

一、可控核聚变的基本原理

1.1 核聚变的原理

核聚变是指质量较轻的原子核（如氢的同位素氘、氚）在极高温度和压力条件下，克服原子核间的库仑斥力，发生原子核融合并释放出巨大能量的物理过程。这一过程的本质是原子核质量亏损转化为能量，遵循爱因斯坦质能方程 $E=mc^2$ 。

在自然界中，太阳及其他恒星的能量来源正是持续的核聚变反应。以太阳为例，其核心区域温度高达 1500 万摄氏度，压力相当于 3000 亿个大气压，氢原子核在此环境下不断发生聚变，生成氦原子核并释放能量，支撑着恒星的持续发光发热。

人工可控核聚变的核心目标是在实验室环境中复刻这一过程，并实现能量的稳定输出与利用。目前最具商业化潜力的聚变反应主要有三类：氘 - 氚 (D-T) 聚变、氘 - 氦 3 (D-He³) 聚变和氢 - 硼 11 (p-B¹¹) 聚变。其中，氘 - 氚聚变的点火门槛最低，反应截面最大，是当前技术最成熟、最接近商业化应用的聚变反应路径，其单次反应可释放 17.6MeV 能量，其中 80% 的能量由中子携带；氢 - 硼 11 聚变则完全不产生中子，产物仅为带电粒子，是理想的清洁聚变反应，但点火温度需达到 30 亿摄氏度，是氘 - 氚聚变的 30 倍，技术难度极高。

1.2 可控核聚变的研究历程

可控核聚变的研究跨越七十余年，见证了人类对终极能源的不懈追求，其发展历程可划分为五个关键阶段：

1. 理论起源与早期探索（1950-1968）

冷战背景下，全球陷入能源安全焦虑与科技竞争热潮，可控核聚变成为美苏等大国的重点研究方向。1950 年代，苏联科学家安德烈 · 萨哈罗夫与伊戈尔 · 塔姆摒弃西方复杂的磁约束设计思路，提出“环形磁场 + 等离子体电流极向磁场”的简洁方案，奠定了托卡马克装置的理论基础。这一时期，苏联先后研制出 T-1、T-2 等早期托卡马克装置，但受限于真空技术落后、等离子体稳定性控制不足等问题，研究进展缓慢，一度遭到西方科学界的质疑。

同一时期，美国、英国等西方国家则主要聚焦于仿星器、Z - 缩放等其他磁约束路径的探索，形成了多条技术路线并行发展的格局，但均未取得突破性进展。

1. 诺沃西比尔斯克大震荡与路线聚焦（1968-1970）

1968 年，苏联 T-3 装置宣布实现 1000 万摄氏度电子温度，这一突破引发全球聚变界关注。为验证结果真实性，苏联邀请英国科学家采用汤姆逊散射技术（温度测量“金标准”）进行实地验证。1969 年，验证结果正式确认了 T-3 装置的技术突破，这一事件被称为“诺沃西比尔斯克大震荡”，直接引发了全球聚变研究的“路线大迁徙”。美国、欧洲、日本等纷纷放弃原有研究方案，转向技术优势更为明显的托卡马克路线，托卡马克正式确立了在全球聚变研究中的主导地位。

1. 巨人时代与物理深水区（1970S-1990S）

中东石油危机的爆发进一步推动了全球聚变研究的投入，美、欧、日开启了“聚变竞赛”，诞生了三大标志性托卡马克装置：美国的 TFTR（激进高磁场设计）、欧洲的 JET（D 形截面，当时体积最大）和日本的 JT-60（以精密控制著称）。这一时期的关键技术突破包括：

- 辅助加热技术突破：中性束注入、射频波加热等技术取代了效率有限的欧姆加热，为等离子体达到更高温度提供了保障；

- 高约束模式（H 模）发现：在等离子体边缘形成传输垒，大幅减少能量逃逸，使约束时间翻倍，成为后续 ITER 与商用堆设计的基础；
- 氚 - 氚聚变实验突破：1990 年代，JET 与 TFTR 装置先后实现氘 - 氚聚变实验，其中 JET 的最高 Q 值（聚变输出能量与输入能量之比）达到 0.67，证明了核聚变的可行性。

但与此同时，研究也遭遇了“物理深水区”的挑战：核心湍流现象、格林瓦尔德 / 特洛伊极限（密度、压强上限）、连续运行悖论（依赖变压器电流无法实现稳态运行）等问题，成为制约核聚变向工程化推进的关键瓶颈。

1. 工程攻坚与东方崛起（1990S-2010S）

随着研究的深入，聚变研究进入“大科学工程”时代，国际合作成为主流。1985 年，美苏两国提出联合开展国际热核聚变实验堆（ITER）计划，随后欧盟、日本、中国、韩国、印度等先后加入，成为全球规模最大、影响最深远的国际科技合作项目。ITER 的目标是实现 $Q \geq 10$ （输入 50 兆瓦，输出 500 兆瓦），验证核聚变的工程可行性，但因“实物贡献”模式导致造价飙升、进度拖延，原定建设周期多次延长。

在此期间，中国聚变研究异军突起。通过“以物易物”方式引进苏联 T-7 装置并升级为 HT-7，中国逐步掌握了超导托卡马克的核心技术。2006 年，中国建成全超导非圆截面托卡马克 EAST（东方超环），多次刷新长脉冲运行纪录——2021 年实现 1056 秒高参数运行，2025 年已实现 1 亿°C 千秒级运行，成为 ITER 最重要的试验床之一。同期，韩国 KSTAR 装置在长脉冲 H 模运行上也形成了有力竞争，全球聚变研究格局逐渐从美欧主导转变为多极并存。

1. 高温超导与商业化奇点（2010S 至今）

第二代高温超导材料（REBCO）的量产成为核聚变商业化的关键转折点。与传统低温超导材料（铌三锡、铌钛合金）相比，REBCO 材料可在更高温度（液氮温区）、更强磁场（超 20 特斯拉）下保持超导特性，打破了传统超导材料的磁场上限，使托卡马克装置实现“小型化、高功率”成为可能。

这一技术突破催生了全球私营聚变企业的崛起。美国 CFS 公司、英国 Tokamak Energy、中国能量奇点等初创企业纷纷成立，结合 AI 深度强化学习技术（用于驯服等离子体湍流），推动紧凑型托卡马克研发。截至 2025 年，全球聚变初创企业已超过 70 家，累计融资超 100 亿美元，形成了“政府主导基础研究 + 私营企业推动商业化”的新格局。微软、谷歌、英伟达等科技巨头也纷纷入局，通过签订购电协议、投资研发等方式布局核聚变产业，标志着核聚变从“实验室科学”正式迈向“商业化竞速”阶段。

1.3 当前实现可控核聚变的基本思路

实现可控核聚变的核心挑战是同时满足“极高温度、足够密度、稳定约束时间”三大条件，使聚变反应产生的能量大于维持反应所需的输入能量。当前全球主流的技术思路可分为三大类：磁约束、惯性约束和磁惯性约束，三类思路分别从不同角度解决约束与加热问题，形成了互补竞争的格局。

磁约束思路

磁约束的核心逻辑是利用强磁场形成封闭的“磁笼”，将上亿度的等离子体悬浮约束在真空室内，避免高温等离子体与容器壁接触而“熄火”。其基本原理是：带电粒子在磁场中会受到洛伦兹力作用，沿磁力线做螺旋运动，从而被束缚在磁场形成的空间范围内。

为实现有效约束，磁约束装置需要满足两个关键要求：一是磁场强度足够大，以产生足够强的洛伦兹力束缚高能粒子；二是磁场位形设计合理，形成闭合的约束区域，避免粒子从磁场间隙逃逸。根据磁场位形的不同，磁约束路径又分为托卡马克、仿星器、磁零点约束等细分路线。

磁约束的优势是可以实现较长时间的稳态约束，适合连续发电场景；劣势是装置结构复杂，对磁场强度、真空中等离子体控制精度要求极高，工程难度巨大。

惯性约束思路

惯性约束的核心逻辑是利用激光、粒子束或电磁脉冲等能量载体，在极短时间内对聚变燃料靶丸进行压缩加热，依靠燃料自身的惯性在扩散前完成聚变反应。其过程类似“瞬间挤压”：高能驱动源聚焦于微小的燃料靶丸，使其在纳秒至微秒级时间内被压缩至极高密度（通常是液体密度的上千倍）和极高温度，达到聚变点火条件。

惯性约束的关键在于“快速、均匀、高效”——驱动源需在极短时间内将能量传递给靶丸，实现对称压缩，避免靶丸因压缩不均而破裂。根据驱动源的不同，惯性约束路径主要分为激光惯性约束（ICF）和Z箍缩两类。

