

可控核聚变新阶段，迈向终极能源第一步

电新首席证券分析师：曾朵红
执业证书编号：S0600516080001
联系邮箱：zengdh@dwzq.com.cn

联系电话：021-60199793
2025年6月13日



■ Part1 什么是可控核聚变？

■ Part2 为什么当下是可控核聚变的新阶段？

■ Part3 装置架构拆解与产业链成本图谱

■ Part4 核聚变度电成本具备竞争力

■ Part5 投资建议和风险提示

- ◆ **可控核聚变是终极能源解决方案，但实现难度高，当前技术路径多样。**可控核聚变因能量密度高、燃料储量丰富、安全性优越，被视为终极能源解决方案。当前主流技术路径包括磁约束（托卡马克装置）、惯性约束（NIF装置）及磁惯性约束（直线型装置），国内外多个装置在建，处于劳森判据 $Q>1$ 的验证阶段。
- ◆ **为什么当下是可控核聚变的新阶段？**
 - 一、政策与资本双轮驱动产业化。**1) 政策上，中国通过多项财政支持、央企协同、研发创新及安全监管等政策举措推动核聚变产业发展；海外竞相锁定30-40年代商用时间窗口，通过资金注入、机制优化和国际合作加速技术转化。2) 投资上，24年全球聚变企业达50家，80%为私营，美国占半数，国内以聚变新能和中国聚变能领衔，分别布局低温超导和高温超导托卡马克，聚焦25-30年的 Q 值验证和30-40年的商业电站落地目标。
 - 二、多种技术路径百花齐放，实验&工程有望突破。**1) 高温超导磁体将托卡马克体积缩小至传统装置的 $1/40$ ，成本降低、迭代加速，是未来发展方向；2) 直线型磁惯性装置Helion计划25年下半年达到 $Q>1$ ，28年实现50MW商用并网；3) NIF惯性路径单次点火 $Q>2$ ；提出聚变-裂变混合堆规划等。
 - 三、装置密集建设期，招标体量大。**核聚变单堆实验装置投资百亿元量级，国内25-27年是聚变装置密集建设期，包括BEST、洪荒170、和龙-2、星火一号等，综合年均投资超100亿元，规模体量大。
 - 四、节点验证即将到来，拐点渐近。**25-26年SPARC与Helion将验证高温超导/磁惯性路线的科学可行性；27-28年国内多个装置建设完成，验证国内独立自主核聚变工程可行性，同时海外首个聚变电厂订单落地，或将标志着行业从“实验”迈向“能源”。
- ◆ **核聚变供应链较长、工程难度大。**当前最为成熟的是低温超导托卡马克路线，初代实验堆的投资约150亿元，迭代周期约5-10年，其成本拆分为：磁体系统20-30%、真空室三大件12-15%、偏滤器包层5-10%，若是高温超导托卡马克，则磁体系统成本占比达50%；当前产业链核心系统多由央企承担，民营企业则聚焦细分领域，上市的核心供应商为西部超导、国光电气、安泰科技等；其次最快验证 $Q>1$ 的直线型装置投资约30-40亿，其模块化程度高，迭代周期仅1-2年，成本占比最高的是电源系统，占50%。
- ◆ **远期经济性测算彰显核聚变潜力。**托卡马克因体积大、建设周期长，在初始成本上仍占劣势，但具备长周期稳态运行潜力；直线型装置结构简单、投资低、建设快，短期经济性突出。我们计算低温超导托卡马克聚变装置、直线型磁惯性聚变装置，在 $Q=30$ 和 $Q=3$ 的情况下，度电成本分别为0.31、0.27元/kwh，低于火电，具备商业化竞争力，若聚变功率进一步提升则度电成本有望低于0.2元/kwh，将成为成本最低的能源形式。
- ◆ **投资建议：**在政策与资本双轮驱动下，核聚变国内外多个装置在建，拉动大规模招标，25-28年将集中验证 $Q>1$ ，推动行业从实验向产业迈进，未来空间无限，建议关注核心供应商：西部超导（低温超导磁体）、联创光电（高温超导磁体）、爱科赛博（磁体电源）、精达股份（高温超导带材）、国光电气（第一壁&偏滤器）、安泰科技（偏滤器）等
- ◆ **风险提示：**技术瓶颈风险、巨额资金投入风险、国际竞争与专利风险、政策不确定性风险、需求与商业模式风险

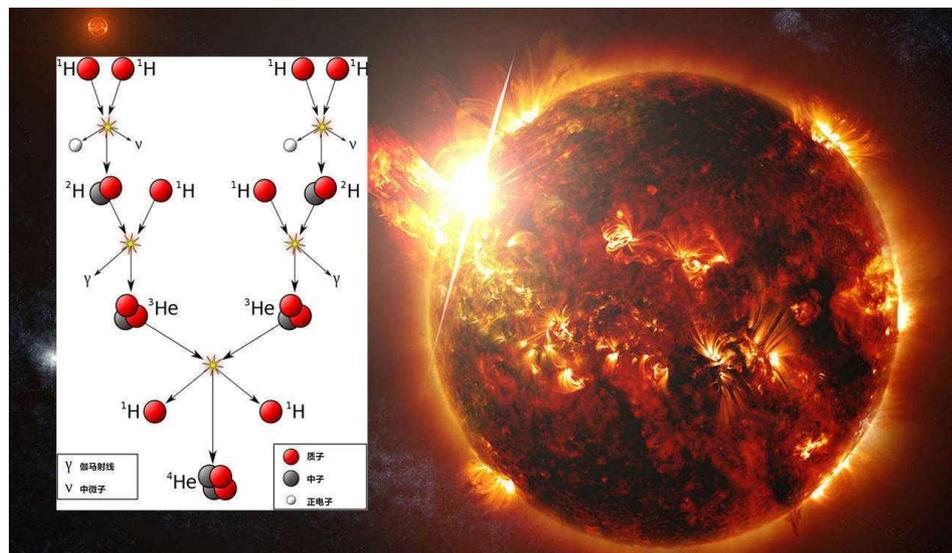
Part1 什么是可控核聚变?

- ◆ **核聚变**：两个较轻的核结合，形成一个较重的核和一个极轻的核（或粒子）的一种核反应形式。质量小的原子，主要是指氘，在一定条件下（如超高温和高压），能让核外电子摆脱原子核的束缚，两个原子核能够互相吸引而碰撞到一起，发生原子核互相聚合作用，生成新的质量更重的原子核（如氦），中子虽然质量比较大，但是由于中子不带电，因此也能够在这个碰撞过程中逃离原子核的束缚而释放出来，大量电子和中子的释放所表现出来的就是巨大的能量释放。恒星的能量来源就是内部不断进行的核聚变反应；而不可控的核聚变就是氢弹的爆炸。
- ◆ **核聚变优势**：反应能量大、燃料资源充足、安全性高、放射性低、未来度电成本低，因此可控核聚变被认为是终极能源形式。

图表：不可控核聚变：氢弹的爆炸

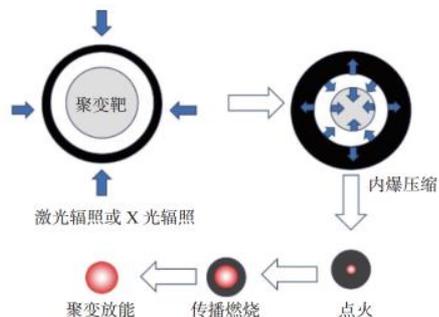


图表：可控核聚变：太阳

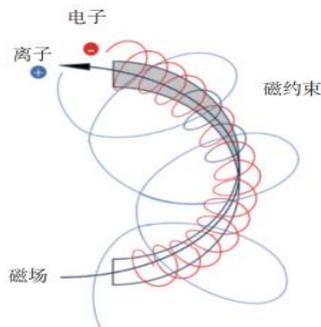


- ◆ 核聚变反应对于温度的要求非常高，通常需要达到上亿摄氏度。在如此高的温度下，气体分子将被完全电离，此时物质以高温等离子体（完全电离的气体）形态存在。**为了持续输出反应能量，对于聚变等离子体的有效约束是关键。通常为磁约束、惯性约束、磁惯性约束。**

类型	概念
磁约束	磁约束 通过加热等外部手段将燃料温度提升，极高的温度使得燃料完全电离形成等离子体，采用特殊结构的磁场形式把燃料离子和大量自由电子组成的处于热核反应状态的高温等离子体约束在有限的体积内，使之受到控制地发生核聚变反应，并在此过程中释放出能量。增强磁场可以大幅度地减小带电粒子横越磁力线的扩散和导热特性，使处于磁场中的高温等离子体与反应容器的壁面隔开，从而保护壁面不受高温侵袭。
惯性约束	惯性约束 采用高能量的激光或粒子束将燃料加热和压缩为等离子体，在自身惯性作用下，等离子体在极短的时间内来不及向四周飞散，在此过程中被压缩至高温、高密度的物理状态，从而发生核聚变反应。由于这种核聚变的方式是通过等离子体自身的惯性作用约束而实现的，因此被称为惯性约束核聚变。这种约束方式约束的时间尺度较短，形成的等离子体具有较高的温度和密度等特征参数，需要大量的能量输入和精密的控制技术。
磁惯性约束	磁惯性约束 融合磁约束的持续性与惯性约束的高密度优势，其核心思路分3步：1. 磁场初步约束等离子体；2. 通过电场或磁场等方式加速粒子，使其汇聚于反应区；3. 磁场进一步约束压缩反应区等离子体，实现聚变反应。 磁惯性约束聚变兼具惯性约束聚变与磁约束聚变的特点 ，其等离子体参数介于二者之间，同时由于其成本低廉、设施小型化、研发周期相对较短等优势，因此具有潜在的商业价值。



图表：惯性约束核聚变原理示意图



图表：磁约束核聚变原理示意图



图表：磁惯性约束核聚变装置Polaris

1 磁约束：当前物理研究上最成熟的路线

- ◆ **磁约束聚变**是指用特殊形态的磁场把氘、氚等轻原子核和自由电子组成的、处于热核反应状态的超高温等离子体约束在有限的体积内，使它受控制地发生大量的原子核聚变反应，释放出能量，主要的装置有托卡马克、仿星器。
- ◆ **磁约束路线的托卡马克装置是当前物理研究上最成熟的路线**，早在1998年日本JT-60装置上实现能量增益因子Q值达到1.25，实现科学可行性向工程可行性的跨越。由于传统托卡马克装置资金需求量大、工程复杂度大，几大国家联合推出国际热核聚变实验堆（ITER）计划，是全球规模最大、影响最深远的国际科研合作项目之一，投资超220亿美元，2006年启动建设，计划2035年实现 $Q \approx 10$ 的氘氚聚变实验，验证商业聚变的工程可行性。

