

机械设备

报告日期：2025 年 04 月 14 日

未来理想终极能源，“政策-产业-资本”有望共振

——可控核聚变行业深度报告

投资要点

□ 可控核聚变：未来理想终极能源，多种装置路线并行

1、**核聚变**指的是两个较轻的原子核结合成一个较重的核，同时释放巨大能量的核反应形式；一般用反应截面来描述核聚变反应发生的难易程度，**氘氚（D-T）反应**是最容易实现的核聚变反应。

2、**可控核聚变**是指在人工控制条件下，通过持续、稳定的核聚变反应释放能量的技术，具有资源丰富、清洁绿色、安全高效等优点，是人类未来理想终极能源。

3、**实现聚变的三种途径：磁约束、惯性约束和引力约束。**磁约束聚变目前是各国研究的重点方向，而托卡马克装置是目前最有前景的磁约束核聚变装置。

□ 聚变研究的两个关键参数：聚变三乘积、Q 值

1、**聚变三乘积**指的是密度、温度、能量约束时间的三乘积，是劳逊判据的重要形式。劳逊判据（Lawson criterion）用于衡量核聚变反应的能量产出率与能量损耗率之间的关系。

2、**聚变增益因子 Q** 是直接衡量聚变反应堆品质的参量，其定义为聚变反应产生的聚变能量输出值与外部能量输入值之比。

当 $Q=1$ 时，输出能量与输入能量达到平衡。但一般来说大多数聚变反应会释放一部分无法在等离子体中被捕获的能量，因此需要更高 Q 值才可能在不需外部加热的条件下实现自我维持，达到真正的点火条件。

□ 产业接近临界：当前已进入工程可行性验证阶段，等待核聚变 ChatGPT 时刻

1、90 年代实现核聚变能科学可行性已得到验证，目前处于工程验证阶段，对于托卡马克装置，若工程 Q 值 >1 ，则有望实现能量净增益；若工程 Q 值 >30 ，则商业化有望开启。

2、**国内外催化不断，“政策、产业、资本”形成共振。**1) 国内：3 月 28 日“环流三号”实现双亿度；4 月 1 日上海未来产业基金拟入股聚变能源公司；2) 海外：2024 年底 OpenAI CEO 透露其投资的初创企业 Helion 将很快演示净能量增益核聚变，均标志着产业临界点即将到来，有望带动可控核聚变产业大爆发。

□ 空间测算：2031-2035 年全球核聚变设备新增规模有望达万亿，2023-2035 年 CAGR 约 23%

中期：实验装置、工程堆招标在即，国内设备市场空间超千亿。目前国内规划在建核聚变项目众多，并给出清晰时间规划，规模多在百亿人民币级别以上：BEST、CFETR、星火一号聚变-裂变混合堆、Z-FFR 等。

全球核聚变设备市场空间测算：2031-2035 年全球核聚变设备市场新增规模有望达万亿，2023-2035 年设备市场年均规模 CAGR 约 23%。

□ 投资建议：全球可控核聚变产业加速，聚焦设备供应商

看好中游设备：联创光电（高温超导磁体）、国光电气（偏滤器、第一壁、泵阀等）、安泰科技（偏滤器）、合锻智能（真空室）；上游材料：西部超导、永鼎股份、精达股份等。

□ 风险提示

技术可行性验证不及预期，资金投入及政策支持不及预期，宏观环境超预期恶化。

行业评级：看好(维持)

分析师：邱世梁

执业证书号：S1230520050001
qiushiliang@stocke.com.cn

分析师：王华君

执业证书号：S1230520080005
wanghuajun@stocke.com.cn

分析师：周向昉

执业证书号：S1230524090014
zhouxiangfang@stocke.com.cn

相关报告

1 《周期反转，成长崛起；重视工程机械、人形机器人等》

2025.04.13

2 《2025 年 3 月新船价格同比增长约 2%，持续推荐船舶龙头》 2025.04.11

3 《人形机器人：智元首届供应商大会在上海成功举办，重视特斯拉产业链》 2025.04.03

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

正文目录

1 可控核聚变：未来理想终极能源	5
1.1 可控核聚变是人类未来理想终极能源	5
1.2 实现可控核聚变的主要路径及典型方案	6
1.3 托卡马克装置内部结构拆解：以 ITER 为例	8
2 技术奇点临近：当前已进入工程可行性验证阶段，Q 值突破有望引爆商业化革命	12
2.1 国际：2050 年为建成并投入运行 DEMO 的关键时间节点	12
2.2 国内：2030's 年建成 CFETR 工程堆，2050's 年建成 PFPP 原型电站	18
2.3 民营企业：产业化进展降低行业门槛，民营企业陆续入场	22
2.4 评价聚变堆性能的指标：能量平衡、氚自持、可利用率、耐辐照能力	23
3 2031-2035 年全球核聚变设备新增规模有望达万亿	24
3.1 产业链及价值量拆分：设备价值量占比较高	24
3.2 空间测算：2031-2035 年全球可控核聚变设备新增规模有望达万亿	27
4 相关公司：前期重点关注受益 ITER 项目交付及国内新实验装置建设的核心设备供应商	27
4.1 联创光电：聚焦新型主业战略明确，激光超导两翼齐飞	29
4.2 国光电气：特种微波器件核心供应商，核工业设备打开第二增长曲线	30
4.3 西部超导：国内唯一超导线材商业化生产企业，超导业务快速增长	31
4.4 永鼎股份：光通信+电力传输双主业驱动，超导材料布局未来	31
4.5 精达股份：电磁线领军企业，高端化带来市场新机遇	33
4.6 安泰科技：聚焦新材料核心主业，技术驱动高成长	34
5 风险提示	34

图表目录

图 1: 核聚变是两个小的原子核聚合一个较大的原子核时发生的反应	5
图 2: 核聚变与核裂变对比具有资源丰富、清洁绿色、安全高效等特点	5
图 3: 聚变三乘积是衡量核聚变反应效率和性能的关键指标	6
图 4: 实现磁约束、惯性约束有多种装置方案	7
图 5: ITER 的内部结构主要包括磁体、真空容器、等离子屏蔽包层等	8
图 6: 真空容器所在位置示意图	9
图 7: 真空容器内部包含如超导板、护墙板、第一壁结构等	9
图 8: 等离子屏蔽包层所在位置示意图	9
图 9: 偏滤器所在位置示意图	10
图 10: 偏滤器由穹顶板、内外靶板、抽气系统和冷却系统组成	10
图 11: 超导磁体系统超导磁体系统所在位置示意图	11
图 12: 托卡马克装置线圈主要包括 CS、PF、TF 线圈	11
图 13: 低温恒温器所在位置示意图	11
图 14: 低温恒温器主要由顶盖、上环体、下环体和基座这 4 大部分组成	11
图 15: ITER 参与方包括欧盟、中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国	13
图 16: ITER 计划在 2034 年开始开展完整研究活动	14
图 17: DIII-D 在等离子体的边缘创造了能够耐更高密度和温度的“超级 H 模”聚变等离子体	15
图 18: NIF 是世界最大的激光器，由美国加利福尼亚州 LLNL 研制。	15
图 19: JET 创下了聚变能量 69MJ 的世界纪录	16
图 20: WEST 装置为 ITER 验证全钨偏滤器与主动冷却技术方案	17
图 21: JT-60SA 装置探索无感应电流驱动与稳态运行模式	18
图 22: KSTAR 开展等离子体高参数稳态运行研究	18
图 23: 我国可控核聚变计划 2030's 年建成 CFETR 工程堆，2050's 年建成原型电站	18
图 24: 环流三号在最新实验中首次实现原子核温度 1.17 亿度、电子温度 1.6 亿度的参数水平	20
图 25: 东方超环成功实现超 1 亿摄氏度、1066 秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行	20
图 26: 聚变堆主机关键系统综合研究设施正在加快建设	21
图 27: CFS 计划建造其第一座 ARC 聚变发电厂	23
图 28: 核聚变产业链包括上游原材料、中游设备及下游核电应用	25
图 29: FIRE 项目成本拆解：设备费用占比约 55%	25
图 30: ITER 工程验证堆成本中设备费用占比 86%	26
图 31: DEMO 商业示范堆成本中设备费用占比 85%	26
图 32: 公司 2018-2023 年营收	29
图 33: 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 8%	29
图 34: 联创光电持有联创超导 40% 股权（截至 2024Q3）	30
图 35: 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 15%	30
图 36: 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 36%	30
图 37: 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 31%	31
图 38: 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 41%	31
图 39: 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 6%	32
图 40: 公司 2018-2023 年归母净利润	32
图 41: 永鼎股份持有东部超导 64% 股权（截至 2024Q3）	32
图 42: 公司 2019-2024 年营收 CAGR 为 13%	33

图 43: 公司 2019-2024 年归母净利润 CAGR 为 5%	33
图 44: 精达股份持有上海超导 18%股权 (截至 2024 年年报)	33
图 45: 公司 2019-2024 年营收 CAGR 为 10%	34
图 46: 公司 2019-2024 年归母净利润 CAGR 为 18%	34

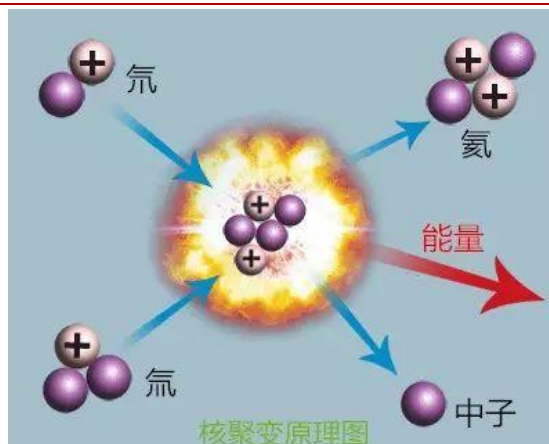
表 1: 核聚变实现方式主要包括磁约束、惯性约束、引力约束	7
表 2: ITER 参与方包括欧盟、中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国	13
表 3: 我国形成了以专业院所为主, 多家高校和研究单位共同参与的核聚变技术开发格局	19
表 4: 私营企业积极开展未来发展路线及聚变产业的相关部署	22
表 5: 聚变能源开发 4 个重要节点分别对应: 当前水平-ITER 水平-DEMO 水平-商业堆水平	24
表 6: 2035 年全球可控核聚变新增规模有望达到万亿	27
表 7: 关注受益 ITER 项目交付及国内新实验装置建设的核心设备供应商	28

1 可控核聚变：未来理想终极能源

1.1 可控核聚变是人类未来理想终极能源

核聚变 (nuclear fusion) 是两个较轻的原子核结合成一个较重的核，同时释放巨大能量的核反应形式。**可控核聚变 (Controlled nuclear fusion)** 是指在人工控制条件下，通过持续、稳定的核聚变反应释放能量的技术。其核心目标是将太阳内部的聚变原理转化为可控制的能源输出。

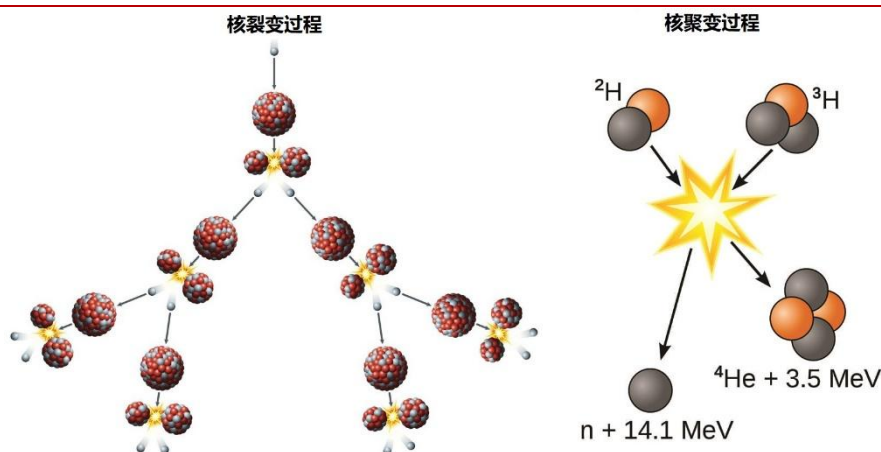
图1：核聚变是两个小的原子核聚合一个较大的原子核时发生的反应



资料来源：中科院等离子所，浙商证券研究所

核聚变能具有资源丰富、清洁绿色、安全高效等特点，是人类未来理想终极能源的首要选择。核聚变对比核裂变的主要优势在于：**1) 资源丰富**：核聚变使用的燃料在自然界中十分丰富，获得方式容易。据测算，每升海水中含有 0.03 克氘，全球海水中就有超过 45 万吨氘，每升海水中的氘经过聚变反应可以产生 300 升汽油燃烧后释放出的能量。氚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。**2) 清洁绿色**：核聚变反应过程不产生污染环境的氮化物和硫化物，不排放二氧化碳，是理想的低碳能源。**3) 安全高效**：由于核聚变过程难以启动和维持，因此不存在失控和熔毁的风险，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，很快失去其能量，并在对反应堆造成任何持续损害之前熄灭，因此，聚变堆的安全性非常高。