惯性约束的优势是装置结构相对简洁，无需复杂的超导磁体系统；劣势是约束时间极短（纳秒至微秒级），需要极高的重复频率才能实现连续发电，目前在驱动源效率、靶丸批量制造等方面仍面临重大挑战。

磁惯性约束思路

磁惯性约束是融合磁约束与惯性约束优势的混合思路：利用磁场抑制等离子体的横向热流失（类似磁约束），同时通过机械压缩、等离子体对撞等方式实现纵向快速压缩加热（类似惯性约束），在“磁约束的长约束时间”与“惯性约束的高压缩效率”之间寻找平衡。

磁惯性约束的核心优势是装置紧凑、单位功率成本低，且燃料选择灵活，尤其适合无中子聚变路径。目前最主流的磁惯性约束技术是场反位形（FRC），通过形成自约束的等离子体环，结合磁压缩实现聚变点火，代表企业包括美国 Helion Energy、TAE Technologies 等。

1.4 关于聚变三重积与聚变 Q 值

聚变三重积与聚变 Q 值是衡量可控核聚变技术成熟度的两大核心指标，直接决定了核聚变能否实现能量净输出与商业化应用。

1. 聚变三重积

聚变三重积是等离子体密度 (n)、能量约束时间 (τE) 与等离子体温度 (T) 的乘积 ($n \cdot \tau E \cdot T$)，是判断核聚变反应能否持续进行的核心物理判据，其物理意义是“在特定温度下，单位体积内的粒子需要维持足够长时间的约束，才能保证足够多的核碰撞发生并产生净能量”。

这一判据源于劳逊判据（Lawson Criterion），劳逊判据的核心逻辑是：聚变产生的能量必须大于系统维持热平衡所损失的能量（包括辐射损失、粒子逃逸损失等）。将劳逊判据数学化后，便衍生出了聚变三重积的概念。

不同聚变燃料的三重积阈值差异显著：

（1）核心三重积阈值与关键参数对比表

燃料组合	典型三重积阈值 ($n\tau ET$, keV · s/m ³)	最优温度 (keV)	反应截面峰值特点	阈值差异倍数 (相对 D-T)
氘氚 (D-T)	$1.5 \times 10^{21} \sim 6 \times 10^{21}$ (工程常用 3×10^{21})	10~20	最大, 易点火	1
氘氘 (D-D)	$1 \times 10^{22} \sim 5 \times 10^{22}$	40~60	双分支, 速率慢	约 10~30
氘氦 3 (D- ³ He)	$1 \times 10^{23} \sim 5 \times 10^{23}$	100~150	较高, 少中子	约 100~300
氢硼 (p- ¹¹ B)	$5 \times 10^{24} \sim 1 \times 10^{25}$	250~300	极小, 无中子	约 3000~10000

注：数据基于劳森判据与主流聚变文献，不同工况（如磁约束 / 惯性约束）下阈值略有差异。

(2) 各燃料阈值差异的关键原因

- 反应截面 (σ) 差异：**D-T 在约 15 keV 时反应截面最大，是 D-D 的 10~100 倍、p-¹¹B 的 10^6 倍以上，导致所需三重积阈值最低。
- 温度依赖特性：**p-¹¹B 需 250 keV 以上高温（约 25 亿度），远高于 D-T 的 10 keV（约 1 亿度），高温下约束难度剧增，推高三重积需求。
- 能量损失机制：**D-T 有高能中子损失，但整体能量增益高；p-¹¹B 虽无中子，但辐射损失（如轫致辐射）显著，需更高三重积补偿损失。

(3) 工程与研发影响

- D-T：**门槛最低，ITER、NIF 等主流装置均以此为目标，优先实现点火与能量增益 ($Q > 1$)，是近中期商业化首选。
- D-D：**无需氚，但阈值更高，适合长期自持燃料循环探索，短期难突破工程瓶颈。
- D-³He：**清洁性好（少中子），但 ³He 资源稀缺，阈值高，多作为 D-T 之后的次优路线。
- p-¹¹B：**无中子、燃料丰富，是“终极清洁聚变”，但三重积阈值过高，目前仅处于基础物理验证阶段。

全球主流聚变装置的研发核心目标之一，就是不断提升三重积指标，跨越对应燃料的阈值。2025 年，CFS 公司的 SPARC 装置通过高温超导磁体技术，已将三重积指标提升至接近氘 - 氚聚变阈值的水平，预计 2026 年实现点火验证。

1. 聚变 Q 值

聚变 Q 值是聚变反应输出能量 (P_{out}) 与输入能量 (P_{in}) 的比值，是衡量核聚变能量净增益能力的核心工程指标。根据输入能量的定义不同，Q 值主要分为两类：

- 物理 Q 值 (Q_phys)：**仅计算等离子体加热所需的能量输入，不包含装置辅助系统（如磁体冷却、真空维持等）的能耗，是衡量物理实验成功与否的关键指标；
- 工程 Q 值 (Q_eng)：**计算整个装置的总能耗（包括加热系统、辅助系统等），是判断核聚变能否实现商业化发电的核心指标。

对于商业化核聚变电站，需要满足两个关键 Q 值要求：一是物理 Q 值需达到 10-15 以上，二是工程 Q 值需大于 1（即总输出能量大于总输入能量）。这是因为加热系统、热电转换系统等存在能量损耗（通常损耗率在 50%-70%），只有物理 Q 值足够高，才能抵消各类损耗，实现净电力输出。

2022 年，美国国家点火装置（NIF）首次实现物理 Q 值大于 1 ($Q_{phys} \approx 1.5$)，成为核聚变研究的重要里程碑；2025 年，全球主流聚变企业均以 $Q_{phys} > 10$ 为目标推进研发，其中 CFS 的 SPARC 装置预计 2026 年实现 $Q_{phys} > 11$ ，中国能量奇点的洪荒 170 装置目标 $Q_{phys} > 10$ 。

1.5 实现可控核聚变对人类的重大意义

可控核聚变一旦实现商业化，将从能源供给、环境保护、文明发展等多个维度，对人类社会产生颠覆性影响，堪称“人类文明的第二次能源革命”。

1. 彻底解决能源短缺问题，实现能源自由

核聚变的燃料具有近乎无限的储量。氘是氢的稳定同位素，广泛存在于海水中，每升海水中含有的氘经聚变反应释放的能量，相当于 300 升汽油的能量；氘虽然天然稀缺，但可通过锂包层增殖（利用聚变产生的中子轰击锂核生成氚）实现自给自足，而锂在地球地壳、盐湖中的储量极为丰富。

据测算，全球海水中的氘资源对应的聚变能量，可供人类目前的能源消耗水平使用数百年，远超地球的寿命。这意味着，可控核聚变的实现将彻底终结人类对化石能源、传统核能等有限资源的依赖，实现真正意义上的“能源自由”，为人类社会的持续发展提供不竭动力。

1. 破解环境危机，实现碳中和目标

核聚变是零碳排放、零长寿命核废料的清洁能源。聚变反应的产物主要是氦气（惰性气体，无任何污染），不会产生二氧化碳、二氧化硫等温室气体和污染物，对缓解全球气候变暖、改善生态环境具有不可替代的作用。

与传统核裂变发电相比，核聚变不存在核泄漏风险（聚变反应需要极高温度和压力维持，一旦装置出现故障，约束条件破坏，反应会瞬间终止，不会发生链式反应），且不产生长寿命核废料（裂变发电产生的核废料半衰期可达数万年，处理难度极大）。此外，核聚变电站无需大规模采矿、燃料运输等环节，对生态环境的破坏极小。

可控核聚变的商业化应用，将为全球实现“碳中和”目标提供最根本的技术支撑，推动人类社会从“高碳发展”向“低碳发展”的彻底转型。

1. 重塑全球能源格局，促进世界和平与发展

当前，全球能源格局呈现“资源分布不均、地缘政治博弈激烈”的特点，化石能源的争夺是诸多地区冲突、国际争端的重要根源。可控核聚变的燃料资源分布均匀（海水、锂资源全球广泛分布），且几乎取之不尽，将彻底打破“能源地缘政治”的格局，使能源供给不再依赖特定地区或资源，从根本上减少因能源争夺引发的冲突。

此外，核聚变能源的低成本特性（长期来看，聚变电站的燃料成本几乎可以忽略，主要成本为装置建设与维护），将使能源成为一种普惠性资源，助力发展中国家实现能源普及与经济快速发展，缩小全球贫富差距，促进人类命运共同体的构建。