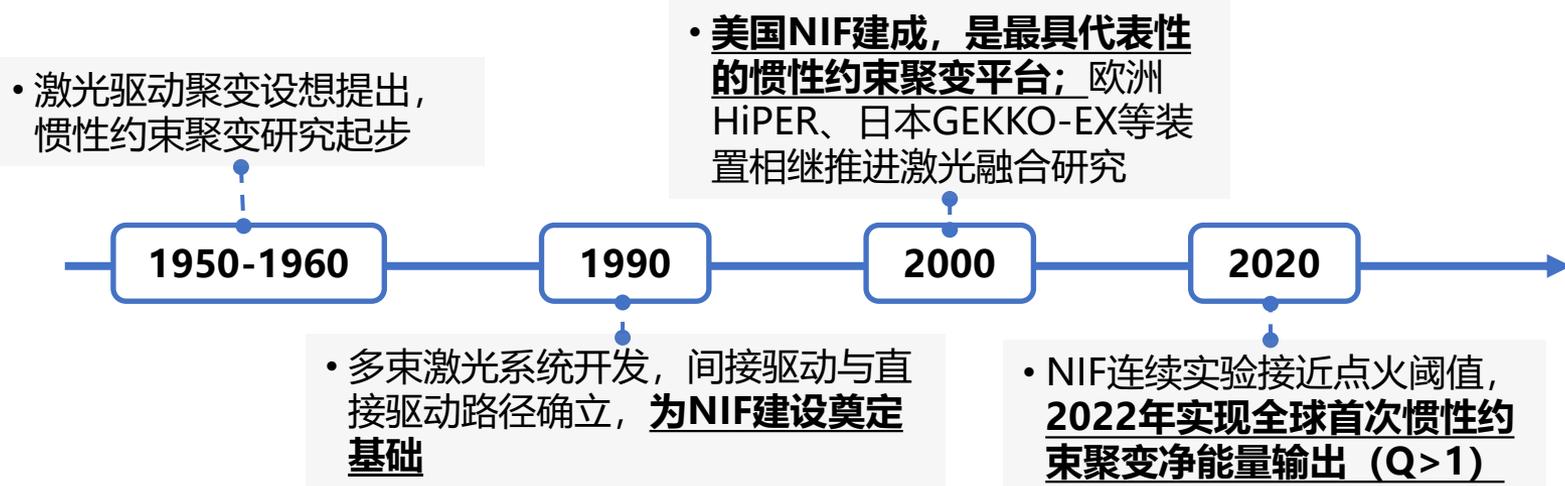
• 托卡马克概念提出，多种聚变装置尝试，1968年，苏联T-3托卡马克首次实现高温等离子体稳定运行

• **ITER 建设启动，是全球规模最大的托卡马克装置**；中国EAST、韩国KSTAR、日本JT-60升级计划展开



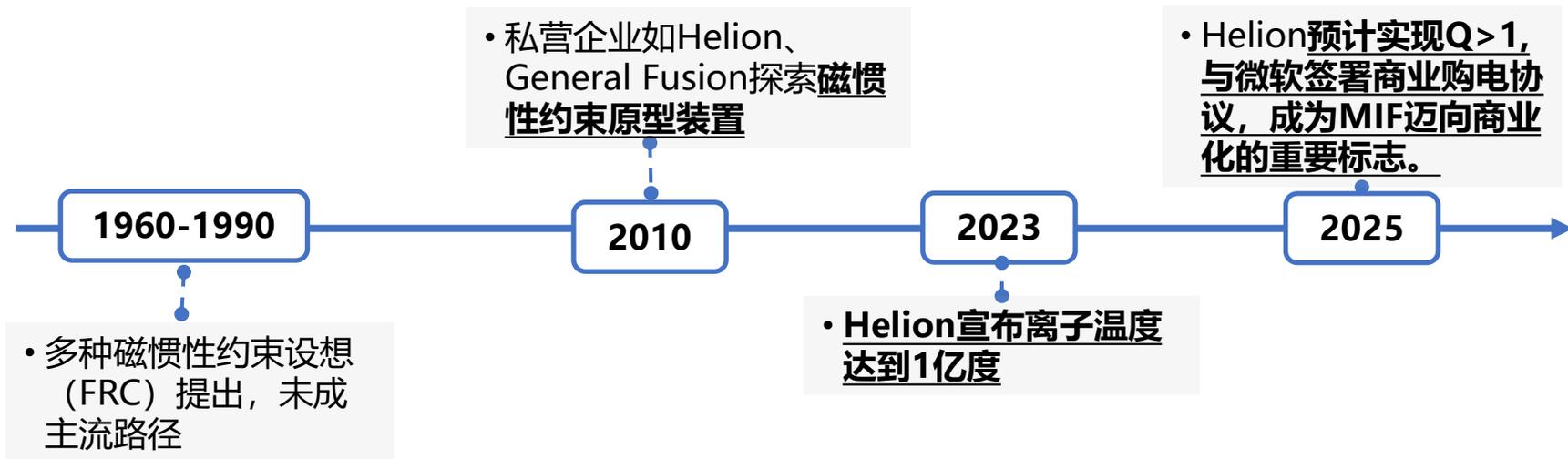
2 惯性约束：率先实现聚变点火，但系统总Q值仍远小于1

- ◆ **惯性约束聚变**是通过激光或粒子束在极短时间内对燃料靶丸进行加热和压缩，使其内部产生极端高温高压，从而触发核聚变反应。该路径最早在上世纪50年代提出，随着激光技术的突破而逐步推进。
- ◆ **美国国家点火装置 (NIF) 是当前最具代表性的惯性约束聚变平台**，2009年建成，采用“间接驱动”路径，目标是实现聚变点火。2022年 NIF首次实现聚变净能量增益 ($Q>1$)，验证了理论模型的可靠性，但若计入激光器电能到激光的转换损耗，系统总Q值仍远小于1。其意义更多在于验证极端物理模型和国防研究，而非直接推动商用可控核聚变。
- ◆ 英国First Light Fusion等企业也在探索“飞片驱动”等新型激光/动能路径，尝试以更高效率、更低成本实现惯性约束的工程转化。



3 磁惯性约束：设备小型化与工程灵活性的潜力路径

- ◆ **磁惯性约束聚变**是一种融合磁约束与惯性压缩优点的混合路径，旨在以更小型装置实现高能量效率和频繁脉冲聚变。早期虽有场反转构型（FRC）设想，但长期处于非主流探索。
- ◆ 进入2010年代，Helion Energy、General Fusion 等私营企业以MIF为技术核心，相继开发磁线圈+电磁压缩等创新装置，目标是**低成本、模块化、中小型反应堆形态实现可控聚变**，目前处于**工程验证与技术突破并行期**。
- ◆ 2023年Helion宣布离子温度达到1亿度；近期计划25年下半年实现 $Q > 1$ ，与微软签署2028年购电协议，成为**技术迈向商业化的重要标志**。磁惯性路径因其工程灵活性和资本吸引力，正逐步形成新兴赛道。

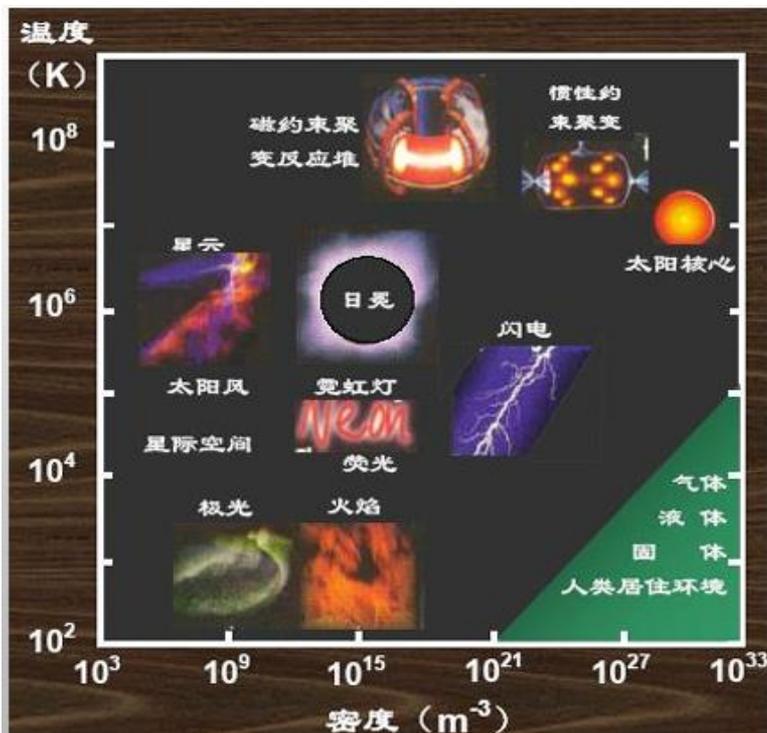


4 可控核聚变主要装置类型

约束类型	磁约束		惯性约束	磁惯性约束
主要装置名称	托卡马克		激光约束	直线型装置
代表项目	ITER		NIF	Polaris (Helion)
装置结构图				

- ◆ **一、克服库仑斥力：**核聚变需要极高的温度和足够的密度 才能克服原子核直接的排斥力。
- ◆ **二、满足劳森判据Q阈值：**根据Lawson判据，聚变反应需要满足特定的条件，即**等离子体密度、温度和约束时间的三重积**， $nT\tau \geq 3 \times 10^{21} \text{ keV}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ ，当该值超过阈值时，聚变就可以自行维持。一般来讲，温度 $T > 10 \text{ KeV}$ 可以满足，仍需约束 $nt > 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\cdot\text{s}$ 。当 $Q=1$ 时，表示聚变反应产生的能量等于输入的能量， $Q > 1$ ，意味着聚变反应实现能量的净增益。 $Q \geq 30$ 被认为是可实现商业化的标志。当前人类仅在JT60上实现 $Q=1.25$ ，其余装置均处于 Q 接近1的临界点，并未真正突破。

图表：克服库仑斥力需要极高温度和足够密度



图表：Q值的意义

Q值	平衡点	意义
Q=1	科学盈亏平衡点	Q=1是能量收支平衡点（输出=输入），Q>1是核聚变自持反应的起点
Q≥5	工程盈亏平衡点	等离子体进入“燃烧状态”，聚变能量可自我维持
Q≥30	经济盈亏平衡点	运行效率足够高，不仅能自给自足，还能产生并出售额外的电能，实现商业化运行

- ◆ **三、反应材料的选择**：反应燃料通常是最易实现的氘氚DT为主，但氘价格昂贵且受管控，自持还未突破。
- ◆ **四、工程复杂度高**：装置的工程建设难度极高、需要花费大量时间建设、检测，迭代速度相对慢，装置的投资额高，资金需求量大。例如ITER参与方包括欧美、中国、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国（已退出），是2010年开始建设，原本计划2025年开始等离子体实验，目前调整为2034年开始实验；ITER初始投资计划50亿欧元，目前调整为超过200亿欧元。

图表：当前聚变主要燃料

燃料	应用场景	优势	最低三重积	点火温度	单次反应能量输出
氘氚 (D-T)	磁约束（托卡马克、仿星器）和惯性约束两大主流路径均采用氘氚燃料。	1) 反应截面大，点火温度相对较低（约1亿°C） 2) 已验证可行性，是目前唯一实现能量增益（ $Q>1$ ）的燃料组合 3) 氘在海洋中储量丰富（约45万亿吨），氚可通过锂-6的中子辐照生成，理论上可实现燃料循环 4) 能量输出强劲：单次反应释放17.59 MeV能量	2.8e21	10~30 keV	17.59 MeV
氘氘 (D-D)	磁约束路径的潜在替代方案。海洋馈赠的清洁选项	1) 燃料资源无限（氘在海洋中取之不尽），无需依赖氚增殖。 2) 辐射更低：中子能量仅2.45 MeV（约为D-T聚变的1/7），材料损伤风险相对缓解。	1.9e23	约50~100 keV	3.27~4.04 MeV
氘氦3 (D- ³ He)	燃料极度稀缺，除非开拓月球矿场	1) 发电效率飞跃：发电效率大幅提高，产物中的带电粒子可直接进行能量转换发电。 2) 单次能量峰值四大反应中最高	5.1e22	约50~100 keV	18.34 MeV
氢硼 (p- ¹¹ B)	新兴的磁惯性约束路径	1) 无中子辐射：反应产物为三个α粒子，可直接发电且无放射性废物。 2) 燃料易获取（硼在地壳中储量丰富，氢可通过水分解获得）	6.6e23	约150~300keV	8.68 MeV

Part2 为什么当下是可控核聚变的新阶段?