图2：核聚变与核裂变对比具有资源丰富、清洁绿色、安全高效等特点



资料来源：中国新材料产业技术创新平台，中国核电网，浙商证券研究所

1.2 实现可控核聚变的主要路径及典型方案

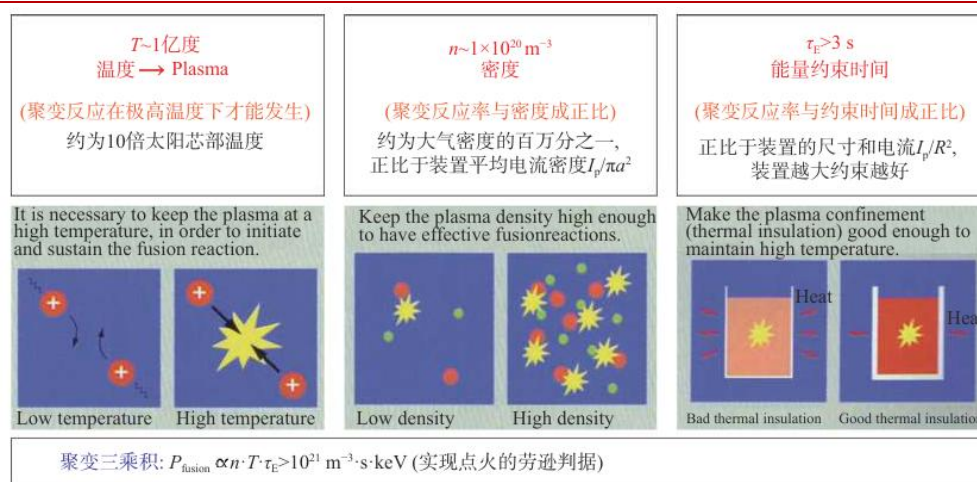
聚变三乘积是衡量核聚变反应效率和性能的关键指标。实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：足够高的温度、一定的密度和一定的能量约束时间，三者的乘积称为聚变三乘积。根据劳逊判据，只有聚变三乘积大于一定值（ $5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ ），才能产生有效的聚变功率输出。

1) 高温：原子核在极高温度下产生足够实现聚变反应的动能。原子核都带正电，因此两个原子核相互靠近时，会受到强大库仑斥力的阻碍。要实现原子核的聚变反应，必须让它们靠得足够近，使核力能将它们“粘合”成新的原子核。只有当两个原子核具有极大的动能时，才有望实现碰撞。根据实验资料估计，使两氘核相遇，它们的相对速度必须大于每秒 1000 公里。高温可以赋予物质动能，对于一团氘核整体而言，温度必须达到一亿度，才能够使它们具有足以产生碰撞的动能。而对于最容易实现的氘核与氚核间的聚变反应，温度则必须在五千万度以上。

2) 燃料密度：燃料密度指等离子体中参与聚变反应的轻原子核（如氘、氚）的粒子数密度，即单位体积内的燃料原子数量。高密度可增加燃料粒子碰撞机会，从而提升聚变反应速率。根据劳森判据，聚变功率与粒子碰撞频率平方成正比。

3) 约束时间：高温等离子体需要维持足够长的时间，以便充分地发生聚变反应，放出足够多的能量，使聚变反应释放的能量大于产生和加热等离子体本身所需的能量及其在这过程中损失的能量。这样，利用聚变反应放出的能量来维持所需的极高温度，毋需再从外界施入能量，聚变反应也能自持地进行下去。约束时间与密度有关，密度大，单位时间里参加反应的原子核较多，放出能量也多，因而约束的时间可以相应地短些。反之，约束时间必须长些。前者对应的约束手段为惯性约束，后者则对应磁约束。

图3：聚变三乘积是衡量核聚变反应效率和性能的关键指标



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》，浙商证券研究所

核聚变实现方式主要包括磁约束、惯性约束、引力约束，目前国际上主流可控核聚变发电的技术路径为磁约束、惯性约束。在高温状态下，电子的动能大于原子核对它的约束能时，电子就会摆脱原子核的束缚，成为自由运动的电子；而原子核则会因为失去一个电子，变成带一个单位正电荷的“离子”，这种过程称为“电离”，这种既呈现带电性、同时宏观上正负离子数相等的物质称为“等离子体”。等离子体在高温高压下极易不稳定，高温等离子体的强热流、强粒子流与直接面对等离子体的器壁之间产生的强烈相互作用，会导致第一壁损伤，产生杂质，污染等离子体，引起等离子体能量辐射损失与等离子体约束性能降低。因此，对

于聚变等离子体的有效约束是关键。现阶段技术可以实现的约束方式有 2 种。(1) **磁约束**: 目前主流方案, 利用强磁场 (如托卡马克装置) 约束高温等离子体, 避免其接触容器壁。中国“东方超环”(EAST) 和“环流三号”已实现百秒级高约束模式运行。(2) **惯性约束**: 通过激光或粒子束瞬间压缩燃料靶丸, 瞬间达到超高密度, 但仅能维持极短时间, 如美国国家点火装置 (NIF)。

表1: 核聚变实现方式主要包括磁约束、惯性约束、引力约束

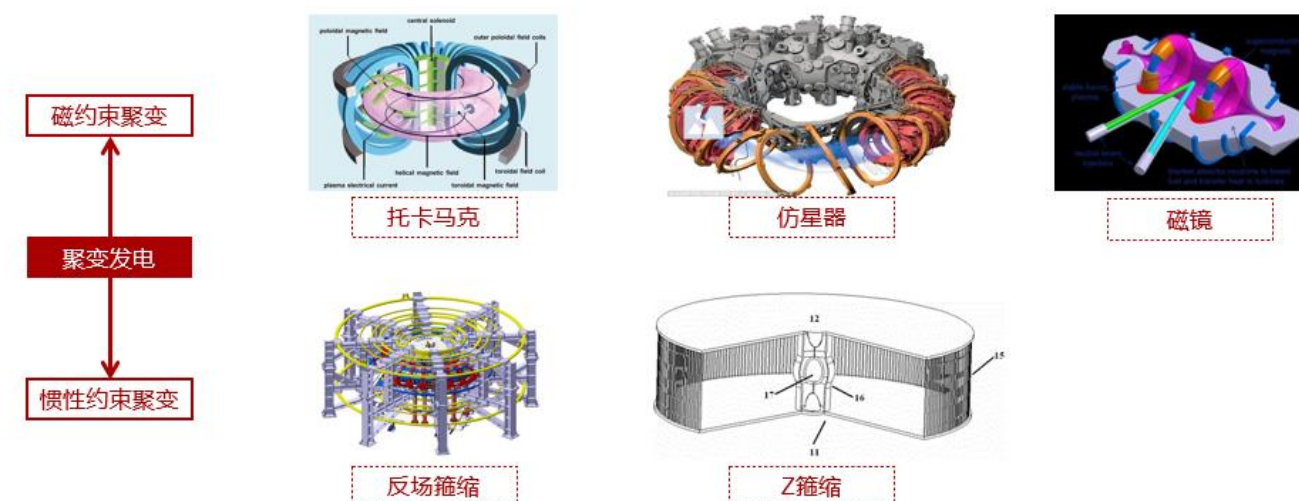
约束方式	原理	典型方案	优点	缺点
磁约束	通过磁场来约束温度极高的等离子体的核燃料, 以使其反应	托卡马克、仿星器、反向场箍缩、磁镜等	可稳态运行发电	为长时间约束高温等离子体, 需要维持强大的磁场, 难度及成本较高
惯性约束 (激光约束)	通过激光等产生的巨大的压强, 使核燃料体积在极短的时间内变小, 密度变大, 原子核发生聚变反应	氢弹(不可控)、激光、Z 箍缩等	无材料问题, 技术成熟实现容易	能量的输出和转移还不成熟, 因此多用于国防领域
引力约束	利用天体的巨大质量产生的引力场, 将核燃料压缩至极端高温高压状态, 使轻原子核发生聚变反应	太阳	无需外部能量输入	地球上无法制造与太阳相当的质量, 无法通过引力约束实现可控核聚变

资料来源:《等离子体物理及应用领域》, 中科院等离子体所, 中山大学中法核工程与技术学院, 浙商证券研究所

聚变增益因子 Q 是直接衡量聚变反应堆品质的参量, 其定义为聚变反应产生的聚变能量输出值与外部能量输入值之比。当 $Q=1$ 时, 输出能量与输入能量达到平衡。但由于能量输入和输出过程会有能量损耗, 为了保证反应时长, 需要更高 Q 值 (至少达到 $Q=5$) 才可能在不需要外部加热的条件下实现自我维持, 达到真正的点火条件; 如果再考虑到反应堆的建设和运营等成本, 则 Q 值至少等于 10 达到经济平衡, Q 值大于 30 的时候核聚变发电站有望实现商业化。

托卡马克 (Tokamak) 装置 是目前最有前景的磁约束核聚变装置。托卡马克指的是“带有电磁线圈的环形真空室”, 它的中央是一个环形真空, 外面环绕着线圈。通电时其内部会产生巨大螺旋形磁场, 将其中的等离子体加热到很高温度, 以达到受控核聚变的目的。

图4: 实现磁约束、惯性约束有多种装置方案

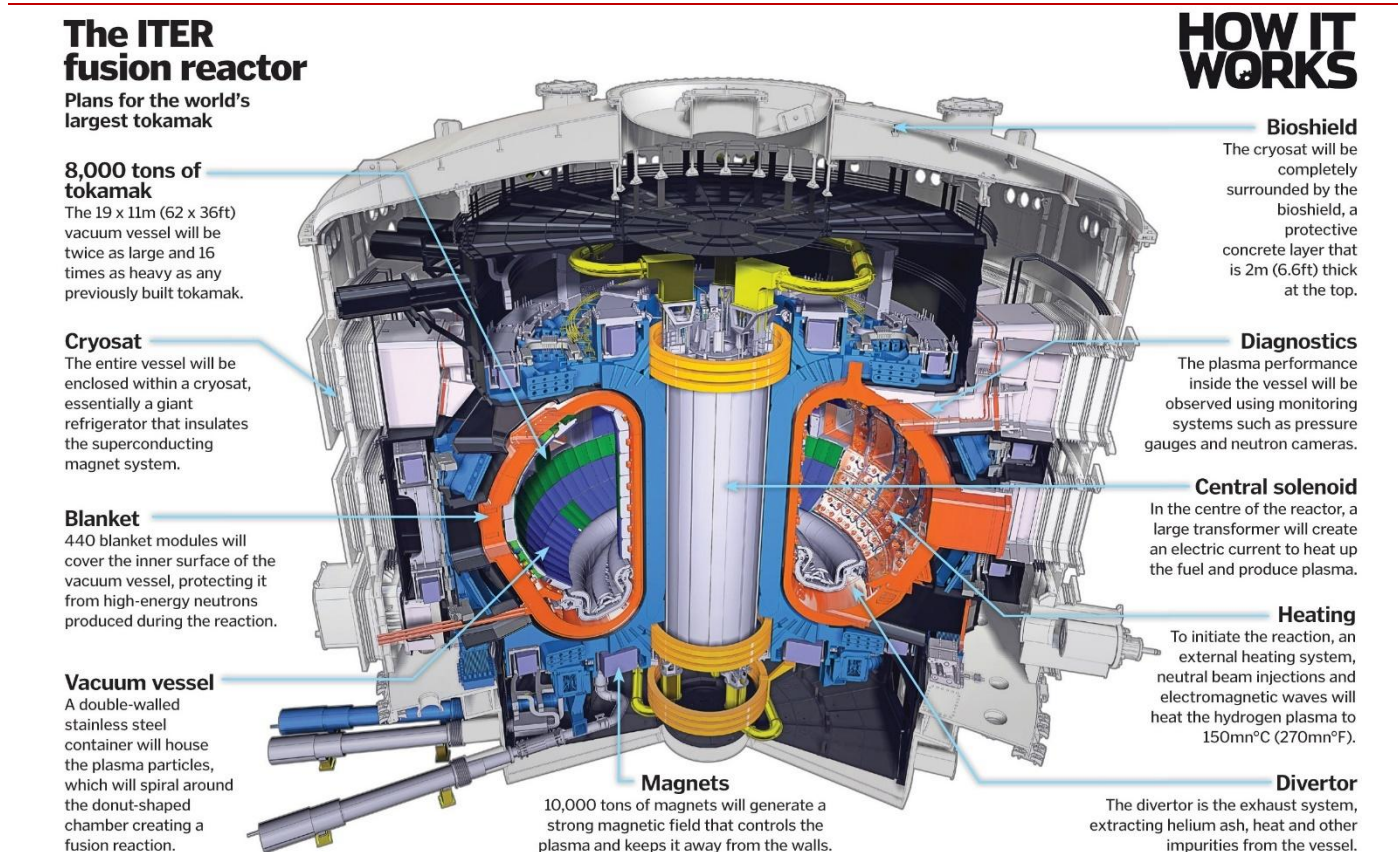


资料来源:《可控核聚变科学技术前沿问题和进展》, SciTechDaily, X 技术, 凤凰军事, 浙商证券研究所

1.3 托卡马克装置内部结构拆解：以 ITER 为例

托卡马克是一种利用磁约束实现可控核聚变的环形装置，ITER 是典型的托卡马克装置。其工作原理是：首先向环形真空室内充入一定气体，在微波等预电离手段的作用下，产生少量离子，然后通过感应或者微波、中性束注入等方式，激发并维持一个强大的环形等离子体电流。这个等离子体电流与外面的线圈电流一起产生一定的螺旋型磁场，将其中的等离子体约束住，并使其与外界尽可能地绝热。这样，等离子体才能被感应、中性束、离子回旋共振、电子回旋共振、低杂波等方式加热到上亿度的高温，以达到核聚变的目的。