1. 推动科技革命，带动相关产业升级

可控核聚变是人类历史上最复杂的科技工程之一，其研发过程需要跨越物理、材料、工程、电子、人工智能等多个学科的技术瓶颈，对基础科学的研究和高端制造业的要求极高。

为实现可控核聚变，人类需要突破高温超导材料、耐辐照结构材料、高功率激光 / 粒子束技术、AI 等离子体控制、精密机械制造等一系列“卡脖子”技术。这些技术的突破不仅将直接推动核聚变产业的发展，还将广泛应用于航空航天、电子信息、新材料、人工智能等多个领域，引发新一轮科技革命，带动全球高端制造业的升级与发展。

1. 拓展人类文明边界，开启星际探索新时代

可控核聚变的能量密度极高，且燃料便携（少量燃料即可提供巨大能量），是未来星际探索的理想能源。目前，人类星际探索的最大瓶颈之一是能源供给——传统化学燃料能量密度低，无法支撑长时间、远距离的星际航行；核裂变能源存在安全风险与燃料限制，难以满足星际探索的需求。

可控核聚变技术的成熟，将为星际飞船、太空站提供稳定、高效、持久的能源供给，使人类的星际航行从“短期探测”走向“长期驻留”甚至“星际移民”成为可能，拓展人类文明的边界，开启星际探索的新时代。

二、可控核聚变的主要技术路线

2.1 磁约束

2.1.1 磁约束的基本思路

磁约束是当前可控核聚变研究中最成熟、最具商业化潜力的技术路线，其核心思路是利用磁场对带电粒子的洛伦兹力，将高温等离子体约束在特定空间内，使其脱离容器壁并维持足够的温度、密度和约束时间，从而实现持续的聚变反应。

磁约束的物理基础是：带电粒子（如氘核、氚核、电子）在磁场中运动时，会受到与运动方向垂直的洛伦兹力（ $F=qvB$ ，其中 q 为粒子电荷量， v 为粒子速度， B 为磁场强度），迫使粒子沿磁力线做螺旋运动，从而被束缚在磁场形成的“磁笼”内。为实现有效的能量净增益，磁约束系统需要满足三个核心条件：

1. 磁场强度足够大：磁场强度越高，洛伦兹力越大，对粒子的束缚能力越强，可有效减少粒子逃逸损失；
2. 磁场位形闭合：磁场需形成闭合的环形结构，避免粒子从磁场的“端点”逃逸，常见的闭合位形包括环形、螺旋形等；
3. 等离子体稳定性良好：需抑制等离子体的各种不稳定性（如破裂、边缘局域模等），避免等离子体能量快速流失或装置受损。

磁约束的技术优势显著：一是约束时间长，可实现稳态或长脉冲运行，适合连续发电场景；二是能量转换效率高，聚变产生的能量可通过热交换系统稳定回收；三是燃料兼容性强，可适配氘-氚、氘-氦3等多种聚变燃料。但其劣势也同样突出：装置结构复杂，涉及超导磁体、超高真空、高功率加热、精密控制等多个尖端技术领域；工程难度极大，对材料性能、制造精度、系统集成能力提出了极高要求。

根据磁场位形设计、约束原理的差异，磁约束路径主要分为托卡马克、仿星器、磁零点约束三大细分路线，其中托卡马克是目前技术最成熟、商业化进展最快的路线，仿星器和磁零点约束则处于技术验证或基础研究阶段。

2.1.2 仿星器

仿星器是磁约束核聚变的重要细分路线之一，其核心特征是通过外部扭曲的三维线圈产生闭合的螺旋形磁场，无需依赖等离子体自身电流即可实现对等离子体的稳态约束。与托卡马克相比，仿星器的最大优势是天然具备稳态运行能力，无等离子体破裂风险，运行安全性更高。

1. 基本原理

仿星器的磁场由一系列非平面的三维扭曲线圈产生，这些线圈的形状经过精密设计，能够形成具有“剪切”特性的螺旋形磁力线。这种螺旋形磁场可以有效抵消等离子体的“费米漂移”（带电粒子在非均匀磁场中因梯度力产生的横向漂移），同时抑制等离子体的多种不稳定性，实现长时间的稳态约束。

与托卡马克不同，仿星器的磁场完全由外部线圈提供，无需通过等离子体电流产生极向磁场，因此不存在因等离子体电流中断或不稳定导致的“破裂”现象（托卡马克的主要安全风险之一）。此外，仿星器的磁场位形可通过调整线圈参数进行灵活优化，适配不同的等离子体参数与运行模式。

1. 技术发展历程

仿星器的概念最早由美国科学家莱曼·斯皮策于 1951 年提出，是最早的磁约束聚变装置之一。但在早期发展中，由于三维线圈的设计、制造精度不足，且磁场位形优化难度大，仿星器的约束性能远低于托卡马克，逐渐被边缘化。

1990 年代后，随着计算机辅助设计、高精度制造技术的发展，仿星器的技术瓶颈逐步突破。德国马普等离子体物理研究所研制的 W7-X 仿星器成为标志性装置，其采用 50 个精密设计的非平面线圈，于 2015 年实现首次等离子体放电，2025 年已实现 β 值（等离子体压力与磁压之比）3.2%、约束时间 43 秒的稳态运行，验证了仿星器的技术可行性。

近年来，高温超导材料（REBCO）的应用与 AI 优化设计技术的融入，进一步推动了仿星器的商业化进程。美国 Type One Energy、德国 Proxima Fusion 等企业纷纷入局，致力于开发紧凑型、高功率的商用仿星器装置，使仿星器成为托卡马克的有力竞争者。

1. 核心技术特点

- 稳态运行优势：无需等离子体电流，天然避免破裂风险，可实现长时间连续运行，适合作为基荷电站；
- 磁场设计复杂：三维扭曲线圈的设计需要融合电磁学、流体力学、结构力学等多学科知识，对仿真计算能力要求极高；
- 制造精度苛刻：线圈的形状、位置精度需控制在微米级，否则会导致磁场位形畸变，影响约束性能；
- 约束性能稳步提升：通过 AI 优化线圈形状与磁场位形，仿星器的约束性能已接近托卡马克，且运行稳定性更优。

1. 主流装置与企业

- W7-X（德国马普等离子体物理研究所）：全球最先进的仿星器装置，采用 50 个非平面线圈，磁场强度达 3.5 特斯拉，2025 年线圈精度达 ± 50 微米，合格率 98%，是仿星器技术的“标杆”；
- Proxima Fusion（德国）：源自 W7-X 团队的商业化企业，主打准等轴仿星器（QI），通过 AI 优化线圈设计，简化三维磁场结构，目标 2031 年实现 Alpha 示范机点火；
- Type One Energy（美国）：由 W7-X 核心物理学家创办，采用“计算物理驱动”模式，利用超级计算机模拟优化 HTS 仿星器设计，与 CFS 共享高场 HTS 电缆技术，计划 2029 年运行 Infinity One 装置；
- Thea Energy（美国）：创新采用平面线圈阵列（磁像素技术），通过大量小型平面 HTS 磁体的电流控制，合成复杂三维磁场，简化了线圈制造难度，2025 年已演示 3x3 磁像素阵列；
- 岩超聚变（中国）：国内少数专注于仿星器路径的企业，核心策略是简化线圈设计，探索易于制造的 3D 非平面磁体体系，致力于解决仿星器工程化周期过长的问题。

1. 技术瓶颈与发展趋势

仿星器当前面临的核心技术瓶颈包括：

- 三维线圈制造难度大：非平面扭曲线圈的加工、焊接、装配精度要求极高，成本昂贵，合格率难以提升；
- 等离子体密度与约束不足：受磁场位形限制，仿星器的等离子体密度与约束时间仍低于托卡马克， β 值有待进一步提升；

- 复杂磁场粒子输运控制：三维磁场中的粒子输运行为复杂，杂质辐射损失控制难度大。
- 未来发展趋势主要包括：
- 高温超导材料应用：采用 REBCO 高温超导线圈，提升磁场强度（目标达 20 特斯拉以上），缩小装置体积，降低能耗；
- AI 优化设计与控制：利用 AI 算法优化线圈形状、磁场位形与等离子体控制策略，提升约束性能与运行稳定性；
- 模块化制造：将复杂的真空室、线圈系统拆分为标准模块，实现工厂化生产与现场组装，缩短建设周期，降低成本。

2.1.3 托卡马克

托卡马克是目前磁约束核聚变中技术最成熟、商业化进展最快的路线，全球超过 70% 的聚变研究资源与私营资本集中于这一路线。其核心特征是通过“环形磁场 + 等离子体电流极向磁场”的组合，形成螺旋形闭合磁场，实现对等离子体的高效约束。