1 举国之力，推动可控核聚变发展

- ◆ 政策端，全球能源转型背景下，多国政府对可控核聚变给予大力支持。
- ◆ 中国通过多项政策举措全力推动核聚变产业发展，涵盖财政支持、央企协同、研发创新及安全监管等方面，为核聚变技术研发和产业化提供有力保障。2022年《上海市科技支撑碳达峰碳中和实施方案》推动研究基于钷基熔盐堆、可控核聚变、小型化核聚变等先进核能原理与关键技术研发；2024年《上海核电产业高质量发展行动方案（2024-2027年）》推动紧凑式磁约束高温超导托卡马克装置、双锥对撞惯性约束激光核聚变、磁-惯性约束核聚变等技术研发，突破大尺寸、高电流密度、强磁场的高温超导磁体关键技术。

图表：部分国家级可控核聚变产业政策

时间	政策名称	相关内容
2022年	《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划的通知》	加快三代核电标准化、谱系化发展，持续推进钠冷快堆、高温气冷堆、铅铋快堆等四代核电堆型的研发和应用。加快 可控核聚变 等前沿颠覆性技术研究。
2022年	《“十四五”现代能源体系规划》	支持 受控核聚变 的前期研发，积极开展国际合作
2022年	《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030年）》	新型核能发电技术。研究四代堆、 核聚变反应堆 等新型核能发电技术
2023年	国资委实施未来产业启航行动	明确 可控核聚变 领域为未来能源的唯一方向
2024年	《关于推动未来产业创新发展的实施意见》	聚焦核能、 核聚变 等重点领域，打造“采集-存储-运输-应用”全链条的未来能源装备体系
2025年	《关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知》	当前， 我国聚变研究进入快速发展期 ，已建成若干座聚变装置，聚变能应用的工程化设计研究稳步推进。为进一步规范聚变装置辐射安全监管

1 举国之力，推动可控核聚变发展

- ◆ 海外竞相锁定商用时间窗口，并通过资金投入、机制优化和国际合作加速技术转化。
- ◆ 德国以2045年实现原型堆并网和无补贴商运为双目标，强化德法意三边合作机制。
- ◆ 美国通过科技攻关、产业化准备和全球合作三大支柱，明确2030年代示范堆落地与2040年代规模商用目标。
- ◆ 韩国推出1.2万亿韩元的新商业计划，加速技术开发和基建投入。
- ◆ 加拿大通过联邦与省级联合注资建立三大研究中心重启国家战略。

图表：部分海外可控核聚变产业政策

时间	国家	政策名称	相关内容
2024年	德国	《德国制造的核聚变》	以2045年并网原型堆和无补贴商运电厂为双目标。通过技术中立的基础研究资助、里程碑式拨款国家级及建立协调机构（聚变委员会）强化德法意三边合作实现。
2024年	美国	《2024年聚变能战略》	通过三大支柱（科技攻关、产业化准备、全球合作）推动2030年代示范堆落地，2040年代规模化商用。
2024年	韩国	《“核聚变能源实现加速战略”计划》	推动总额达1.2万亿韩元的核聚变技术开发和基础设施建设新商业计划
2024年	英国	《关于新的聚变能国家政策声明的磋商》	制定全球首个聚变能专属国家政策声明，通过技术中立、开放选址、简化审批流程且取消容量门槛，加速聚变能商业化。
2022年	加拿大	《核聚变2030：加拿大路线图》	联邦与省级联合投资（首阶段5年1.25亿加元）、建立三大聚变研究中心（磁约束、惯性约束及替代技术），并培养高端人才，重启国家聚变项目

1 举国之力，推动可控核聚变发展

- ◆ 投资端，国家队主导科研，民营企业加速商业化，企业数量快速扩张。
- ◆ 中国国家队主要是【中科院/绵阳九院-聚变新能/先觉聚能】和【中核-中国聚变能/联创光电】。聚变新能为低温超导托卡马克路线，25年已开始招标建设BEST装置、计划27年建成、27-30年验证Q>5，30-40年建成CFEDR作为商业示范堆。中国聚变能走全超导托卡马克路线，计划26年下半年开始招标建设新一代装置。

图表：当前国家队可控核聚变项目

主导机构	商业化公司	装置/路径	定位	当前进展/未来规划
中国核工业集团-西南物理研究院	中国聚变能	HL-3	我国目前设计参数最高、规模最大的常规磁体托卡马克聚变研究装置	2025年三乘积已经达到10的20次方，预计2045年进入示范阶段
	联创光电+江西国资委	聚变-裂变混合堆	规划中，预计落地江西	总投资200亿元；计划2029年实现商业化发电
中科院-合肥等离子体物理研究所	-	EAST	低温超导托卡马克实验装置	2025年1月实现1066秒长脉冲高约束模等离子体运行
	聚变新能	BEST	在建，紧凑型低温超导托卡马克装置	紧凑型装置，注册资本增至145亿元；进入密集招标期；预计2027完工；
		CFEDR	规划，预计2035前完工	关键系统部件研究，计划Q>30，工程示范堆
绵阳九院	先觉聚能	Z箍缩聚变-裂变混合堆	规划，预计2035年开始建设	在2035年开始建1000MW级电功率Z箍缩聚变裂变混合堆，2040年进行发电演示

1 举国之力，推动可控核聚变发展

- ◆ **民营企业已开始涌现。**各公司凭借独特的技术路线与高校科研优势，积极布局核聚变领域，部分已取得专利并获融资支持。**能量奇点**为高温超导托卡马克路线，预计2027年实现等效氦聚变反应，2030年后建设示范电站。**新奥科技**建成中国首台球形托卡马克，**星环聚能**为同一路线，正在建设CTRFR-1。**联创光电**计划2029年建成高温超导的聚变裂变混合实验堆“星火一号”项目。

图表：中国活跃核聚变公司

公司名称	成立时间	技术路线	对标公司	主导高校	地理位置	设备情况	目标	融资
联创光电	1999年	混合堆	/	/	江西	/	<ul style="list-style-type: none"> Q值超30, 连续发电功率100MW 29年建成, 32年并网发电 	200亿元人民币
新奥科技	2018年	磁约束·球形托卡马克	/	北京大学、南开大学	河北廊坊	“玄龙-50U”装置实现百万安培氦硼等离子体放电	<ul style="list-style-type: none"> 26年“和龙-2”装置建成 验证球形环氦硼热核聚变反应 	约40亿人民币
星环聚能	2021年	磁约束·球形托卡马克	Tokamak Energy	清华大学工程物理系	陕西西安	已建成 SUNIST-2, 正在建设 CTRFR-1	<ul style="list-style-type: none"> 目标建成我国首个商用可控聚变堆。 	69,000,000美元 (约5亿人民币)
能量奇点	2021年	磁约束·托卡马克	Commonwealth Fusion Systems	/	上海	已建成首个样机	<ul style="list-style-type: none"> 2035年实现可控核聚变发出第一度电 	112,418,000美元 (约8亿人民币)
瀚海聚能	2022年	磁约束·场反位形(FRC)	Helion	四川大学	四川成都	采用场反位形直线型装置	<ul style="list-style-type: none"> 推进线性装置物理及工程设计 	超过5000万元人民币
聚变新能	2023年	磁约束·环形托卡马克	/	中科院	合肥	在建BEST	<ul style="list-style-type: none"> Q>5,实现氦气燃烧等离子体的稳定运行并演示发电 	注册资本145亿元人民币
星能玄光	2024年	磁约束·场反位形(FRC)	Helion和TEA	/	合肥	自主研发和建造场反位形装置Xeonova-1	<ul style="list-style-type: none"> 推进场反位形装置的研发和优化 	1亿元人民币
先觉聚能	2025年	混合堆-Z箍缩	ZAP Energy	绵阳九院	四川	近期可能揭牌:二期27-28年启动	<ul style="list-style-type: none"> 35年建设1000MW级电功率Z箍缩聚变裂变混合堆, 2040年进行发电演示 	50亿元人民币
诺瓦聚变	2025年	磁惯性约束	Helion	/	上海		<ul style="list-style-type: none"> 27年实现Q大于1 	5.5亿元人民币

1 举国之力，推动可控核聚变发展

- ◆ **海外核聚变公司数量更多，以美国最为领先。**截至2024年，全球核聚变活跃公司总数约50家（2020年仅约20家），其中80%为私营企业。公司数量最多的是美国，多达25家，且美国在多个技术路线上保持国际领先。另外，英国5家，德国4家，日本4家，法国、加拿大、澳大利亚、瑞典、瑞士、以色列、新西兰等也有代表企业。

图表：海外主要可控核聚变企业

企业名称	国家	技术路线	目标	融资规模
Commonwealth Fusion Systems (CFS)	美国	磁约束·托卡马克	2025-2026年SPARC实现Q>1; 2030年前建商用堆	约30亿美元
Helion Energy	美国	磁惯性约束·场反位形(FRC)	2025年实现Q>1, 计划2028年供电微软	超过10亿美元
TAE Technologies	美国	磁约束·场反位形(FRC)	2025年前后第六代 Copernicus证明Q>1; 2030年前商业堆目标	约14亿美元
Tokamak Energy	英国	磁约束·球形托卡马克	已达到1亿摄氏度等离子体离子温度; 30年代初投入商业运行, 输出净电功率约 150-200MW	2亿美元
General Fusion	加拿大	多活塞式聚变装置	2025年完成 LM26 调试; 2026年冲击聚变增益 = 1; 2030年代初推出商用机组并网	3.2亿美元
Zap Energy	美国	磁约束·Z箍缩	实验装置运行中, 寻求突破Q>1	2.08亿美元

2 多种技术路径有所突破

◆ 一、高温超导的应用

- ◆ 高温超导可以产生更强的约束磁场，因此在相同等离子体约束效果下，高温超导托卡马克装置可以大幅缩小体积，**线性尺寸上高温超导托卡马克是低温超导的1/4-1/3，则体积可缩小1/40，成本大幅下降、制造过程大幅简化，能够推动核聚变装置加速迭代。**
- ◆ ITER 作为国际大科学工程标杆，以 220 亿美元投入、29 年周期 打造 28 米级低温超导装置，借规模效应锚定氘氘聚变科学基线（5.3T 磁场、15MA 等离子体电流）。美国 CFS 主导的 SPARC，凭私营资本实现 30亿美元融资、5-6年建设周期，以 3.5 米级高温超导装置突破 11T 磁场强度，虽等离子体电流（8.7MA）略逊，却以 1/8 直径达成大于2倍的磁场增益。

图表：高温超导VS.低温超导

参数	工作温区	临界磁场强度	制冷能耗	工程复杂度	成本	辐照耐受性	代表应用
高温超导 (HTS, 如 YBCO)	液氮温区 (77 K/-196°C)	>30 T (理论极限)	低 (液氮成本 \$0.1/L)	简化 (无需多层绝热, 磁体结构轻量化)	带材当前 \$20-50/m (规模化后目标\$5/m)	较差 (中子辐照可能退化, 需屏蔽层)	SPARC、洪荒170、星火一号
低温超导 (LTS, 如 Nb3Sn/NbTi)	液氮温区 (4.2 K/-269°C)	~15 T (Nb3Sn上限)	极高 (液氮成本 \$10/L, 制冷系统复杂)	复杂 (需液氮循环、超真空绝热)	Nb3Sn线 \$100-200/m (材料+冷却系统翻倍)	较好 (ITER验证抗辐照能力)	ITER、BEST、CFEDR、JT-60SA

图表：ITER VS. SPARC

装置名称	投资	国家	主导机构	建设周期	直径/m	磁场强度/T	等离子体电流/MA
ITER	220亿美元 (35国分摊, 2020年估值)	国际	国际合作	2006-2035年 (29年, 含多次延期)	28	5.3 T (Nb3Sn 超导)	15
SPARC	30亿美元 (私营融资, 含原型机研发)	美国	CFS	2021-2026年 (5-6年, 2026年首次等离子体)	3.5 (仅为 ITER的1/8)	11 T (YBCO 超导)	8.7

