，建成第一座石墨慢化反应堆
1945	实现不可控的链式反应——原子弹，用于军事目的
1951	美国建成第一座快中子堆，产生200kW电功率，首次演示核能发电
1952	美国实现第一次不可控聚变反应，试爆热核反应原理装置
1953	美国建成第一座核潜艇用的动力堆陆上模型
1954	苏联建成第一座电功率5MW石墨慢化、水冷却示范核电站
1957	美国建成第一座压水堆型示范核电站，电功率90MW
1961	美国建成第一座商用核电站，电功率185MW
1970s	美国开发出加强辐射小型热核武器——中子弹
1970s	以石油危机为契机，全世界大规模推进核电站建设

图表：四代核电站的发展历程及主要特点

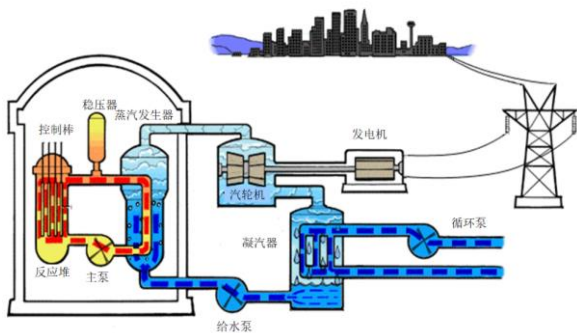


02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

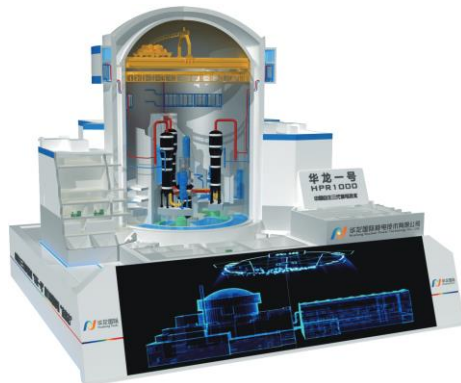
2.2 三代堆由二代堆改进而来，四代则是根本性革命性的变化

- 三代堆由二代堆改进而来，我国三代商业化核电技术水平处于世界前列。目前主流的三代技术是在二代技术的基础上继承改进的，第三代核电的概念则起源于上世纪90年代，当时美国电力研究院出台了“先进轻水堆用户要求”文件（即URD），用一系列定量指标来规范核电厂的安全性和经济性。随后，欧洲出台的欧洲用户对轻水堆核电厂的要求（即EUR），也表达了与URD相同或近似的看法。国际上通常把满足URD文件或EUR文件的核电机组称为第三代核电机组。第三代核电站反应堆类型的代表，有美国西屋电气公司的AP1000，法国阿海珐公司的EPR，俄罗斯原子能公司的AES2006，中国的“华龙一号”、“国和一号”等。
- 四代核电是根本性革命性的变化，与三代方案以及概念完全不同。1996年美国能源部(DOE)提出了以核废物减量、节约铀矿资源、进一步强化固有安全性为目标的第四代核电站的概念；2000年，IAEA发起创新型反应堆与燃料循环国际计划(INPRO)，联合各核电技术国家，在保证核安全、最小风险以及尽可能不影响环境的前提下，共同开发更具竞争力的创新型核能系统(INS)；2001年7月，美国能源部牵头，由美国、英国、韩国、南非、日本、法国、加拿大、巴西、阿根廷9国，成立了第四代核能系统国际论坛(GIF)，中国、瑞士和欧洲原子能共同体后来也加入其中。不管是二代还是三代，均属于热堆技术，其堆型绝大多数为压水堆，三代技术与二代相比，没有实质性的差别，只是安全性提高了一些，而第四代核电技术并不是在第三代技术基础上的延伸，它与当代核电技术相比，是根本性革命性的变化，包括方案以及概念完全不同。

图表：压水堆是二代、三代核电站主要堆型



图表：华龙一号核岛示意图



02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

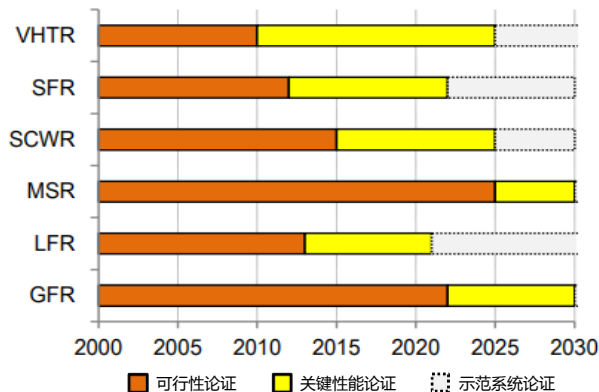
2.3 四代核电包括6种堆型，GIF提出具体发展目标

- **四代堆具备多项优点，主要包括6种堆型。**第四代核反应堆是目前正在研发的、在反应堆概念和燃料循环方面有重大创新的下一代反应堆，其主要特征是安全可靠、废物产生量小、具有更好的经济性、具备多用途功能、可防止核扩散。经过共同努力，2002年，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（2014年进行了更新），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。
- **中国为GIF成员国，GIF提出四代核电具体发展目标。**GIF目前拥有14个成员，中国在2006年加入。GIF提出四代核电的具体发展目标包括：1) 在可持续性方面，应能实现能源生产的可持续性，促进核燃料的长期可使用性，并最大限度地减少核废物的产生和降低核废物的长期管理负担；2) 在安全性和可靠性方面，应具备优异的安全性与可靠性和极低的堆芯损坏概率与损坏程度，并消除开展厂外应急响应的必要性；3) 在经济性方面，其寿期循环成本应优于其他能源技术，且财务风险水平与其他能源项目相当；4) 在防扩散和实物保护方面，使第四代核能系统成为一条非常不具吸引力的武器材料转用和盗窃路线，并为防范恐怖袭击提供更强的实物保护。

图表：第四代核能系统目标

目标	内容
可持续性目标	(1) 符合清洁空气目标的可持续能源生产，促进各系统的长期可用性和核燃料有效利用于全球能源生产；(2) 核废物最小化并处理核废物，显著减轻长期监管负担，从而改善对公众健康和环境的保护。
经济型目标	(1) 比其它能源具有清晰的全寿命周期成本优势；(2) 财务风险级别与其它能源项目相差无几。
安全性和可靠性目标	(1) 具有卓越的运行安全性和可靠性；(2) 反应堆堆芯损坏的可能性和损坏程度非常低；(3) 消除对厂外应急响应的需要。
防扩散与实物保护目标	第四代核能系统将提高对最不适于武器级核材料非法转移或盗窃路线的保障，并增强对恐怖行为的实物保护。

图表：GIF路线图中6种四代核能系统研发时间表



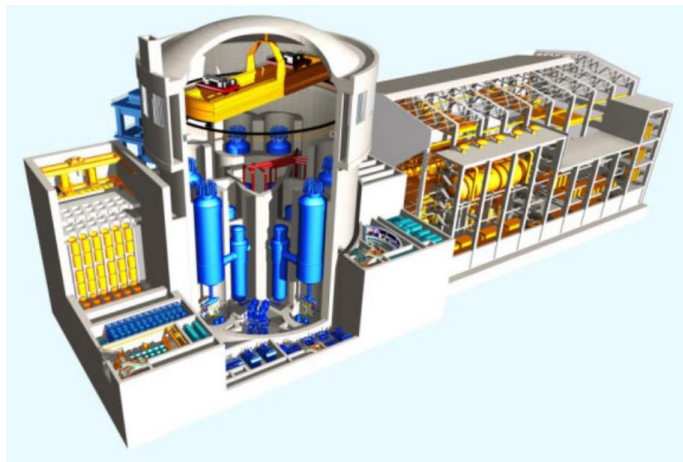
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.4 超高温/高温气冷堆（V/HTR）

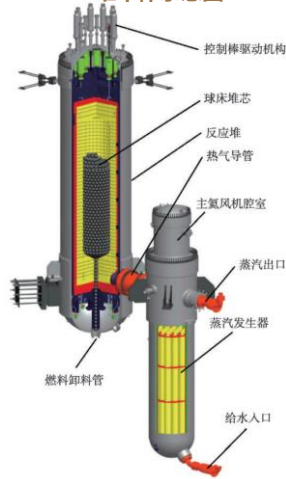
2.4.1 新一代核能系统，模块式高温气冷堆是该技术发展的新阶段

- **国际公认的新一代核能系统，应用前景广阔。**高温气冷堆属于热中子裂变反应堆，用氦气作冷却剂，石墨作慢化材料，采用包覆颗粒燃料以及全陶瓷的堆芯结构材料。模块式高温气冷堆安全性好、氦气堆芯出口温度高，是目前国际核能领域公认的新一代核能系统，在工艺供热、核能制氢、高效发电、空间电源甚至军用领域都有广泛的应用前景。国际上把高温气冷堆列为符合第四代先进核能系统技术要求的堆型之一。2003年发表的第四代核能系统路线图报告把超高温气冷堆（VHTR）列为第四代核能系统6种候选技术之一。此后更新的路线图报告则将VHTR更改为V/HTR（超高温气冷堆/高温气冷堆），并说明它包括的温度范围是700~1000℃。
- **由军品到商用，模块式高温气冷堆是该技术发展的新阶段。**高温气冷堆的前身是气冷反应堆，用气体作为冷却剂，最早应用于军用核材料生产，后逐步发展为商用发电的动力反应堆。它大致分为四个阶段：早期气冷堆（Magnox堆）、改进型气冷堆（AGR堆）、高温气冷堆（HTGR）和模块式高温气冷堆（MHGTR），MHGTR是HTGR技术发展的新阶段。

图表：HTR-PM600核电厂3维设计图



图表：HTR-PM堆本体示意图



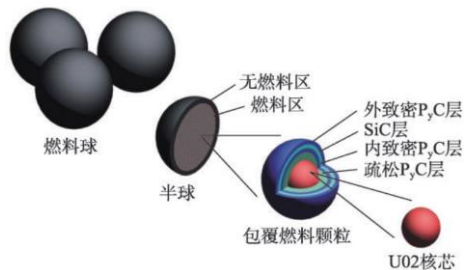
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.4 超高温/高温气冷堆（V/HTR）

2.4.2 高温气冷堆具有优异的固有安全性，潜在制氢能力使其更具吸引力

- **具有优异的固有安全性是模块式高温气冷堆的突出特征。**高温气冷堆的高温特性和安全性能首先源于其独特的包覆颗粒燃料，目前压水堆使用的燃料由氧化铀陶瓷芯块和锆合金包壳组成，HTR-PM球形燃料元件结构以直径0.5mm左右的二氧化铀为芯核，通过疏松热解碳、碳化硅、致密热解碳等三种同心球壳状包覆材料形成燃料颗粒，形成0.92mm直径的包覆颗粒燃料。燃料颗粒随机弥散在石墨基体内，大约12000个包覆颗粒燃料与石墨一起被填充在1个直径60mm的燃料球中。只要环境温度不超过1650℃，碳化硅球壳就能保持完整，固锁放射性裂变产物，形成了第一道安全屏障。
- **氦气冷却，石墨慢化，出口温度高使其具备制氢能力。**高温气冷堆采用氦气作冷却剂。氦气是一种惰性永久气体，不与任何物质起化学反应，中子吸收截面小，难于活化，具有很低的放射性水平。高温气冷堆采用石墨作慢化剂，堆芯不含金属，结构材料由石墨和碳块组成，熔点都在3000℃以上。另外，氦气与反应堆的结构材料相容性好，避免了以水作冷却剂与慢化剂的反应堆中的各种腐蚀问题，使冷却剂的出口温度可达950℃甚至更高。由于出口温度高，该堆型可以用于更高温度的核能热利用，电解效率高达75%以上的高温固体氧化物电解水制氢SOEC（Solid Oxide Electrolysis Cell），其运行温度为600℃~900℃，高温气冷堆是其所需理想堆型。美国能源部于2004年出台的《氢能技术研究、开发与示范行动计划》中，核能制氢系采用高温热化学技术制氢，即碘—硫热化学循环制氢。利用反应堆堆芯出口温度高达950℃~1000℃超高温气冷堆进行碘—硫热化学循环规模化制氢，将成为高温气冷堆未来的重点应用领域。

图表：HTR-PM球形燃料元件结构



图表：燃料球及内部燃料颗粒尺寸示意图



图表：包覆颗粒燃料示意图



02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.4 超高温/高温气冷堆（V/HTR）

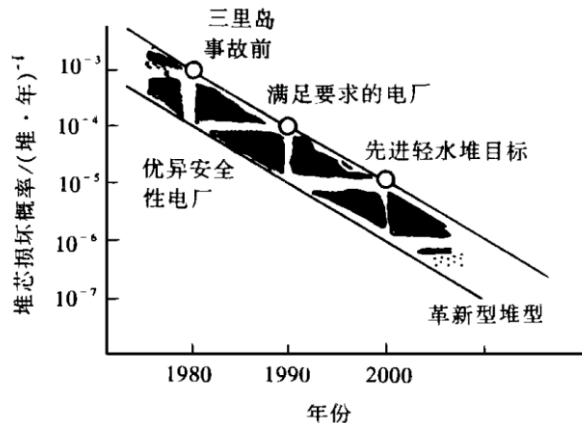
2.4.3 固有安全性源自核子物理性质及材料特点

- 核反应堆停堆后继续产生热量，将热量顺利带出堆芯是保证核安全的最主要挑战。一般的燃煤或燃气锅炉熄火后，就不会再产生热量。而核反应堆不同，压水堆和沸水堆最大的危险在于冷却水主环路失灵，那么即使中子吸收棒被放到“全关”的位置，之前裂变产生的放射性元素仍然会继续裂变而产生过多的热量，最终会把整个炉心熔化掉（Reactor Core Meltdown），极高温的放射性金属熔浆有可能会烧穿反应炉的水泥地基而渗入地下水层，将大量危险的放射性同位素释放到外界。
- 温度升高反应减缓，燃料结构材料保证不发生放射性泄露。高温气冷堆的功率控制和绝不熔堆的保证来自核子物理性质：裂变产生的快中子（Fast Neutron）和石墨原子核碰撞之后，损失动能，成为慢中子（Thermal Neutron）；而其他铀235原子核吸收慢中子（这就是所谓的连锁反应，Chain Reaction）而引发新的裂变截面（即机率）随温度增高而减小，在摄氏1000度以上减小得很快，当反应堆温度逐步升高到1600℃，连锁反应就基本停止了。这个温度远低于燃料可承受的最大温度，因此燃料颗粒无论如何不会被烧坏，这决定了高温气冷堆在任何情况下都不会有放射性泄露的可能。

图表：福岛核泄漏事故现场



图表：世界核电厂安全性改进的发展趋势



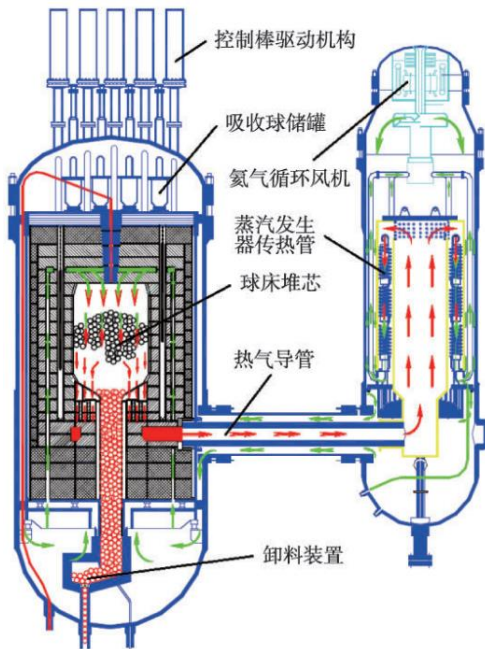
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.4 超高温/高温气冷堆（V/HTR）