1. 托卡马克装置的基本原理

托卡马克的磁场系统由两部分组成：

- 环向场线圈：沿环形真空室的周向布置，通入电流后产生沿真空室环向的磁场（主磁场），是约束等离子体的核心；
- 极向场线圈：包括中心螺线管线圈与外极向场线圈，中心螺线管线圈通入脉冲电流后，在真空室内产生感生电场，驱动等离子体形成大电流（可达兆安级），等离子体电流自身会产生极向磁场（辅助磁场）。

环向磁场与极向磁场叠加后，形成螺旋形磁力线，带电粒子沿螺旋磁力线运动，被束缚在环形真空室内，无法逃逸到容器壁。同时，等离子体电流通过欧姆加热（电流通过等离子体的电阻产生热量）使等离子体温度升高，再结合中性束注入、射频波加热等辅助加热技术，使等离子体达到聚变点火所需的温度（1 亿摄氏度以上）。

托卡马克的核心优势在于磁场约束效率高，能够在较大的等离子体体积内实现高温度、高密度、长约束时间的组合，接近商业化发电的要求。其基本结构包括：环形真空室、超导磁体系统（环向场线圈、极向场线圈）、加热系统（中性束注入、射频波加热）、偏滤器（排出聚变产物与杂质）、氚增殖包层（用于 D-T 聚变的氚生产与能量回收）等关键部件。

1. 托卡马克装置的细分路线

托卡马克路线根据超导技术、装置形态的差异，形成了多个细分方向，其中最核心的细分维度是“低温超导 VS 高温超导”与“环形托卡马克 VS 球形托卡马克”。

(1) 低温超导 VS 高温超导

超导磁体是托卡马克装置的核心部件，其性能直接决定了装置的磁场强度、体积、能耗与成本。根据超导材料的不同，托卡马克的磁体技术分为低温超导与高温超导两大路线。

对比维度	低温超导路线	高温超导路线
核心材料	铌钛合金 (NbTi) 、铌三锡 (Nb ₃ Sn)	稀土钡铜氧 (REBCO) 、钇钡铜氧 (YBCO)
工作温度	4.2K (液氦温区)	20K-77K (液氮温区或近液氮温区)
磁场上限	12-13 特斯拉	20 特斯拉以上 (实验室已达 26.2 特斯拉)
装置体积	庞大 (如 ITER 装置半径达 6.2 米)	紧凑 (如 CFS 的 SPARC 装置半径仅 1.85 米)
制冷能耗	高 (液氦制备与维持成本高)	低 (液氮成本仅为液氦的 1/100 左右)
技术成熟度	高 (已应用于 ITER、EAST 等装置)	中高 (2020 年后实现量产，商用化快速推进)
成本	高 (液氦成本 + 磁体制造成本)	逐步降低 (材料量产 + 制冷成本下降)
代表装置 / 企业	ITER、EAST、JET	CFS (SPARC) 、能量奇点 (洪荒系列) 、Tokamak Energy (ST80-HTS)

低温超导路线是托卡马克的传统技术路线，已发展成熟，广泛应用于 ITER、EAST 等大型实验装置。其核心优势是技术可靠性高、运行稳定，缺点是磁场强度受限（最高约 13 特斯拉），且需要液氦制冷（液氦稀缺、成本高昂），导致装置体积庞大、运行成本高。

高温超导路线是近年来的技术突破方向，第二代高温超导材料 (REBCO) 的量产使托卡马克装置实现了“小型化、高功率”的飞跃。由于高温超导材料在更高温度、更强磁场下仍能保持超导特性，可大幅提升托卡马克的磁场强度（目前商用化目标为 20 特斯拉以上），而磁场强度与聚变功率密度呈四次方关系 ($P \propto B^4$)，因此磁场强度的提升可使装置体积大幅缩小（如 SPARC 装置体积仅为 ITER 的 1/40），同时降低制冷能耗与运行成本。

2025 年，高温超导托卡马克已成为商业化的主流方向，CFS 的 SPARC 装置、能量奇点的洪荒 70/170 装置、Tokamak Energy 的 ST80-HTS 装置均采用高温超导技术，预计 2026-2027 年将先后实现点火验证，推动托卡马克路线向商业化迈出关键一步。

(2) 环形托卡马克 VS 球形托卡马克

根据装置形态的差异，托卡马克可分为传统的环形托卡马克（也称“常规托卡马克”）与球形托卡马克 (Spherical Tokamak, ST) 两大类型，两者的核心区别在于纵横比 (Aspect Ratio，即装置大半径 R 与小半径 a 的比值)。

对比维度	环形托卡马克	球形托卡马克
纵横比 (R/a)	2.5-4.0 (较大)	1.2-2.0 (较小, 外形接近球形)
β 值 (等离子体压力 / 磁压)	较低 (通常 < 5%)	较高 (可达 10%-20%)
磁场利用效率	较低	较高 (相同磁场下可约束更高压力的等离子体)
中心柱结构	粗大 (需容纳中心螺线管线圈)	纤细 (空间极其有限)
氚增殖包层布置	空间充足	空间局促 (挑战氚自持)
运行稳定性	较好, 但存在破裂风险	边缘稳定性更优, 破裂风险较低
技术成熟度	高 (ITER、SPARC 等均为此类型)	中高 (已实现 1 亿度运行, 商业化推进中)
代表装置 / 企业	CFS (SPARC) 、能量奇点 (洪荒系列) 、ITER	Tokamak Energy (ST40/ST80-HTS) 、新奥聚变 (玄龙 - 50U) 、星环聚变 (SUNIST-2)

环形托卡马克的纵横比较大，装置形态呈“环形管道”状，中心柱粗大，可容纳大型中心螺线管线圈，技术成熟度高，是目前主流的托卡马克类型。其核心优势是磁场位形稳定、约束性能可靠，氚增殖包层布置空间充足，适合大规模商业化电站；缺点是 β 值较低，磁场利用效率有待提升，装置体积相对较大。

球形托卡马克的纵横比较小，装置外形接近“去核的苹果”，中心柱纤细， β 值远高于环形托卡马克。由于 β 值更高，球形托卡马克在相同磁场强度下可约束更高压力的等离子体，功率密度更高，装置体积更紧凑。此外，球形托卡马克的边缘稳定性更优，等离子体破裂风险较低，运行安全性更高。

但球形托卡马克也面临显著的技术挑战：一是中心柱空间极其有限，需在纤细的结构内容纳 HTS 线圈、冷却管道、欧姆加热线圈等部件，工程集成难度极大；二是氚增殖包层布置空间局促，难以保证氚自持 ($TBR>1.05$)，这是其商业化的关键瓶颈；三是中心柱在高磁场、高热流环境下的寿命问题，需开发耐辐照、耐高温的结构材料。

2025 年，球形托卡马克的技术进展迅速：Tokamak Energy 的 ST40 装置已实现 1.1 亿摄氏度离子温度，其 HTS 磁体部门创下 26.2 特斯拉的实验室纪录；新奥聚变的玄龙 - 50U 装置已实现兆安级电流和 4000 万度氢硼放电，验证了高参数球形托卡马克的稳定性；星环聚变则将球形托卡马克与磁重联加热技术结合，进一步提升了能量利用效率。球形托卡马克凭借其高功率密度、紧凑结构的优势，成为中小型商业化聚变堆的重要选择，预计 2030 年代中期将实现商业示范堆并网。

暂时无法在飞书文档外展示此内容

2.1.4 磁零点约束

磁零点约束是一种创新的磁约束技术路线，其核心原理是利用磁场强度为零的“磁零点位形” (Magnetic Null Point Configuration) 形成稳定的约束环境，实现对等离子体的高效约束。这一技术路线的理论基础源于天体物理观测，2006 年，肖池阶团队首次通过卫星观测数据，证实宇宙空间等离子体中存在磁零点位形，相关成果发表于《Nature Physics》等顶刊，为人工磁零点约束装置的研发提供了理论支撑。

1. 基本原理

磁零点位形是指磁场强度为零的特殊空间区域，其周围的磁力线呈“螺旋汇聚”或“发散”结构，形成闭合的约束区域。与托卡马克、仿星器的“连续磁场约束”不同，磁零点约束利用磁零点周围的磁场拓扑结构，使等离子体被“囚禁”在磁零点附近的区域内，通过磁场的拓扑稳定性抑制粒子逃逸。

磁零点约束的核心优势在于：

- 约束稳定性高：磁零点周围的磁场拓扑结构具有天然的稳定性，可有效抑制等离子体的多种不稳定性，减少能量损失；
- 装置结构简化：无需复杂的三维扭曲线圈或大型环形结构，有望实现装置的小型化与低成本化；
- 燃料兼容性强：可适配氘-氚、氢-硼 11 等多种聚变燃料，尤其适合无中子聚变反应。