2 多种技术路径有所突破

- ◆ **二、直线型模块化设计，大幅简化装置缩短迭代速度**
- ◆ **直线型装置常在磁惯性路线被使用，工程简单、迭代迅速，或率先实现能源化应用，改写核聚变竞争格局。**最具代表性的是Helion，其迭代周期压缩至1-3年，远超传统科研机构的十年周期。2023年第六代装置Trenta实现等离子体压缩密度 $3 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ，温度9keV（一亿度），**当前已经建成第七代装置，计划2025年下半年达到目标 $Q > 1$ ；并在2028年实现首个50MW商用堆并网发电（微软PPA履约）。**

图表：Helion7代更新，颠覆聚变研发范式

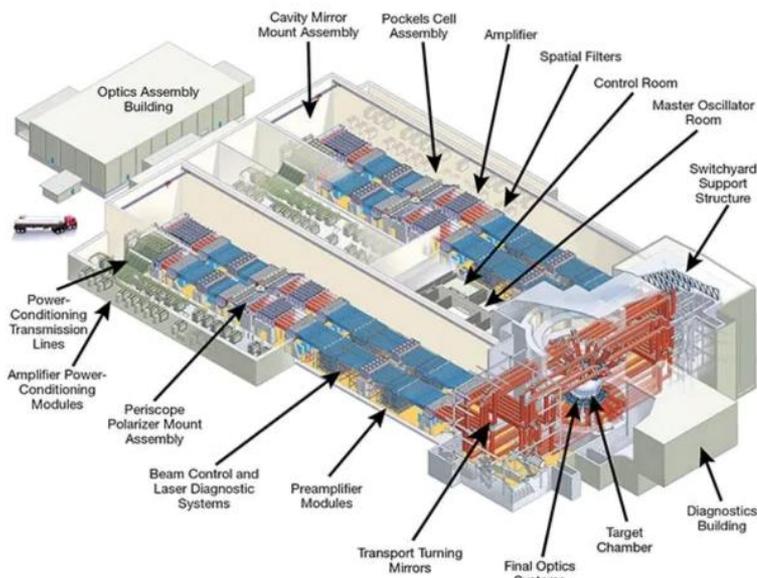
代际	装置名称	时间	主要成果
第一代	LSX	1990年代初期	LSX设计目标为形成 $s=8$ （内部回旋半径数量）的场反构型（FRC），实验成功形成 s 高达8的FRC，远超此前实验的 $s \leq 2$ 。
第二代	IPA	2008	研究了融合形成的FRC的约束。
第三代	IPA-C	2010	达到 300 km/s 的速度，产生氘中子和 2 keV 的氘离子温度。
第四代	Grande	2014	压缩磁场达到 4特斯拉 ，形成厘米级FRC，等离子体温度 5 keV 。演示了 首次 从亚尺度脉冲磁系统中直接回收磁能，超过 100万个脉冲的往返效率超过95% 。
第五代	Venti	2018	磁场 7T ，高密度离子温度 2keV 。三重积达到 $6.4 \times 10^{18} \text{ keV} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。
第六代	Trenta	2020-2021	磁压缩场超过 10T ，离子温度超过 8keV ，电子温度超过 1keV 。进行了为期16个月一万多次放电实验，获得 一亿度 。报告的离子密度高达 $3 \times 10^{22} \text{ ions} / \text{m}^3$ 和约束时间高达 0.5ms 。
第七代	Polaris	2024	预计增加脉冲频率至 1Hz （短时间），加热等离子体超过 一亿度 ，尺寸比Trenta大 25% 。

2 多种技术路径有所突破

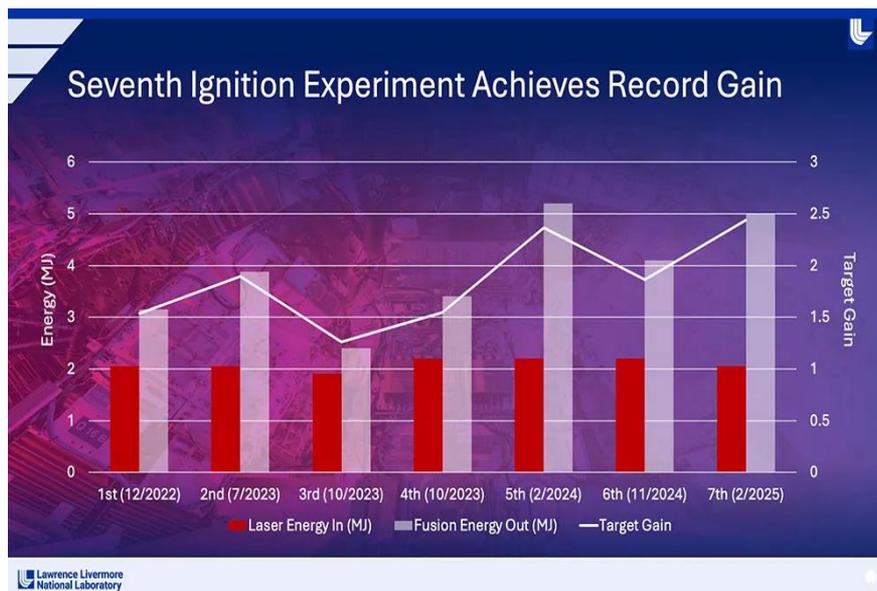
◆ 三、NIF惯性路线实现 $Q > 1$

- ◆ NIF以192路激光光路的规模，在**2022年12月**实现2.05MJ的激光能量打击氘氘燃料靶丸，产生了3.15MJ的聚变能量，聚变增益 $Q = 1.54$ 。这是人类历史上首次在激光惯性聚变上获得超过外部驱动能量的聚变能量输出。另外，2023年7月30日、2023年10月7日和2023年10月30日NIF又3次实现靶能量增益大于1的点火；**2024年2月12日**，产量达到创纪录的5.2MJ，**能量增益超过2**。NIF已实现7次点火，如下图所示。
- ◆ NIF所描述的Q值计算的是输入到靶腔的能量与聚变反应输出能量的比值，**未包含激光器系统总能耗**（实际激光器需要消耗约300MJ电能才能输出2MJ耳激光能量），若计入系统总能耗，Q值仍远小于1。

图表：NIF装置图



图表：NIF装置7次点火实现的增益记录



2 多种技术路径有所突破

◆ 四、聚变裂变混合堆概念推出

- ◆ **绵阳九院子公司先觉聚能混合堆项目计划27年投产。** 2021年，用于验证Z箍缩聚变点火的科学可行性“电磁驱动大科学装置”项目获得四川省发改委立项，投资规模达到50亿元。按照发展规划，将在2035年开始建设1000MW级电功率Z箍缩聚变裂变混合堆，2040年进行发电演示，之后进入商业推广阶段。一期50亿规划预计2027-28年投产，二期105亿+预计2030年投产。
- ◆ **江西国资委+联创光电+585所合作星火项目，预计29年并网发电。** 2023年11月12日，中核集团与江西省政府签署全面战略合作框架协议。当日江西联创光电超导应用有限公司（下称联创光电超导）和中核聚变（成都）设计研究院有限公司签订了协议，双方计划各自发挥技术优势，联合建设聚变-裂变混合实验堆项目“星火一号”。技术目标Q值大于30，实现连续发电功率100 MW。该项目拟落户江西省，**工程总投资预计超过200亿元。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。**

图表：混合堆技术突破的“中国加速度”

方向	核心突破	时间	意义
中子源	LTD功率源10秒一次	2025	提前美国激光路线 3-5年
材料	中国纳米ODS钢 250 dpa	2026	解决14 MeV中子损伤难题
经济性	30亿美元左右，输出电可高达100—200万千瓦，堆址寿命长	2035	经济优势明显

2 多种技术路径有所突破

- ◆ 可控核聚变的技术路径由“多元并进”逐步替代过去的“单一路线验证”，全球核聚变从基础科学走向工程实践的临界点已被跨越。
- ◆ 磁约束、惯性约束和磁惯性约束三条技术路径在科学可行性验证、工程可行性推进以及商业化探索方面均取得显著进展。预计未来十年内，磁约束聚变将通过BEST、SPARC、ITER等项目实现关键突破，ARC和CFETR等示范堆将迈向商业化运行；惯性约束聚变有望在2030年前后进行工程验证，并在2040年实现首个商业装置；磁惯性约束聚变计划在2025-2028年间实现首堆运行，并在2030年后启动商业试验堆。

图表：多路径探索进展显著

路径	科学可行性	工程可行性	商业化探索
磁约束聚变	20世纪90年代已实现 $Q \approx 1$ ，BEST将验证 $Q > 5$ ，ITER将验证 $Q > 10$	<ul style="list-style-type: none"> • 2027年BEST进入放电试验阶段； • 2034年ITER进入放电阶段； • 2030s中期DEMO堆启动设计/建设 	<ul style="list-style-type: none"> • 2027-2030年CFS SPARC 示范机计划实现 $Q > 10$； • 2030-2035年CFS ARC计划实现商业化； • 预计2040年中国 CFETR 示范堆计划运行，迈向商业堆； • 2050s商用堆发电入网；
惯性约束聚变	NIF实现 $Q > 1$ ，但尚未稳定控制重复性	<ul style="list-style-type: none"> • 2030前后进行激光点火重复性与高效率验证； • 2030s中后期进行高频激光驱动技术迭代 	<ul style="list-style-type: none"> • 2030年Marvel Fusion、Focused Energy 启动实验装置； • 2040年Focused Energy 计划实现首个商业装置； • 2040s中后期进行激光商用堆尝试； • 2050+进行大规模商业发电，但难度与成本高于磁约束
磁惯性约束聚变	2025-2026目标 Helion实现 $Q \approx 1$ 并商用验证	<ul style="list-style-type: none"> • 2025-2028，General Fusion/Helion首堆运行； • 2030前后，多家私营企业打磨技术迭代 	<ul style="list-style-type: none"> • 预计在2028年前送出聚变电能； • 2030年TAE、Helion 等公司计划启动商业试验堆； • 2035+若 进展顺利，预计可实现早期商业化

3 25-27年实验装置建设小高峰，招标体量大

- ◆ 2025-2027年将成为可控核聚变基础设施建设的密集期，年均投资额超过150亿元。
- ◆ 当前中国在建14个主要项目的总投资规模达1362亿元。当前项目以规划阶段为主，表明**未来3-5年是招标关键窗口期**。投资主体呈现多元化，涵盖科研机构（中科院合肥所、清华、中核）、国企（新能、联创光电、中国聚变能）和民企（新奥、能量奇点、星环、瀚海聚能、诺瓦聚变、星能玄光）。

图表：国内主要项目CAPEX

项目名称	机构	状态	建成时间/ 预计建设周期	总投资额 (亿元)	预计投资额 (亿元)						
					24年	25年	26年	27年	28年	29年	30年
EAST	中科院合肥等离子体物理研究所	已建成	2006年/升级	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
BEST	聚变新能	在建	2024-2027年	145	20.0	60.0	40.0	25.0			
CFETR-CFEDR		规划	2035-2040年	700							
环流二号HL-2A	中核西南物理研究所	已建成	2020年	-							
环流三号HL-3		已建成	2020年/2025年升级	40		20.0	20.0				
未命名	中国聚变能源	规划	2027-2030年	110				27.5	27.5	27.5	27.5
洪荒70	能量奇点	已建成	2024年	1.5							
洪荒170		规划	2025-2027年	35		11.7	11.7	11.7			
洪荒380		规划	2030-2035年	-							
玄龙50U	新奥科技	已建成	2024年	40	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
和龙-2		规划	2024-2027年	60	15.0	15.0	15.0	15.0			
SUNIST	清华大学工程物理	已建成	2002年	1							
CTRFR-1	星环聚能	规划	2024-2027年	10	2.5	2.5	2.5	2.5			
HHMAX901	瀚海聚能	在建	2024-2026年	3	1.0	1.0	1.0				
未命名	诺瓦聚变	规划	2025-2027年	5.5		1.8	1.8	1.8			
Xeonova-1	星能玄光	已建成	2025年	1							
星火一号	联创光电	规划	2025-2029年	200		40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	
	上海科技大学			8	1.0	4.0	3.0				
合计投资额				1362	44	157	137	129	72.5	72.5	32.5