图5： ITER 的内部结构主要包括磁体、真空容器、等离子屏蔽包层等

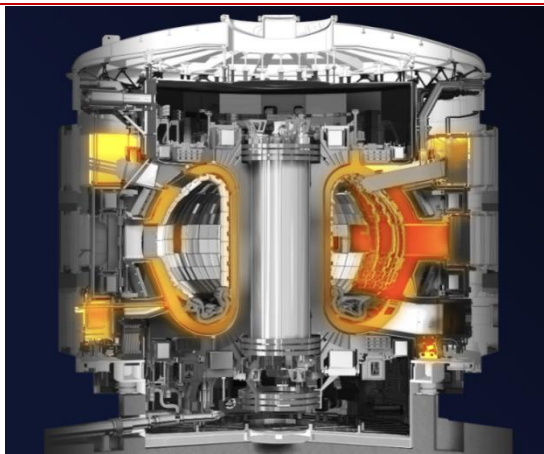


资料来源：How It Works，浙商证券研究所

托卡马克的核心由以下组件构成：

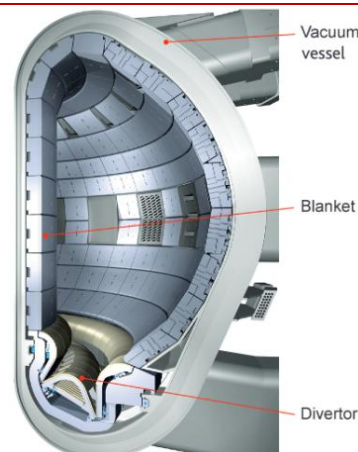
真空容器 (Vacuum Vessel)：用于维持反应堆内部的真空环境，同时保护内部组件免受外部环境的影响。真空容器内部包含多个模块，如导流板、护墙板、第一壁结构以及屏蔽插头等，其功能主要在于：1) 通过抽真空技术形成超高真空环境，防止空气分子污染等离子体并维持上亿摄氏度高温等离子体的稳定性。2) 真空室与强磁场系统配合形成磁约束空间，将高温等离子体限制在真空室内，避免其与容器壁直接接触导致烧毁，同时通过磁场调整等离子体的形状和稳定性。3) 作为核安全屏障，其双层结构（如不锈钢壳体）和填充的硼化冷却水可吸收聚变反应释放的高能中子，减少辐射对周围设备和人员的危害。**第一壁结构 (First Wall)** 第一壁结构位于屏蔽包层的外侧，直接承受来自等离子体的热负荷和粒子轰击。它由耐高温材料制成，如钨或碳化硅，用于保护真空容器不受高温影响。

图6: 真空容器所在位置示意图



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

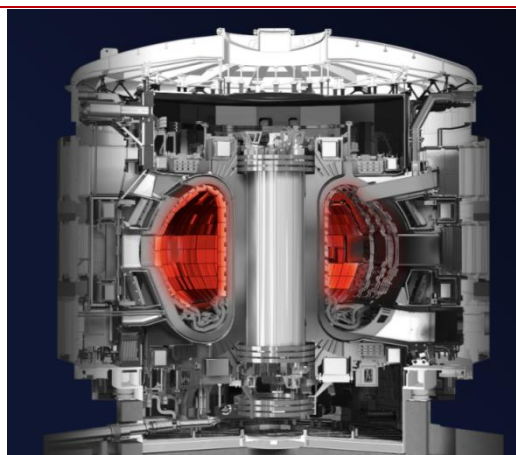
图7: 真空容器内部包含如导流板、护墙板、第一壁结构等



资料来源: IRSN, 浙商证券研究所

等离子体屏蔽包层(Blanket): 位于真空容器内部, 主要功能在于中子屏蔽与辐射防护。该包层通常由锂基材料制成, 聚变反应释放的高能中子具有强穿透性, 包层通过含锂材料与中子发生反应产生氦, 同时吸收中子能量并屏蔽辐射, 保护真空室和外围设备免受辐射损伤。

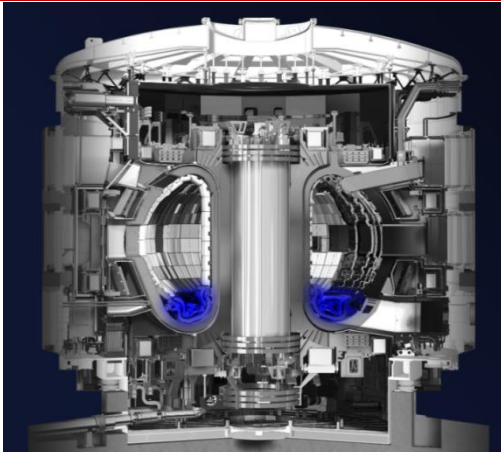
图8: 等离子体屏蔽包层所在位置示意图



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

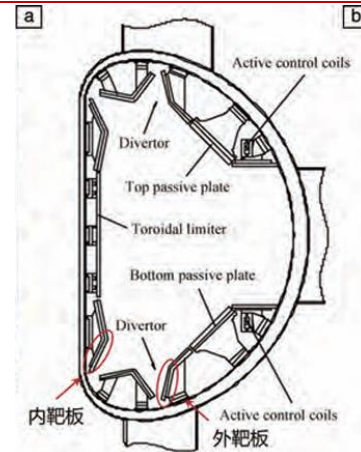
偏滤器(Divertor): 偏滤器是核聚变装置中用于管理高能粒子流和热负荷的核心部件, 其功能涵盖热管理、杂质控制、电磁力承载等多个方面。偏滤器由穹顶板、内外靶板、抽气系统和冷却系统组成, 通过形成等离子体边界并引导高能粒子流进入特定区域, 有效减少等离子体与第一壁的相互作用, 从而降低第一壁材料的侵蚀和杂质返流。

图9: 偏滤器所在位置示意图



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

图10: 偏滤器由穹顶板、内外靶板、抽气系统和冷却系统组成



资料来源:《核聚变装置偏滤器靶板材料选择与研究进展》, 浙商证券研究所

超导磁体系统: ITER 使用超导磁体来约束和控制高温等离子体, 主要磁体包括环向磁场线圈、极向磁场线圈、中央螺线管和校正场线圈。

1) PF 线圈 (Poloidal Field Coil, 极向场线圈): 用于产生极向磁场, 控制等离子体的位置、形状和电流分布, 在等离子体的产生、上升、成形和平顶各个阶段提供欧姆加热和控制等离子体位形。

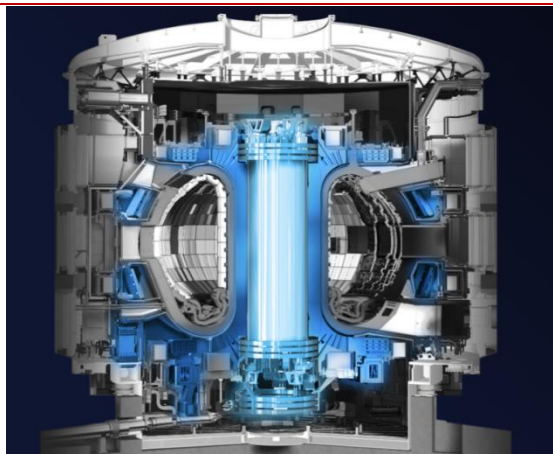
2) TF 线圈 (Toroidal Field Coil, 环向场线圈): 用于产生环向磁场, 约束等离子体的径向运动, 防止等离子体与真空室壁接触, 是 ITER 超导磁体系统的核心部件之一, 对于实现等离子体的稳定约束至关重要。ITER 的环向场线圈由 18 个 TF 线圈构成, 每条 TF 线圈由 7 根完整连续的基于 Nb_3Sn 超导线的铠装导体 (CICC) 绕制而成, 每条线圈高 17 米, 重 360 吨, 产生的磁场强度最高可达 11.8 特斯拉。

3) CS 线圈 (Central Solenoid, 中心螺线管): 用于产生垂直磁场, 激发并加热等离子体, 同时在等离子体电流的建立和维持过程中发挥关键作用。ITER 的中央螺线管由六个独立线圈组构成, 采用铌三锡 (Nb_3Sn) 超导导体的导管式电缆, 通过垂直预压缩结构固定为一体, 单根导体长度达 910 米。

4) CC 线圈 (Correction Coil, 校正场线圈): 用来补偿环向场和极向场系统由于制造与安装过程带来的不可消除的磁场误差。ITER 装置共有 18 个校正场线圈, 其中底部、侧线圈和顶部线圈各 6 个。ITER 校正场线圈由 NbTi 超导导体绕制而成, 匝工作电流 10kA, 最高磁场约 5 特斯拉。

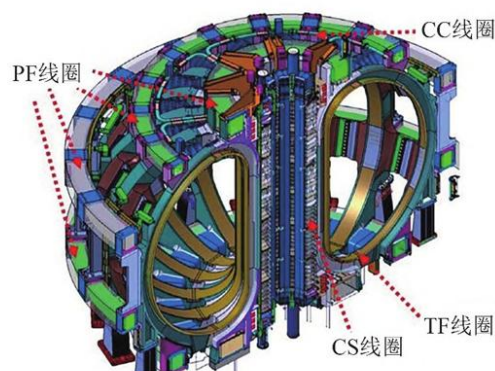
ITER 磁体主要使用低温超导材料, 而近年来高温超导材料亦逐渐展现出巨大应用潜力。 ITER 的磁体通过液氮冷却至 4K 的极低温度, 以实现超导状态。ITER 工程推动了低温超导材料性能和产业化水平的不断提升, 目前以 NbTi 和 Nb_3Sn 为代表的低温超导材料凭借成熟的加工工艺和成本优势, 仍是商业化应用的主流选择。但近年来以稀土钡铜氧 (rare earth barium copper oxide, REBCO) 为代表的高温超导材料, 在工业化生产能力和性能方面均获得显著提升, REBCO 材料具有更高的临界温度、热稳定性以及强磁场下的载流能力, 展现出巨大的应用潜力。目前, CFS、TE、能量奇点等商业聚变公司正致力于将高温超导磁体技术应用于未来商用可控聚变示范堆。

图11: 超导磁体系统超导磁体系统所在位置示意图



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

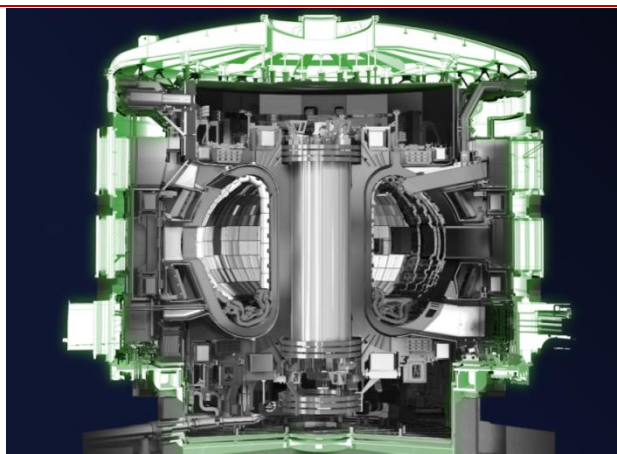
图12: 托卡马克装置线圈主要包括 CS、PF、TF 线圈



资料来源:《磁约束可控核聚变装置的磁体系统综述》, 浙商证券研究所

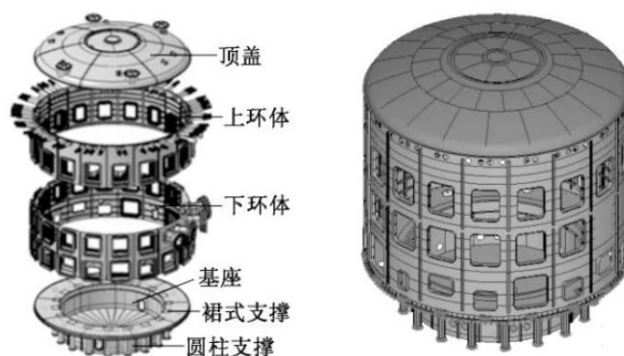
低温恒温器 (Cryostat): 低温恒温器功能包括维持超导磁体极端低温环境、提供真空隔离、辐射防护等。低温恒温器由不锈钢制成, 重达 3850 吨, 其基座部分 (1250 吨) 是 ITER 最重的部件。整体来看, 真空杜瓦高 30 米、直径 30 米, 体积达 16000m³, 从上到下主要由顶盖、上环体、下环体和基座这 4 大部分组成, 各部分通过焊接或螺栓连接成一个整体。托卡马克的环向场线圈 (TF) 和极向场线圈 (PF) 需在 -269℃ (4.2K) 的液氦环境中运行, 以保持超导特性, 低温恒温器通过多层真空绝热结构隔绝外界热量, 将磁体系统与室温环境隔离, 确保超导线圈的稳定运行; ITER 的真空容器与低温恒温器共同构成双层真空屏障, 确保等离子体纯度; 除了为系统运行提供稳定的真空环境之外, 还要在氦气泄漏以及等离子体破裂等极端情况下保证整个装置的安全。