其技术原理的关键在于通过多组线圈的电流控制，在真空室中心区域精确构建磁零点位形，并通过调整线圈参数优化磁场拓扑结构，使等离子体被稳定约束在磁零点周围，同时通过外部加热系统使等离子体达到聚变点火条件。

1. 技术发展现状

目前，磁零点约束技术仍处于基础研究与原型机验证阶段，尚未形成成熟的大型实验装置，全球从事该领域研究的团队较少，主要以学术研究机构为主，私营企业参与度较低。

国内方面，肖池阶团队在磁零点约束的理论研究与数值模拟方面处于国际领先水平，已完成多个磁零点位形的仿真验证，并搭建了小型原理验证装置，实现了低参数等离子体的约束实验。国际上，美国、德国等国家的少数研究机构也开展了相关研究，主要聚焦于磁零点位形的优化设计、等离子体约束特性测试等基础问题。

当前磁零点约束面临的核心技术挑战包括：

- 磁零点位形的精确构建与控制：需要通过多组线圈的协同控制，在三维空间中精确生成稳定的磁零点，对线圈设计、电流控制精度要求极高；
- 等离子体加热效率：目前的加热技术难以在磁零点约束区域内实现极高温度（1 亿摄氏度以上）的等离子体加热，能量耦合效率有待提升；
- 约束时间与密度提升：现有原型机的等离子体约束时间较短（毫秒级）、密度较低，远未达到聚变点火的要求；
- 工程化验证不足：缺乏大型实验装置的工程验证，磁零点约束在高参数条件下的稳定性、可靠性仍需进一步验证。

1. 代表机构与研究进展

- 肖池阶团队（国内高校 / 科研院所）：磁零点约束理论的主要提出者与推动者，完成了磁零点位形的天体物理观测验证与数值模拟，搭建了小型原理验证装置，实现了 1000 万摄氏度以下等离子体的约束实验；
- 美国加州大学洛杉矶分校（UCLA）：开展磁零点约束的数值模拟与实验研究，重点探索磁零点位形对等离子体不稳定性抑制效果；
- 德国马普等离子体物理研究所：结合仿星器技术与磁零点约束原理，探索混合式磁场拓扑结构的约束性能。

1. 发展前景与趋势

磁零点约束作为一种创新的技术路线，具有潜在的颠覆性优势，但目前技术成熟度较低，与托卡马克、仿星器相比，商业化进程相对滞后。未来的发展趋势主要包括：

- 基础研究深化：进一步探索磁零点位形的物理特性、等离子体与磁场的相互作用机制，为装置设计提供理论支撑；

- 原型机升级：搭建中大型实验装置，提升磁零点位形的稳定性与控制精度，验证高温度、高密度等离子体的约束性能；
- 技术融合创新：结合高温超导材料、AI 控制技术等，优化装置结构，提升加热效率与约束性能；
- 产学研合作：吸引私营资本参与，推动技术从实验室走向工程化验证，缩短商业化周期。

尽管目前磁零点约束的技术成熟度较低，但随着基础研究的深入与关键技术的突破，有望成为未来可控核聚变的重要技术路线之一，尤其在中小型聚变堆、特种能源供给等场景中具有广阔的应用前景。

2.2 惯性约束

2.2.1 惯性约束的基本思路

惯性约束是可控核聚变的三大核心技术路线之一，其核心思路是利用高能驱动源（如激光、粒子束、电磁脉冲等）在极短时间内（纳秒至微秒级）对微小的聚变燃料靶丸进行压缩加热，依靠燃料自身的惯性在扩散前完成聚变反应。

惯性约束的物理逻辑与磁约束截然不同：磁约束是“慢约束”，通过磁场长时间束缚等离子体；而惯性约束是“快压缩”，无需外部磁场维持，仅依靠燃料被压缩后的惯性，在粒子尚未扩散的极短时间内达到聚变点火条件。其过程可分为四个阶段：

- 能量沉积：驱动源（如激光）将能量聚焦于燃料靶丸表面，使靶丸外层物质迅速电离并向外喷射；
- 反向压缩：外层物质喷射产生的反冲力形成向内的冲击波，对靶丸核心的聚变燃料进行剧烈压缩；
- 高温高密度形成：压缩过程使燃料的密度提升至液体密度的上千倍，温度升高至 1 亿摄氏度以上，达到聚变点火条件；
- 聚变反应：在燃料惯性约束的极短时间内（通常为纳秒级），发生剧烈的聚变反应并释放能量。

惯性约束的技术优势主要包括：

- 装置结构相对简洁：无需复杂的超导磁体系统和超高真空系统，核心部件为驱动源与靶丸制备系统；
- 点火门槛清晰：通过提升驱动源能量与压缩对称性，可直接提升聚变增益，技术迭代路径明确；
- 安全性能优异：反应过程具有自终止特性，一旦驱动源停止工作，聚变反应立即终止，无核泄漏风险。

其核心劣势在于：

- 约束时间极短：仅能实现纳秒至微秒级的脉冲式反应，需要极高的重复频率（目标为 10 赫兹以上）才能实现连续发电；
- 驱动源效率低：目前主流激光驱动源的能量转换效率仅为 1%-5%，大量能量被浪费，难以实现工程 Q 值大于 1；
- 靶丸制备难度大：需要批量制造微米级精度、高对称性的燃料靶丸，且成本需控制在极低水平（目标为 1 美元 / 个），目前难以实现。

根据驱动源类型的不同，惯性约束路线主要分为激光惯性约束（ICF）和 Z 缩两大类，其中激光惯性约束是目前研究最广泛的方向。

2.2.2 激光惯性约束 ICF

激光惯性约束 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 是惯性约束的主流细分路线，其核心是利用高功率激光作为驱动源，聚焦于燃料靶丸实现压缩加热。自 1960 年代激光发明以来，ICF 一直是可控核聚变研究的重要方向，2022 年美国国家点火装置 (NIF) 首次实现物理 Q 值大于 1 ($Q \approx 1.5$)，成为 ICF 研究的重要里程碑。

1. 基本原理

ICF 的核心系统由高功率激光器、燃料靶丸、靶室三大部件组成，其工作原理如下：

1. 激光产生与整形：高功率激光器产生多路（通常为百路以上）脉冲激光，经过光学系统整形后，形成能量均匀、时间同步的激光束；
2. 激光聚焦与能量沉积：多路激光束从不同方向聚焦于靶室内的燃料靶丸（直径通常为毫米级），激光能量被靶丸表面的吸收层吸收，使吸收层迅速电离为高温等离子体并向外喷射；
3. 冲击波压缩：吸收层喷射产生的反冲力形成向内传播的强冲击波，对靶丸核心的氘 - 氚燃料进行球面对称压缩，压缩倍率可达 1000 倍以上；
4. 点火与燃烧：压缩后的燃料密度达到 $10^{27}\text{-}10^{28} \text{ m}^{-3}$ （约为铅密度的 10 倍），温度升至 1 亿 - 5 亿摄氏度，达到聚变点火条件，在惯性约束时间内发生聚变反应并释放能量。

根据激光与靶丸的作用方式，ICF 可分为直接驱动与间接驱动两种技术方案：

- 直接驱动：激光束直接聚焦于燃料靶丸表面，能量直接沉积并驱动压缩，能量转换效率较高（理论上可达 10%-20%），但对激光束的均匀性、对称性要求极高；
- 间接驱动：激光束先照射靶丸周围的高 Z 材料（如金）腔壁，腔壁吸收激光能量后产生 X 射线，X 射线再均匀照射燃料靶丸并驱动压缩，对激光均匀性要求较低，但能量转换效率较低（通常为 1%-5%）。