3 25-27年实验装置建设小高峰，招标体量大

- ◆ 聚变从当前时点到量产还需要很长的周期，但在此期间装置需要不断更新迭代，每一代的更迭都将带来较大投资，从而拉动招标体量扩大。以国内低温超导托卡马克为例，聚变新能BEST实验装置投资145亿，下一代CFETR商业demo投资需要600-800亿，再下一代才是可量产的核聚变商业堆 投资预计800亿/个。
- ◆ 2025年以来，中科院主导的EAST、BEST、CRAFT等项目招标规模可观，单项目金额超千万元的案例频现，可控核聚变装置建设进入密集落地期。同时，行业典型项目招标正向更高参数、更复杂系统升级，超高压电源、低温传输线、高温超导等新兴设备需求激增。

图表：主要项目招标情况

项目	标段	主要部件	公开总金额（万元）
EAST	8	偏滤器系统、辅助系统	4,066
BEST	8	磁体系统	8,150
CRAFT	13	辅助系统	9,975
ITER	4	特种部件制造与材料	1,854
其他中科院招标项目	38	磁体系统、辅助系统	28,204
相关企业招标项目	19	基建配套、辅助系统	40,473

4 关键节点即将到来

图表：未来三年关键节点

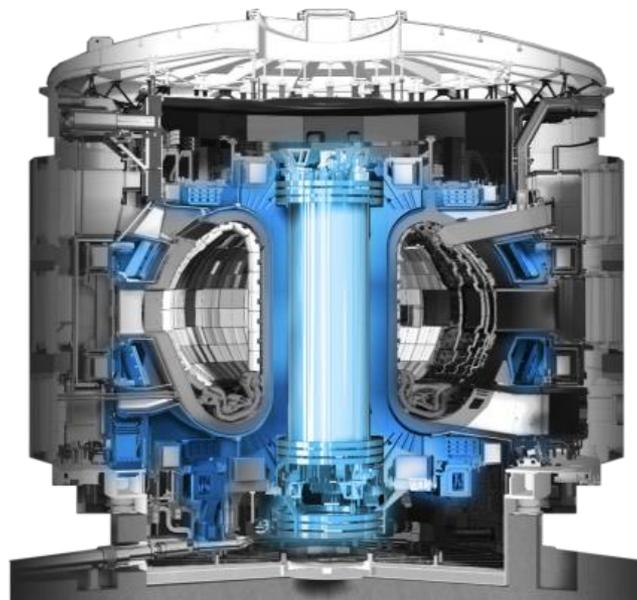
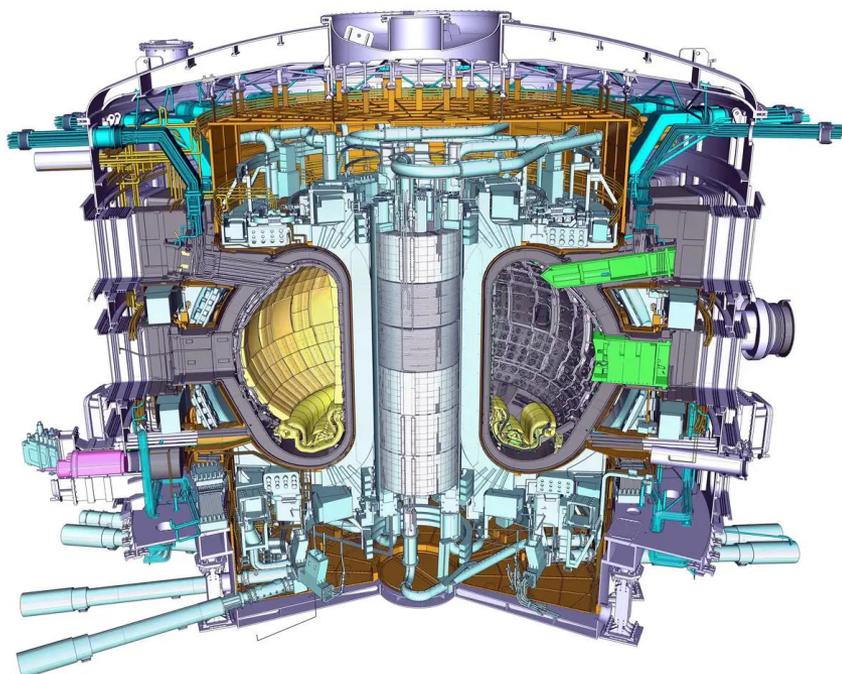
年份	项目/事件	关键里程碑	国家/机构	意义
2025	Helion Q>1验证	Polaris装置实现氘-氦3聚变净能量增益（输出>输入），触发微软50 MW订单。	美国Helion	私营聚变首次净增益
	ARC聚变电厂启动关键审批流程	美国首座CFS商业聚变电厂，产能约400MW，计划于2020年代末破土动工，2030年代初投入运营。	美国CFS	全球首个聚变电厂项目
	ITER首等离子体计划推迟	低功率等离子体实验（延迟至2033），为全面实验铺垫。	国际团队	超导托卡马克科学延误
	W7-X刷新三重积纪录	维持43秒三重积峰值，首次精确弹丸注入控制，指向30分钟目标。	德国马普所	仿星器装置参数突破
2026	SPARC首次等离子体	全球首个全高温超导托卡马克运行（磁场 21 T），验证紧凑化设计。	美国CFS/MIT	高温超导工程化首证
	英国STEP设计冻结	确定球形托卡马克技术路线（高温超导+液态锂包层），目标2040年发电。	英国原子能机构	球形托卡马克工程定型
	W7-X仿星器氘实验	氘气下稳态运行 30分钟@2亿℃，验证仿星器聚变燃料约束能力。	德国马普所	非托卡马克路线关键测试
2027	CFS首座电厂签约	SPARC技术衍生200 MW电厂签约，目标电价 <\$0.05/kWh。	美国CFS	全球首个聚变商业订单
	SPARC氘-氦实验	目标能量增益 Q>10，验证高温超导抗中子辐照能力。	美国CFS/MIT	高温超导托卡马克科学可行性
	CFETR高温超导磁体交付	7 T全高温超导环向场线圈交付，支撑中国聚变工程实验堆建设。	中科院等离子体所	中国自主超导产业链成熟
	TAE Copernicus建造推进	目标达1亿℃，验证Q>1净增益能力，推进氢-硼聚变路径。	美国TAE	无中子聚变关键验证
	General Fusion电厂动工	50 MW磁化靶聚变（MTF）电厂开建，液态金属压缩技术工程化验证。	加拿大General Fusion	磁惯性约束首座示范堆

Part3 装置架构拆解与产业链成本图谱

1 托卡马克中磁体成本最高，占比28%/50%

- ◆ 托卡马克是当前传统主流设备，使用一个特殊的环形磁性笼，将等离子体与容器壁隔离开，创造出核聚变反应的封闭空间。以最为完整的ITER为例，托卡马克装置的主要部件包括磁体系统、真空室、包层模块、偏滤器、真空杜瓦。另外还有真空系统、低温系统、氦增值、电源诊断系统等支持系统。
- ◆ 在托卡马克中成本占比最高的是磁体系统，磁体主要由铌锡与铌钛超导线圈构成，实现磁场控制。低温超导托卡马克装置磁体系统占比约28%，高温超导托卡马克其磁体系统占比更高，约为50%。

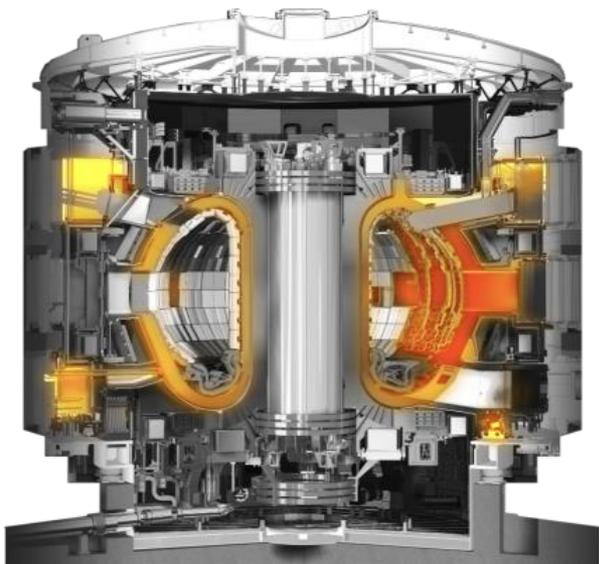
图表：磁体系统主要范围及组成部分



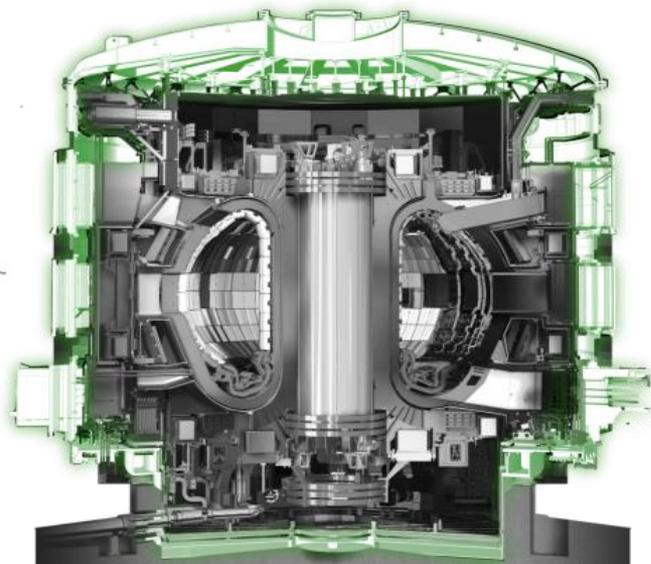
2 三大件：真空室+冷屏+杜瓦，成本占10-15%

- ◆ 真空室、冷屏、杜瓦共称为托卡马克三大件，占低温超导托卡马克的总成本的12%。
- ◆ 真空室是可控核聚变的核心密闭容器，为等离子体提供高真空约束环境，主要材料为不锈钢或铁素体马氏体钢，需耐受高能中子辐照，分成：1) 壁内屏蔽块用于中子屏蔽与抑制磁场扰动，2) 热屏蔽层要降低真空室至超导磁体的辐射与传导热负荷。
- ◆ 真空杜瓦，也称低温恒温器，是一个不锈钢高真空容器，处于整个托卡马克装置外围，为真空室与超导磁体提供高真空及超低温环境并支撑整体结构。