2.4.4 因“不会熔毁”受到国际关注，中国项目建设领先

- **起源于美国，发展于德国，目前受到世界多方关注。**高温气冷堆最早是1943年美国的Farrington Daniels在Oak Ridge实验室所做的一个实验，不过一直到1960年才在德国由Schulten牵头开始实际的工程设计与建设。Schulten的反应堆简称AVR，1967年建成并网发电，电功率为15MW。根据堆芯燃料几何形状的不同，目前的高温气冷堆分为球床堆和棱柱堆两大类型。我国和德国的球床堆使用球形燃料元件，而美国和日本主要开发的是棱柱堆。这两种堆型核心技术完全相同。日本对其HTTR有丰富的设计、技术、管理经验，并掌握了燃气轮机和制氢技术，目前已与波兰等国进行合作，希望依托先进的高温气冷堆技术经验尽早实现商用化。俄罗斯Bochvar无机材料研究所也正在开展高温气冷堆燃料制造技术研究。
- **我国完成世界首座球床模块式实验堆，相关技术走在世界前列。**我国在20世纪70年代开始高温气冷堆的研究，研究工作的实施主体为清华大学核研院。1986年，高温气冷堆被列为国家“863计划”项目之一。在国家“863计划”支持下，HTR-10第一罐混凝土于1995年6月浇灌，2000年达到临界，2003年1月实现满功率调试运行，成为世界上第一座球床模块式高温气冷实验堆。2006年，高温气冷堆进入国家16个重大科技专项名单，高温气冷堆的商业化正式提上日程。中国华能集团、中国核工业建设集团公司和清华大学分别以47.5%、32.5%、20%的投资比例，共同投资建设20万千瓦级模块式高温气冷堆核电站示范工程，该工程于2008年10月启动，原定2009年9月开工，2013年11月投产发电，但由于受福岛核事故影响，2012年12月才正式开工建设，2021年8月20日首次装料，2022年底首次实现双堆初始满功率运行。目前该项目正在做最新的试验验证，截止2023年6月30日暂未商运。在此基础上，我国60万千瓦级模块式高温气冷堆的技术攻关工作也正在部署。

图表：HTR-10堆本体示意图



图表：HTR-10的基本参数

性能	参数
热功率	10MW
电功率	3MW
一回路氮气压力	3.0MPa
堆芯氮气出口平均温度	700℃
堆芯氮气入口平均温度	250℃
氮冷却剂流量	4.3kg·s ⁻¹
蒸汽温度	435℃
蒸汽压力	3.5MPa
给水温度	104℃
堆芯体积	5m ³
堆芯燃料球总数	2.7万个
燃料加浓度	17%
平均燃耗	80GW·d·t ⁻¹
堆芯平均功率密度	2MW·m ⁻³
单球最大的功率	1.08kW

02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.4 超高温/高温气冷堆（V/HTR）

2.4.5 产业化不断推进，主要设备国产化率高

- 国内高温气冷堆产业化项目持续推进，相关技术引领全球。伴随国内HTR-10、石岛湾高温气冷堆示范工程的成功建设，中国高温气冷堆技术已经实现全球引领。高温气冷堆在石岛湾核电站的示范成功，具备了规模化推广的基础。高品质工艺热和高参数高温蒸汽可广泛应用于石油、化工等领域。2015年4月，据中国核建介绍，商用60万千瓦高温堆江西瑞金核电项目初步可行性研究报告已通过专家评审。这是中国核建在60万千瓦高温堆商业化推广道路上迈出的重要一步，为我国第一座商用高温堆电站项目的顺利开展奠定了坚实基础。在获得国家核准，并获得国家核安全局颁发的建造许可证后，江西瑞金高温堆核电项目一期工程2台机组，开工到并网发电预计需要4-5年时间。此外在国家科技重大专项“高温气冷堆核电站”支持下，高温气冷堆制氢关键技术研究也已取得良好进展。
- 上下游500多家单位齐心协力攻关，高温气冷堆示范工程设备国产化率达到93.4%。HTR-PM的核心设备及系统可归纳为九大设备和系统：反应堆压力容器、主氦风机、蒸汽发生器、堆内金属构件、控制棒、吸收球、燃料装卸、氨净化和乏燃料储存。在石岛湾重大专项实施过程中，我国完成了一系列世界首台套的重大装备的制造，对于相关行业的技术提升起到了重要的推动作用。例如上海电气完成了反应堆压力容器、金属堆内构件、控制棒驱动机构等重要装备的研制；上海电气鼓风机厂和哈电佳木斯电机厂完成了主氦风机的研制。作为国家十六个重大科技专项之一，上下游共500余家单位参与了石岛湾高温气冷堆示范工程的研究和建设，参与的技术研发和工程建设的人员超过万人，其中仅首次使用的设备就有2200多台（套），创新型设备600余台，设备国产化率达到93.4%。

图表：国内高温气冷堆相关项目关键日期

HTR-10	
开工建设	1995.6
临界日期	2000
满功率运行	2003
石岛湾20万千瓦示范工程	
开工建设	2012.12
临界日期	2021.9
满功率运行	2022.12
瑞金60万千瓦产业化项目	
可行性研究	2015.4
开工建设(原计划)	2017
并网日期(原计划)	2021
高温气冷堆制氢项目	
关键设备样机研究	十三五
中试验证	十四五
核能制氢-氢冶金的工程示范	十五五
氢气透平循环发电、核能制氢的工程应用	2030以前

图表：高温气冷堆项目产业链部分相关企业

序号	公司名称	相关产品
1	佳电股份	直流蒸汽发生器、主氦风机
2	尚纬股份	核电QA类电缆
3	中钢新型	高温气冷堆用核石墨粉
4	海陆重工	吊篮筒体、安注箱、堆内构件吊具
5	中核北方核燃料元件有限公司	高温气冷堆核燃料元件
6	上海电气	核岛和常规岛多项核心设备
7	方大炭素	攻克高温气冷堆炭堆内构件技术
8	中核科技	高温气冷堆核级氢气隔离阀研制
9	兰石重装	高温气冷堆核电站乏燃料现场贮存和运输系统设备
10	中国核建	旗下中核二四为石岛湾施工建设方

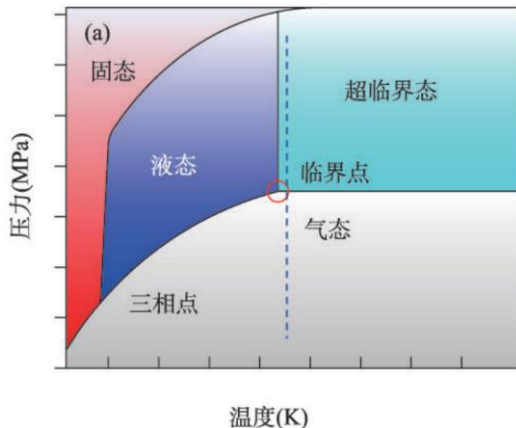
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.5 超临界水冷堆(SCWR)

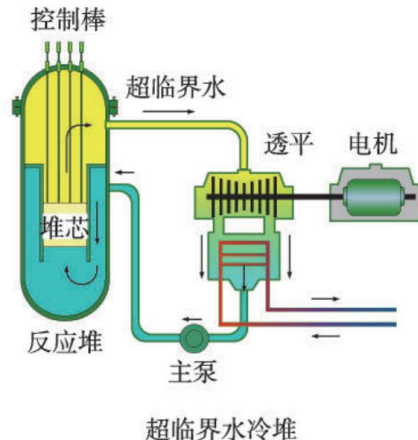
2.5.1 以超临界水为冷却剂采用直接循环，具有更高的热传导效率

- **以超临界水为冷却剂的唯一水冷堆型，具有更高的热传导效率。**在第四代核能系统候选堆型中，超临界水冷堆是唯一的水冷堆型。所谓超临界水冷堆，说的是系统以超临界水作为冷却介质。水的临界点为374°C和22.1MPa，超过这个点以后水的液态和气态的差别消失，因此超临界水冷反应堆是一个高温高压的水冷反应堆。超临界水冷反应堆的优势显而易见。由于水在超临界状态下兼具液体和气体的性质，因此具有更高的热传导效率。如果运行压力为250个大气压，冷却剂出口温度可高于500°C，因此可以提高热电转换效率，有效节省铀资源。同时，由于超临界水冷堆只存在一种相态，因此可以简化反应堆系统，从而节省建造成本，在经济上具有一定的优势。此外超临界水堆还可以继承现有轻水堆以及超临界火电技术的部分经验。
- **超临界水冷堆采用直接循环，相比压水堆取消了蒸汽发生器、稳压器、主循环泵等。**超临界水冷堆一般运行压力为25MPa左右，反应堆出口温度大于等于500°C，系统热效率在40%以上。超临界水冷堆的基本流程为：主循环泵提供驱动压头，使流体通过主给水管道进入反应堆堆芯，经过核加热后转变为高温高压“超临界蒸汽”（加热过程无相变），“超临界蒸汽”通过主蒸汽管道进入下游汽轮机做功，输出电能。经过汽轮机后的乏汽在冷凝器内进一步冷却，形成液相水，重新返回主泵入口，形成闭式直接循环。

图表：水工质相态示意图



图表：超临界水冷堆的流程示意图



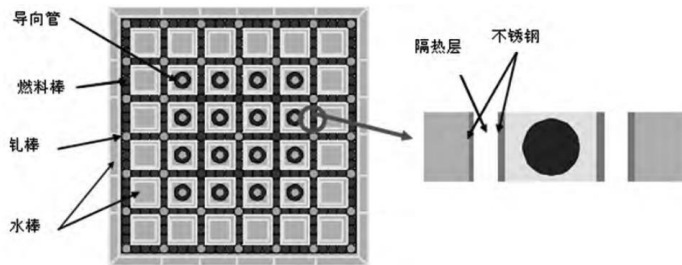
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.5 超临界水冷堆(SCWR)

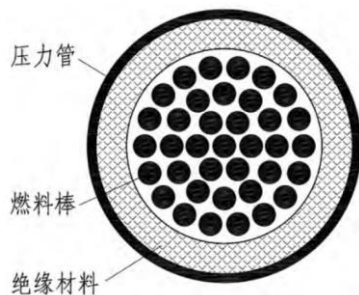
2.5.2 世界多国开展研发工作，我国CSR1000具有自主知识产权

- **相关技术起源较早，世界多国开展研发工作。**超临界水冷堆并不是一个新近提出的核能系统概念，早在20世纪50年代，美国和苏联的研究人员就提出了利用超临界水作为反应堆冷却剂的想法并进行了探索性研究，但限于当时的工业水平，没有持续开展工作。20世纪90年代，日本研究人员较为系统地开展了超临界水冷堆的设计与研究工作。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。加拿大、欧洲原子能共同体和日本已成功地完成了SCWR概念的开发，并经过国际同行审查。我国和俄罗斯也正在继续从事其开发工作，但我国正在开发的是热中子谱堆芯概念，而俄罗斯开发的是快中子谱堆芯概念。
- **国内2003年开始相关研究，CSR1000具有自主知识产权。**我国从2003年就开始了超临界水冷堆技术跟踪研究。2003年10月中国核动力研究设计院批准了“超临界轻水堆研究”科研基金项目。国内多家高校和研究机构参与研究，提出了具有自主知识产权的中国超临界水冷堆CSR1000总体设计方案，并在设计研究、实验及相关技术研究和材料研究方面取得了丰富的研究成果。2014年5月，中国正式签署了加入第四代核能系统国际论坛超临界水冷堆系统安排协议。2015年3月，在芬兰召开的超临界水冷堆系统指导委员会(SCWR-SSC)会议上，中国代表被推选为新一届系统指导委员会主席。2017年7月，我国完成了GIF-SCWR两个项目管理委员会(PMB)的加入工作。自加入GIF-SCWR以后，我们先后举办了第11届IAEA信息交流会(IEM)，第8届超临界水堆会议(ISSCWR-8)等。

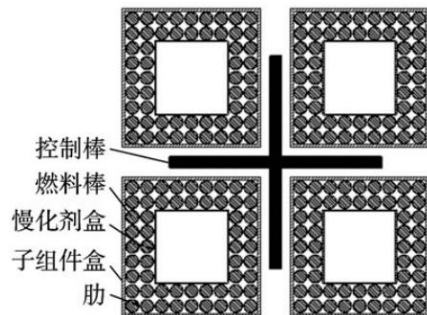
图表：日本SCLWR-H燃料组件截面图



图表：加拿大Brady等提出的燃料组件设计概念



图表：中国CSR1000燃料组件截面图



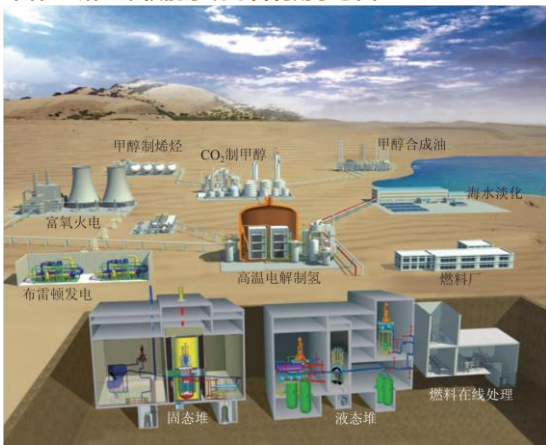
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.6 熔盐反应堆(MSR)

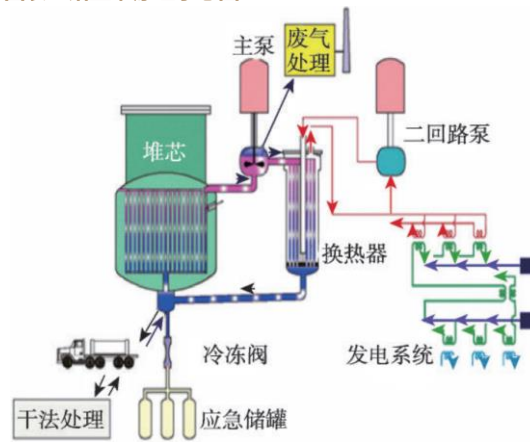
2.6.1 出口温度高有利于核能综合利用，系统有较好的传热性和非常低的蒸汽压力

- **以熔盐作为冷却剂，出口温度高有利于核能综合利用。**熔盐堆是以熔盐作为冷却剂的反应堆，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℃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。
- **石墨兼作慢化剂，系统有较好的传热性和非常低的蒸汽压力。**熔盐堆主要包括堆本体、回路系统、换热器、燃料盐干法处理系统、发电系统及其他辅助设备等。熔盐堆燃料是以氟化铍和氟化锂及溶解在其中的钍或铀的氟化物组成的液态融合物，具有很好的传热特性和非常低的蒸汽压力，可以降低对压力容器和管道压力。堆本体主要由堆芯活性区、反射层、熔盐腔室/熔盐通道、熔盐导流层、哈氏合金包壳等组成，上百根均匀排列、无包壳并带有通道的石墨元件组成燃料盐通道并兼作慢化剂，含有裂变材料和可转换材料的燃料熔盐通过堆芯石墨通道时发生裂变放出热量，经过加热的700℃以上高温燃料熔盐流出堆芯出口，通过热交换器将热量转换到二次回路中的冷却盐中，二次回路再通过另一个热交换器将热量传给第三个氦气回路推动氦气轮机作功发电。

图表：熔盐堆核能系统综合利用示意图



图表：熔盐堆原理示意图



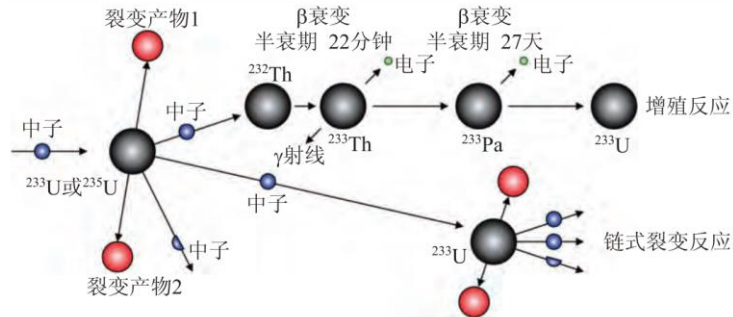
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.6 熔盐反应堆(MSR)