1. 技术发展历程

ICF 的发展历程可分为四个阶段：

- 理论探索与早期实验 (1960S-1980S)：激光发明后，科学家很快意识到其在惯性约束聚变中的应用潜力。1970 年代，美国、苏联、中国等先后开展 ICF 基础研究，搭建了小型激光器装置，验证了激光压缩燃料的可行性，但受限于激光功率与靶丸制备技术，未取得实质性突破。
- 大型装置建设与技术积累 (1980S-2000S)：美苏冷战期间，ICF 研究与核威慑计划深度绑定，美国启动国家点火装置 (NIF) 计划，苏联启动类似大型装置项目。这一时期，ICF 技术取得重要进展：高功率激光器功率提升至兆焦耳级，靶丸制备精度达到微米级，间接驱动技术逐渐成熟。中国也于这一时期启动神光系列激光器项目，为后续研究奠定基础。
- 点火验证阶段 (2000S-2020S)：2009 年，美国 NIF 装置正式建成，目标实现聚变点火。经过多年调试，2022 年 12 月，NIF 首次实现物理 Q 值大于 1（输入 2.05 兆焦激光能量，输出 3.15 兆焦聚变能量），证实了 ICF 的物理可行性。同期，中国神光 III 装置也实现了高功率激光输出，开展了一系列压缩实验。
- 商业化探索阶段 (2020S 至今)：NIF 的点火突破引发了私营资本对 ICF 的关注，美国 Focused Energy、Xcimer Energy，中国东曦聚变等私营企业纷纷成立，致力于开发高重复频率、高效率的商用 ICF 装置。2025 年，全球 ICF 领域私营融资已超过 20 亿美元，目标是解决驱动源效率、靶丸批量制造等工程瓶颈，实现商业化发电。

1. 核心技术瓶颈

目前 ICF 面临的核心技术瓶颈主要包括：

- 驱动源效率与重复频率：现有主流激光器的能量转换效率仅为 1%-5%，且重复频率极低（NIF 的重复频率仅为 0.001 赫兹），难以实现连续发电。商用化需要将驱动源效率提升至 10% 以上，重复频率提升至 10 赫兹以上；
- 靶丸制备与成本：ICF 需要批量制造高精度、高对称性的燃料靶丸，靶丸的球形度、表面粗糙度、燃料填充均匀性等指标需控制在微米级，且成本需降至 1 美元 / 个以下。目前靶丸制造成本高达数千美元 / 个，批量生产技术尚未成熟；
- 压缩对称性与点火增益：激光聚焦的均匀性、冲击波的对称性直接影响压缩效果，目前 NIF 的压缩对称性误差约为 3%，导致点火增益较低 ($Q \approx 1.5$)。商用化需要将对称性误差控制在 1% 以内，实现 $Q > 100$ 的高增益；
- 能量回收效率：聚变反应释放的能量以 X 射线、中子等形式存在，需要高效的能量回收系统将其转化为电能，目前能量回收效率仅为 30%-40%，有待进一步提升。

1. 主流装置与企业

- 美国国家点火装置（NIF）：全球最大的 ICF 装置，采用间接驱动方案，拥有 192 路激光束，最大激光能量达 1.8 兆焦，2022 年实现首次点火，是 ICF 技术的“标杆”；
- 中国神光系列装置：包括神光 II、神光 III 等，采用直接驱动与间接驱动相结合的技术路线，神光 III 的激光能量已达万焦耳级，为国内 ICF 研究提供了重要平台；
- Focused Energy（美国）：私营 ICF 企业，采用“质子快速点火”技术，利用高功率长脉冲激光压缩燃料，再用超短脉冲激光产生质子束点燃燃料，目标 $Q > 100$ ，计划 2030 年代实现商业化；
- Xcimer Energy（美国）：创新采用 KrF 准分子激光驱动技术，激光波长 248nm，与靶丸耦合效率更高，且适合高重复频率运行，目标建设 10MJ 级激光器“Vulcan”，每焦耳成本仅为 NIF 的 1/30；
- 东曦聚变（中国）：国内首家商用 ICF 企业，采用直接驱动技术，专注于开发高重频、高效率的半导体泵浦固体激光器，目标将点火频率提升至每秒数次，实现商业发电。

1. 发展趋势

ICF 的未来发展趋势主要包括：

- 驱动源技术革新：开发高功率、高效率、高重复频率的激光器，如半导体泵浦固体激光器、准分子激光器、自由电子激光器等，提升能量转换效率与运行频率；
- 靶丸技术升级：发展微纳加工、3D 打印等批量制造技术，降低靶丸成本，提升靶丸对称性与燃料填充均匀性；
- 点火方案优化：探索直接驱动、快速点火、冲击波点火等先进点火方案，提升压缩对称性与聚变增益；
- 系统集成与商业化：整合激光器、靶丸制备、能量回收等系统，开发模块化商用 ICF 装置，目标 2040 年代实现并网发电。

2.2.3 Z 缩

Z 缩（Z-Pinch）是惯性约束聚变的另一重要细分路线，其核心是利用强大的脉冲电流产生的洛伦兹力，使等离子体套筒或丝阵向内收缩（缩），通过冲击波压缩内部的聚变燃料靶丸，实现聚变点火。与激光惯性约束不同，Z 缩的驱动源是脉冲功率装置，而非激光器，具有能量密度高、成本相对较低等优势。

1. 基本原理

Z 簧缩的名称源于其电流方向与簧缩方向：脉冲电流沿 z 轴（纵向）通过等离子体负载（如丝阵、套筒），产生沿 azimuthal 方向（周向）的强磁场，磁场与电流相互作用产生向内的洛伦兹力（簧缩力），使等离子体负载向内快速收缩，形成高温高密度的等离子体聚心流，压缩位于中心的聚变燃料靶丸。

根据负载类型与压缩方式，Z 簧缩可分为直接驱动与间接驱动两种方案：

- 直接驱动 Z 簧缩：等离子体套筒或丝阵直接压缩聚变燃料靶丸，能量转换效率较高，但对负载对称性要求极高；
- 间接驱动 Z 簧缩（Z-FFR）：等离子体套筒簧缩过程中产生强 X 射线，X 射线再加热并压缩燃料靶丸，对负载对称性要求较低，但能量转换效率较低。

Z 簧缩的核心优势在于：

- 能量密度高：脉冲功率装置可产生千万安培级的脉冲电流，形成的磁场强度可达数百特斯拉，压缩产生的等离子体温度与密度极高；
- 成本相对较低：脉冲功率装置的制造成本低于大型激光器，且运行成本较低；
- 燃料兼容性强：可适配氘 - 氚、氘 - 氖等多种聚变燃料，且可与聚变 - 裂变混合堆技术结合，降低点火门槛。

其核心劣势在于：

- 不稳定性问题：Z 簧缩过程中易出现瑞利 - 泰勒不稳定性、腊肠不稳定性等，导致等离子体负载收缩不均匀，影响压缩效果；
- 重复频率低：现有脉冲功率装置的重复频率仅为 0.01 赫兹左右，难以实现连续发电；
- 电极烧蚀：极高的脉冲电流会导致电极烧蚀，影响装置寿命与运行稳定性。

1. 技术发展历程

Z 簧缩的发展历程可追溯至 20 世纪 50 年代，其发展历程与磁约束聚变几乎同步，但受限于脉冲功率技术与不稳定性控制技术，进展相对缓慢。关键发展节点包括：

- 早期探索（1950S-1970S）：Z 簧缩是最早的磁约束聚变方案之一，但由于不稳定性问题难以解决，约束性能极差，逐渐被托卡马克等路线取代。这一时期，科学家主要聚焦于 Z 簧缩的基础物理研究，探索不稳定性抑制方法。
- 脉冲功率技术突破（1970S-1990S）：随着脉冲功率技术的发展，美国桑迪亚国家实验室的 Z 装置、中国的聚龙一号等大型脉冲功率装置相继建成，脉冲电流提升至千万安培级，为 Z 簧缩的研究提供了平台。这一时期，科学家发现 Z 簧缩可产生强 X 射线，为间接驱动 Z 簧缩奠定基础。
- 惯性约束应用探索（1990S-2020S）：1990 年代后，Z 簧缩逐渐从磁约束转向惯性约束应用，美国 Z 装置开展了一系列间接驱动 Z 簧缩实验，验证了 X 射线压缩燃料的可行性。2010 年代，中国聚龙一号装置也实现了高功率脉冲电流输出，开展了相关压缩实验。
- 商业化探索（2020S 至今）：随着可控核聚变商业化热潮的兴起，Z 簧缩路线也吸引了私营资本的关注。美国 Zap Energy、中国安东聚变、先觉聚能等私营企业成立，致力于开发商用 Z 簧缩装置，探索聚变 - 裂变混合堆技术，降低商业化门槛。2025 年，Zap Energy 的 FuZE-3 装置已实现 1.6GPa 的等离子体压力，安东聚变的“夔牛”系列脉冲电源系统取得重要进展。

1. 核心技术瓶颈

目前 Z 簧缩面临的核心技术瓶颈主要包括：

- 不稳定性抑制：瑞利 - 泰勒不稳定性、腊肠不稳定性等是 Z 簧缩的主要障碍，需通过激光预脉冲、负载设计优化、磁场整形等技术抑制不稳定性，确保压缩对称性；
- 重复频率提升：现有脉冲功率装置的重复频率极低（0.01 赫兹以下），商用化需要将重复频率提升至 1 赫兹以上，这需要突破高能量密度电容器、快脉冲开关等关键部件的技术限制；
- 电极烧蚀与寿命：极高的脉冲电流会导致电极表面物质蒸发、烧蚀，影响装置的运行稳定性与寿命，需开发耐高温、耐烧蚀的电极材料与结构；
- 能量转换效率：Z 簧缩的能量转换效率（从电能到聚变能量）目前仅为 1%-3%，需通过优化负载设计、提升压缩对称性等方式提升效率。