图表：真空室主要范围及组成部分



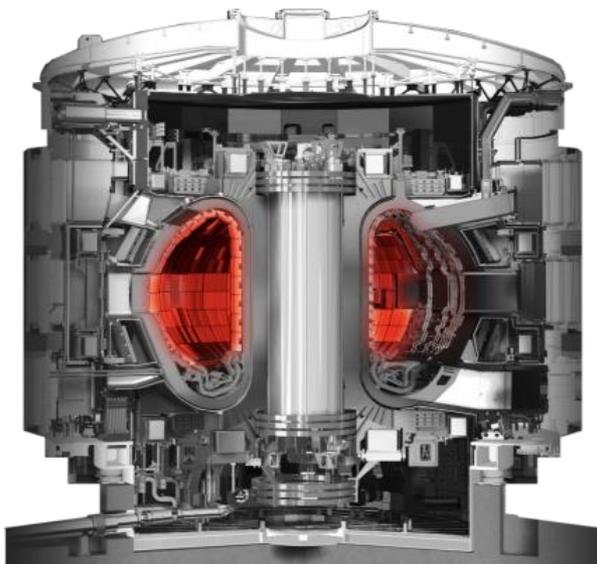
图表：真空杜瓦主要范围及组成部分



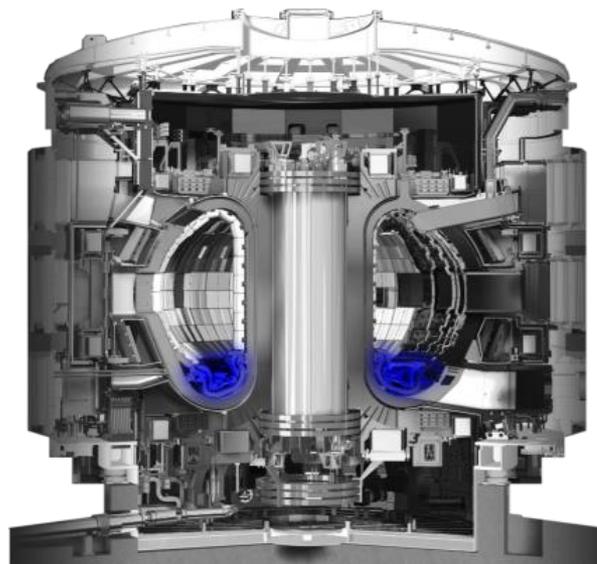
3 包层系统、偏滤器：技术难度大、成本占5-10%

- ◆ **包层模块覆盖真空室内壁，用于屏蔽高热负荷与高能中子，保护超导磁体与结构材料。**该系统主要承担三大核心功能：氦燃料自持、能量增殖（将聚变能转化为热能）以及辐射屏蔽。包层系统分成：1) 第一壁主要材料为钨，直接承受等离子体热负荷与中子辐照，2) 440块屏蔽块通过钢-碳化硼复合材料慢化吸收中子，同时导出聚变产热。
- ◆ **偏滤器是位于真空室底部的关键部件，承担聚变产物的杂质控制、热量耗散的功能。**主要材质为钨、石墨、铜及其合金、钼及其合金、铌及其合金等。其内、外靶板是受等离子体轰击最激烈的区域，同时也是装置中热负荷最严苛的区域。

图表：包层系统主要范围及组成部分



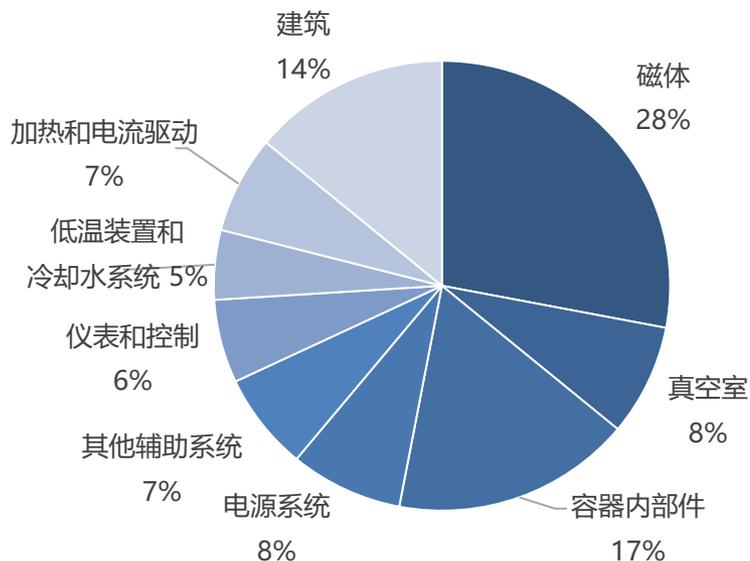
图表：偏滤器主要范围及组成部分



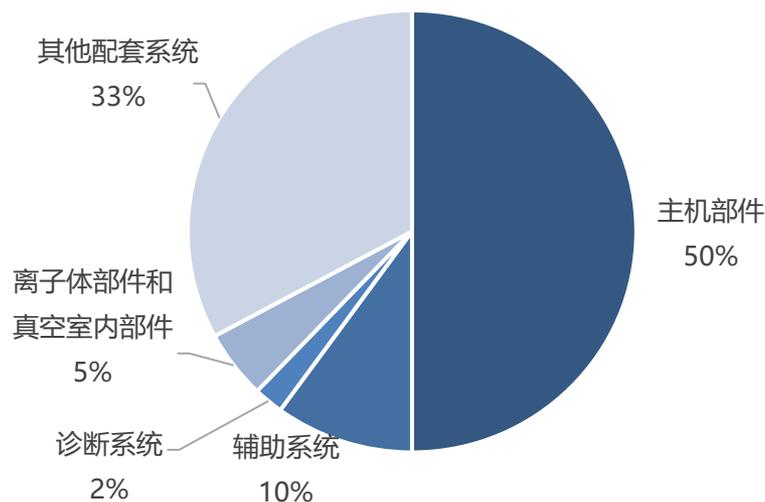
4 低温/高温超导托卡马克成本拆分 (海外)

- ◆ 从ITER装置的成本拆分来看，低温超导托卡马克装置除了磁体系统占比约28%、三大件约12%、包层偏滤器10%之外，还有些辅助系统包括：电源系统8%、加热系统7%、低温冷却系统5%、仪器控制6%等关键技术环节比重较高，另外土建厂房占14%左右。
- ◆ 高温超导磁体系统占比更高(约为50%)，如SPARC项目20亿美元总投资中10亿用于高温超导磁体。除此之外，高温超导其他部分的成本与低温超导基本保持一致，但由于高温超导托卡马克体积较小，其他成本比例降低。
- ◆ **若在中国建一个类似SPARC的装置，约需70亿人民币，成本约为SPARC1/2。**未来技术成熟后，主机部件（包括磁体、真空室、杜瓦、冷屏）约占一半经费，即35亿人民币；目前磁体处于研发阶段，成本高，占比达50%。辅助系统约占70亿中的10%，包括各种加热系统、低温系统、真空系统、送气系统等。诊断系统约1 - 2亿，经费波动幅度较大，与反应堆情况和所需传感器有关。面向等离子体部件（不考虑包层）和真空室内部件约需几亿人民币。电源、厂址和变电站等其他配套系统占20亿人民币。

图表：低温超导托卡马克-成本拆分 (ITER为例)



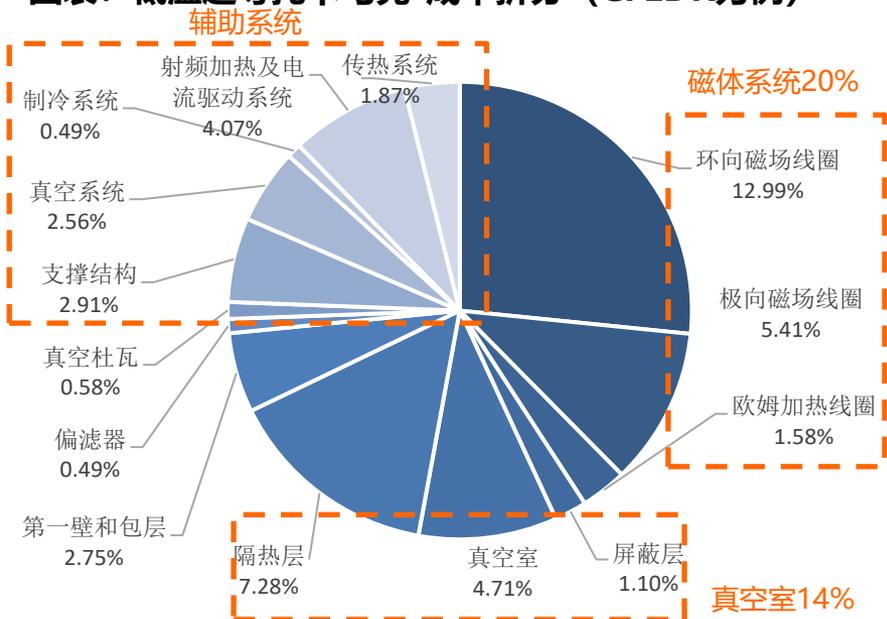
图表：高温超导托卡马克-成本拆分 (SPARC为例)



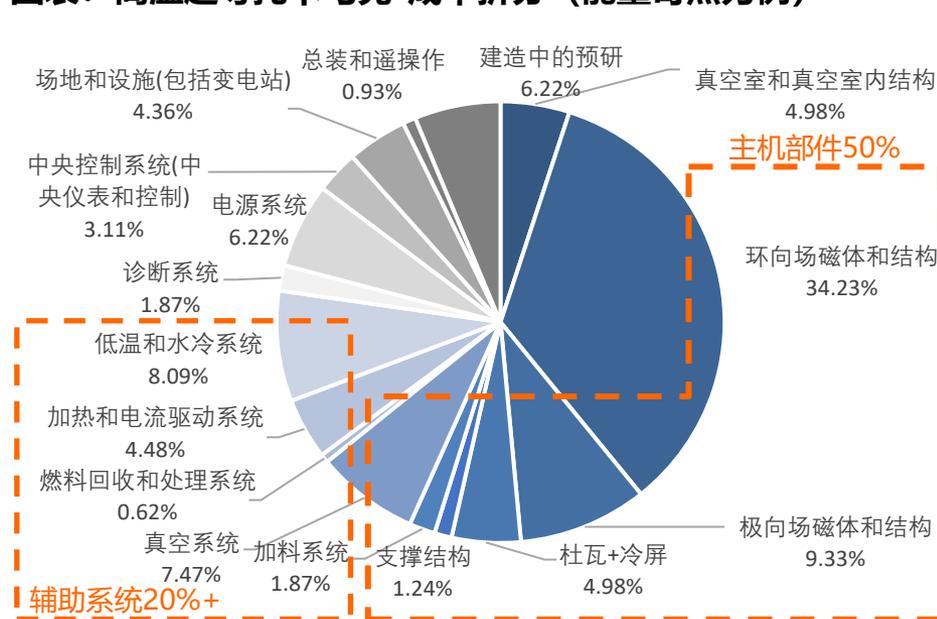
5 低温/高温超导托卡马克成本拆分（国内）

- ◆ 由于国内产业链成本总体低于海外，因此国内托卡马克装置成本拆分略有差异。低温超导装置成本占比中，磁体国内/外分别为20%/28%，真空室国内/外分别为14%/8%。高温超导装置成本占比中，主机部件国内外均为50%。
- ◆ 国内成本优势明显，以CFEDR和能量奇点为例，1个ITER的造价能支持2个CFETR的建设。
- ◆ 根据CFEDR电站的成本拆分数据，对比ITER磁体系统占比下降，真空室成本占比上升。结构内具体部件分布：磁体系统内环向场线圈成本占比最高（12.99%），真空室中占比最高结构为隔热层（7.28%）。包层系统（2.75%）与偏滤器（0.49%）成本显著低于核心系统。辅助系统中，射频加热及电流驱动系统（4.07%）占主要费用。
- ◆ 能量奇点的成本拆分数据中，各项成本占比与SPARC接近，聚变堆芯系统环向场磁体和结构成本占比最高（34.23%），其次是极向场磁体和结构，占比9.33%，真空室和真空室内结构占比4.98%。辅助系统中，占比最高结构为低温和水冷系统（8.09%），其次为真空系统（7.47%）。