图13: 低温恒温器所在位置示意图



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

图14: 低温恒温器主要由顶盖、上环体、下环体和基座这 4 大部分组成



资料来源: 真空聚焦, 浙商证券研究所

2 技术奇点临近：当前已进入工程可行性验证阶段，Q 值突破有望引爆商业化革命

2.1 国际：2050 年为建成并投入运行 DEMO 的关键时间节点

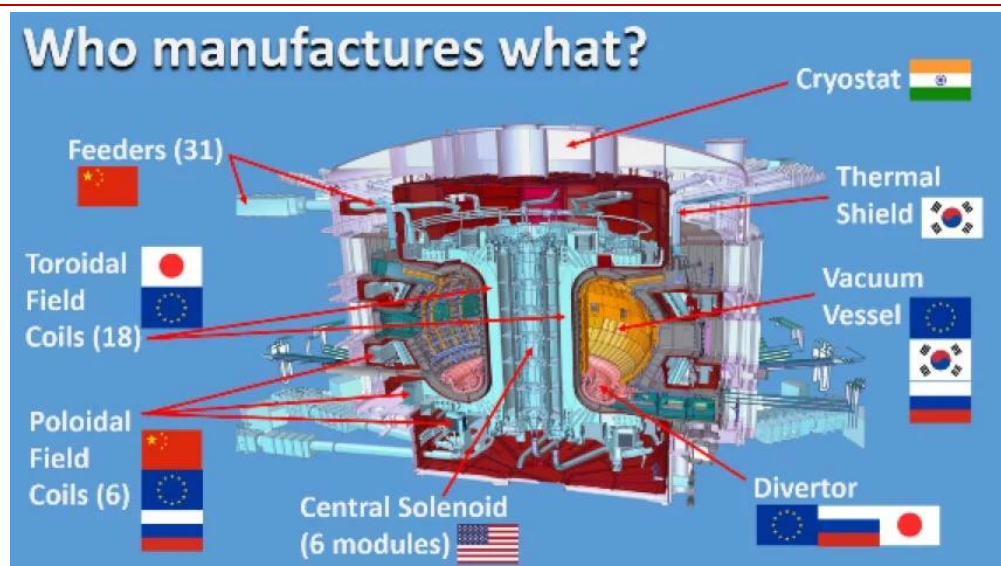
ITER（国际热核聚变实验堆）为全球范围国际科技合作项目，建设目的为试验和演示聚变电站的关键技术。ITER 装置设计总聚变功率达到 $5 \times 10^5 \text{kW}$ ，是一个电站规模的实验反应堆。它的作用和任务是利用具有电站规模的实验堆证明氘、氚等离子体的受控点火和持续燃烧，验证聚变反应堆系统的工程可行性，综合测试聚变发电所需的高热流和核部件，实现稳态运行，从而为建造聚变能示范电站奠定坚实的科学基础和必要的技术基础。ITER 是目前全球规模最大、影响最深远的国际科技合作项目之一，参与方包括欧盟、中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国。欧盟负责建设成本的最大部分（45.6%），其余的六国各负责 9.1%。

表2: ITER 参与方包括欧盟、中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国

ITER 核心组件	主要构成	参与方
环向场线圈	18 个 TF 线圈	欧盟负责 10 个 TF 线圈、日本负责 8 个 TF 线圈和 1 个备用线圈、中国、韩国和俄罗斯提供组件、40 家公司参与制造
极向场线圈	6 个 PF 线圈	欧盟负责 4 个 PF 线圈、俄罗斯负责 1 个 PF 线圈、中国和欧盟联合制造 1 个 PF 线圈
中央螺线管	6 个独立线圈组	美国
校正场线圈	18 个 CC 线圈	中国
真空容器	9 个扇段、端口短管	欧盟负责 5 个扇段、韩国负责 4 个扇段、俄罗斯提供端口短管
低温恒温器	底座、下圆柱体、上圆柱体和顶盖	印度
磁体馈线系统	31 套馈线系统	中国
偏滤器	内外侧靶板、穹顶	日本负责外侧靶板、欧洲负责内侧靶板、俄罗斯负责穹顶
热屏蔽层	真空容器热屏蔽 (VVTs)、低温容器热屏蔽 (CTS)	韩国

资料来源: F4E, SciTechDaily, iterchina, kfe, 住友重工, 浙商证券研究所

图15: ITER 参与方包括欧盟、中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国



资料来源: SciTechDaily, 浙商证券研究所

ITER 计划在 2035 年实现氘-氘聚变运行, 随后实现全磁能和等离子体运行。ITER 的基础建设开始于 2013 年, 原计划于 2025 年完成建设并正式开始等离子体试验, 而根据 ITER 理事会最新版项目时间表, ITER 装置建设将推迟, 在 2035 年实现氘-氘聚变运行, 随后实现全磁能和等离子体运行。目前, ITER 所有环向场线圈、极向场线圈的制造已经完成。

图16: ITER 计划在 2034 年开始开展完整研究活动



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

目前,国际磁约束聚变界的主要研究内容是与 ITER 装置相关的各类物理与技术问题。国际上,美国、欧盟、日本、韩国等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,在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。

美国: 美国政府高度重视聚变能研究,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。美国系统部署聚变中子源 (FPNS)、材料-等离子辐照实验 (MPEX) 装置、热排出与约束研究的托卡马克 (EXCITE) 等科学设施;普林斯顿等离子物理实验室 (PPPL) 依托 TFTR 装置开展过氘氘实验,聚变功率约 10.7MW;还建设了球形托卡马克设施 NSTX-U,探索新型聚变堆途径。美国能源部加大力量多次组织开展聚变能开发路线评估,制定聚变路线,2040 年建成投运示范堆。

DIII-D 是美国通用原子能公司 (GA) 运行的美国最大托卡马克装置,依托装置灵活的特点,发展了最先进的等离子体控制、运行、加热、数值模拟,开展面向 ITER 乃至未来聚变堆的探索实验研究,提出了引领聚变堆等离子体的研究方向。2024 年 12 月 5 日,IE 报道称研究人员成功在 DIII-D 上实现两大关键性进展:一是通过“邻近控制”算法成功在超出 Greenwald 密度上限 20% 的条件下实现等离子体的高质量约束;二是在等离子体的边缘创造了能够耐更高密度和温度的“超级 H 模”聚变等离子体。

图17: DIII-D 在等离子体的边缘创造了能够耐更高密度和温度的“超级 H 模”聚变等离子体



资料来源: ITER, 浙商证券研究所

NIF 是世界最大的激光器,由美国加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)研制。2022 年 12 月 13 日, NIF 首次在可控核聚变实验中实现核聚变反应的净能量增益,在人类历史上首次达到了聚变产能大于驱动聚变发生的激光能量这一“点火”里程碑。2023 年 10 月, NIF 成功点火次数增至四次。

图18: NIF 是世界最大的激光器, 由美国加利福尼亚州 LLNL 研制。



资料来源: 中国核技术网, 浙商证券研究所

欧盟: 欧盟聚变路线紧密关联 ITER 计划, 计划在 ITER 实现氘氚运行后, 2040 年开始建造示范堆, 并于 2050 年建成。依托 JET、ITER 等国际项目欧盟开展了聚变研究, 经验丰富。JET 装置大规模开展 3 轮氘氚实验, 2023 年创下了聚变能量 69MJ 的世界纪录; 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。同时，欧盟也在积极部署核聚变研究科研设施，支持各成员国装置（ASDEX-U、TCV、WEST 等）的运行、升级，进一步丰富等离子体物理研究经验。

JET，又称欧洲联合环，位于英国牛津附近的卡勒姆聚变能源研究中心（CCFE），由英国原子能管理局（UKAEA）运营。JET 在 1983 年正式投入运行，2023 年退役。退役前曾是全球规模最大、功率最强的在运托卡马克研究装置。1991 年 11 月，JET 进行了世界首次氘氘实验，反应产生了 1.7MW 的聚变功率，证实了受控核聚变作为先进能源的科学可行性。2023 年 12 月 JET 最后一次实验中，JET 使用 0.21 毫克 D-T 燃料在 5 秒产生 69MJ 的聚变功率，再次打破历史记录。

图19： JET 创下了聚变能量 69MJ 的世界纪录



资料来源：ITER，浙商证券研究所

WEST 装置是法国的超导托卡马克装置，由位于普罗旺斯卡达拉舍的法国原子能委员会（CEA）负责运行。其主要的研究目标为：为 ITER 解决主动冷却、全钨偏滤器的运行技术问题；掌握金属第一壁条件下等离子体壁平衡时间尺度内的等离子体运行方案。

图20: WEST 装置为 ITER 验证全钨偏滤器与主动冷却技术方案



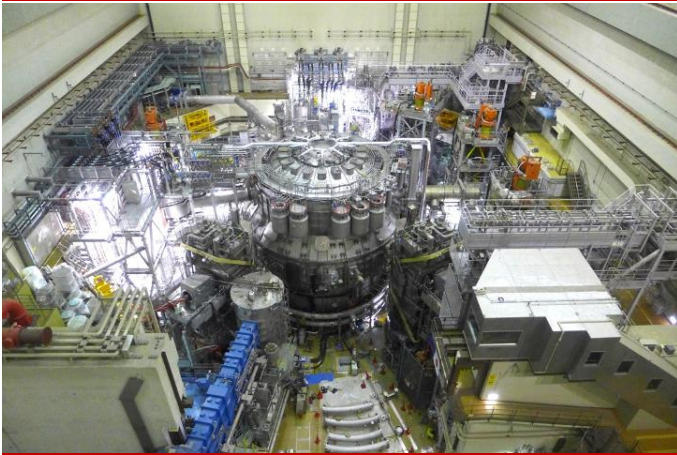
资料来源: ITER, 浙商证券研究所

日本: 日本聚变技术路线以托卡马克为主,通过 ITER 等国际合作项目与欧洲紧密合作,工程技术雄厚,其聚变装置 JT-60U 具有国际上最高的聚变三乘积 (1.5×10^{21})。日本通过 BA 计划与欧盟紧密合作,以 JT-60SA 为载体,掌握聚变堆的等离子体物理和技术。在仿星器领域,日本还建造了大型螺旋装置 LHD,开展技术研究。日本的聚变能发展思路是以 ITER 和 JT-60SA 为载体,研究和掌握下一代聚变堆的等离子体物理和技术,通过 BA 计划以及国内部署的其他设施研究解决下一代聚变堆的核工程技术问题。

JT-60SA 是目前国际上规模最大的全超导托卡马克装置,其前身是日本的 JT-60U。JT-60SA 装置是欧盟和日本签署的科学合作协议“更广泛方法 (BA) 协议”的一部分,主要任务为:支持 ITER 项目的开展,对 ITER 关键物理进行补充和解决聚变堆 (DEMO) 所面临的工程问题。JT-60SA 装置将追求实现完全无感应电流驱动、稳态运行模式,以及超过无壁磁流体不稳定性 (MHD) 极限下的高比压运行模式。

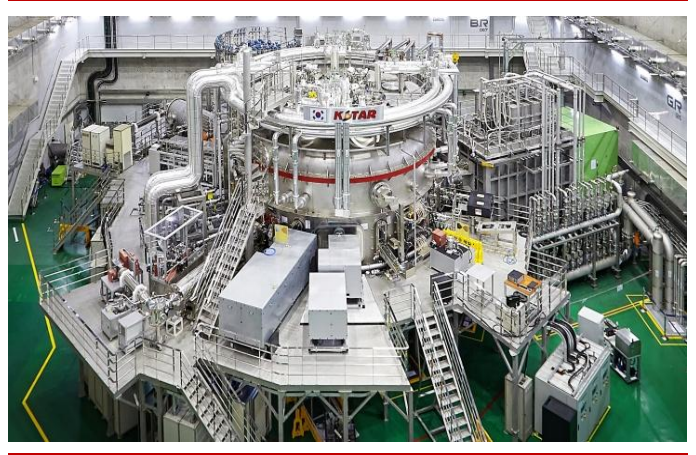
韩国: 韩国依托全超导聚变装置 (KSTAR) 开展 ITER 前的等离子体高参数稳态运行研究,计划 2040 年前后建成聚变示范堆。韩国的聚变能计划是基于其大型超导托卡马克装置 KSTAR 过渡到 ITER,推动 DEMO 到 2030 年建成,聚变电站于 2040 年建造。

图21: JT-60SA 装置探索无感应电流驱动与稳态运行模式



资料来源: QST, 浙商证券研究所

图22: KSTAR 开展等离子体高参数稳态运行研究



资料来源: 中国核电网, 浙商证券研究所

2.2 国内: 2030's 年建成 CFETR 工程堆, 2050's 年建成 PFPP 原型电站

中国自 20 世纪 90 年代开始托卡马克研究, 先后建成运行合肥超环 (HT-7)、中国环流器二号 (HL-2A) 及东方超环 (EAST) 等装置。2006 年中国正式加入 ITER 项目, 负责完成了 ITER 装置多个重要部件的设计、制造与装配任务。我国根据自己的国情, 制定了中国磁约束聚变能发展路线: 实验装置-实验堆-工程堆、示范堆-商业堆。