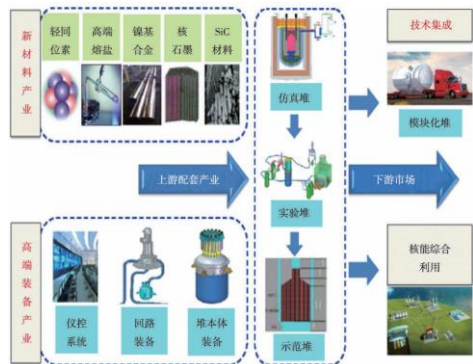
2.6.2 熔盐堆能与钍基核燃料很好结合，钍基核燃料具备储量大等优势

- **熔盐堆研发美国，能和钍基核燃料很好结合。**熔盐堆研发始于20世纪40年代末的美国，主要目的是美国空军为轰炸机寻求航空核动力(轻水堆则是美国海军为潜艇研发的核动力装置)，此后由于战略导弹的异军突起，使核动力轰炸机变为鸡肋，熔盐堆也失去了军方的支持。研究表明熔盐堆具有非常独特而优异的民用动力堆性能，可以用铀基核燃料，更适合于钍基核燃料。熔盐堆的独特优势引起了世界多国关注，中国及前苏联均曾在上世纪70年代开展过相关研究，1971年，上海“728工程”建成了零功率冷态熔盐堆并达到临界，但限于当时的科技、工业和经济水平，后转为建设轻水反应堆，自此在世界范围内熔盐堆研究的国家行为几乎停止。直到20世纪末和21世纪初，能源危机与环境挑战为钍基熔盐堆发展提供了新的机遇，2001年被第四代核反应堆国际论坛(GIF)选为六个候选堆型之一，钍基熔盐堆研发自此在世界范围内呈现急剧上升趋势。
- **钍基核燃料具备储量大、不易制备核武器等优势，是更理想的民用核燃料。**人类迄今发现的有商业价值的易裂变核素有：铀-235、钚-239和铀-233。其中，铀-235是自然界唯一天然存在的易裂变核素，钚-239需较难裂变的铀-238吸收中子后转换而来，而铀-233则需较难裂变的钍-232吸收中子后转换而来，所以铀-238和钍-232也称可转换核素。天然钍中只含有钍-232，要在吸收中子转换为易裂变的铀-233后才好利用，即钍铀燃料循环(钍基核燃料)。我国钍资源储量丰富，初步估算如能实现钍基核燃料的完全循环利用，可供使用几千年以上，将确保我国能源的自给自足。地球上钍资源总储量是铀资源的3~4倍，钍基核燃料的有效利用对于人类发展也有着巨大的价值。此外，钍基核燃料还具有不易用于制造核武器等特点，是更理想的民用核燃料。

图表：钍-232的增殖反应和铀-233的链式裂变反应



图表：产学研深度融合打造钍基熔盐堆研发全产业链



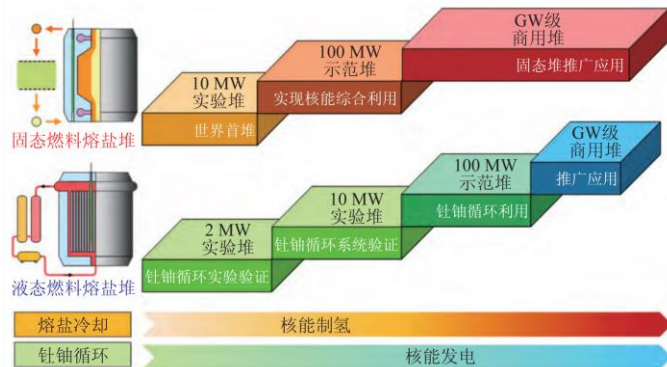
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.6 熔盐反应堆(MSR)

2.6.3 多国展开熔盐堆研究，我国液态燃料钍基熔盐实验堆即将投运

- **熔盐堆发展为液、固两种堆型，多国进行研究。**经过几十年发展，熔盐堆已扩展为两类堆型：液态燃料熔盐堆(MSR-LF)和固态燃料熔盐堆(MSR-SF，也称为氟盐冷却高温堆-FHR)。液态燃料熔盐堆因其可在线添料并进行后处理，是国际公认的钍基核能的理想堆型，可实现钍燃料的闭式循环；固态燃料熔盐堆中通过不停堆连续更换燃料球，也可在开环模式下提高核燃料使用率，实现钍燃料的部分利用。欧美各国积极推进国际合作并组建合作机构，开展熔盐堆概念设计和评估；欧盟自2001年起先后启动多个研究项目，由欧洲原子能共同体和其中六个国家参与，开展液态燃料熔盐堆的评估与可行性研究，提出熔盐快堆系统的优化设计；亚洲各国受能源需求的拉动，对两种熔盐堆的发展均表现出很高的积极性，印度与日本正在积极推动液态燃料钍基熔盐堆的研究工作，韩国已经启动了固态熔盐堆研究计划。
- **我国2011年启动TMSR科技专项，2023年6月项目获得运行许可。**2011年，中科院部署启动了首批战略性先导科技专项（A类）“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统（TMSR）”，计划用20年左右在国际上首先实现钍基熔盐堆的应用，同时建立钍基熔盐堆产业链和相应的科技队伍。2017年4月，甘肃省武威市与中科院签订了在该市民勤县建设钍基熔盐堆核能系统项目的战略合作框架协议，该项目分两期建设，总投资220亿元。2018年9月，该项目开工建设，2021年，主体工程完工。今年6月国家核安全局发布关于颁发2MW钍基熔盐实验堆运行许可证的通知，甘肃钍基熔盐实验堆获运行许可，标志着继高温气冷堆后，我国又一四代核能堆即将投运。

图表：钍基熔盐堆核能系统技术路线和阶段目标



图表：钍基熔盐堆核能系统发展路线图



02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.7 钠冷快堆(SFR)

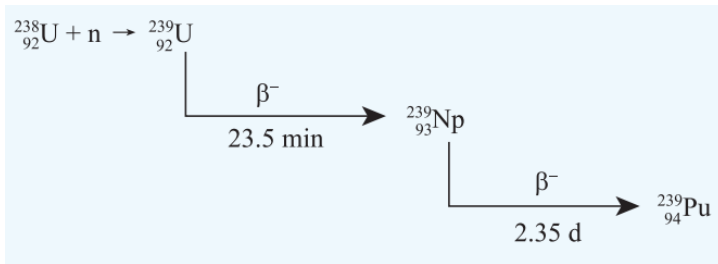
2.7.1 快堆可实现铀资源高效利用，钠冷快堆发展最快

- **快堆可实现铀资源高效利用，与压水堆配合裂变核能几乎无限。**快中子堆(简称快堆)是主要以平均中子能量0.08~0.1MeV的快中子引起裂变链式反应的反应堆。快中子堆的主要特点是，在堆运行时，新产生的易裂变核燃料(如钚)多于消耗掉的易裂变核燃料钚，即增殖比大于1，易裂变核燃料得到增殖，因此又称为快中子增殖反应堆。运行中真正消耗的是天然铀中不易裂变且丰度占99.2%以上的铀-238。快堆的乏燃料经后处理，钚返回堆内再烧，多余的钚则用于装载新的快堆。大规模用热堆迟早会遇到铀资源短缺的问题，所以我国核能的基本战略是“热堆—快堆—聚变堆”三步发展，压水堆生产的工业钚与快堆自己增殖的钚供给新建快堆初装料，一座1GWe的快堆在60年寿期中只需消耗70~80吨贫铀即可。出于发展快堆对铀资源利用率的提高，使更贫的铀矿也值得开采，则世界可用铀资源将扩大千倍，所以压水堆——快堆和燃料循环匹配起来，裂变核能几乎可以认为是无限的，可以实现核能的大规模可持续发展。
- **钠冷快堆发展最快，具备燃料增殖与废料嬗变两大优势。**为了在堆芯内维持快中子，除气体外不宜用含轻核的冷却剂，可选用钠、氦和铅等，钠冷快堆是第四代快堆堆型中发展最快，也最接近商业化的快堆，其主要有两大优势：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。

图表：小型钠冷快堆核电源非核集成测试装置



图表： ^{238}U — ^{239}Pu 转换示意图



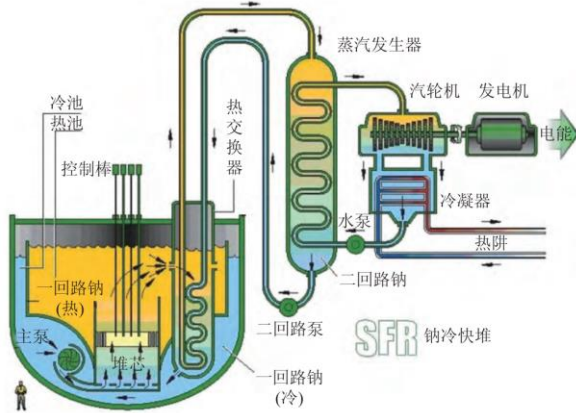
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.7 钠冷快堆(SFR)

2.7.2 钠冷快堆以钠作为冷却剂，核燃料30多年可增殖一倍

- **钠冷快堆以钠作为冷却剂，池式钠冷快堆因安全性逐渐成为主流。**钠冷快堆就是以熔融钠或低共熔钠钾合金作为冷却剂，由快中子触发核裂变而维持链式反应的反应堆。根据堆型布置的不同，钠冷快堆可以分为回路式钠冷快堆和池式钠冷快堆。回路式结构就是用管路把各个独立的设备连接成回路系统，这样设备维修起来比较方便，但由于系统复杂，容易发生故障。池式结构采用的是一体化方案，即把堆芯与一回路的钠循环泵、中间热交换器等浸泡在一个液态钠池内。池式结构维修不便，但安全性好。近年来，出于安全方面的考虑，池式钠冷快堆逐渐成为发展的主流。
- **钠具备高导热系数和低中子吸收率，核燃料30多年可增殖一倍。**钠的主要优点为高导热系数和低中子吸收率。高导热系数有利于高速率传热，低中子吸收率有利于核反应进行。如钠的导热能力是水的130倍，用其作为冷却剂在很大程度上能防止堆芯的熔化。同时，钠是地球上比较丰富的元素之一，在价格方面具有一定的优势。钠的熔点为98℃，沸点为883℃，能够在接近大气压力下运行。钠和钠钾共晶合金不会严重腐蚀钢材，并且与许多核燃料兼容。钠冷快堆增殖速度约30年翻一倍，30多年后核燃料钚-239就可以翻一番，此时当初的钚-239可以满足两座同规模钠冷快堆的需要，再经过30多年，钚-239可以满足四座钠冷快堆的需要。

图表：钠冷快堆原理示意图



图表：中国快中子零功率装置



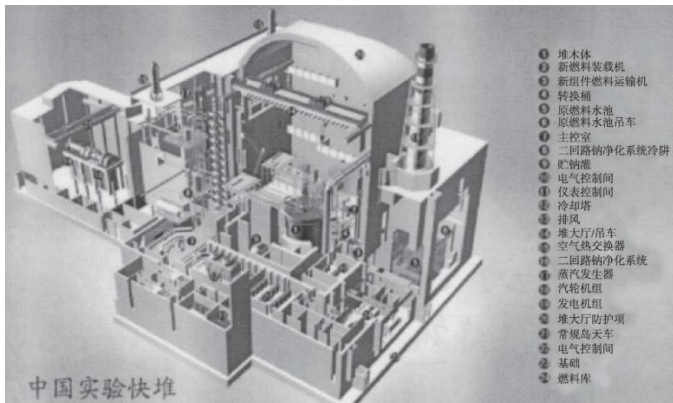
02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.7 钠冷快堆(SFR)

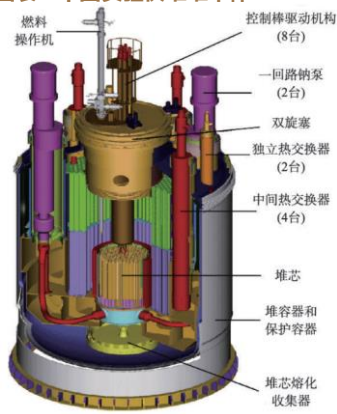
2.7.3 钠冷快堆被称为首选堆型，我国正在进行600MW示范堆建设

- **钠冷快堆被称为首选堆型，工程技术最为成熟。**在GIF的6种四代堆型中，只有钠冷快堆在工程技术上最为成熟，因而被称为首选堆型。俄罗斯有长期运营钠冷快堆的经验，其1980年并网商运的BN-600型反应堆已运行37年，2016年BN-600的负荷因子超过了87.45%。80万千瓦的BN-800型反应堆于2016年10月31日正式投入商业运行，是全球在运的最大的钠冷反应堆，计划2030年还建设一座功率为120万千瓦的更大型钠冷反应堆，其设计工作已经完成；美国已在20世纪40年代建成全球首座实验快堆，共建成了22座快堆，其中钠冷快堆19座，包括实验快堆，原型快堆，经济验证性(或称示范)快堆，功率从0.25MWt直到1200MWe，积累了约350堆年的运行经验，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。
- **我国已完成钠冷快堆实验项目，正在进行600MW示范堆建设。**中国是世界上第8个拥有钠冷快堆技术的国家，中国钠冷快堆技术研发起步于20世纪60年代。1987年，中国实验快堆（CEFR）项目被纳入国家“863”计划。该项目由中核集团组织，中国原子能科学研究院具体实施。2000年5月，CEFR(钠冷)开工建设，于2011年7月成功并网发电，通过项目实施，我国建立了一套快堆标准规范体系，积累了钠阀、钠容器、高温钠换热器、钠仪表和探测蒸汽发生器钠水反应的氢计的制造经验，掌握了数字化安全监测系统可靠性验证的经验，设备国产化率达到70%。按照钠冷快堆实验堆—示范堆—商用堆“三步走”发展计划，2017年在福建霞浦开建的中国CFR-600示范快堆A型(CDFR)，采用单机容量60万千瓦的钠冷快堆，计划于2023年完工；2020年末福建霞浦示范快堆2号机组（CFR-600）开工建设。