图表：低温超导托卡马克-成本拆分（CFEDR为例）



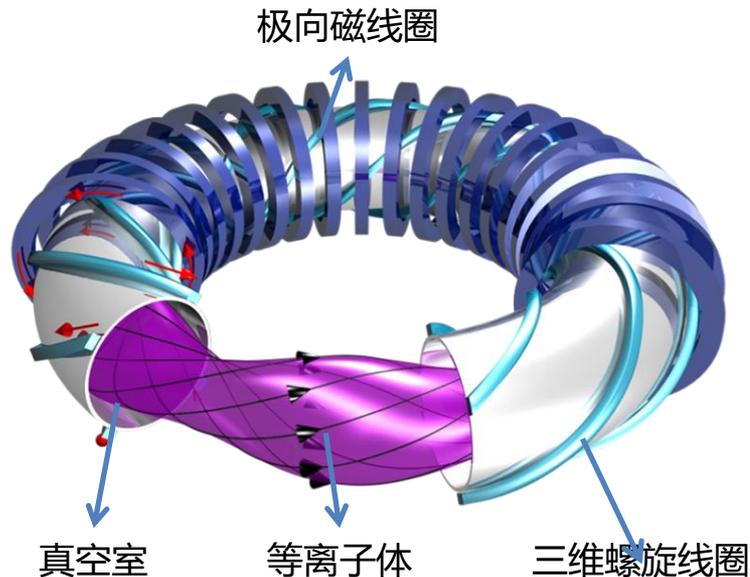
图表：高温超导托卡马克-成本拆分（能量奇点为例）



1 仿星器装置主要组成部件

- ◆ 仿星器是利用精确计算的三维磁场及线圈加工工艺转移等离子体电流控制，能直接通过外部复杂线圈形成内部闭合、扭曲的环状磁笼。
- ◆ 仿星器的构成部件和托卡马克基本一致，但相比托卡马克装置结构更复杂、工程难度更大，研发周期长、成本高，目前仅日本、德国有完整装置。仿星器内部没有等离子体电流，从根本上避免了托卡马克因等离子体电流不稳定性导致的“大破裂”风险，运行更稳定，设计灵活性高，热流控制较好。传统仿星器的磁场波纹度较大，导致其新经典输运水平和高能粒子损失水平高于托卡马克，这在一定程度上影响了等离子体的约束性能。
- ◆ 对于大型仿星器，德国 Wendelstein 7-X 仿星器的建设成本约为 10 亿欧元。一些中小型仿星器的研发和建设成本相对较低，美国 Type One Energy 公司在 2024 年融资 8200 万美元的基础上寻求 2 亿美元的投资，以完成其第一台机器无限一号（Infinity One）的设计。

图表：仿星器装置结构示意图



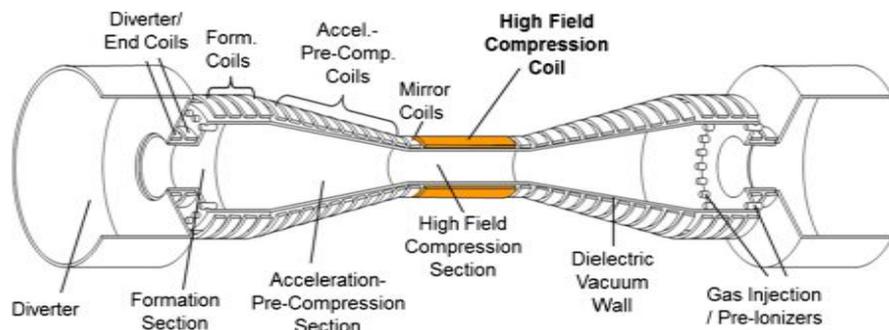
图表：仿星器与托卡马克装置主要结构差异

结构	主要差异	托卡马克	仿星器
磁体系统	线圈类型	环形磁线圈、极向磁线圈、中心螺线管、	环形磁线圈、极向磁线圈、三维螺旋线圈
真空室	形状	轴对称标准环形 (类似“甜甜圈”)	非轴对称扭曲环形 (8字形或螺旋形)
	内部结构	规则对称，偏滤器等设备易于安装	需适应复杂磁体安装和三维磁场分布
包层系统	形状	环形	定制化复杂几何形状

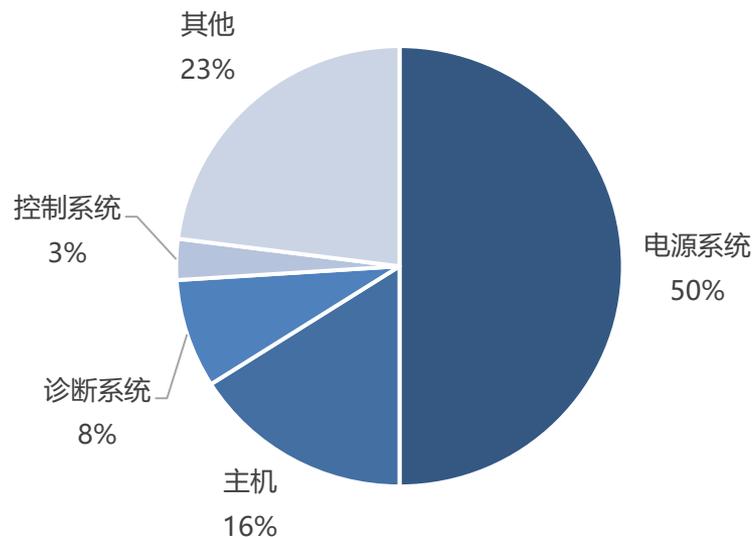
1 直线型磁惯性约束装置组成部分及成本测算

- ◆ **结构简单模块化，有利于迭代更新。**磁惯性约束常用直线型装置，是一种结合磁场约束与惯性压缩的混合核聚变技术。装置采用直线几何设计，省去传统环形磁体的复杂结构，因此其投资成本大幅低于托卡马克或仿星器，且由于其直线型、模块化的设计，检修更换、装置迭代更容易，Helion前7代装置投资共约6-10亿美金，我们预计国内直线型装置反应堆投资约5-6亿，商业化约30-50亿/座。
- ◆ 以某国内初创公司的测算数据为例，其第一代直线型装置规划投资5-6亿，其中电源系统占50%、主机16%、诊断系统8%、控制系统2-3%等。

图表：直线型磁惯性约束装置结构图



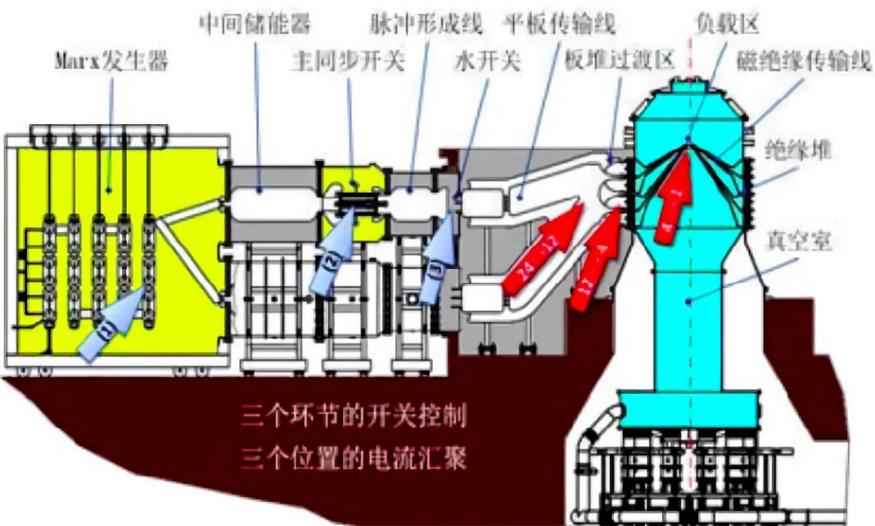
图表：直线型磁惯性约束装置-成本拆分



2 Z箍缩装置组成部分及成本测算

- ◆ **Z箍缩装置也是直线型装置，工程复杂度远低于托卡马克。** 核心结构模块主要有1) 金属衬套，通常材料为高导电性金属（如钨、铝）或液态锂（可重复使用设计），空心圆柱体（直径毫米级），置于真空室中心，燃料注入其内部；2) 脉冲电源系统，传输结构为同轴水线 + 磁绝缘传输线，引导电流以光速95%传输至衬套，避免能量损失；3) 真空室，材料主要为不锈钢内衬+抗辐射层（如硼聚乙烯），顶部/底部设电极接口；4) 磁约束与诊断系统；5) 能量回收层（包层），材料为液态锂或氟锂铍（FLiBe）熔盐包裹真空室，吸收中子后循环至热交换器发电。
- ◆ 以美国“Z Machine”（桑迪亚实验室）为例，其升级版投入约 1.2亿美金，脉冲电源系统成本占比最高达到 45%-50%；真空室+磁约束系统成本占比15-20%。**与托卡马克相比，1) Z箍缩采用直线对称设计（真空室+同轴电极），建造难度降低50%以上，更易模块化量产；2) 省去昂贵低温超导系统（占托卡马克成本30%），运维复杂性显著下降。**

图表：Z箍缩装置结构图（聚龙一号）



图表：Z箍缩装置-成本拆分(Z-Machine)

模块	成本占比	核心功能与挑战
脉冲电源系统	45%-50%	电容储能模块（Marx发生器）+ 传输线，需承受极高电流（>26 MA）。
金属衬套&燃料靶	20%-25%	高精度可替换衬套（单次成本\$10万级），频繁更换推升运维成本。
真空室	15%-20%	抗中子辐照材料（如钢-钨复合结构），密封性要求高。
诊断与控制系统	10%-15%	高速传感器（X光、中子探测器），实时反馈坍塌动态。
冷却与能量回收	<5%	液态金属冷却剂循环，能量转化效率尚低（<5%）。

1 分结构产业链：国央企承担关键系统，民营企业聚焦细分领域

- ◆ 可控核聚变产业链整体呈现民企在细分领域确立优势、关键系统以国家队为主的供应生态。
- ◆ 海外项目中，ITER项目主要招标项目聚焦在磁体、真空系统、偏滤器及电源配套系统领域。其中截至2025年6月，西部超导主要承担磁体系统相关部件，已承担国内超导托卡马克90%以上的磁体订单。国光电气聚焦真空部件及真空室内部件领域，中标了高真空电连接器加工项目。安泰科技参与项目偏滤器核心部件制造。纽威股份、百利电气等参与项目配套系统制造，久立特材参与导体铠甲部分。
- ◆ 国内项目中，EAST装置的供应链以科研院所关联企业为主，但其聚变电源由爱科赛博部分承担、带材和偏滤器靶板西部超导及安泰科技中标。BEST项目招标以磁体系统为主，其中偏滤器部件由国光电气供应，真空室部件由合锻智能供应，PF磁体电源许继电气中标，电容器由王子新材子公司供应，其他大部分项目部件仍为科研院所供应。

图表：重点项目上市公司中标情况

项目	部件	中标公司
ITER	磁体系统	西部超导
	真空系统	国光电气
	偏滤器	安泰科技
	阀门	纽威股份
	电缆（带材）	永鼎股份
	电力无功补偿设备	百利电气
	导体铠甲	久立特材
EAST	偏滤器	安泰科技
	磁体电源	爱科赛博
	电缆（带材）	西部超导
BEST	偏滤器	国光电气
	真空室	合锻智能
	磁体电源	许继电气
	电容器	王子新材

2 分结构产业链：国央企承担关键系统，民营企业聚焦细分领域

原材料	钨	中钨高新	第一壁&偏滤器	偏滤器	宝钛股份
		厦门钨业		安泰科技	
		安泰科技	偏滤器、第一壁	国光电气	
		章源钨业	真空杜瓦	真空杜瓦	航天晨光
		洛阳钼业			应流股份
		翔鹭钨业			上海电气
		中金岭南			兰石重装
天力复合	低温系统	雪人股份			
磁体	带材	永鼎科技	配套设备	电力无功补偿设备	百利电气
		精达股份		电缆	久盛电气
	超导	西部超导	电容	尚纬股份	
		永鼎股份	电源系统	王子新材	
		联创光电	核电搅拌站	弘讯科技	
		精达股份	核电搅拌站	南方路机	
		百利电气	气体分离装置	利柏特	
宝胜股份	电子管	旭光电子			
真空室	真空室	国光电气	整机运营	整机运营	中国聚变能源
	构件	上海电气			上海未来聚变能源
	阀门	合锻智能			安徽聚变新能
		江苏神通			
		纽威股份			
间接制造	中核科技				
聚变电源	磁体电源	海陆重工			
		爱科赛博			
		许继电气			
		英杰电气			