中国磁约束聚变能的开发将分为 3 个阶段:

第一阶段: 推动 CFETR 立项并开始装置建设, 形成聚变技术实践的基础条件;

第二阶段: 计划 2030's 年左右完成 CFETR 建设, 调试装置运行并进行物理实验, 逐步验证聚变能源的可行性与稳定性;

第三阶段: 在 CFETR 装置上进行磁约束聚变能源的难点技术探索, 计划 2050's 年前后建成商业聚变示范电站, 实现磁约束聚变能源的商业化应用。

图23: 我国可控核聚变计划 2030's 年建成 CFETR 工程堆, 2050's 年建成原型电站



资料来源: 《Overview of CFETR Physics Design》, 浙商证券研究所

目前,我国形成了以专业院所(核工业西南物理研究院和中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所)为主,多家高校和研究单位共同参与的核聚变技术开发格局。西南物理研究院建造的“环流(HL)”系列装置和中科院等离子所建造的“HT”系列装置为我国核聚变领域在各种技术路线上积累了丰富的经验,其所对应的最新装置“环流三号”和“东方超环”在今年均取得重大进展突破。

表3: 我国形成了以专业院所为主,多家高校和研究单位共同参与的核聚变技术开发格局

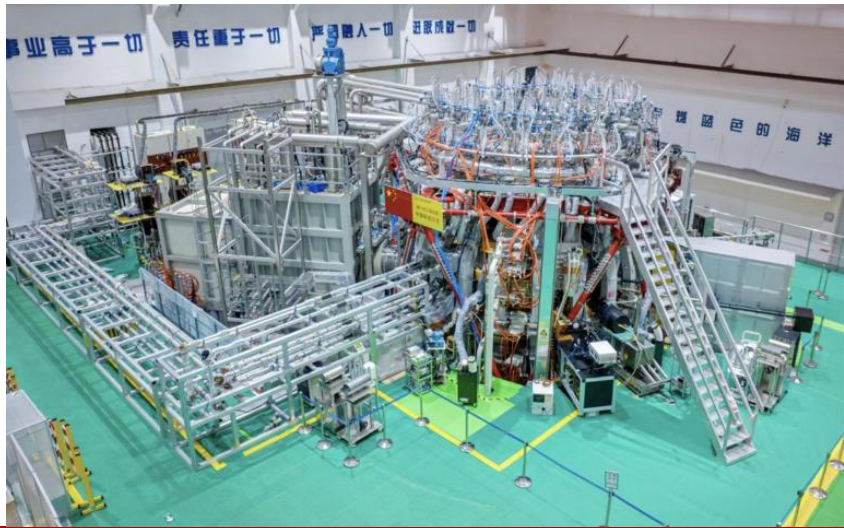
项目名称	所在地	负责方	项目介绍	规划&进展
环流三号(HL-3)	四川成都	核工业西南物理研究院	核工业西南物理研究院自主设计、建造的中国新一代人造太阳,目标是验证聚变堆物理与工程相关技术的可行性	2025年3月28日,环流三号在最新实验中首次实现原子核温度1.17亿度、电子温度1.6亿度的参数水平,标志着中国可控核聚变研究进入燃烧实验阶段。
东方超环(EAST)	安徽合肥	中科院合肥研究院等离子体所	中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所设计研制的国际首个全超导托卡马克装置,旨在为实验堆设计与建设提供科学依据,并为ITER项目的建设提供直接经验	2025年1月20日,EAST成功实现超1亿摄氏度、1066秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行,验证了聚变堆高约束模稳态运行的可行性。
BEST	安徽合肥	中科院合肥研究院等离子体所	全超导托卡马克核聚变实验装置(EAST)的后续项目	2023年12月,中科院等离子体所BEST部分部件开始招标;BEST装置将使用真实的原料和氙进行可控核聚变反应,计划在2027年建设完成,并在全球首次演示聚变能发电。
CRAFT	安徽合肥	中科院合肥研究院等离子体所	为CFETR研究关键技术及搭建综合性研究平台	CRAFT项目目标2025年底完全建成。截至2024年5月,CRAFT项目总体进度已达70%,主体工程已完成116项关键里程碑当中的76项,项目从子系统的实验室研发测试阶段进入关键部件的研制和现场集成及调试阶段。
星火一号	江西南昌	中核集团	聚变-裂变混合堆	计划在2025年完成核聚变混合堆实验技术验证;2029年首次并网发电。

资料来源:中核集团,《磁约束核聚变托卡马克装置研究进展与展望》,中国科学院,安徽省科技厅,中国能源研究会核能专业委员会,界面新闻,浙商证券研究所

环流三号(HL-3)装置旨在为ITER及未来聚变堆的关键科学和技术问题的解决提供研究平台与支撑,重点开展了ITER相关运行模式研究、高性能等离子体运行及相关物理(高密度、高比压、高自举电流)研究、先进偏滤器概念设计与验证、高热负荷材料与部件测试以及聚变等离子体关键物理研究。

2025年3月28日,环流三号在最新实验中首次实现原子核温度1.17亿度、电子温度1.6亿度的参数水平,综合参数大幅跃升,相关技术指标达到国际前列,创造了我国核聚变研究多项新纪录,标志着中国可控核聚变研究进入燃烧实验阶段。

图24: 环流三号在最新实验中首次实现原子核温度 1.17 亿度、电子温度 1.6 亿度的参数水平



资料来源：中核集团，浙商证券研究所

东方超环（EAST）是由中国科学院合肥物质研究院等离子体物理研究所设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，2006 年建成并实现首次放电。该装置主要以射频（RF）加热主导，能够实现低动量功率注入，为 ITER 相关研究提供支撑。该装置旨在为实验堆设计与建设提供科学依据，并为 ITER 项目的建设提供直接经验，进而推动等离子体物理学及相关学科与技术的发展。主要研究方向包括全超导托卡马克稳态运行所面临的工程物理学挑战，托卡马克稳态运行的实时控制与安全操作对策，及相关辅助加热物理、等离子体约束与输运特性研究等，并在全金属壁环境及稳态偏滤器运行条件下开展等离子体与壁相互作用研究，为未来聚变反应堆研发辅助加热、诊断与控制技术。

2025 年 1 月 20 日，EAST 成功实现超 1 亿摄氏度、1066 秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行。亿度千秒量级稳态高约束模的实现充分验证了聚变堆高约束模稳态运行的可行性，对聚变堆的建设和运行具有重大的意义。

图25: 东方超环成功实现超 1 亿摄氏度、1066 秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行



资料来源：中国科学院，浙商证券研究所

BEST 装置是全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）的后续项目，将在第一代 EAST 装置的基础上，首次演示聚变能发电，并有望率先建成世界首个紧凑型聚变能实验装置。BEST 装置将使用真实的原料氘和氚进行可控核聚变反应，计划在 2027 年建设完成。

CFETR（中国聚变工程试验堆）是我国继 ITER 之后桥接核聚变示范堆（DEMO）的一个大型试验平台，对未来核聚变堆主要部件进行工程试验，为设计和建造核聚变示范堆提供技术基础。

聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）是为 CFETR 研究关键技术及搭建综合性研究平台。截至 2024 年 5 月，CRAFT 项目总体进度已达 70%，主体工程已完成 116 项关键里程碑当中的 76 项，项目从子系统的实验室研发测试阶段进入关键部件的研制和现场集成及调试阶段。2024 年 12 月 29 日，CRAFT 子系统“聚变工程堆中心螺管系统”已完成首轮测试。

图26： 聚变堆主机关键系统综合研究设施正在加快建设



资料来源：中科院物质科学研究所，浙商证券研究所

星火一号是由中核集团牵头，总投资超 200 亿元建设的聚变-裂变混合堆项目。星火一号的技术目标为：Q 值（聚变能量增益因子）大于 30，实现连续发电功率 100MW。计划在 2025 年完成核聚变混合堆实验技术验证，2029 年首次并网发电。

国内其他装置：清华大学中国联合球形托卡马克（Sino-UNited Spherical Tokamak, SUNIST）装置 2002 年建成，并实现首次等离子体放电，侧重开展无感电流驱动、等离子体不稳定性，以及破裂与磁重联等研究。新奥能源研究院的玄龙-50（EXL-50）装置于 2019 建成，在无中心螺线管 ECRH 电流驱动实验方面取得了进展。中国科学技术大学的科大环实验装置（The Keda Torus eXperiment, KTX）是国内唯一运行的反场箍缩装置，可实现超低 q 放电、常规放电和反向场放电运行。

2.3 民营企业：产业化进展降低行业门槛，民营企业陆续入场

民营企业积极开展未来发展路线及聚变产业的相关部署。随着相关材料和技术的突破，尤其是新型高温超导材料的研发与产业化不断取得进展，紧凑型核聚变装置成为现实。聚变装置呈现出体积更小、建造更快、成本更低的发展态势，民营企业进入核聚变领域的门槛随之降低。根据 FIA 发布的 2024 年聚变能产业报告，截至 2024 年 7 月，核聚变行业累计融资规模 71 亿美元，较 2023 年增长 14.5%。其中，Xcimer Energy 新增融资 1 亿美元，SHINE Technologies 新增融资 9000 万美元。聚变商业公司的投资者呈现多元化特点，包括个人投资者（比尔·盖茨、杰夫·贝索斯等）、国家主权财富基金（Kuwait Investment Authority、淡马锡控股等）、能源企业（雪佛龙技术风险投资、意大利国家石油公司、挪威国家石油公司等）以及诸多国际知名公司（谷歌、软银、丰田、尼康、索尼、米哈游等）。

表4：民营企业积极开展未来发展路线及聚变产业的相关部署

国家	公司名称	投资金额	目标	技术方案	投资方
美国	Helion Energy	>22 亿美元	2028 年对赌发电	线型：脉冲场反位形	Sam Altman、软银愿景基金二期、光速创投、Mithril Capital(Peter Thiel)、Capricorn Investment Group、Dustin Moskovitz、Nucor
美国	Commonwealth Fusion Systems	>20 亿美元	2030s 发电	高温超导紧凑型托卡马克	比尔·盖茨、索罗斯、老虎环球基金、Alphabet、Marc Benioff、淡马锡、Equinor
美国	Tri-Alpha Energy, Inc	>12 亿美元	2035 年并网发电	线型：场反位形+磁镜	保罗·艾伦、高盛、雪佛龙、住友商事美国公司、Reimagined Ventures、洛克菲勒家族
加拿大	General Fusion	>3 亿美元	2050 年前发电	紧凑型，压缩点火	杰夫·贝索斯、微软、Thistledown Capital(Tobias Lütke)、加拿大政府、Chrysalix Venture Capital
欧洲	Tokamak Energy	2.5 亿美元	2030 年并网发电	托卡马克类	East X Ventures、Lingotto Investment Management、Furukawa Electric、British Patient Capital、BW Group、Sabanci Climate Ventures

资料来源：云岫资本，浙商证券研究所

CFS(Commonwealth Fusion Systems)是从麻省理工学院独立出来的核聚变初创企业，成立于 2018 年。CFS 和美国麻省理工学院等离子体科学与聚变中心（PSFC）开发的 SPARC 热核聚变反应堆通过提高电流强度产生更强的磁场，从而制造出更小体积和更经济的托卡马克核聚变装置。CFS 通过 SPARC 的建造和试验，在材料、计算机建模和控制系统等领域取得了关键突破，计划在 2025 年建造一个名为 ARC 的原型反应堆，并在 21 世纪 30 年代建造一座商业核聚变发电厂。

图27: CFS 计划建造其第一座 ARC 聚变发电厂



资料来源: CFS 官网, 浙商证券研究所

Helion Energy 于 2013 年成立, 采用了磁约束聚变和惯性约束聚变相结合的技术方案。技术路径是“脉冲不点火聚变”, 利用一个杠铃形状等离子体加速器装置, 通过强大磁场将气体混合物压缩加热至原子分裂的程度并在设备的两端形成等离子体。磁场驱动等离子体以 161 万 km/h 的速度相互撞击并进一步压缩, 从而产生超过 1 亿℃的高温, 引发核聚变反应并进行发电。

TAE (Tri-Alpha Energy) 成立于 1998 年, 总部位于美国加利福尼亚州, 其专注于核聚变发电和粒子加速器技术。TAE 利用氢与硼发生核聚变反应发电, 与氘氚聚变不同, 氢硼聚变不会出现放射性的中子, 从而减少了辐射影响。此外, TAE 加强人工智能和机器学习在核聚变控制系统的应用, 提高了等离子体稳定性实验的效率。

政企合作成为新趋势。 鉴于核聚变的研究开发需要大量资金和技术, 政企合作成为聚变领域的一个新趋势。2024 年 6 月美国能源部与八家公司签署合同以提供综合试验聚变电厂设计; 德国政府的“Fusion 2040”计划将直接投资于私营公司; 韩国通过公私合作模式推进聚变堆技术, 并建立一个由私营部门主导的工业聚变能生态系统; 此外, 日本、英国和欧盟政府也均有与私营企业合作的相关计划。