图表：中国实验快堆效果图



图表：中国实验快堆堆本体

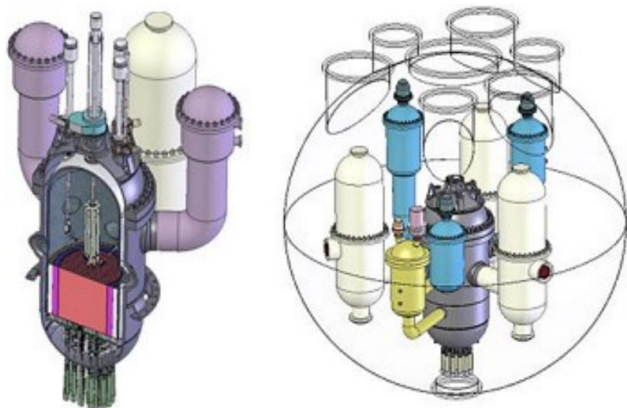


02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

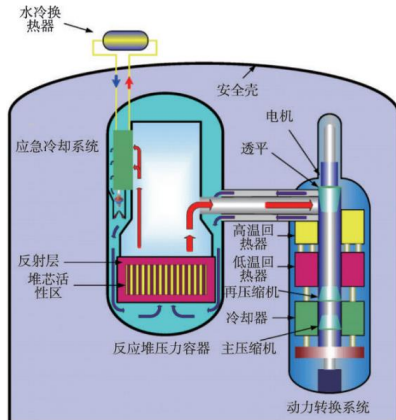
2.8 气冷快堆(GFR)：具有高温系统的技术优势，技术成熟度低

- **气冷快堆以气体为冷却剂，具有高温系统的技术优势。**气冷快堆，英文名称为Gas Cooled Fast Reactor，简称为GFR，是一种高温气体冷却快谱反应堆，采用气体作为堆芯冷却剂。由于气体工质密度一般相对较低，对中子的慢化能力较弱，在不显著添加其他慢化剂的情况下，中子能谱为快谱。气体工质的慢化能力一般也弱于金属冷却剂，因此气冷快堆的中子能量要高于金属快堆，也就是说气冷快堆的中子能谱更“硬”。气冷快堆作为一种高温气体反应堆，具有高温系统的技术优势，可提高循环热效率，并为工业应用提供高温工艺热。因此气冷快堆可借鉴快堆(如钠冷快堆SFR)的燃料回收工艺和高温气冷堆(VHTR)的堆芯技术，如反应堆结构、材料等。
- **技术成熟度较低，没有国家建造过真正的气冷快堆。**早期GFR的研究由于其安全性的致命缺陷以及技术开发难度等问题，在世界核能事业萎缩的大背景下随之被搁置，只有很少数的国家与研究机构坚持GFR研究。进入新世纪以来，随着核能回暖，GFR又因其高增殖比及高热效率等特点，重新成为业界的研究热点，其中用氦冷却的GFR被提议为钠冷快堆更长期的替代方案。然而由于气冷快堆的自身特点，其研发难度更大，技术成熟度更低。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。

图表：GIF气冷快堆参考设计示意图



图表：二氧化碳气冷快堆参考设计示意图



02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

2.9 铅冷快堆(LFR)

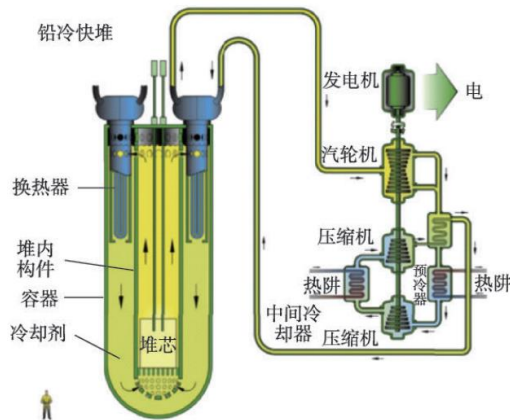
2.9.1 LFR结构较为简单，有望成为首个实现工业示范的第四代核能系统

- **铅冷快堆采用铅基材料作为冷却剂，有望成为首个实现工业示范的第四代核能系统。**铅基反应堆(LFR)是采用铅基材料(铅或铅合金)作为一回路系统冷却剂的反应堆，在高温和接近大气压的条件下运行。作为第四代核能系统中的六种堆型之一，铅基堆是一种能够实现多种应用且可持续发展的先进核能系统。根据2014年1月第四代核能系统国际论坛(GIF)发布的“第四代核能系统技术路线更新图”显示，铅基堆有望成为首个实现工业示范的第四代核能系统。铅是人类最早发现的金属之一。由于其具有抗腐蚀性被应用于许多场合。熔融铅和铅铋共晶合金具有的基本热力学和中子学特性，用作冷却剂具有一定的优势。如铅在常压下的沸点(1749°C)很高，铅铋共晶合金(铅44.5%，铋55.5%)的沸点为1670°C，具有较强的热传导能力。由于铅的密度较高，铅和铋也是出色的伽马辐射屏蔽材料，同时对中子几乎是透明的，中子吸收和慢化截面很小。
- **LFR包括两个回路，结构较为简单。**典型的铅基堆系统构成包括一回路和二回路两个热力循环系统：1) 铅基堆一回路系统一般采用池式布局，将一回路中的驱动泵、换热器等热工设备及堆芯置于堆容器内，容器内的液态铅基冷却剂通过热工设备的驱动与流动传热，将堆芯产生的热量传递至二回路，整个一回路系统的工作压力为常压；2) 铅基堆二回路系统一般采用水作为工质，二回路冷却工质在换热器内吸收一回路释放的热量后，通过汽轮机和发电机将热能转换为电能。

图表：中国实验快堆堆本体

图表：铅基材料与其他堆用冷却剂热物性对比

冷却剂	铅 (723 K, 0.1 MPa)	铅铋合金 (723 K, 0.1 MPa)	铅铋合金 (673 K, 0.1 MPa)	钠 (723 K, 0.1 MPa)	水 (573 K, 15.5 MPa)	氦气 (1023 K, 3 MPa)
密度(g/cm ³)	10.52	10.15	9.72	0.844	0.727	0.0014069
熔点(K)	601	398	508	371	—	—
沸点(K)	2023	1943	1992	1156	618	—
比热容(kJ/(kg K))	0.147	0.146	0.189	1.3	5.4579(Cp)	5.1917(Cp)
体积比热容(kJ/(m ³ K))	1546	1481	1837	1097	3965	7.304
热导率(W/(m K))	17.1	14.2	15.14	71.2	0.5625	0.368



02 四代核电渐行渐近，国内相关技术走在世界前列

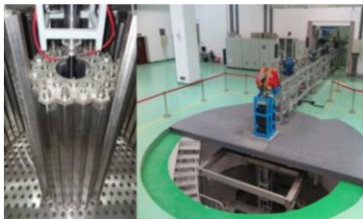
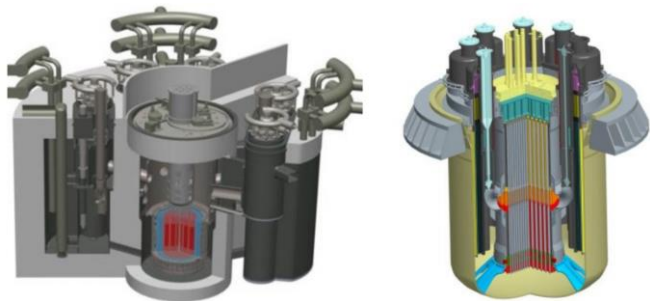
2.9 铅冷快堆(LFR)

2.9.2 铅基堆走在第四代核能前列，我国已建成国际领先的实验装置群

- **铅基堆走在第四代核能前列，主要核大国均制定了发展计划。**美国已于21世纪初重启铅冷快堆研发计划，美国的爱达荷国家工程和环境实验室和麻省理工学院联合研究嬗变处理核废料；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研究小型模块化设计；美国阿贡国家实验室主要研究小型自然循环铅冷快堆，并处于国际领先地位；美国西屋公司主要验证示范快堆技术的可行性。俄罗斯最早将铅基堆应用于核动力潜艇，已积累近百堆年的运行经验。前苏联设计研发了铅铋反应堆作为驱动动力，并成功建造了7艘“阿尔法”级核潜艇，创造了潜艇航速世界记录，进入21世纪，俄罗斯主要实施“突破”计划（Proryv Project），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。欧盟是铅基堆发展最为活跃的地区之一，在欧盟第五、六、七科技框架计划的长期支持下，形成了完整的发展路线和计划，参与铅基堆研究计划的欧盟研究机构超过20家。
- **国内铅基堆研究历史超30年，已建成国际领先的实验装置群。**我国铅基堆研究始于20世纪80年代中后期，主要由中科院核能安全技术研究所-FDS凤麟团队在IAEA及ITER国际合作计划、国家“863”/“973”计划、国家磁约束聚变专项和中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”等重大项目的持续支持下，开展铅基堆基础研究和关键技术攻关。我国已建成规模最大、功能与性能参数国际领先的实验装置群，包括铅基堆零功率物理实验装置CLEAR-0、铅基堆工程技术集成实验装置CLEAR-S、铅基数字仿真反应堆CLEAR-V三座“实验反应堆”工程验证平台。

图表：国际典型铅基堆BREST-OD-300（左）与ALFRED

图表：中国铅基中子物理实验堆、工程验证实验堆、数字仿真反应堆



03

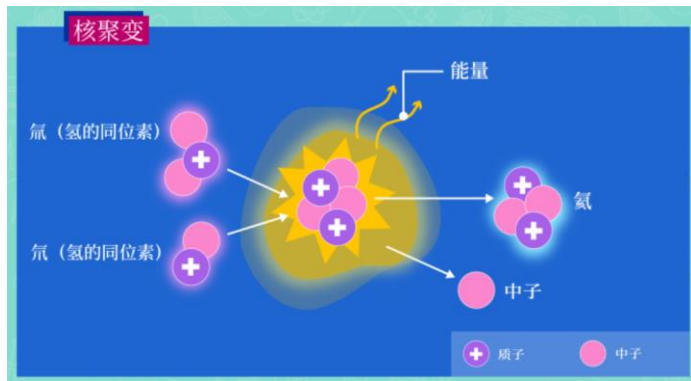
人类终极能源，可控核聚变稳步前行

03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.1 核聚变能释放巨大能量，作为能源需以可控为前提

- **两个轻原子结成为较重原子发生质量亏损，释放巨大能量。**核能的释放主要分为核聚变和核裂变，核聚变是两个轻原子核结合形成一个较重原子核，同时释放大量能量的过程。原子核中蕴藏巨大的能量，在一定条件下，一个氘核(由一个质子一个中子组成)和一个氚核(由一个质子和二个中子组成)会发生聚变核反应，生成一个氦核(二个质子和二个中子组成)，并放出一个中子。精密的测量表明，氦核加上一个中子的质量之和小于一个氘核与氚核反应前的质量之和(发生质量亏损)，根据著名的质能公式 $E=mc^2$ ，反应过程中出现的质量亏损转化为巨大的能量释放出来。
- **氢弹爆炸为不可控核聚变，作为能源的聚变需以可控为前提。**早在五十年代初地球上就实现了聚变核反应，这就是氢弹的爆炸。它是依靠原子弹爆炸时形成的高温高压，使得氢弹里面的热核燃料氘氚发生聚变反应，释放巨大能量，形成强大无比的破坏力。可惜这种瞬间的猛烈爆炸无法控制。要把聚变时放出的巨大能量作为社会生产和人类生活的能源，必须对剧烈的聚变核反应加以控制，因而称为受控核聚变。
- **冷核聚变难以复现，主流研究以热核聚变为主。**冷核聚变是指在相对低温(甚至常温)下进行的核聚变反应，上世纪80年代美国两位化学家宣称在电化学实验中观察到室温条件下两次氘原子的核聚变，按照目前的核聚变原理，核聚变只能在极端的高压和高温条件下才能产生，这对反应堆的设计和结构材料的选择都是巨大的挑战。如果能实现室温条件下的核聚变，无疑将是人类科学史上的重大突破。然而，在全球众多科学家复现无果后，人们逐渐产生了质疑。尽管30多年来，不断有人继续探索“冷核聚变”的可能性，但主流科学界对冷核聚变持否定态度。

图表：核聚变原理示意图



图表：氢弹爆炸——不可控的核聚变



03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.2 核聚变具备多项优势，有望成为人类“终极”能源

- **核裂变成熟度高，但并非人类最理想的能源。**人类现在已经开发出各种新能源，如太阳能、风能、水能、潮汐能、地热能等。这些新能源各有特点，都有实用价值。但是从根本上来说他们只能作为一种辅助能源，要让这几种能源作为整个社会生产和人类生活所需的基本动力来源目前是不可能的。上世纪五十年代开始登上世界能源舞台的核电站显示了巨大的威力，但这种核电站是以原子核的裂变反应为基础的，产生的放射性废物处理比较困难，而且主要核燃料铀的储量相对其它元素来说并不丰富，开采和提炼又十分困难，同时因为发展史上一些大事故，让人们们对核电站心有余悸，甚至很多国家做出决策不再发展裂变核电站，因此原子核的裂变能并不是人类最理想的能源。
- **与其他能源相比，核聚变具有以下优势：**
 - 1) 原料资源丰富。**其主要燃料氘跟氧结合成重水存在于海水之中，每公斤海水含氘0.03克。地球上有海水 10^{21} 千克，含氘 3×10^{16} 千克，目前全世界能源消耗水平每年 2×10^{20} 焦耳，只需燃烧 10^6 千克氘就够了。地球上的氘够用 3×10^{10} 年之久，即使考虑到能源消耗水平逐年增加，也足以用上 10^{10} 年，也就是几百亿年；
 - 2) 释放能量大。**每单位质量的聚变燃料释放出的能量非常大，是裂变的四倍，“燃烧”一千克氘相当于四千克铀，相当于七千吨汽油或一万吨煤。即“燃烧”1千克海水=燃烧210千克(300升)汽油所获得的能量。
 - 3) 放射危害小。**氘、氚等聚变反应中产生的氦，是没有放射性的。如果不在聚变堆加入铀、钍等裂变材料，那么聚变堆产生的放射性废物，主要是泄漏的氘，以及聚变时释放的中子、质子。聚变堆产生的放射性，比裂变堆少得多；
 - 4) 安全性高。**聚变是自限过程——如果人们无法控制反应，它会自行停止。由于聚变反应只能在极端条件下发生，基于链式反应的裂变型事故或核熔毁不可能发生。

图表：钚239、铀235两种裂变材料的裂变反应与氘氚聚变反应中释放的反应能

材料	单位质量/ (T/g)	密度/ (g/cm ³)	单位体积/ (T/cm ³)
²³⁹ ₉₄ Pu	17.3	19.8	343
²³⁵ ₉₂ U	17.6	18.8	331
氘氚冰	81	0.255	21

图表：不需要外加任何能源就能长期自己发光的氚灯



03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

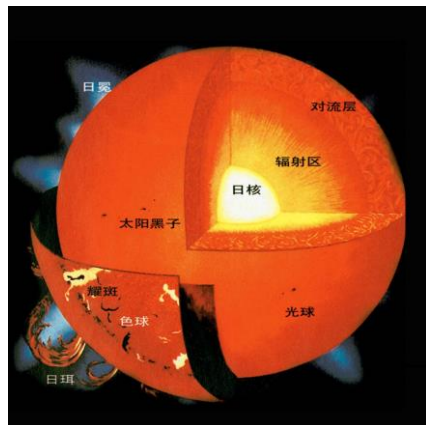
3.3 超高温是核聚变必需的外部条件，帮助原子核克服静电斥力

- **核聚变实现需要先提供能量，帮助原子核克服静电斥力。**受控聚变的研究之所以如此艰难，根本的原因是由于所有原子核都带正电，2个带正电的原子核互相接近时，它们之间的静电斥力也越来越大。而核力是一种短程力，必须使它们靠得足够近，达到 10^{-15} 米以内，核力才能将它们“粘合”成整体形成新的原子核。铀-235、钚-239等的裂变，不需要入射中子及靶原子核具有任何动能；而为了使2个原子核聚变，首先必须使两个原子核的一方或双方有足够的能量，去克服彼此之间的静电斥力。太阳时刻都在发生着核聚变反应，其中心温度有1500万度，表面温度最高到6000度，但是由于压力巨大，聚变反应可以自然地发生，但是在地球上实现持续核聚变所需的条件要比在太阳上苛刻的多。
- **超高温是核聚变必需的外部条件，用于帮助原子核获得能量。**获得聚变能源最方便的途径，是将大量的聚变材料在极短的时间内，加热到极高的温度。温度越高，氦核运动的速度也越快。当温度达到 $1 \sim 2$ 亿 $^{\circ}\text{C}$ 时，氦核运动的速度也就达到每秒1000~2000千米。中国科学院等离子体物理研究所网文章显示，根据实验资料估计，使两氦核相遇，它们的相对速度必须大于每秒1000千米，也即温度必须高达1亿度，因此超高温是发生核聚变所必需的外部条件。采用常规的方法，要想加热到如此高的温度是非常困难的。1945年原子弹研制成功以后，人们也就找到了在极短时间内加热到几亿度高温的方法。1952年，美国用原子弹爆炸产生的高温，第一次实现了大量氘、氚材料的聚变，但是人类需要的是可控的核聚变，采用这种方式会使得聚变反应难以控制。