Part4 核聚变度电成本具备竞争力

1 聚变能初显经济潜力

- ◆ **尽管尚未商业化，聚变能预期价格已具备初步竞争力。**根据第三方预测，聚变能的LCOE范围为30-140美元/MWh，已处于与可再生能源如太阳能和风电相近的区间，甚至优于部分传统能源如美国核能（142-222美元/MWh）和燃气调峰（110-228美元/MWh）。
- ◆ **整体能源市场将持续朝向更高效率和更低成本的方向发展。**从预测趋势来看，至2050年，传统能源如煤炭、天然气、水电的LCOE呈现下降趋势。从2030-2050年，煤炭由96-131美元/MWh下降至77-107美元/MWh，水电维持在42-121美元/MWh。与此同时，生物能源成本相对坚挺。

图表：2024能源LCOE对比

能源类型		LCOE (美元/MWh)
可再生能源	住宅屋顶太阳能光伏	122-284
	社区及工商业太阳能光伏	54-191
	公用事业太阳能光伏	29-92
	地热能	64-106
	陆上风电	27-73
	海上风电	74-139
传统能源	燃气调峰	110-228
	美国核能	142-222
	煤炭	69-168
	燃气联合循环	45-108
聚变能		30-140 (预测)

图表：能源LCOE预测

能源类型	2030	2040	2050
水电	50-130	49-121	42-121
生物能源	143-173	141-173	132-167
煤炭	96-131	78-108	77-107
天然气	54-128	55-119	55-119
核能 (按WACC分类)	WACC8%	58-185	
	WACC4%	47-117	

2 私营企业的LCOE目标普遍显著低于政府项目

- ◆ 低成本路径由私营企业主导（目标均 <0.6 元/kWh），其紧凑设计、工程友好型技术（磁惯性、场反位形）和资本效率（融资10亿级美元）是关键优势；政府项目则侧重科研验证，成本与商业化进程均滞后。
- ◆ 美国私营企业表现突出，Helion凭借磁惯性技术路线目标成本最低（0.07-0.3元/kWh），已获微软购电协议支持；TAE（场反位形）和CFS（高温超导托卡马克）紧随其后，目标分别为 <0.3 元/kWh和0.4-0.6元/kWh；加拿大General Fusion（磁活塞压缩）目标 <0.5 元/kWh，同样聚焦低成本路径；
- ◆ 政府项目成本较高：英国UK STEP（0.5-0.8元/kWh）、国际ITER（0.7-1元/kWh）及欧盟DEMO（0.7-1.2元/kWh）的LCOE普遍高于私营项目，主因需巨额投资（ITER达220亿美元）和长期科研验证目标（如 $Q>10$ ）。

图表：代表项目经济性对比

项目	技术路线	投资规模	目标Q值	商用预期时间	预计LCOE	特点说明
ITER (国际)	磁约束托卡马克	\$220亿	≈ 10	2035 (实验)	学术估算约0.7-1元/kWh	全球最大科研项目，重科研验证
Helion (美国)	磁惯性	\$10亿 (已融资)	> 1	2028 (目标)	目标0.07-0.3元/kWh	目标紧凑低成本，微软已签购电协议
TAE (美国)	场反位形	\$12亿+	> 1 (物理验证)	2030后	目标 <0.3 元/kWh	高频率运行、稳态放电探索中
CFS (美国)	高温超导托卡马克	30亿美元	SPARC: $Q > 10$, ARC: $Q > 30$	2030年代中期	目标约0.4-0.6元/kWh	与MIT合作，紧凑托卡马克
UK STEP (英国)	球形托卡马克	数十亿英镑 (前期2亿)	$Q > 1$	2040 (建成示范堆)	预估0.5-0.8元/kWh	退役煤电厂址改建，政府主导
EU DEMO (欧盟)	磁约束托卡马克	50-60亿美元以上	$Q > 10$	2050 (首堆)	学术估算约0.7-1.2元/kWh	ITER成果工业化，超大型工程
General Fusion (加拿大)	磁活塞压缩 (惯性)	超3亿美元	目标 $Q \approx 10$	2030年后示范机	目标 <0.5 元/kWh	靠活塞冲击压缩，运行温和、工程友好

3 商业化度电成本测算可低于0.3元/kwh

- ◆ **低温超导托卡马克聚变装置以国内CFETR为例**，其初始设备投资为800亿元-2GW聚变功率，考虑氦成本、运维费用、材料更换，总投资约1100亿；假设 $Q=30$ ，考虑热电转换，在50年内发电量为38.8万GWh，则简单计算**度电成本为0.3元/kwh，低于火电。**
- ◆ **直线型磁惯性聚变装置以海外Helion为例**，其初始设备投资为40亿元-100MW聚变功率，考虑氦成本、运维费用、材料更换，总投资约58亿；假设 $Q=10$ ，考虑热电转换，在50年内发电量为3万GWh，则简单计算**度电成本为0.18元/kwh，低于光伏风电。**直线型其结构简单、建设周期短和初始投资较低，使其在实现特定能量输出目标时具备更高的经济效率。

图表：低温超导托卡马克与直线型磁惯性经济性对比

技术方式	低温超导托卡马克			直线型磁惯性	
初始投资 (亿元)	800			40	
运维费用	5%			3%	
材料更换	10%			5%	
氦成本 (亿元)	180			15	
总费用 (亿元)	1100			58.2	
若Q=	5	10	30	3	10
聚变功率 (GW)	2.0	2.0	2.0	0.1	0.1
热电转换	24%	24%	24%	81%	81%
发电功率 (GW)	0.33	1.17	1.72	0.06	0.09
发电量 (GWh/年)	1440	5040	7440	424	631
总发电量 (GWh)	72000	252000	372000	21185	31556
度电成本 (元/kwh)	1.53	0.44	0.30	0.27	0.18

Part5 投资建议与风险提示

◆ **投资建议：**在政策与资本双轮驱动下，核聚变国内外多个装置在建，拉动大规模招标，25-28年将集中验证Q>1，推动行业从实验向产业迈进，未来空间无限，建议关注核心供应商：西部超导、国光电气、安泰科技、精达股份等

图表：公司估值表（截至2025年5月30日收盘价，盈利预测来自wind一致预期）

分类	证券代码	公司名称	市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)				PE		
				24年	25年E	26年E	27年E	25年E	26年E	27年E
原材料	000657.SZ	中钨高新	137	9	10	11	13	14	13	10
	600549.SH	厦门钨业	315	17	20	22	24	16	15	13
	000969.SZ	安泰科技	119	4	4	4	5	34	29	26
	002378.SZ	章源钨业	82	2	2	2	3	41	34	27
	603993.SH	洛阳钼业	1,514	135	150	165	183	10	9	8
	002842.SZ	翔鹭钨业	19	-1	-	-	-	-	-	-
	000060.SZ	中金岭南	182	11	11	13	13	16	15	14
	873576.BJ	天力复合	25	1	1	1	1	43	39	34
	600105.SH	永鼎股份	78	1	4	1	2	21	52	42
	600577.SH	精达股份	151	6	7	9	10	21	18	16
磁体	600577.SH	精达股份	151	6	7	9	10	21	18	16
	600105.SH	永鼎股份	78	1	4	1	2	21	52	42
	600363.SH	联创光电	208	2	6	7	10	33	28	20
	600468.SH	百利电气	56	-1	-	-	-	-	-	-
	688122.SH	西部超导	285	8	10	12	14	28	23	20
	600973.SH	宝胜股份	71	-3	1	1	-	77	55	-
	688776.SH	国光电气	60	0	1	2	2	49	35	25
真空室	601727.SH	上海电气	1,310	8	14	27	32	96	48	40
	603011.SH	合锻智能	37	-1	-	-	-	-	-	-
	002438.SZ	江苏神通	62	3	3	4	5	18	15	13
	603699.SH	纽威股份	165	12	14	16	19	12	10	9
	000777.SZ	中核科技	65	2	3	4	4	21	17	16
	002255.SZ	海陆重工	48	4	4	5	6	11	10	9
第一壁&偏滤器	600456.SH	宝钛股份	139	6	6	7	8	23	20	17
	000969.SZ	安泰科技	119	4	4	4	5	34	29	26
	688776.SH	国光电气	60	0	1	2	2	49	35	25
真空杜瓦	600501.SH	航天晨光	84	-4	0	0	-	603	301	-
	603308.SH	应流股份	91	3	4	6	7	22	16	12
	601727.SH	上海电气	1,310	8	14	27	32	96	48	40
配套设施	603169.SH	兰石重装	73	2	2	3	3	33	28	26
	002639.SZ	雪人股份	67	0	-	-	-	-	-	-
	600468.SH	百利电气	56	-1	-	-	-	-	-	-
	301082.SZ	久盛电气	32	0	-	-	-	-	-	-
	603333.SH	尚纬股份	34	0	-	-	-	-	-	-
	002735.SZ	王子新材	38	-1	-	-	-	-	-	-
	603015.SH	弘讯科技	45	1	-	-	-	-	-	-
	603280.SH	南方路机	24	1	-	-	-	-	-	-
	605167.SH	利柏特	45	2	2	3	3	19	16	13
	600353.SH	旭光电子	67	1	2	2	3	40	32	24
	002611.SZ	东方精工	135	5	6	7	8	22	20	17
	688167.SH	炬光科技	57	-2	0	1	2	28,365	69	36
	600875.SH	东方电气	474	29	44	52	57	11	9	8
	600501.SH	航天晨光	84	-4	0	0	-	603	301	-

- ◆ **技术瓶颈风险：** 尽管可控核聚变研究取得了显著进展，但仍面临诸多技术难题。如等离子体的长时间稳定控制技术，要实现商业化发电，需确保等离子体在高温、高压状态下长时间稳定运行，目前该技术还未完全成熟。同时，用于核聚变装置的材料需具备耐高温、抗辐射等特性，当前部分关键材料的性能和量产能力仍有待提升，若这些技术瓶颈无法突破，将阻碍可控核聚变商业化进程。
- ◆ **巨额资金投入风险：** 可控核聚变项目建设和研发需要巨额资金。从实验堆到商业堆的建设，涉及大量先进设备研发制造、科研人员投入以及长期实验研究。若资金筹集不足或资金链断裂，项目可能停滞甚至失败，尤其是民营企业，对政策专项债等外部资金支持依赖度较高，资金风险更为突出。
- ◆ **国际竞争与专利风险：** 全球各国在可控核聚变领域竞争激烈，美国、欧洲等国家和地区也在大力推进相关研究。不同国家技术路径存在差异，可能引发专利壁垒。我国在技术发展过程中，若不能妥善应对国际专利纠纷，或无法在国际竞争中占据技术优势，将对国内产业发展造成不利影响，限制技术交流与合作，增加技术研发成本和时间。
- ◆ **政策不确定性风险：** 虽然国家将核聚变纳入“未来产业十大工程”，但政策的持续性和具体扶持力度仍存在不确定性。若未来政策支持减弱，在项目审批、资金补贴、土地使用等方面无法给予足够支持，将影响企业参与积极性，减缓产业发展速度，也会增加企业投资风险。
- ◆ **市场需求与商业模式风险：** 目前距离可控核聚变商业化发电还有一定时间，未来市场需求和商业模式尚不明朗。在电力市场中，传统能源和其他新能源已占据一定市场份额，可控核聚变电力如何定价、如何接入现有电网、如何开拓市场等都存在不确定性。

免责声明

- 东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。
- 本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（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，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。
- 在法律许可的情况下，东吴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。
- 市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，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。
- 本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。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。
- **东吴证券投资评级标准**
- 投资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A股市场基准为沪深300指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普500指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：
- 公司投资评级：
 - 买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；
 - 增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；
 - 中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；
 - 减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；
 - 卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。
- 行业投资评级：
 - 增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；
 - 中性：预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；
 - 减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。
- 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应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

- 东吴证券研究所
- 苏州工业园区星阳街5号
- 邮政编码：215021
- 传真：（0512）62938527
- 公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>

东吴证券财富家园