2.4 评价聚变堆性能的指标: 能量平衡、氦自持、可利用率、耐辐照能力

可控核聚变评价指标中, 能量平衡、氦自持、可利用率、耐辐照能力 4 个指标最为关键, 可用于各种聚变堆的技术性能差异比较。1) 能量平衡指核聚变反应中输出能量与输入能量的比值, 通常用 Q 值表示。当 $Q>1$ 时, 反应产生的能量超过维持反应所需的输入能量, 标志着技术可行性; 2) 氦自持: 氦是稀缺资源, 世界上现存的氦总量不足 30kg。聚变堆要实现商业应用, 必须实现氦自持, 即增殖量超过消耗量。3) 可利用率: 反应堆稳定运行时间占总运行时间的比例, 反映工程可靠性。4) 耐辐照能力: 材料在中子辐照下的损伤程度, 通常以离位损伤深度 (dpa) 衡量。

国际公认聚变能源开发 4 个重要节点, 分别对应当前水平-ITER 水平-商业示范堆水平-商业堆水平。能量平衡、氦自持、可利用率、耐辐照能力 4 个指标最为关键, 可用于各种

聚变堆的技术性能差异比较。聚变能源发展需要跨越4个里程碑节点，节点1为当前的领域最优水平；节点2为ITER水平；节点3为聚变商业示范堆（DEMO）水平；节点4为第一代商业堆水平。

表5：聚变能源开发4个重要节点分别对应：当前水平-ITER水平-DEMO水平-商业堆水平

评价指标	节点1	节点2	节点3	节点4
能量平衡	$Q_{Sci}=1$	$Q_{Eng}=1$	$Q_{Eng}=5$	$Q_{Eng}=10$
氚自持	数值模拟	实验模块	扇形切片或全堆	全堆
可利用率	<1%	25%	50%	70%
耐辐照能力	-	3-5	50	100

资料来源：《聚变能源研究态势及展望》，浙商证券研究所

3 2031-2035 年全球核聚变设备新增规模有望达万亿

3.1 产业链及价值量拆分：设备价值量占比较高

产业链上游主要是各类原料供应：包括金属钨、铜等第一壁材料，各类有色金属等高温超导带材原料以及氘氚燃料。这些原材料是建造核聚变装置的基础，钨和铜作为第一壁与偏滤器的主体材料，需承受高达每秒数兆瓦的热负荷及中子辐照；超导材料中，低温超导材料（如 Nb_3Sn ）仍是 ITER 等传统装置的主流选择，但高温超导带材（如 $ReBCO$ ）因可在更高温度下维持强磁场，正在被一些商业聚变公司所试验应用；重水、 $Li6$ 则是实现核聚变反应的必要原料。

中游主要为各类设备：包括磁体、偏滤器、第一壁、磁体支撑等核聚变主机设备，以及压力容器、蒸汽发生器、汽轮机、发电机、各类泵阀等其他设备。这些设备的设计与制造需要极高的精度与可靠性，以保证核聚变装置能够安全稳定运行。其中超导磁体占总投资成本 20-30%，是装置运行的核心部件。

下游主要为核电站运营：是技术成果转化与商业化应用的核心环节，用于商业发电。

图28: 核聚变产业链包括上游原材料、中游设备及下游核电应用



资料来源: 各公司官网, 国光电气招股书, 前瞻产业研究院, 浙商证券研究所

参考 FIRE, 聚变实验装置建设成本在百亿人民币, 其中设备费用(主机、辅助系统、电力系统)占比约 55%。根据 FIRE 官方数据, 在一个核聚变实验装置成本中, 主机占比约 30% (包括磁体 17%、包层 7%、真空室 4%等), 辅助系统占比约 10% (包括加热系统 7%、真空系统 1%、气体注入系统 1%、燃料循环系统), 电力系统占比约 15%, 场地基础设施占比约 15%, 其余项目支持、装配、运维等占比约 30%。

图29: FIRE 项目成本拆解: 设备费用占比约 55%

Cost Estimate of FIRE Preconceptual Design (FY 2002\$)

Greenfield Site Cost Estimate		Estimated Cost	Conting'y	Total with Conting'y	
1 - Fusion Core Systems			\$279,524	\$71,279	\$350,803
1.1	Plasma Facing Components	\$66,977			
1.2	Vacuum Vessel & In-Vessel Structures	\$42,354			
1.3	Toroidal Field Magnets and Structures	\$123,121			
1.4	Poloidal Field Magnets and Structures	\$35,732			
1.5	Cryostat	\$1,919			
1.6	Tokamak Support Structure	\$9,420			
2 - Auxiliary Systems			\$89,789	\$22,896	\$112,685
2.1	Gas & Pellet Injection Fueling Systems	\$4,769			
2.2	Vacuum Pumping System	\$12,645			
2.3	Fuel Recovery and Processing Systems	\$4,089			
2.4	RF Heating/Current Drive Systems	\$68,286			
3 - Diagnostic Systems			\$21,455	\$5,471	\$26,926
4 - Power Systems			\$153,504	\$39,144	\$192,648
5 - Central Instrumentation & Controls			\$18,337	\$4,676	\$23,013
6 - Site and Facilities			\$143,882	\$36,690	\$180,572
7 - Machine Assembly & Remote Maintenance			\$80,375	\$20,496	\$100,871
8 - Project Support & Oversight			\$118,378	\$30,186	\$148,564
9 - Preparations for Operations			\$40,351	\$10,290	\$50,641
10 - R&D During Construction			\$19,328	\$4,929	\$24,256
Cost Estimate of Preconceptual Design (FY 2002\$)			\$945,595	\$241,127	\$1,186,721

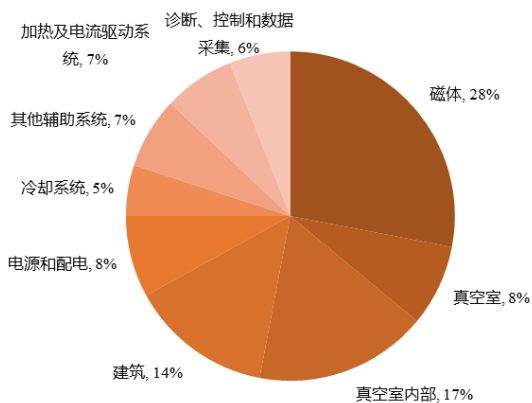
TPC w/o contingency \$946M

TPC with contingency \$1.200M

资料来源: PPPL 官网, 浙商证券研究所

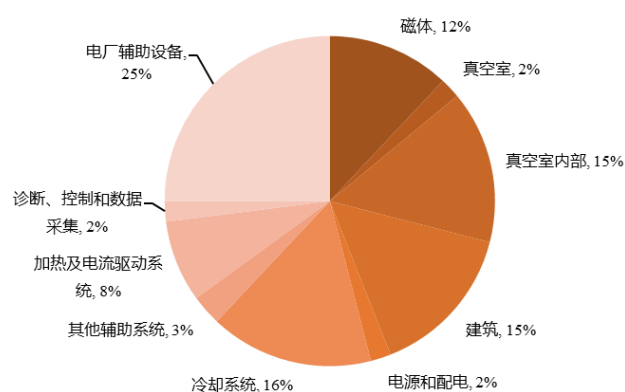
ITER（工程堆）、DEMO（商业示范堆）的设备费用（除建筑外建设费用）占比分别在 86%、85%，ITER 项目建设成本在千亿人民币。根据 ITER 官方数据，其项目预计建设费用约为 200 亿欧元（220 亿美元），其中主机（包括磁体、真空室、包层等）占比 53%，电源、建筑占比 22%，其他辅助系统占比 25%；DEMO 商业示范堆中主机成本占比为 29%，电厂辅机设备占比 25%，电源、建筑占比 17%，其他辅助系统占比 29%。

图30： ITER 工程验证堆成本中设备费用占比 86%



资料来源：《Superconductors for fusion:a roadmap》，浙商证券研究所

图31： DEMO 商业示范堆成本中设备费用占比 85%



资料来源：《Superconductors for fusion:a roadmap》，浙商证券研究所

3.2 空间测算：2031-2035 年全球可控核聚变设备新增规模有望达万亿

- (1) 商业堆：根据 FIA 对 39 家核聚变私营公司的问卷统计，预期 2025 年-2030 年完成核聚变商业堆验证的公司有 5 家，2031-2035 年有 13 家，2036-2040 年有 13 家，2041-2045 年有 6 家。
- (2) 实验堆：考虑到商业堆验证前需要进行实验堆验证，参考 CFS 聚变实验堆 SPARC 相比聚变商业堆 ARC 预计投运时间提前 5 年，我们假设：2021-2025 年完成核聚变实验堆验证的公司数量为 5 家，2026-2030 年数量为 13 家，2031-2035 年数量为 13 家，2036-2040 年数量为 6 家。
- (3) 市场规模：测算的聚变实验堆设备总空间 2 千亿元、聚变商业堆设备总空间 3 万亿元按比例拆分，则全球核聚变设备市场年均新增规模将从 2021-2025 年的 254 亿元增长至 2031-2035 年的 10860 亿元，CAGR 约 23%。

表6：2035 年全球可控核聚变新增规模有望达到万亿

	2021-2025 年	2026-2030 年	2031-2035 年
完成商业堆验证公司数量	0	6	13
占比	-	15%	33%
商业堆设备总空间	商业堆总需求 36 台*单堆成本 1000 亿元*设备占比 85%=30600 亿元		
商业堆设备新增空间（亿元）	-	4708	10200
完成实验堆验证公司数量	5	13	13
占比	13%	33%	33%
实验堆设备总空间	商业堆总需求 36 台*单堆成本 100 亿元*设备占比 55%=1980 亿元		
实验堆设备新增空间（亿元）	254	660	660
全球核聚变设备市场新增规模（亿元）	254	5368	10860

资料来源：FIA，浙商证券研究所

4 相关公司：前期重点关注受益 ITER 项目交付及国内新实验装置建设的核心设备供应商

可控核聚变目前处于工程验证阶段，前期重点关注受益 ITER 项目交付及国内新实验装置建设的核心设备供应商：

上游材料：西部超导（低温超导带材、磁体）、永鼎股份（子公司东部超导，高温超导带材）、精达股份（参股上海超导，高温超导带材）。**中游设备：**联创光电（高温超导磁体）、国光电气（偏滤器、包层第一壁板、泵阀等）、安泰科技（偏滤器）、合锻智能（真空室）；**其他：**景业智能（核工业智能装备）。

表7： 关注受益 ITER 项目交付及国内新实验装置建设的核心设备供应商

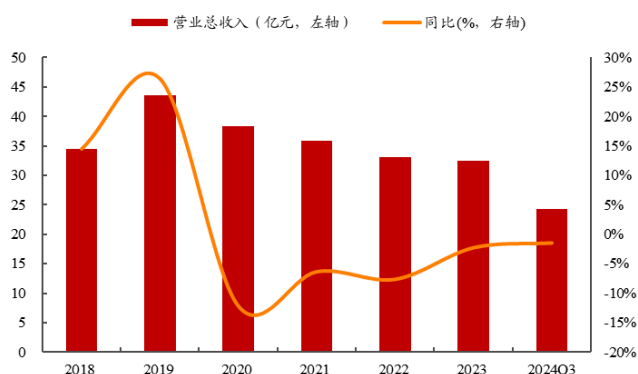
核聚变产业链	市值（亿）	归母净利润（亿）			PE			PB （MRQ）	ROE （2023）
		2024E	2025E	2026E	2024E	2025E	2026E		
国光电气	86	0.48	1.23	1.66	179	70	52	4.6	4.9%
联创光电	255	4.64	6.03	7.44	55	42	34	6.0	8.5%
西部超导	307	8.09	10.46	12.78	38	29	24	4.7	11.9%
永鼎股份	78							2.8	1.5%
精达股份	133	5.62	7.26	8.63	24	18	15	2.3	8.1%
安泰科技	119	3.72	4.51	5.23	32	26	23	2.2	4.9%
合锻智能	86	0.48	1.23	1.66	179	70	52	4.6	4.9%
PE 平均值					65	37	30	3.8	7%

资料来源： ，浙商证券研究所，盈利预测采用 一致预期（永鼎股份无 一致预期），其中 2024 年归母净利润数据：国光电气、西部超导、精达股份、安泰科技为公司公告；数据截至 2025/04/11

4.1 联创光电：聚焦新型主业战略明确，激光超导两翼齐飞

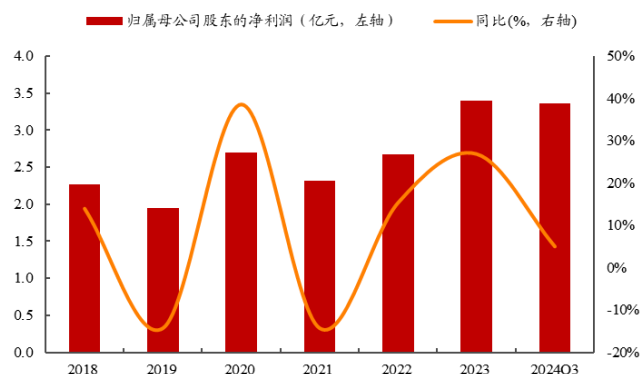
光电子产业领先企业，盈利能力有望不断提升。公司成立于 1999 年，主营业务可分为智能控制器、背光源产品、光电线缆、激光及微电子四大板块，2023 年营收占比分别为 61%、27%、5%、6%。未来公司将持续优化业务结构，剥离亏损业务，重点打造激光和超导两大新兴产业。