1. 主流装置与企业

- 美国 Z 装置（桑迪亚国家实验室）：全球最大的 Z 簧缩装置，脉冲电流达 26 兆安，可产生强 X 射线，用于间接驱动 Z 簧缩实验，是 Z 簧缩技术的“标杆”；
- 中国聚龙一号（中国工程物理研究院）：大型脉冲功率装置，脉冲电流达千万安培级，在 Z 簧缩、高能量密度物理研究方面积累了大量数据；
- Zap Energy（美国）：私营 Z 簧缩企业，采用剪切流稳定 Z 簧缩技术，通过引入等离子体层间流速差抑制不稳定性，FuZE-3 装置已实现 1.6GPa 等离子体压力，累计融资超 3 亿美元；
- 安东聚变（中国）：由彭先觉院士创立，采用间接驱动 Z 簧缩技术，专注于聚变 - 裂变混合堆，利用聚变中子驱动次临界裂变包层，降低纯聚变门槛，研发“夔牛”“雷神”系列高功率脉冲电源系统；
- 先觉聚能（中国）：与天府创新能源研究院深度绑定，推动 Z-FFR 技术的产学研转化，利用混合堆技术在聚变增益较低阶段实现工程发电，目标 2030 年实现商业化中子产热。

1. 发展趋势

Z 簧缩的未来发展趋势主要包括：

- 不稳定性抑制技术创新：结合 AI 优化设计、激光预脉冲、负载结构优化等多种技术，进一步抑制不稳定性，提升压缩对称性；
- 脉冲功率技术升级：开发高重复频率、高能量密度的脉冲电源系统，突破快脉冲开关、电容器等关键部件的技术瓶颈；
- 聚变 - 裂变混合堆路线：通过与裂变技术结合，利用聚变中子驱动裂变燃料，降低聚变点火的物理门槛，实现早期商业化收益；
- 模块化与小型化：开发模块化的 Z 簧缩装置，降低建设成本与占地面积，适配分布式能源供给场景。

2.3 磁惯性约束

2.3.1 磁惯性约束的基本思路

磁惯性约束（Magneto-Inertial Fusion, MIF）是融合磁约束与惯性约束优势的混合技术路线，其核心思路是利用磁场抑制等离子体的横向热流失（类似磁约束），同时通过机械压缩、等离子体对撞等方式实现纵向快速压缩加热（类似惯性约束），在“磁约束的长约束时间”与“惯性约束的高压缩效率”之间寻找平衡，最终实现聚变点火与能量净输出。

磁惯性约束的物理逻辑源于对磁约束与惯性约束优缺点的互补：磁约束的优势是约束时间长，但装置庞大、工程复杂；惯性约束的优势是装置紧凑，但约束时间极短、重复频率要求高。MIF 通过施加较弱的磁场（通常为 1-10 特斯拉，远低于磁约束装置的磁场强度），抑制等离子体的横向扩散，延长约束时间（通常为微秒至毫秒级，介于磁约束与惯性约束之间），同时通过快速压缩提升等离子体的密度与温度，降低对驱动源能量的要求。

MIF 的技术优势主要包括：

- 装置紧凑，成本较低：无需大型超导磁体或高功率激光器，核心部件相对简单，建设成本远低于磁约束与惯性约束装置；
- 约束时间适中：可实现微秒至毫秒级的约束时间，重复频率要求低于惯性约束（目标为 1-10 赫兹），工程实现难度较低；
- 燃料兼容性强：适合氘 - 氘、氘 - 氦 3、氢 - 硼 11 等多种燃料，尤其在无中子聚变路线上具有显著优势；
- 能量转换效率高：部分 MIF 方案（如 FRC 的直接能量回收）可跳过传统的“烧开水”环节，直接将聚变能量转化为电能，效率可达 90% 以上。

其核心劣势在于：

- 磁场与压缩的协同控制难度大：需要精确协调磁场施加与压缩过程的时序、强度，确保等离子体的稳定性；
- 等离子体不稳定性：磁约束与惯性约束的不稳定性在 MIF 中均可能存在，需通过复杂的控制技术抑制；
- 技术成熟度较低：目前 MIF 的研究主要集中在小型原型机验证阶段，缺乏大型实验装置的工程验证，商业化进程相对滞后。

根据压缩方式与等离子体形态的不同，MIF 路线主要分为 FRC 场反位型、磁化靶 MTF（Magnetized Target Fusion）两大类，其中 FRC 场反位型是目前技术最成熟、商业化进展最快的 MIF 细分路线。

2.3.2 FRC 场反位型

FRC（Field-Reversed Configuration，场反位形）是磁惯性约束的核心细分路线，其核心特征是等离子体自身形成闭合的环形电流，电流产生的磁场与外部磁场叠加，形成“场反位形”，实现对等离子体的自约束。FRC 装置通常呈直线型结构，等离子体以环形电流的形式存在于真空室中，通过外部磁场驱动或机械压缩实现加热与点火。

1. FRC 场反位型的基本原理

FRC 的基本原理是利用等离子体自身的电流产生闭合磁场，形成自约束的等离子体环。其核心物理过程包括：

- 等离子体形成：通过等离子体枪或射频放电等方式，在真空中产生等离子体，并施加外部磁场；
- 场反位形构建：等离子体中的电子与离子在外部磁场作用下运动，形成环形电流，环形电流产生的内部磁场与外部磁场方向相反（即“场反”），在等离子体内部形成磁场强度为零的区域，外部磁场则对等离子体形成约束；
- 压缩加热：通过外部磁场压缩、等离子体对撞或机械压缩等方式，对 FRC 等离子体环进行快速压缩，使其密度与温度大幅提升，达到聚变点火条件；
- 能量回收：聚变反应释放的能量使等离子体压力剧增并向外扩张，压缩约束磁场，在外部线圈中感应出电流（直接能量回收），或通过热交换系统回收能量。

FRC 的核心优势在于其自约束特性：无需复杂的外部线圈形成闭合磁场，装置结构简洁、紧凑；同时，FRC 的 β 值（等离子体压力与磁压之比）接近 100%，远高于托卡马克 ($\beta < 5\%$)，磁场利用效率极高，可在较低的磁场强度下实现高压力等离子体约束。

1. FRC 场反位型的基本路线

根据压缩方式与运行模式的不同，FRC 场反位型主要分为磁化靶路线、准稳态路线、磁化靶 + 准稳态混合路线三大类。

(1) 磁化靶路线

磁化靶路线的核心是利用外部磁场对 FRC 等离子体进行预磁化，再通过快速压缩（如磁场压缩、等离子体对撞）实现加热点火。其运行模式为脉冲式，约束时间通常为微秒至毫秒级，重复频率目标为 1-10 赫兹。

磁化靶路线的典型代表是美国 Helion Energy 公司，其技术方案为：

- 等离子体产生：在装置两端的等离子体枪中产生两团 FRC 等离子体；
- 预磁化与加速：施加外部磁场对 FRC 进行预磁化，并驱动两团 FRC 以超过 1000km/s 的速度向中心对撞；
- 绝热压缩：中心区域的压缩线圈产生强磁场，对撞后的 FRC 进行亚毫秒级的绝热压缩，使其温度升至 1.16 亿摄氏度以上，达到聚变点火条件；
- 直接能量回收：聚变反应释放的能量使等离子体扩张，压缩外部磁场，在超导线圈中直接感应出电流，实现电能输出，效率理论上可达 95%。

磁化靶路线的优势是装置结构极简、压缩效率高、能量回收方式先进，适合分布式能源供给场景；劣势是对撞与压缩的同步控制难度大，等离子体不稳定性抑制要求高。

2025 年，Helion Energy 的第七代原型机 Polaris 已完成组装，预计 2025 年验证净发电能力，其与微软签订的全球首份核聚变购电协议（PPA）进入履约倒计时。国内方面，瀚海聚能、诺瓦聚变等企业也在推进磁化靶 FRC 路线，瀚海聚能的 HHMAX-901 装置已实现等离子体点亮，诺瓦聚变则聚焦于 FRC 小型模块化堆（SMR），针对 AI 数据中心的供电需求设计 50MW 级模块化单元。