图表：促成聚变的核力是四种基本力之一



图表：太阳发光发热源自内部时刻进行的核聚变

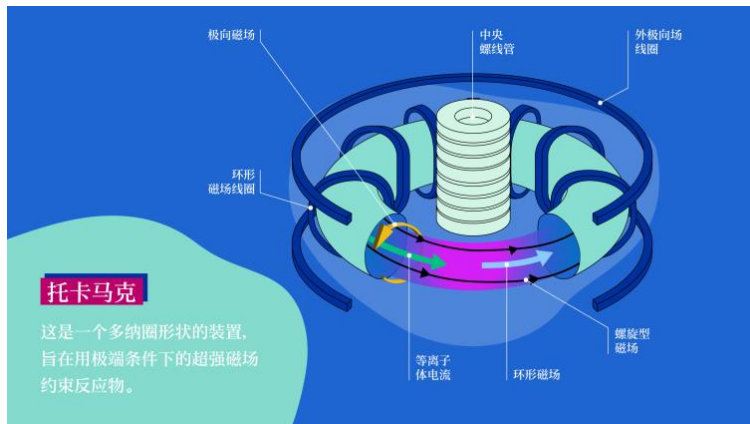


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

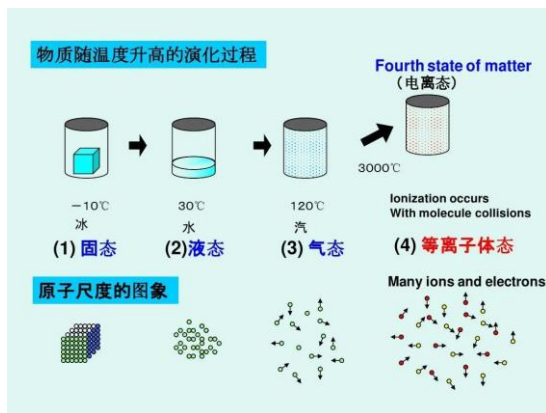
3.4 超高温产生的等离子体具有强导电性，可以利用磁场进行约束

- **超高温下实物容器难以存在，科学家采用磁场进行聚变燃料的约束。**氦核与氦核间发生聚变反应时，温度达到1亿度以上，在这种条件下，任何固态物质都会在极短的时间内汽化，关键问题就是如何找一个这样的“容器”，能装下几亿度的超高温聚变燃料，然后让它们在其中缓慢地发生核聚变。既然用实物制成的容器不行，科学家就采用由封闭磁场组成的“容器”来进行约束。从1946年开始，不同的磁约束概念曾相继提出，20世纪50年代初，苏联科学家提出了“托卡马克”的概念，它的名字Tokamak由俄语“环形、真空室、磁、线圈”的词头组成，苏联于1954年建成了第一个托卡马克装置。托卡马克的发明是聚变研究领域的一大进步，为当时的研究指明了方向。
- **超高温产生等离子体，其强导电性为磁约束创造可能。**任何物质，在较低温度下是固体，温度升高就变成液体和气体，当温度进一步升高时，气体中的原子、分子将出现电离状态，形成电子、离子组成的体系。这种体系是区别于固体、液体和气体的另一种物质存在状态，故又称为物质的第四态。1928年美国科学家Langmuir第一次将物质的这种存在状态命名为等离子体态（Plasma）。在核聚变发生所需要的高温下，物质已全部电离，形成高温等离子体。而由于存在很多自由电子和各种荷电离子，等离子体具有强导电性，于是科学家就想到了磁场，因为带电粒子在磁场中会绕磁力线做回旋运动，通过在容器内建立磁场来约束等离子体，使其不与容器壁接触，可以使核燃料持续燃烧一段时间。

图表：托卡马克装置结构图



图表：高温下物质将转变为等离子形态

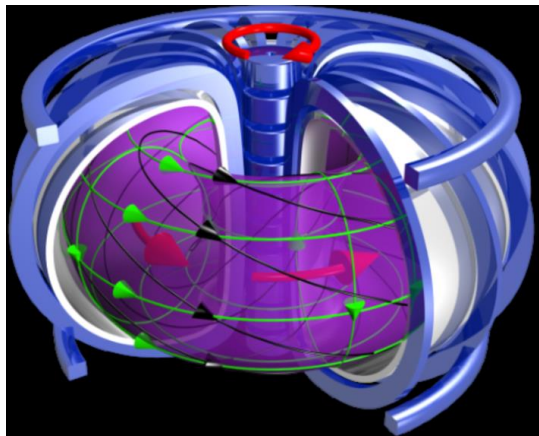


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

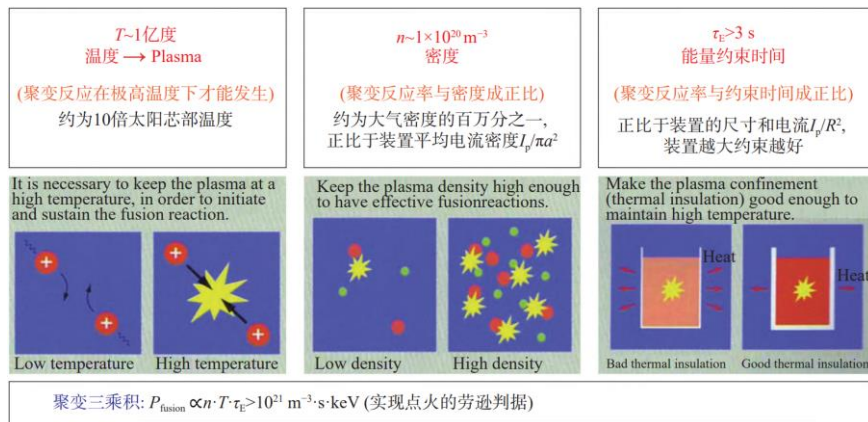
3.5 “聚变点火”是第一步，工程应用还需获得净聚变能

- 通过变压器生产电场驱动电流，电流产生磁场将等离子体约束。由变压器引起的电场驱动电流(红色大箭头)通过等离子体柱，产生一个极向磁场，将等离子体电流弯曲成一个圆形(绿色垂直圆圈)。将等离子体柱弯曲成一个圆圈可以防止泄漏，并且在一个环形容器内这样做会形成一个真空。另一个围绕圆圈长度的磁场被称为环形磁场(绿色水平圆圈)。这两个场结合形成一个类似螺旋结构(黑色所示)的三维曲线，等离子体在其中受到高度约束。
- 高温及约束是可控核聚变的前置条件，实现工程应用还需获得净聚变能。利用聚变反应放出的能量来维持极高温度，毋需再从外界施入能量，反应能自持地进行下去，此时“烧”聚变原料“炉子”已经点着了。表征这个概念的学术术语叫“聚变点火”。对于一定的温度，在一定的时间内，原子核之间互相碰撞的次数，与等离子体中原子核的密度成正比；而在一定密度的情况下，原子核之间互相碰撞的次数，与等离子体中保持这种密度的时间(约束时间)成正比。因此聚变反应中能量的释放，与等离子体的温度、原子核密度、约束时间三者的乘积(聚变三乘积)有关。英国科学家劳逊在二十世纪五十年代详细研究了聚变点火必须的条件，因此点火条件也称劳逊判据，根据劳逊判据，只有聚变三乘积大于一定值，才能产生有效的聚变功率输出。实现“点火”仅是受控核聚变研究的第一步，第二个目标是使输出的能量超过输入的能量，获得净聚变能。科学家们将第一个目标称为验证科学可行性，第二个目标称为验证工程技术可行性。

图表：托卡马克工作原理



图表：获得核聚变反应的三要素

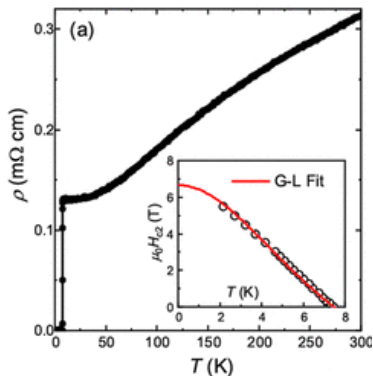


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.6 超导是磁约束核聚变建立和发展的基础，高温超导有望取代低温

- **超导是磁约束核聚变装置建立和发展的基础，其性能至关重要。**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。托卡马克中磁体系统是产生并控制磁场的重要部分，运行所需的磁场场强极大，磁体线圈中需通入大电流，常规金属导体自身电阻损耗严重，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，二十世纪后期，科学家们开始把超导技术用于托卡马克装置。
- **低温超导为聚变应用主流，高温超导有望凭借自身优势反超。**目前，托卡马克超导磁体多用低温超导体(LTS)NbTi和Nb3Sn制作超导线圈。经过多年的发展，低温超导托卡马克磁体的制造技术已日趋成熟，已建立了比较完善的基础实验数据库。ITER计划是人类为解决能源问题而开展的重大国际合作计划，其目的是建造一个可自持燃烧的超导核聚变实验堆。目前，ITER装置、强磁场、加速器等大科学装置所采用的超导电缆都使用NbTi和Nb3Sn低温超导材料。然而，随着超导材料和技术的发展，高温超导(HTS)材料特别是第二代HTS带材性能的提高，HTS较高的运行温度和较强的磁场等特性为低温制冷系统的技术难度、能耗效率等提供了更为广阔的发展空间，其在大型托卡马克磁体设计和制造方面的优势将越来越显著。今年7月中核五公司发布文章称其与中国第一家聚焦聚变能开发的商业公司正式签订了全高温超导核聚变装置总装合同，将承建全球首个全高温超导核聚变实验装置。

图表：典型的超导转变处电阻突变



图表：EAST超导纵场线圈

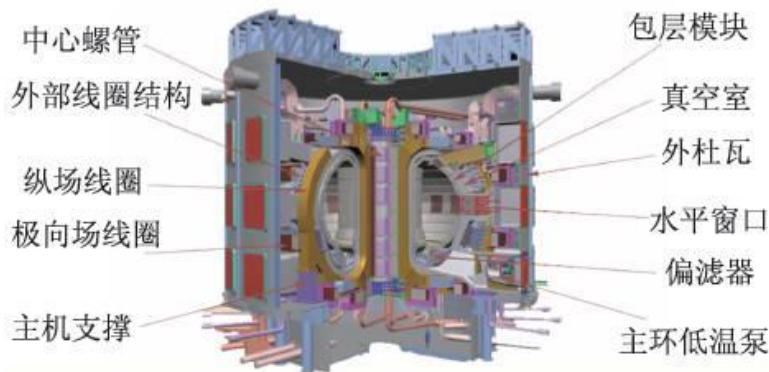


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.7 多国合作推进ITER计划，我国发挥重要作用

- **主要发达国家聚焦托卡马克研究，推动聚变事业不断前行。**苏联于1979年建造的T-7托卡马克装置是世界上第一个超导托卡马克装置，其纵场磁体系统由48个超导线圈组成，这是中国首个超导托卡马克HT-7前身；1982年美国建成并投运TFTR大型托卡马克装置，物理目标是探索并理解聚变堆气氛(D-T)等离子体芯部等离子体行为特性，在D-T运行的三年期间，D-T等离子体相关研究获得了重大的发展；上世纪80年代欧盟建造了用于研究D-T燃料聚变物理的大型实验装置欧洲联合环(JET)，后成为整个欧洲聚变规划的一艘旗舰，D形环向场线圈和真空容器以及大体积强电流等离子体是JET装置独特之处，在对托卡马克边缘等离子体和偏滤器物理的理解方面取得了很大进展；日本JT-60是以实现临界等离子体条件(能量增益因子超过1)为目的的大型托卡马克实验装置，与TFTR，JET列为世界三大托卡马克，该装置1985年运行，后改造成JT-60U，该装置后来在能量增益因子、等离子体温度以及核聚变三乘积等方面均获得了国际最高数值。
- **ITER计划意义重大，我国承担重要任务。**随着国际上众多大中型托卡马克的巨大进展，1985年前苏联和美国在日内瓦峰会上倡议由美、苏、欧、日共同启动“国际热核聚变实验堆(ITER)”计划。2003年2月，我国正式加入ITER计划谈判，2006年11月，中国在法国巴黎与欧盟、印度、韩国、俄罗斯和美国6方代表共同签署了《联合实施国际热核聚变实验堆计划建立国际聚变能组织的协定》。ITER目标是建造一个核聚变实验堆，验证和平利用核聚变能的科学和技术可行性。ITER计划是我国第一次以完全平等身份参与的大型国际科技攻关项目，也是目前以全合作伙伴身份参加的规模最大的国际科技合作计划。作为参与方之一，我国将承担超导材料、电源、包层、遥感技术和加料系统等5大领域的“采购包”任务。

图表：ITER装置示意图



图表：我国ITER计划采购包承担情况

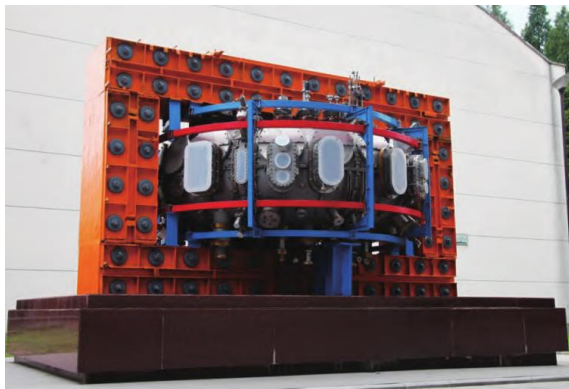


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

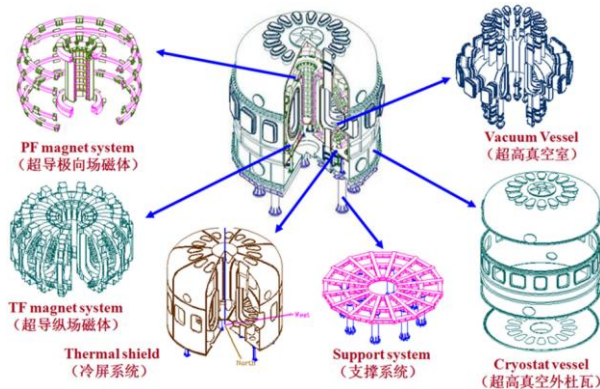
3.8 聚变是我国核能战略“三步走”重要一环，国内研究领先

- **聚变堆是核能发展“三步走”中的一环，国内集中研究托卡马克。**我国核聚变能研究开始于上世纪60年代初，尽管经历了长时间非常困难的环境，但始终能保持稳定、渐进的发展。中国核聚变研究从一开始，就以在我国实现受控热核聚变能为主要目标。从70年代开始，集中选择了托卡马克为主要研究途径，先后建成并运行了小型装置CT-6(中国科学院物理研究所)、KT-5(中国科学技术大学)、HT-6B(中国科学院等离子体物理研究所)、HL-1(核工业西南物理研究院)、HT-6M(中国科学院等离子体物理研究所)。1983年我国提出了“热堆-快堆-聚变堆”核能发展“三步走”战略，具有重要战略意义。
- **引进消化T-7升级为HT-7，使我国在超导托卡马克实验运行上积累了丰富经验。**自上世纪90年代以来，我国开展了中型托卡马克发展计划，探索先进托卡马克经济运行模式和托卡马克稳态运行等问题。1990年10月，中国科学院等离子体物理研究所在认真分析了国际核聚变发展的趋向后，与俄方正式达成协议，采用以易货贸易的方式将T-7引进。此后，等离子体物理研究所用了3年时间将T-7装置升级为HT-7装置（合肥超环），特别是减少了纵场磁体个数以获得更多的等离子体诊断窗口空间，利于物理实验开展。从1994年建成运行到2012年最后一轮实验，HT-7的成功让我国在超导托卡马克实验运行上积累了丰富经验，然而HT-7装置只有纵场磁体采用超导体制制，用以激发等离子体的中心螺管磁体和用以控制等离子体的极向场磁体仍采用铜导体绕制。
- **自主研制全球首个全超导托卡马克装置EAST，中国成为世界上重要的聚变研究中心。**未来聚变堆要向着稳态核聚变能源方向发展，全超导托卡马克是稳态运行的基础。1996年等离子体所向国家提出了建设HT-7U计划，2003年10月正式将装置名称改为EAST，由“Experimental”、“Advanced”、“Superconducting”、“Tokamak”四个单词首字母拼写而成，2006年建成。EAST装置是我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，其成功建设和物理实验使中国在磁约束聚变研究领域进入世界前沿，令中国成为世界上重要的聚变研究中心之一。