图32： 公司 2018-2023 年营收



资料来源： ，浙商证券研究所

图33： 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 8%



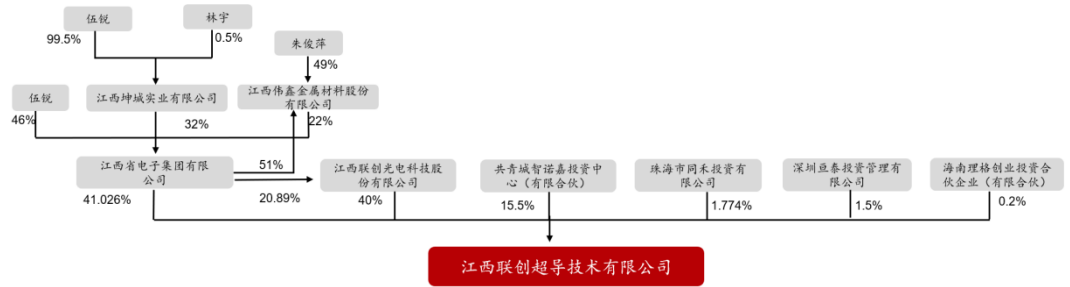
资料来源： ，浙商证券研究所

聚焦智能控制器产品，参股宏发电声投资收益稳定。2023 年公司智能控制产品板块累计实现主营业务收入 19.79 亿元，较上年同期微增 1.22%，归母净利润 1.11 亿元，同比增长 7.53%。公司新能源车控制系统关键技术及车规光耦取得突破，有望成为新的利润增长点。子公司宏发电声作为我国继电器龙头，2021 年全球份额超 17%，市场地位稳固，持续受益下游多领域扩展及市占率的提升。2023 年宏发电声实现归母净利润 18.2 亿元，同比增长 11.19%，公司参股宏发电声 20% 股权，未来有望获得稳定投资收益。

激光业务受益反无人机需求增长，公司由上游核心器件向下游整机延伸。公司激光业务主要产品为泵浦源及激光器，是激光武器的核心器件，目前可预见的订单量增长较快。2023 年负责激光业务的子公司中久光电实现营收 1.66 亿元，净利润 0.36 亿元，销售净利率达 21.9%。2023 年 2 月公司光刃-II 激光反制系统顺利通过验收，在内需和外贸需求驱动下，激光整机产品有望进一步打开公司成长空间。

高温超导磁体核心供应商，由铝加工向晶硅炉、可控核聚变拓展。高温超导产业是公司战略转型重点发展的产业，子公司联创超导是国内领先的可以设计制造中心磁场强度 15T 以上超大口径高温超导磁体的企业。目前公司超导业务产业化能力已得到充分验证，2023 年公司的高温超导感应加热装置正式投产，设备订单部分已交付，余下订单正有序排产；同年，公司顺利推进两台新型晶硅炉样机的生产和调试，在手订单体量超过 300 台，并将于 2024 年年内完成不少于 50 台的交付任务。此外，公司超导磁体已实现由铝加工向光伏晶硅炉拓展，公司与宁夏盈谷合作，目前在手订单 4.3 亿元，意向订单达 9.9 亿元，预计 2024-2026 年将陆续交付。

图34： 联创光电持有联创超导 40%股权（截至 2024Q3）

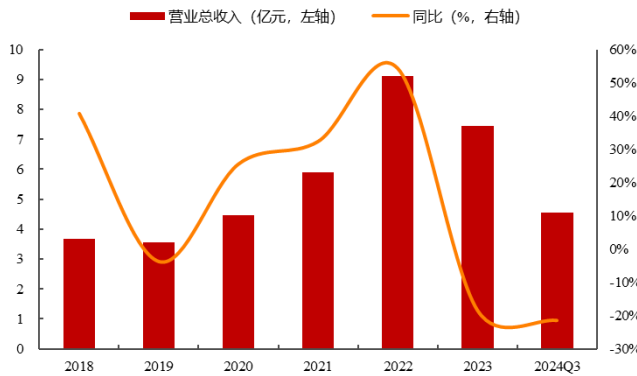


资料来源： ，浙商证券研究所

4.2 国光电气：特种微波器件核心供应商，核工业设备打开第二增长曲线

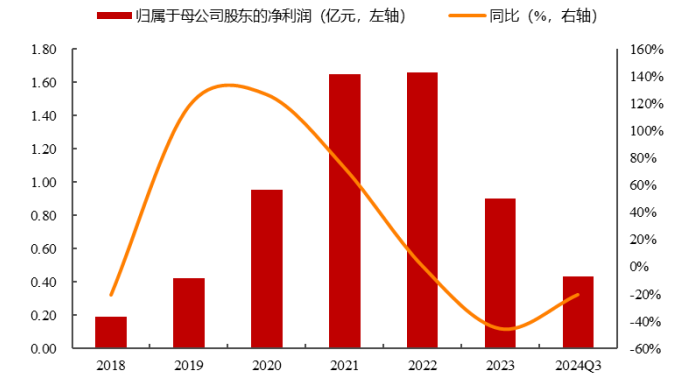
国产微波电真空器件龙头，归母净利润高速增长。公司主要产品包括微波器件、核工业设备两大类，下游广泛应用于雷达、卫星通信、核工业等领域，客户主要为我国各大军工集团及其下属单位。2023 年度，公司实现营业总收入 7.45 亿元，归母净利润 9035 万元，近五年 CAGR 分别为 15%和 36%。

图35： 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 15%



资料来源： ，浙商证券研究所

图36： 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 36%



资料来源： ，浙商证券研究所

微波器件业务受益卫星、雷达、电子对抗，公司立足真空器件向固态器件拓展。在国防现代化、信息化推动下，以雷达、卫星通信、电子对抗等为代表的电子装备快速发展，微波器件作为核心部件持续受益。以 T/R 组件为代表的微波器件是相控阵雷达的核心，预计市场规模将从 2022 年的 63 亿元增长到 2025 年的 85 亿元，CAGR=10%。目前微波电真空器件格局集中且较为稳定，主要为包括公司在内的“两厂两所”，其中公司在连续波行波管（主要用于电子对抗）和捷变频磁控管（主要用于弹载）等方面有技术优势，同时公司也在不断向固态器件进行横向拓展。

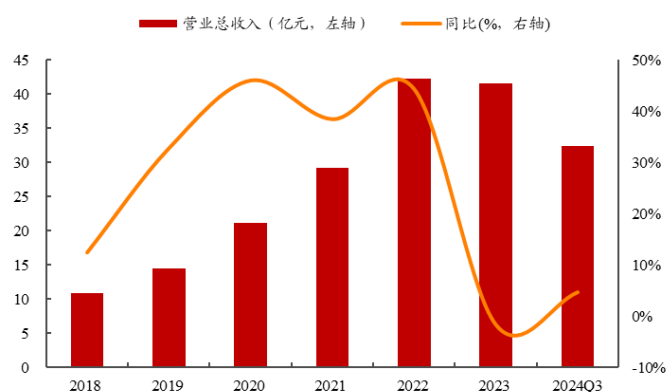
可控核聚变赛道高景气，公司受益新实验装置建设。公司偏滤器和包层系统已向 ITER、HL-2M 等核聚变装置供货，配套先发优势明显。2023 年 11 月，联创超导与中核聚变签订协

议，计划采用全新技术路线，联合建设聚变-裂变混合实验堆项目，工程总投资预计超过 200 亿元，公司等国内相关供应商有望持续受益。

4.3 西部超导：国内唯一超导线材商业化生产企业，超导业务快速增长

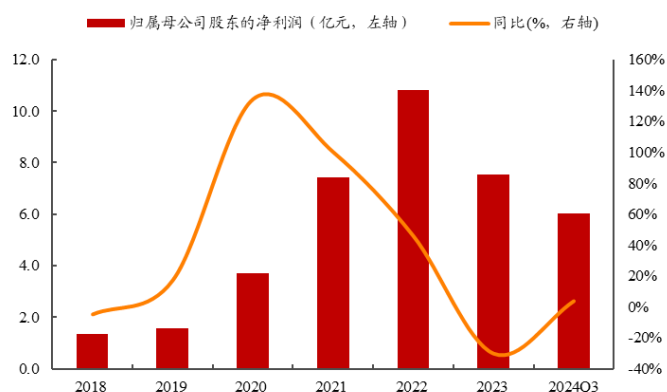
高端钛合金龙头，业务布局多元前景广阔。公司主要从事超导产品、高端钛合金材料和高性能高温合金材料及应用的研发、生产和销售，产品主要应用于能源、医疗、交通、信息、航空、舰船等领域。2023 年，公司实现营收 41.59 亿元，近 5 年营收的 CAGR 为 31%。

图37： 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 31%



资料来源：，浙商证券研究所

图38： 公司 2018-2023 年归母净利润 CAGR 为 41%



资料来源：，浙商证券研究所

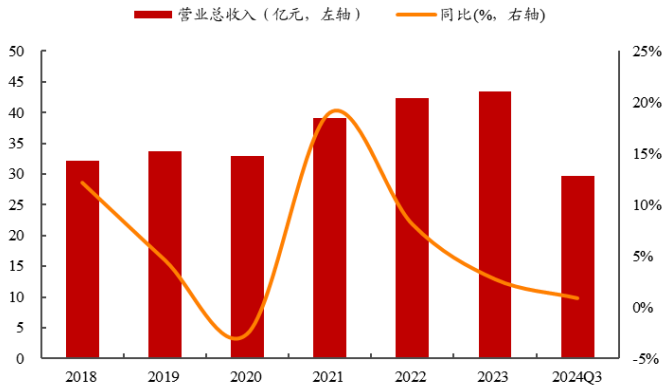
高端钛合金需求增长，打破技术封锁。我国高端钛合金市场需求迅速增长，特别是高端用钛合金对“高均匀性、高纯净性、高稳定性”的要求不断提高。公司是我国高端钛合金棒丝材主要研发生产基地，生产的高端钛合金材料打破了欧美发达国家对我国航空、舰船、兵器用关键钛合金材料的技术封锁和禁运。近年来，公司产品已批量应用于我国航空发动机等关键装备，参与国家多项型号项目，主要客户包括航空工业、中国航发、中船重工、中国兵器工业、中核工业等众多知名集团。

唯一超导线材商业化生产企业，低温超导产品供应 ITER 和 CRAFT 项目。公司是目前国内唯一低温超导线材商业化生产企业，也是目前全球唯一的铌钛铌棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。公司自主开发全套低温超导产品的生产技术，代表我国完成了 ITER 项目的超导线材交付任务，同时也向国家重大科技基础设施项目-聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)批量供货。近年来，公司超导业务发展迅速，产品收入和占比不断提升，2023 年公司超导产品营收 9.85 亿元，占比达 24%。

4.4 永鼎股份：光通信+电力传输双主业驱动，超导材料布局未来

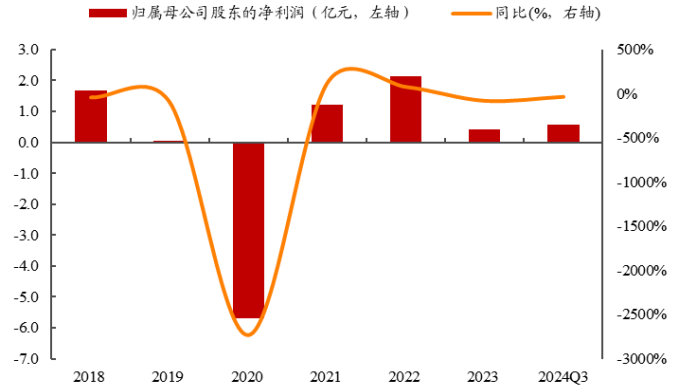
光电线缆与通信领域综合服务商，业务多元协同发展。公司深耕行业 20 余年，光电产业拥有稳定的海内外客户，近五年营业收入复合增长率约 6%，2023 年实现营业收入 43.45 亿元，同比增长 2.78%，其中国际市场贡献占比约 44%。公司深度布局 5G 基建、数据中心及海外市场，稳步推进高温超导带材应用，积极拓展业务范围和产品品类。

图39: 公司 2018-2023 年营收 CAGR 为 6%



资料来源: , 浙商证券研究所

图40: 公司 2018-2023 年归母净利润

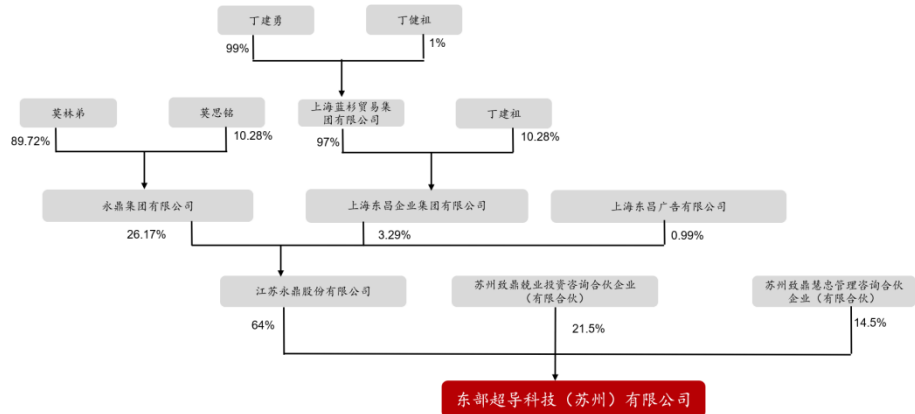


资料来源: , 浙商证券研究所

光通信业务数据中心催生市场新动能,全球光缆预期向好。受益互联网数据中心(IDC)的规模和数量不断扩大,光纤网络的需求也越来越高,预计到2025年,我国数据中心光纤光缆需求将达到1.2亿芯公里,公司有望受益于光纤光缆行业的新市场空间。公司立足“光棒、光纤、光缆”等网络基础通信产品,延伸光芯片、光器件、光模块等产品及大数据采集分析应用与信息服务,2023年公司大数据应用营收9.58亿元,同比增长99%。

公司可控核聚变相关业务由子公司东部超导经营,其自主研发高温超导带材在多领域逐步应用。永鼎旗下子公司东部超导,是我国首家进入高温超导材料领域的高新技术企业,核心产品主要为第二代高温超导带材及超导应用产品。目前高温超导发展进入加速期,关键应用领域取得多项重要阶段性成果。公司以业内独有的磁通钉扎技术,自主研制应用于低温高强磁场环境下的高载流超导带材,稳步推进高温超导带材在磁约束可控核聚变、超导感应加热等领域的应用,并已批量供货。随着国内商业化可控核聚变厂家对带材技术需求的明确,公司加速了产品在低温高磁场下性能的提升工作。为后续更高性能的第二代(YBCO)高温超导带材在可控核聚变方面做好了充分准备。

图41: 永鼎股份持有东部超导 64%股权(截至 2024Q3)

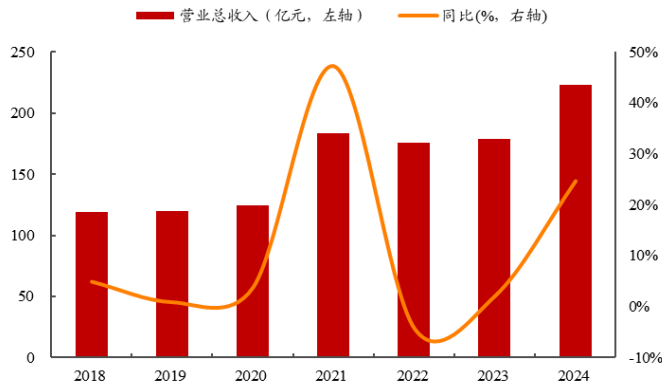


资料来源: , 浙商证券研究所

4.5 精达股份：电磁线领军企业，高端化带来市场新机遇

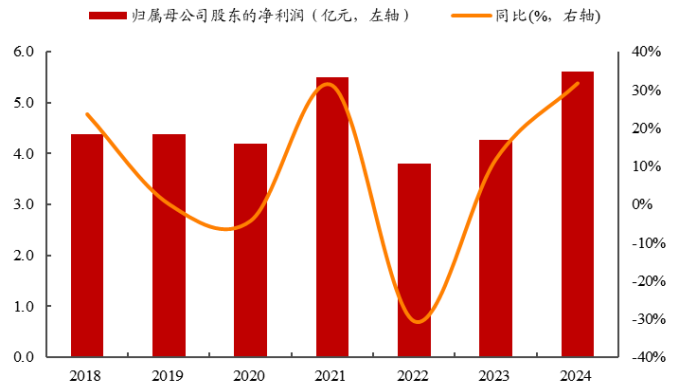
电磁线生产制造领军企业，技术实力持续突破。公司主营业务是特种电磁线、特种导体以及模具制造、维修等生产、研发和销售，产品广泛用于汽车驱动电机、工业精密电机、机器人伺服电机等领域。2024 年公司实现营业收入 223.23 亿元，归母净利润 5.62 亿元，近五年 CAGR 分别为 13%和 5%。

图42： 公司 2019-2024 年营收 CAGR 为 13%



资料来源： ，浙商证券研究所

图43： 公司 2019-2024 年归母净利润 CAGR 为 5%

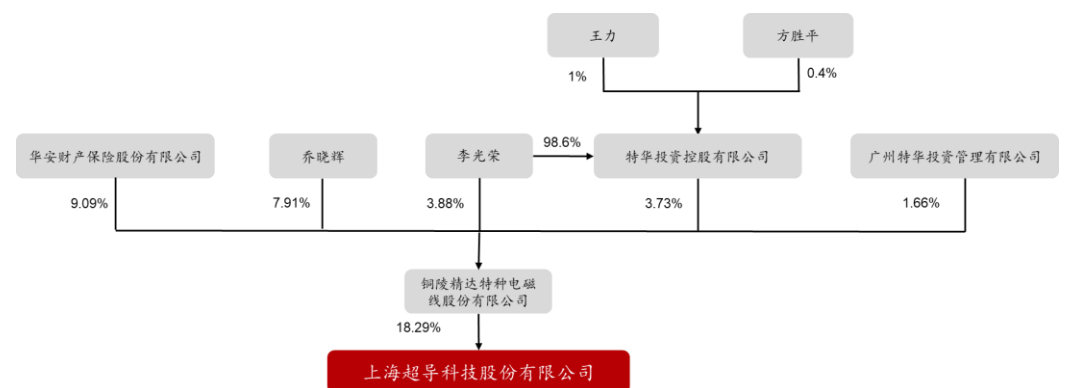


资料来源： ，浙商证券研究所

电磁线业务受益于新能源需求爆发，高端化升级加速。公司作为国内特种电磁线领域的龙头企业，凭借年产超 35 万吨的规模化生产能力，构建了覆盖全国核心经济带的产销网络。随着新能源汽车、可再生能源及智能电网等领域的加速扩张，电磁线作为核心基础材料，需求结构持续优化，技术门槛显著提升。目前公司重点突破高性能铜及贵金属丝线材关键制备加工技术、高耐温绝缘涂层等前沿技术，抢占未来产业制高点。

超导产品扩产完毕，高温超导带材的性能具备全球竞争力。子公司上海超导科研实力强大，实现了从超导带材产品到超导带材生产设备的完全自主化，提高了二代高温超导带材的性价比。目前上海超导扩产、扩建计划已全部完成，新产线的产能快速爬坡，高温超导带材的性能参数也有巨大提升，在高温超导领域已具备全球竞争力。

图44： 精达股份持有上海超导 18%股权（截至 2024 年年报）

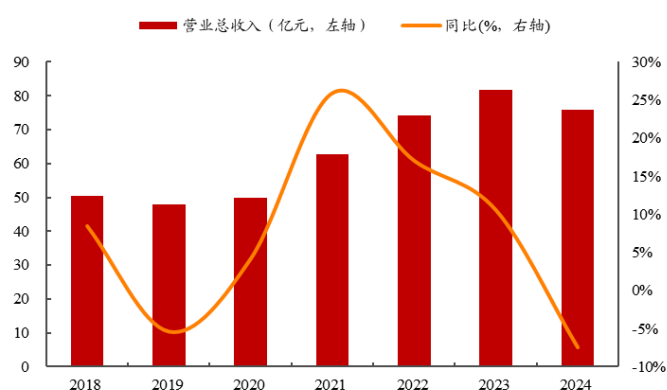


资料来源： ，浙商证券研究所

4.6 安泰科技：聚焦新材料核心主业，技术驱动高成长

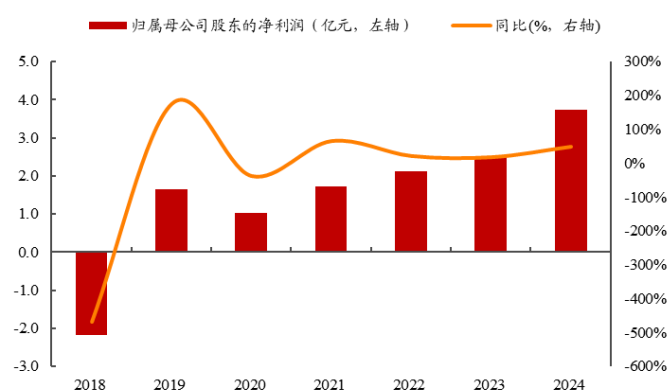
以先进功能材料器件、特种粉末材料为核心，经营业绩稳健增长。公司拥有高端粉末冶金材料及制品产业、先进功能材料及器件产业、高速工具钢产业、节能环保及装备材料产业等四大业务板块，其中高端粉末冶金材料制品和先进功能材料器件为公司核心业务，营收占比 76%。自 2018 年剥离亏损业务后，公司业绩持续好转，2024 年公司营收 75.73 亿元，归母净利润 3.72 元，同比增长 49%，公司运营质量进一步改善。

图45： 公司 2019-2024 年营收 CAGR 为 10%



资料来源：，浙商证券研究所

图46： 公司 2019-2024 年归母净利润 CAGR 为 18%



资料来源：，浙商证券研究所

难熔金属领域国内领军者，聚变项目核心供应商。子公司安泰天龙围绕钨钼制品应用积极拓展新兴市场，强化新产品应用技术研发与成果转化，2024 年实现营业收入 20.22 亿元，继续保持难熔钨钼金属制品行业引领地位。作为全球第三代核电主泵推力盘、核聚变钨铜复合偏滤器部件的核心供应商，公司助力我国人造太阳创亿度百秒世界纪录。此外，公司开发的难熔钨钼、镍基高温合金带材、金属精密过滤装置等产品也为“华龙一号”、AP1000、CAP1400 等多项核电技术提供配套产品。

稀土钕铁硼永磁材料头部供应商，向高端化、智能化转型。公司的稀土永磁材料应用于消费电子、机器人制造和新能源汽车等领域，受益于高端化、智能化趋势，稀土永磁材料将需求不断提升。依托稳定的稀土原料资源保障体系，安泰磁材在 2023 年实现营业收入突破 22 亿元，同年安泰北方扩建项目完成，公司高端稀土永磁制品产能达到 1 万吨。

5 风险提示

1、技术可行性验证不及预期风险：可控核聚变当前处于工程可行性验证阶段，若 Q 值（能量增益因子）突破、氦自持循环、耐辐照材料等关键技术进展不及预期，可能会为相关公司业绩增长带来不利因素。

2、资金投入及政策支持风险：核聚变研发依赖政府及资本长期高投入，若国内外政策支持力度减弱或融资进度放缓，可能影响实验堆建设及技术迭代。

3、宏观环境超预期恶化的风险：若地缘政治冲突升级，可能导致关键技术、材料及设备的跨国流通受阻，影响国内企业技术获取及全球化布局。

股票投资评级说明

以报告日后的 6 个月内，证券相对于沪深 300 指数的涨跌幅为标准，定义如下：

1. 买入：相对于沪深 300 指数表现 + 20% 以上；
2. 增持：相对于沪深 300 指数表现 + 10% ~ + 20%；
3. 中性：相对于沪深 300 指数表现 - 10% ~ + 10% 之间波动；
4. 减持：相对于沪深 300 指数表现 - 10% 以下。

行业的投资评级：

以报告日后的 6 个月内，行业指数相对于沪深 300 指数的涨跌幅为标准，定义如下：

1. 看好：行业指数相对于沪深 300 指数表现 + 10% 以上；
2. 中性：行业指数相对于沪深 300 指数表现 - 10% ~ + 10% 以上；
3. 看淡：行业指数相对于沪深 300 指数表现 - 10% 以下。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重。

建议：投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者不应仅仅依靠投资评级来推断结论。

法律声明及风险提示

本报告由浙商证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格，经营许可证编号为：Z39833000）制作。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但浙商证券股份有限公司及其关联机构（以下统称“本公司”）对这些信息的真实性、准确性及完整性不作任何保证，也不保证所包含的信息和建议不发生任何变更。本公司没有将变更的信息和建议向报告所有接收者进行更新的义务。

本公司的客户作参考之用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告仅反映报告作者的出具日的观点和判断，在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及/或其关联人员均不承担任何法律责任。

本公司的交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。本公司没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。本公司的资产管理公司、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

本报告版权均归本公司所有，未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、发布、传播本报告的全部或部分内容。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明本报告发布人和发布日期，并提示使用本报告的风险。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

浙商证券研究所

上海总部地址：杨高南路 729 号陆家嘴世纪金融广场 1 号楼 25 层

北京地址：北京市东城区朝阳门北大街 8 号富华大厦 E 座 4 层

深圳地址：广东省深圳市福田区广电金融中心 33 层

上海总部邮政编码：200127

上海总部电话：(8621) 80108518

上海总部传真：(8621) 80106010

浙商证券研究所：<https://www.stocke.com.cn>