图表：HT-7装置主机



图表：EAST装置主机结构

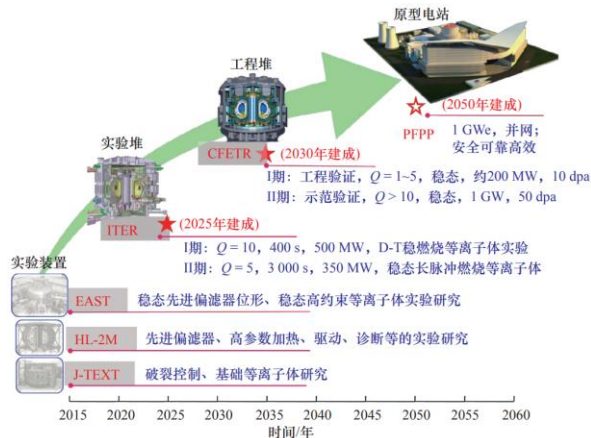


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.9 聚变开发难度大，需长期攻关，我国聚变发展路径清晰

- **HL-2M可与EAST形成互补，重点在其上开展高水平的实验研究。**目前，我国的托卡马克装置主要有华中科技大学的J-TEXT装置、核工业西南物理研究院的HL-2M装置和中国科学院等离子体物理研究所的EAST装置。未来几年，重点在国内磁约束的两个主力装置（EAST、HL-2M）上开展高水平的实验研究。EAST装置目前基本完成了升级，研究能力和实验条件有了大幅度的提高，可以开展大量的针对未来ITER装置和下一代聚变工程堆稳态高性能等离子体研究；在未来几年内，HL-2M装置将完成升级，具有良好的灵活性和可近性，利用独特的先进偏滤器位型，重点开展高功率条件下的边界等离子体物理，与EAST装置形成互补。
- **CFETR是我国聚变实用化研究的关键一步，可以填补ITER空白。**在全面消化、吸收国际热核聚变实验堆设计及工程建设技术的基础上，以我为主开展中国聚变工程试验堆CFETR（China Fusion Engineering Test Reactor）的详细工程设计及必要的关键部件预研，并结合以往的物理设计数据库，在“东方超环”“中国环流器2号改进型”上开展与CFETR装置物理相关的验证性实验，在2035年前后建成CFETR装置。CFETR相较于在建的ITER，在科学问题上主要解决未来商用聚变示范堆必需的稳态燃烧等离子体的控制技术，氦的循环与自持，聚变能输出等ITER装置未涵盖内容。CFETR装置的建设不但能为我国进一步独立自主地开发和利用聚变能奠定坚实的科学技术与工程基础，而且使得我国率先利用聚变能发电、实现能源的跨越式发展成为可能。

图表：中国磁约束聚变发展路线图



图表：部分大型聚变实验装置具备条件对比图

国际上 主要托卡马克装置	国际ITER	中国EAST	韩国KSTAR	法国WEST	欧盟JET	德国ASDEX-U	美国DIII-D
全超导，一体化PF	√	√	√				
长脉冲	√	√	√	√			
高功率电子加热	√	√		√		√	
射频波加热为主	√	√		√			
低动量注入	√	√		√			√
水冷第一壁	√	√		√			
金属壁	√	√			√	√	
ITER-like钨偏滤器	√	√					
偏滤器位型, 3D场	√	√	√		√	√	√

03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

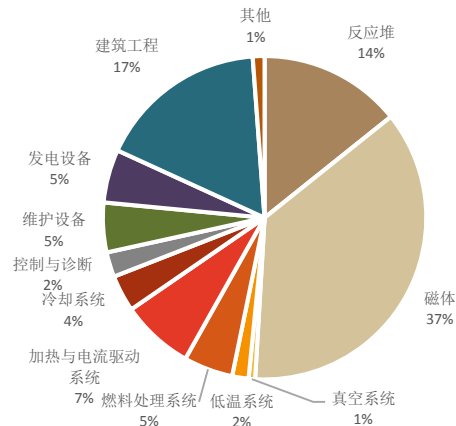
3.10 核聚变项目投资成本较高，成本构成中磁体、反应堆等占比大

- **核聚变项目投资成本较高，ITER最新预算已经达到200亿欧元。**从ITER的建设进程来看，目前可控核聚变装置的投资成本依然非常昂贵，ITER实验设施位于法国南部，2006年启动时最初计划在2016年开机，预算为50亿欧元（约合人民币500亿元）。然而，这项工程的复杂程度一再超出了最初的预想。ITER最近一次公布时间计划是在2016年，当时预计将在2025年启动实验，2035年开始进行氘-氚聚变反应。今年1月，ITER主任皮耶特罗·巴拉巴斯基（Pietro Barabaschi）对法新社（AFP）表示，ITER可能无法在2025年如期启动，而最新的公开预算已高达200亿欧元（约合人民币1565亿元），是当初的4倍。
- **聚变项目包含多个子系统，初始成本中反应堆、磁体、建筑成本最高。**ITER工程的复杂程度一再超出了最初的预想，该项目包含多项子系统，如磁体、热屏蔽层、真空室、低温容器、加速加热系统、冷却系统、控制系统、诊断系统等等。根据Slavomir Entler等人的数据，建造一个3255MW功率的聚变示范电站需要85.25亿欧元的初始资本支出，包括71%的直接支出、17%的间接支出和12%的意外应急支出。直接支出中反应堆、磁体两项支出分别占比为14%、37%，合计超过直接支出的一半，是核聚变电站初始投资中成本较高的项目。其他占比超过10%的还有建筑成本。

图表：ITER项目分解结构



图表：聚变示范电站初始直接支出投资成本构成

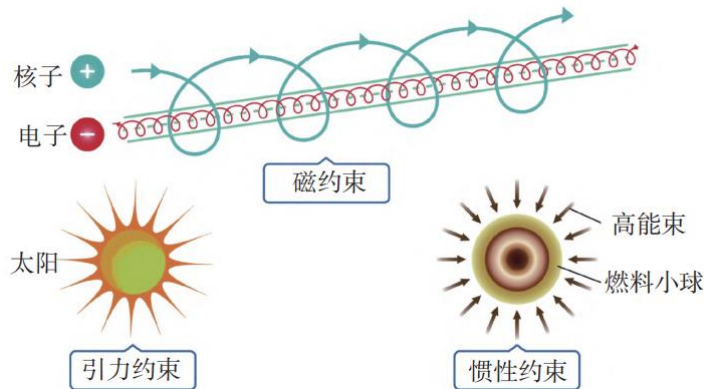


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

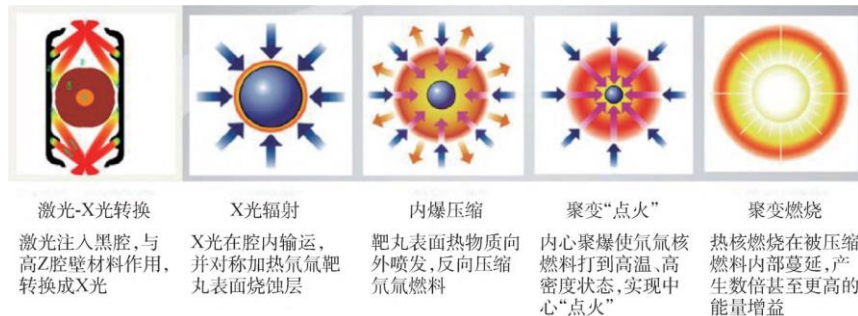
3.11 惯性约束亦有望实现可控，通过激光施加压强使原子核聚变

- **可控核聚变有三种技术路线，磁约束及惯性约束是最有希望的两种。**目前，可控核聚变的技术路线大体有三种，其中以托卡马克为代表的磁约束核聚变是已发展的最有希望利用热核聚变发电的技术方案，也被誉为“人造太阳”，此外还有重力场约束核聚变、激光惯性约束核聚变。引力约束主要是靠强大的万有引力来提供对聚变燃料的约束力，比如太阳的万有引力使日核区的氢不断往中心挤压，从而形成很高的密度，再加上太阳有足够长的能量约束时间，使得核聚变反应得以持续发生，但引力约束无法在地球上实现。所以目前比较希望的两种实现聚变的方法只有磁约束核聚变和惯性约束核聚变。
- **激光聚变唯一实现ICF点火，通过施加压强使原子核聚变。**在进行磁约束研究的同时，20世纪60年代以来，由于激光的出现，在受控聚变的领域，出现了一支强大的新的生力军——惯性约束(inertial confinement fusion, ICF)。激光聚变是目前唯一实现了聚变“点火”的ICF技术路线，将激光在特殊材料制备的黑腔内转化为X光，再利用X光对靶丸进行压缩，在数ns（数亿分之一秒）的时间内约束等离子体的聚变燃烧，最终实现能量增益。通俗讲，就是通过激光产生的巨大的压强，使核燃料体积在极短的时间内变小，密度变大，原子核发生聚变反应，释放出能量。

图表：聚变约束的三种途径



图表：激光聚变的物理过程示意图

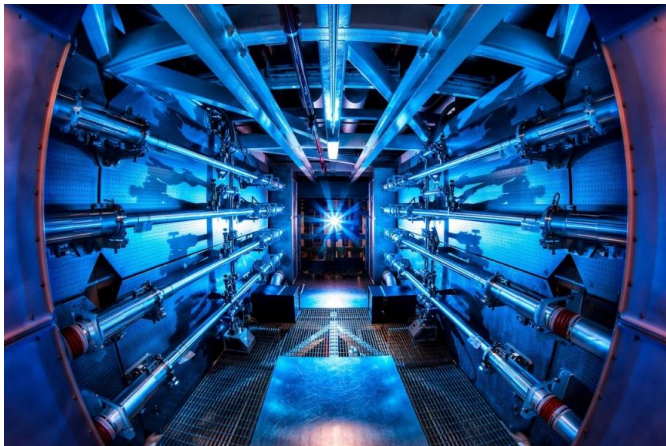


03 人类终极能源，可控核聚变稳步前行

3.12 惯性约束率先实现净能量增益，我国神光Ⅲ部分指标超越NIF

- **惯性约束率先实现净能量增益，NIF首次突破+重现。**2022年12月13日，美国能源部部长詹妮弗·格兰霍姆宣布，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的研究人员利用“国家点火装置”（NIF）总能量为2.05兆焦耳的192路激光束，球对称聚焦在微型氘氚燃料靶丸上，产生了3.15兆焦耳的核聚变能量输出。该成果跨越了聚变点火阈值，这是人类历史上首次实现了净能量增益（ $G>1.5$ ）。与此同时，实验的成功也证实了惯性聚变能源的科学基础。今年7月份劳伦斯利弗莫尔国家实验室在利用“NIF”进行的实验中成功重现了“核聚变点火”突破，并且相比去年12月的实验获得了更高的“净能量增益”。
- **我国惯性约束起步较早，神光系列部分指标超越NIF。**我国惯性约束核聚变研究则可追溯到20世纪60年代中期，迄今已经先后建造了神光Ⅰ、神光Ⅱ、神光Ⅲ等在国际上配置先进的激光聚变综合实验平台。其中由中国工程物理研究院激光聚变研究中心作为建设单位建成的神光Ⅲ激光装置，代表了目前我国在激光约束聚变领域的最高水平。神光Ⅲ主机装置由前端、预放大、主放大、靶场、光束控制与参数测量、计算机集中控制六大系统组成。它有6个束组，可输出48束激光，其主要技术指标已经接近或达到美国NIF的水平，部分指标技术难度甚至有所超越。

图表：NIF的前置放大器模块在激光进入靶室的过程中增加了激光能量



图表：神光Ⅲ装置主要参数与NIF对比

参数	神光Ⅲ主机	NIF
激光束数	48	192
光束口径/mm	360	360
输出能力	180 kJ/351 nm	1.8 MJ/351 nm
峰值功率/TW	60	500
脉冲波形	整形脉冲	整形脉冲
同步精度(RMS)/ps	40	30
打靶精度/ μm	30	50
功率平衡/%	5	8
发射间隔/h	5	8

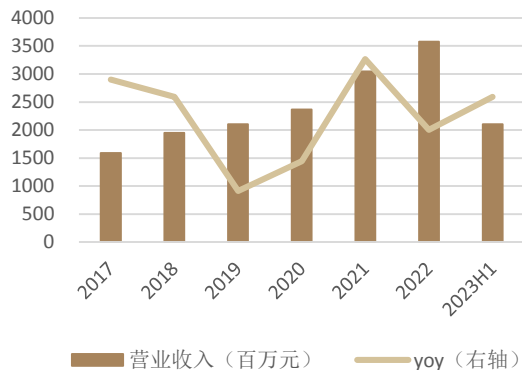
04

建议关注

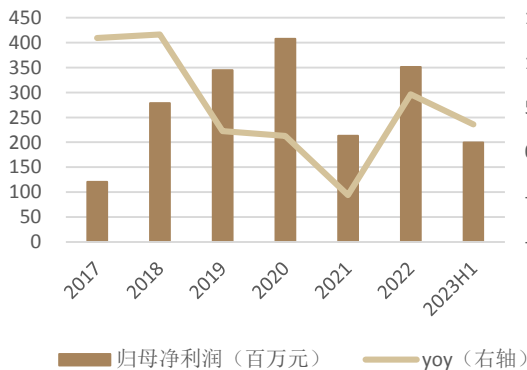
4.1 佳电股份

- **电动机生产历史悠久，产品应用广泛。**哈尔滨电气集团佳木斯电机股份有限公司是中央管理的国有重要骨干企业之一——哈尔滨电气集团有限公司的控股上市公司，继承原佳木斯电机厂全部优质资产，延续80余年电动机生产历史，是党的第一座电机厂，是我国防爆电机、起重及冶金用电机、屏蔽电机（电泵）及局部扇风机的创始厂和主导企业，产品广泛应用于机械煤炭、石油化工、起重冶金、航空航天等行业以及核电站、卫星发射、三峡工程、南极长城站等国家重点建设项目，为我国经济社会发展进步提供卓越驱动力。
- **国内首家取得核级电机设计、制造许可证的企业，在核电领域可供产品市场占有主导优势。**公司是国内首家取得核级电机设计、制造许可证的企业，先后取得了民用核安全电气设备设计、制造和机械设备设计、制造许可证。公司研制的1E级K1类电动机填补了国内空白，达到国际先进水平，且部分指标优于国外同类产品；主氮风机是四代堆-高温气冷堆一回路唯一的动力设备，其功能是驱动一回路内的冷却剂—7.0MPa氮气，流经反应堆堆芯，在反应堆正常启动、功率运行和停堆等工况时，提供足够流量的氮气通过一回路系统，将反应堆堆芯产生的热量带走。产品为立式、电磁轴承支撑的变频调速机组，在国际上处于领先水平。公司主氮风机产品取得了国内“重点领域首台套创新产品”认证。

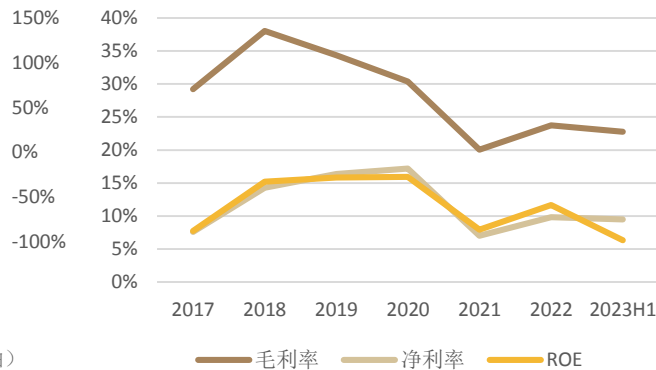
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



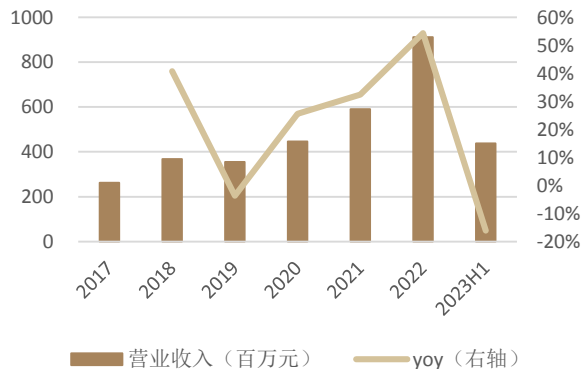
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



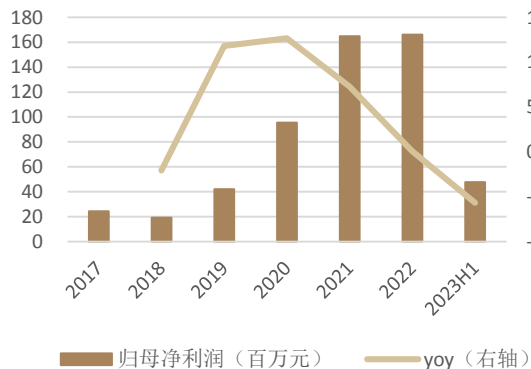
4.2 国光电气

- **起源于1958年，我国微波电子器件主要科研生产基地。**成都国光电气股份有限公司源于1958年，位于成都经济技术开发区龙泉产业园，是我国微波电子器件主要科研生产基地之一。公司产品门类主要包括各类微波器件（电真空、固态）及组件、真空接触器、真空灭弧室、工业用微波能产品、机载厨房服务设备（含高铁服务推车等）、真空规管、真空计、真空工艺设备、真空测控设备、移动压力容器测控组件等。
- **生产ITER关键部件，公司优势明显。**公司的核工业设备及部件产品主要包括ITER配套设备、核工业领域专用泵以及阀门等。公司生产的偏滤器和包层系统是ITER项目的关键部件。偏滤器是托卡马克装置的关键组成部分，它是构成高温等离子体与材料直接接触的过渡区域：一面是温度高达几亿度的等离子体，另一面是通常的固体材料。ITER包层系统的主要功能是吸收来自等离子体和中性束注入的辐射和粒子热通量、为真空室和外部容器组件提供热屏蔽等，由覆盖约600平方米的440块包层模块（BM）组成。一块BM主要分为两部分：一块面向等离子体的第一壁（FW）面板和一块屏蔽模块（SB）。目前国内在该领域具有相关典型项目承建与运维经验的，只有公司一家，公司具有较明显优势。

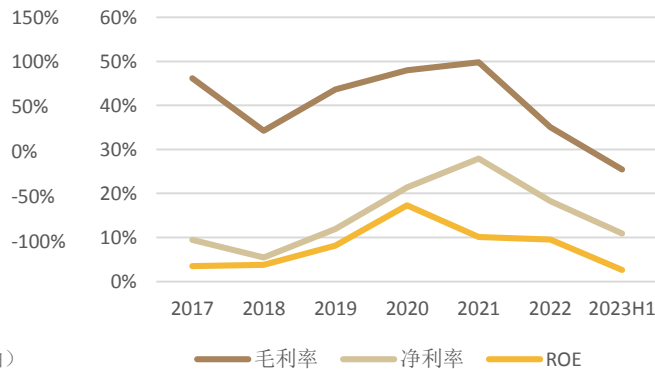
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况

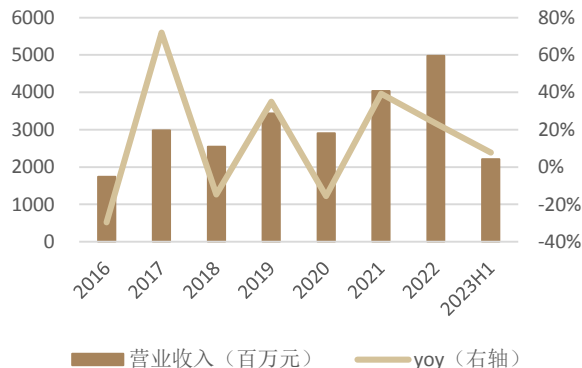


04 建议关注

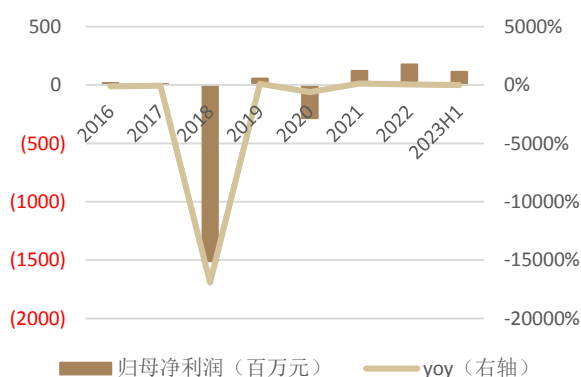
4.3 兰石重装

- **公司拥有辉煌历史，致力于用卓越装备引领产业革命。**兰州兰石重型装备股份有限公司始建于1953年，是中国石化装备制造业的先行者。前身是国家“一五”期间156个重点建设项目之一——兰州炼油化工设备厂，被誉为“中国石化机械摇篮和脊梁”。公司业务涵盖传统能源装备（炼油化工、煤化工、化工新材料等领域）、新能源装备（光伏多晶硅、核能、氢能等领域）、工业智能装备（快速锻造液压机组等）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。
- **核能装备实现国产替代，核燃料贮存容器细分领域具有较高的市场占有率。**公司在核能领域拥有一类放射性物品运输容器制造许可证、民用核安全设备设计许可证（核安全3级）、民用核安全设备制造许可证（核安全2、3级）、制造许可证等多个核级相关资质。公司是国内首家实现国产替代的民用核级板式换热器设计生产企业，子公司中核嘉华在核燃料贮存容器细分领域具有较高的市场占有率，制造了中国首座50吨核乏燃料后处理中间试验厂的绝大多数非标设备。公司产品覆盖上游核化工和核燃料领域设备、中游核电站设备和下游核燃料循环后处理设备，取得了中核集团、中广核集团等40余家核电业主单位供应商资格。

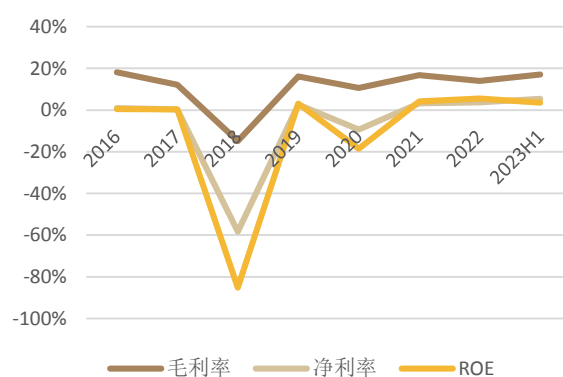
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



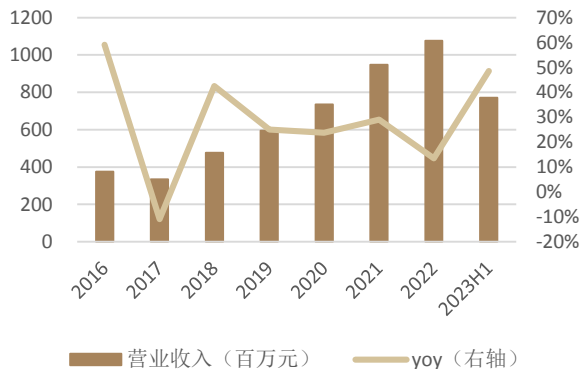
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



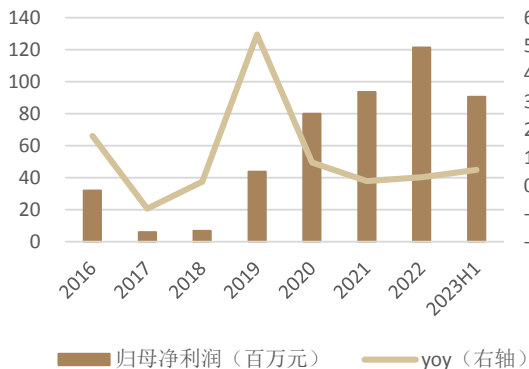
4.4 科新机电

- **创立于1997年，专注于压力容器领域。**科新机电创立于1997年，公司位于四川省德阳市，主要产品为压力容器过程装备。公司长期专注于以重型压力容器为主的高端过程装备和系统集成设计、制造及安装。经过26年的发展，先后参与数千项重大客户项目建设，在生产制造、研发设计、国内外重大项目上积累了丰富的经验，现已发展成为面向核电军工、新能源、石油化工、煤化工、天然气化工等领域的过程装备成套方案解决供应商和进出口贸易的国家高新技术企业。
- **为数不多的拥有资质的民营企业，核电业务迅速发展。**公司2006年开始着力于核电领域，2011年取得民用核安全机械设备制造许可证，成为为数不多的拥有核电资质的民营高端压力容器制造企业。经过17年来的积累，先后与数十个涉核电单位合作，完成了数百项核电装置产品，核电设备制造经验和能力不断提升，近年来，公司的核电业务发展迅速，成功承制了具有四代安全特征的华能石岛湾高温气冷堆核电站示范工程的热气导管、主氦风机冷却器等核电产品，核电产品ANT-12A型新燃料运输容器以优质性能实现替代进口，获得客户赞许，公司已成为中国核电工程公司、中广核工程公司、中核能源科技公司、国核工程公司、中电投等众多核电公司的核级设备和核化工设备的供应商。

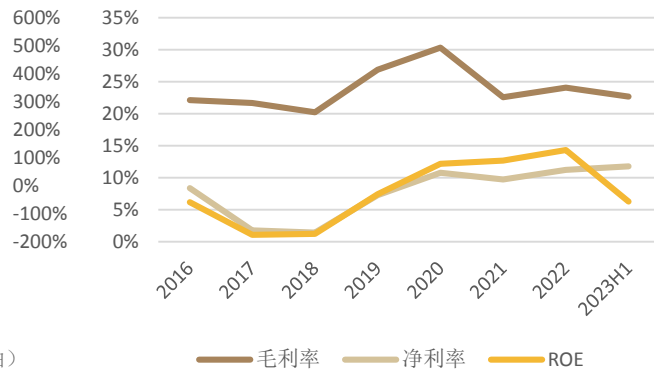
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况

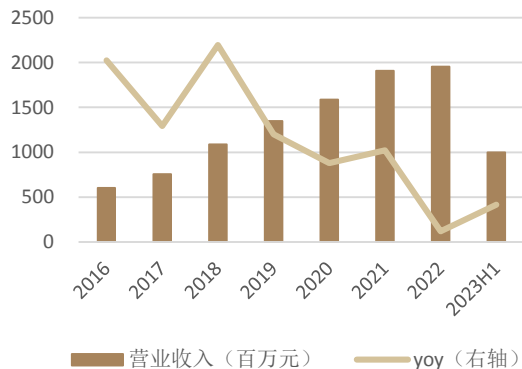


04 建议关注

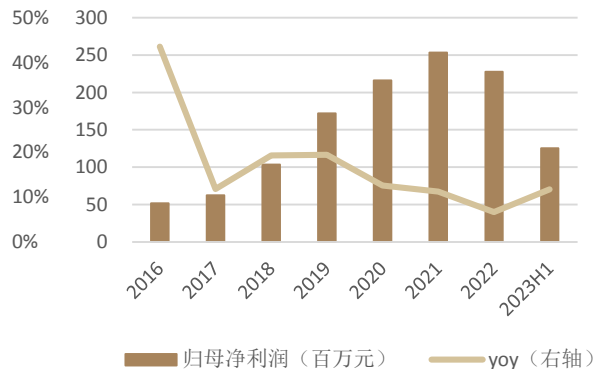
4.5 江苏神通

- **公司专业从事新型特种阀门业务，产品应用广泛。**江苏神通阀门股份有限公司位于江苏省启东市南阳镇，专业从事新型特种阀门研发、生产与销售，主要包括蝶阀、球阀、闸阀、截止阀、止回阀、调节阀、非标阀等七个大类145个系列2000多个规格，产品广泛应用于冶金、核电、火电、煤化工、石油和天然气集输及石油炼化等领域。公司冶金特种阀门主要应用于冶金行业的高炉煤气干法除尘与煤气回收等节能减排系统，产品国内市场占有率70%以上；核级蝶阀、球阀产品国内主要供应商。
- **核电阀门地位突出，实现了核级蝶阀、球阀等产品的全面国产化。**在核电阀门领域，公司产品优势地位突出，自2008年以来，在我国新建核电工程用阀门的一系列国际招标中，公司为核级蝶阀和核级球阀的主要中标企业，获得了这些核电工程已招标核级蝶阀、核级球阀90%以上的订单，实现了核级蝶阀、球阀等产品的全面国产化。近年来，在实现老产品改进、保持持续领先优势的同时，公司还陆续开发了压水堆核电站地坑过滤器、核级调节阀、核级仪表阀、核级气动膜片、氦气隔离阀、低能耗球阀等新产品，以及核化工用系列产品，为我国核电建设工程领域的关键设备国产化做出了贡献。

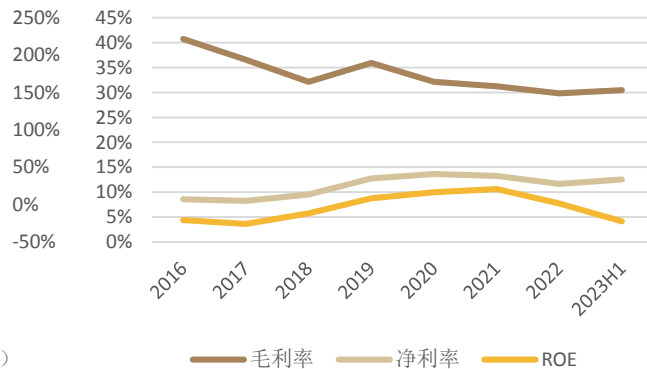
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



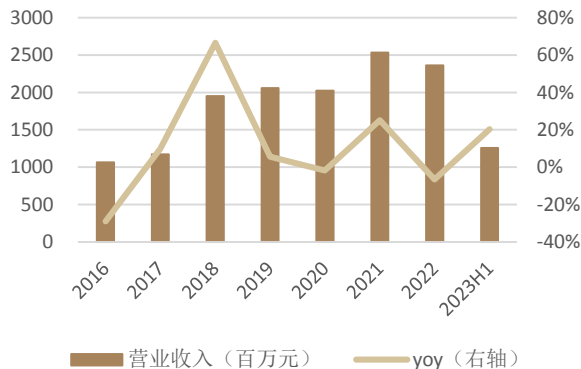
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



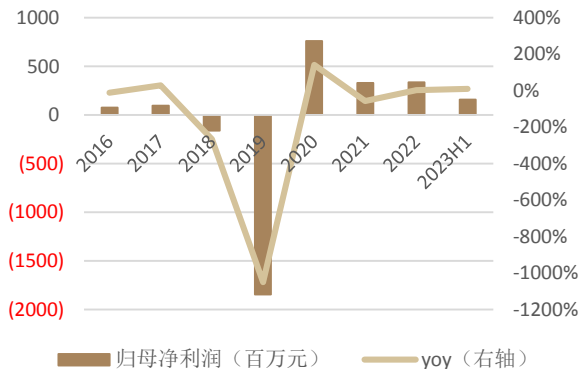
4.6 海陆重工

- **创建于1956年，国内一流的节能环保设备的专业设计制造企业。**苏州海陆重工股份有限公司创建于1956年，公司位于江苏省张家港市开发区，是国内一流的节能环保设备的专业设计制造企业，公司主要从事工业余热锅炉、大型及特种材质压力容器和核安全设备的制造销售业务，目前已初步形成锅炉产品、大型压力容器、核电设备、低温产品、环保工程共同发展的业务格局。公司设备先进，装备精良，专业严谨的制造理念打造出品质非凡、质量一流的“海陆”品牌声誉。
- **深入核电领域20多年，国内首家配套制造核电站堆内构件吊篮筒体的企业。**公司自1998年制造清华大学10MW高温气冷堆堆芯筒体从而进入核电制造行业以来，与上海电气集团下属的上海第一机床厂有限公司结成了战略合作关系，填补了国内核电站反应堆堆内构件吊篮筒体制造的空白。多年来，公司在民用核能领域积累了丰富的制造和管理经验，并完成多个项目的国际、国内首件（台）制造任务。服务堆型包括但不限于二代+堆型、三代堆型（华龙一号、国和一号、AP1000、VVER、EPR）、四代堆型（高温气冷堆、钠冷快堆、钍基熔盐堆）以及热核聚变堆（ITER）等，涵盖了国内外的各核电机组。

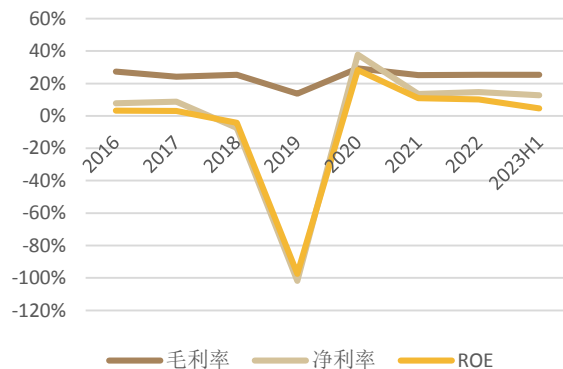
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



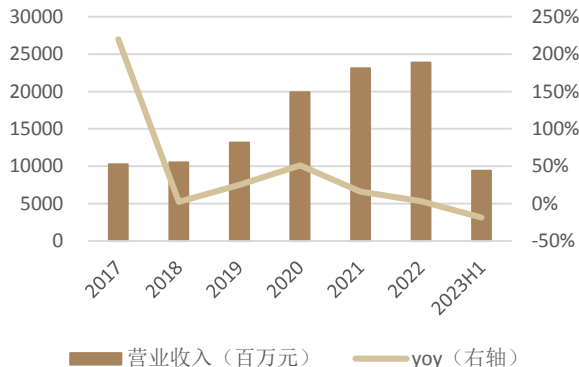
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



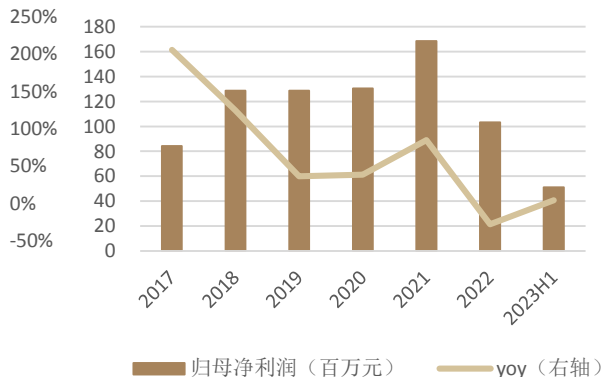
4.7 中国一重

- **历史悠久，国之重器。**中国一重前身为第一重型机器厂，是“一五”期间建设156项重点工程项目之一，始建于1954年，是中央管理的涉及国家安全和国民经济命脉的国有重要骨干企业之一，拥有国家级企业技术中心、重型技术装备国家工程研究中心、国家能源重大装备材料研发中心。公司主要为钢铁、有色、电力、能源等行业及国防军工提供重大成套技术装备、高新技术产品和服务。主要产品有核岛设备、重型容器、大型铸锻件、矿山设备和工矿配件等。
- **国际先进核岛设备供应商和服务商，有力推动国家核电产业的安全高效发展。**中国一重是国内最早开发生产核能设备的企业，也是国内最大的核电锻件供应商，已具备核岛一回路核电设备的全覆盖，成为全球少数兼备核岛铸锻件和核岛成套设备制造能力的重要供应商，国际先进核岛设备供应商和服务商。是国内唯一承担并已完成二代、二代加、三代、四代核电技术装备制造的企业，具备年产5台套核岛一回路主设备和5套常规岛转子锻件及汽轮机缸体铸件的生产能力。目前在建核电站80%以上的核电锻件、70%以上的核反应堆压力容器均由中国一重生产，有力地推动了国家核电产业的安全高效发展，是国家核电“走出去”发展战略的重要支撑力量。

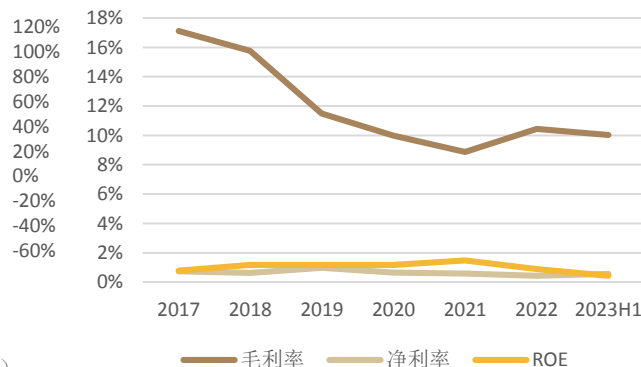
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



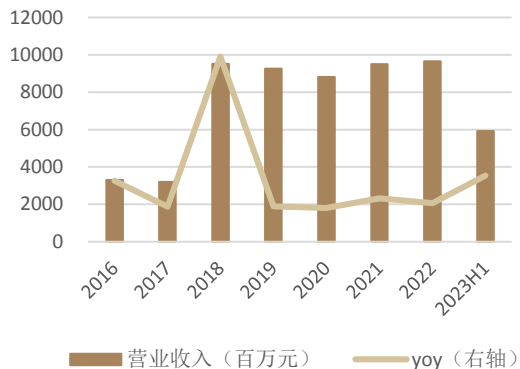
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



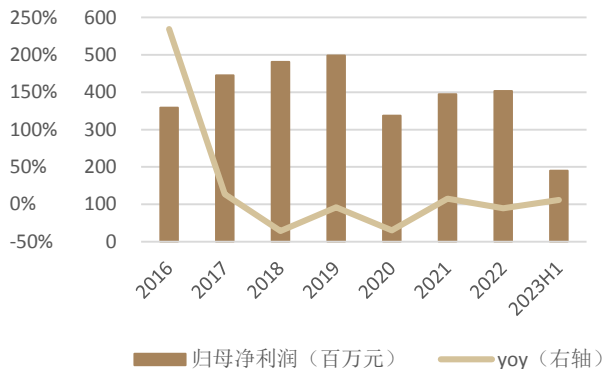
4.8 国机重装

- **以二重主业为平台打造的国家高端重型装备旗舰，世界重大技术装备领域少数具备极限制造能力的企业。** 国机重型装备集团股份有限公司是世界500强企业——中国机械工业集团有限公司的控股子公司，是以中国第二重型机械集团有限公司核心制造主业为平台，整合中国重型机械有限公司、中国重型机械研究院股份公司等国机集团重型装备板块优质资源，组建的集科工贸于一体的国家高端重型装备旗舰。国机重装是国家重大技术装备制造基地，是世界重大技术装备领域少数具备极限制造能力的企业，覆盖全产业链，柔性制造优势突出，可为航空航天、能源、冶金、矿山、交通、汽车、石油化工等重要行业提供系统的制造与服务，在国民经济和国防建设中发挥着战略性、基础性的重要作用。
- **具备核岛主设备制造资质和能力，成功签约全球首个聚变主机关键部件制造合同。** 国机重装拥有反应堆压力容器、稳压器、主管道、堆芯补水箱等核岛主设备制造资质和能力，主管道、堆芯补水箱等产品在诸多核电站得到应用，实现了核岛主设备核级材料全覆盖，具备 CAP1000/1400、ACP1000、华龙一号等为代表的第三代核电机型全套铸锻件和关键零部件生产能力和业绩，同时公司曾成功签约用于全球首个聚变实验电站的聚变堆主机关键部件制造合同。

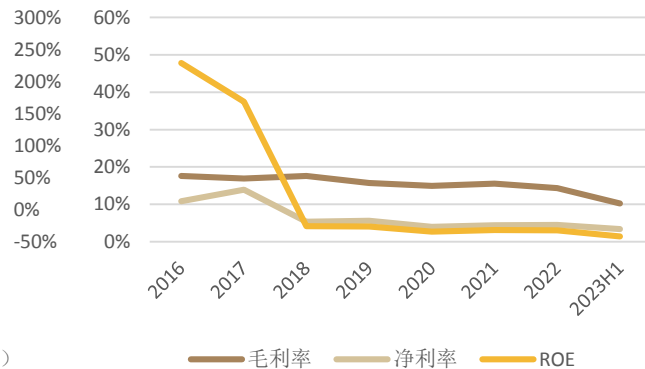
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



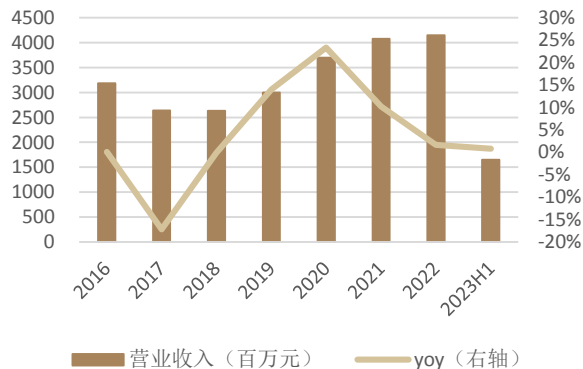
图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



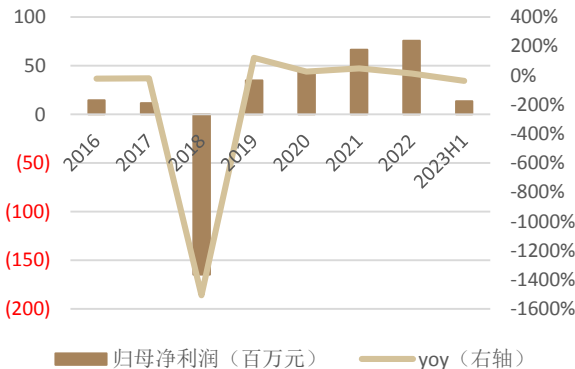
4.9 航天晨光

- **前身为中国近代民族工业摇篮的大型综合装备制造企业。** 航天晨光股份有限公司成立于1999年，2001年在上海证券交易所上市。公司前身为中国近代民族工业的摇篮——1865年清朝洋务运动中创建的金陵机器制造局。新中国成立后，先后隶属于兵器工业部和航天工业部，现为中国航天科工集团有限公司控股的大型综合装备制造企业。公司主营业务以核工装备、智能制造、后勤保障、环保装备、柔性管件、压力容器、艺术工程等多个领域的产品研发、生产和销售为主，产品广泛应用于冶金、石化、电力、环保、物流、市政环卫、煤炭、船舶、核电、航空航天、汽车、轨道交通和民用燃气等领域。
- **放射性废物处理系统关键设备打破国外垄断，热核聚变系统完成江苏省首台（套）重大装备认定申报。** 公司核工装备业务重点立足核级工业基础件、核废料处理装备、核非标成套装备三个发展领域，拥有核电金属软管、核电膨胀节、核废料处置全流程设备、核电热室、手套箱等系列化产品。公司在放射性废物处理系统关键设备领域掌握多项核心技术并打破国外垄断，已发展成为国内核非标成套装备重要供应商。核聚变方面，公司“热核聚变用杜瓦膨胀节成套系统”完成江苏省首台（套）重大装备认定申报。

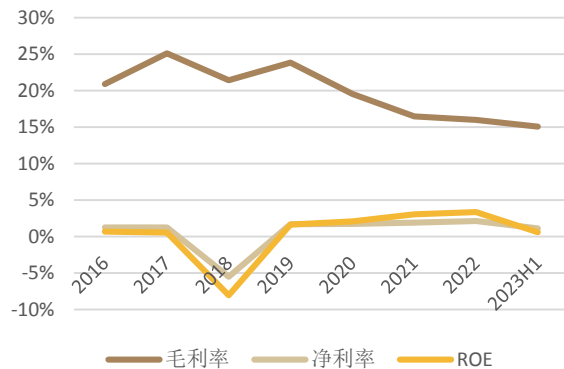
图表：公司近年来营收及增速情况



图表：公司近年来归母净利润及增速情况



图表：公司近年来毛利率、净利率及ROE情况



05

风险提示

- （一）全球范围内无法预期的核电事故；
- （二）核电政策转向保守；
- （三）聚变项目进展不及预期；
- （四）电力市场需求增长缓慢；

分析师与研究助理简介

俞能飞：德邦证券研究所智能制造组组长，机械设备首席分析师。厦门大学经济学硕士，曾于西部证券、华西证券、国泰君安等从事机械、中小盘研究。擅长挖掘底部、强预期差、高弹性标的研究。作为团队核心成员获得2016年水晶球机械行业第一名；2017年新财富、水晶球等中小市值第一名；2018年新财富中小市值第三名；2020年金牛奖机械行业最佳行业分析团队。

投资评级说明

	类别	评级	说明
1.投资评级的比较和评级标准： 以报告发布后的6个月内的市场表现为比较标准，报告发布日后6个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期市场基准指数的涨跌幅；	股票投资评级	买入	相对强于市场表现20%以上；
		增持	相对强于市场表现5%~20%；
		中性	相对市场表现在-5%~+5%之间波动；
		减持	相对弱于市场表现5%以下。
2.市场基准指数的比较标准： A股市场以上证综指或深证成指为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普500或纳斯达克综合指数为基准。	行业投资评级	优于大市	预期行业整体回报高于基准指数整体水平10%以上；
		中性	预期行业整体回报介于基准指数整体水平-10%与10%之间；
		弱于大市	预期行业整体回报低于基准指数整体水平10%以下。

免责声明

分析师声明：本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，本报告所采用的数据和信息均来自市场公开信息，本人对这些信息的准确性或完整性不做任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。报告中的信息和意见仅供参考。本人过去不曾与、现在不与、未来也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接接收任何形式的补偿，分析结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

法律声明：

德邦证券股份有限公司（以下简称“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。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，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。市场有风险，投资需谨慎。本报告所载的信息、材料及结论只提供特定客户作参考，不构成投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。客户应考虑本报告中的任何意见或建议是否符合其特定状况。在法律许可的情况下，德邦证券及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。本报告仅向特定客户传送，未经德邦证券研究所书面授权，本研究报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。如欲引用或转载本文内容，务必联络德邦证券研究所并获得许可，并需注明出处为德邦证券研究所，且不得对本文进行有悖原意的引用和删改。根据中国证监会核发的经营证券业务许可，德邦证券股份有限公司的经营范围包括证券投资咨询业务。



德邦证券
Topsperry Securities

德邦证券股份有限公司

地址：上海市中山东二路600号外滩金融中心N1幢9层

电话：+862168761616 传真：+862168767880

400-8888-128