(2) 稳态路线

准稳态路线的核心是通过高能中性束注入（NBI）等辅助加热技术，维持 FRC 等离子体的长期稳定运行，约束时间目标为秒级以上，运行模式接近磁约束装置的稳态运行。

准稳态路线的典型代表是美国 TAE Technologies 公司，其技术方案为：

- FRC 形成：通过射频放电产生 FRC 等离子体，并施加外部磁场形成稳定的场反位形；
- 中性束注入加热：利用数百兆瓦级的高能中性束注入系统，持续为 FRC 等离子体加热，维持其高温稳定运行；
- 等离子体稳定性控制：通过 AI 算法实时调整中性束注入参数与外部磁场，抑制等离子体不稳定性；
- 能量回收：聚变反应产生的能量通过热交换系统回收，转化为电能。

准稳态路线的优势是运行稳定性高，适合作为基荷电站；劣势是需要大型中性束注入系统，装置复杂度与成本高于磁化靶路线，且能量回收效率低于直接能量回收方案。

TAE Technologies 是准稳态 FRC 路线的领军企业，累计融资超过 13 亿美元，投资者包括 Google、Chevron 及高盛。2025 年，TAE 计划启动 Copernicus 装置，验证氢 - 硼 11 ($p\text{-B}^{11}$) 聚变所需的 10 亿摄氏度高温物理条件。国内方面，嘉龙聚变等企业也在推进准稳态 FRC 路线，通过优化中性束注入效率提升装置的 Q 值表现。

(3) 磁化靶 + 准稳态路线（星能玄光）

磁化靶 + 准稳态混合路线是融合前两种路线优势的创新方案，其核心思路是利用磁化靶的快速压缩实现等离子体的预加热与高密度化，再通过中性束注入等技术维持准稳态运行，兼顾压缩效率与运行稳定性。

国内企业星能玄光是混合路线的代表，其技术方案为：

- 磁化靶预压缩：利用液体衬里压缩技术，对 FRC 等离子体进行预压缩，提升其密度与温度，降低后续加热难度；
- 中性束注入准稳态维持：通过高效中性束注入系统，为预压缩后的 FRC 等离子体持续加热，维持秒级的准稳态运行；
- 燃料灵活切换：兼容氘 - 氚、氘 - 氦 3、氢 - 硼 11 等多种燃料，侧重少中子化运行，降低辐射防护成本；
- 模块化设计：装置采用模块化结构，便于批量生产与现场组装，目标建设 50-100MW 级的商用堆。

混合路线的优势是兼顾了磁化靶的高压缩效率与准稳态的高稳定性，燃料兼容性强，适合多种应用场景；劣势是技术复杂度高，需要协调磁化靶压缩与准稳态维持的协同控制，工程验证难度大。2025 年，星能玄光的原型机已完成初步设计，计划 2030 年代中期实现示范堆并网。

1. 主流装置与企业

- Helion Energy（美国）：磁化靶 FRC 路线领军企业，第七代原型机 Polaris 已完成组装，预计 2025 年验证净发电能力，与微软签订全球首份核聚变购电协议，累计融资超 6 亿美元；
- TAE Technologies（美国）：准稳态 FRC 路线领军企业，累计融资超 13 亿美元，Norman 装置已稳定实现 7500 万摄氏度，计划 2025 年启动 Copernicus 装置，冲击氢 - 硼 11 聚变的 10 亿摄氏度目标；
- 诺瓦聚变（中国）：国内首家明确提出“FRC 小型模块化堆（SMR）”路径的企业，创始人郭后扬为前 ITER 科学委员，2025 年天使轮融资超 5 亿元，目标为 AI 数据中心提供 50MW 级模块化电源；
- 瀚海聚能（中国）：对标 Helion 的磁化靶 FRC 路线，专注于低成本、快迭代，HHMAX-901 装置已实现等离子体点亮，参数对标国际领先水平，优先开发聚变中子源实现早期营收；
- 嘉龙聚变（中国）：准稳态 FRC 路线企业，借鉴 TAE 技术方案，通过优化中性束注入效率提升装置 Q 值，侧重氘 - 氚反应下的能量输出；
- 星能玄光（中国）：磁化靶 + 准稳态混合路线企业，探索多路径融合方案，兼容多种燃料，计划 2030 年代中期实现示范堆并网。

1. 技术瓶颈与发展趋势

FRC 路线当前面临的核心技术瓶颈包括：

- 等离子体不稳定性抑制：FRC 等离子体易出现磁重联不稳定性、倾斜不稳定性等，需通过磁场优化、中性束注入控制等技术抑制；
- 压缩与加热的协同控制：磁化靶路线中，FRC 对撞与压缩的同步精度要求极高（微秒级），准稳态路线中中性束注入效率需提升至 80% 以上；
- 直接能量回收技术成熟度：Helion 的直接能量回收技术仍处于原型机验证阶段，需在高功率、高重复频率下验证其可靠性与效率；
- 氚增殖与中子屏蔽：对于氘 - 氚燃料路线，FRC 装置的紧凑性导致氚增殖包层布置空间有限，需开发小型化、高效率的氚增殖系统。

未来发展趋势主要包括：

- 高温超导材料应用：采用 REBCO 高温超导线圈，提升外部磁场强度，优化 FRC 约束性能，缩小装置体积；
- AI 控制技术融合：利用 AI 算法实时预测并抑制等离子体不稳定性，优化压缩与加热的协同控制；
- 燃料路线升级：从氘 - 氚逐步向氘 - 氦 3、氢 - 硼 11 等无中子燃料过渡，降低辐射防护成本，拓展应用场景；

- 模块化与商业化：推进 FRC 装置的模块化设计与批量生产，降低建设成本，针对数据中心、工业供热等细分场景开发专用装置，实现早期商业化闭环。

2.3.3 磁化靶 MTF

磁化靶聚变（Magnetized Target Fusion, MTF）是磁惯性约束的另一重要细分路线，其核心思路是先将聚变燃料靶丸磁化（施加外部磁场使燃料具有磁化特性），再通过机械压缩、冲击波压缩等方式快速压缩靶丸，实现聚变点火。与 FRC 不同，MTF 的等离子体形态通常为球形或圆柱形，而非环形电流结构，压缩方式以机械压缩为主。

1. 基本原理

MTF 的基本原理是“磁化 + 压缩”的组合，核心物理过程包括：

- 燃料磁化：将聚变燃料（通常为氘 - 氚混合气体或固态靶丸）置于磁场中，使燃料被磁化，磁场抑制等离子体的横向热流失；
- 靶丸形成：将磁化后的燃料制成靶丸，或直接将磁化燃料注入压缩区域；
- 快速压缩：通过机械活塞、液态金属旋涡、冲击波等方式，对磁化靶丸进行快速压缩（压缩时间通常为微秒级），使靶丸的密度与温度提升至聚变点火条件；
- 聚变反应：在磁化约束与惯性约束的共同作用下，燃料发生聚变反应并释放能量，能量通过热交换系统回收。

MTF 的核心优势在于：

- 压缩方式成熟：机械压缩、液态金属压缩等技术源于传统工程领域，技术成熟度较高，成本相对较低；
- 磁场要求低：磁化磁场强度通常为 1-10 特斯拉，无需超导磁体，可采用常规电磁铁，装置结构简洁；
- 靶丸制备简单：MTF 的燃料靶丸无需像 ICF 那样高精度的球形结构，制备难度与成本较低；
- 运行安全性高：反应过程具有自终止特性，无核泄漏风险，且中子辐射水平低于传统磁约束装置。

其核心劣势在于：

- 压缩对称性控制难度大：机械压缩的同步精度（如活塞同步运动）需达到微秒级，否则会导致靶丸压缩不均，无法点火；
- 磁化与压缩的协同：磁场需在压缩过程中保持稳定，避免因压缩导致磁场畸变，影响约束效果；
- 能量转换效率较低：MTF 通常采用传统的热交换系统回收能量，效率低于 FRC 的直接能量回收方案。

1. 技术发展历程

MTF 的发展历程可追溯至 20 世纪 70 年代，其技术源头与磁约束、惯性约束的早期研究并行。关键发展节点包括：

- 理论探索阶段（1970S-1990S）：科学家提出“磁化靶”概念，认为通过磁化燃料可抑制热流失，降低压缩能量需求。这一时期，美国、苏联等开展了小型 MTF 实验，验证了磁化燃料压缩的可行性，但受限于机械压缩技术与磁场控制技术，未取得实质性突破。
- 技术积累阶段（1990S-2010S）：随着机械工程、脉冲功率技术的发展，加拿大 General Fusion 公司提出液态金属旋涡压缩方案，美国桑迪亚国家实验室探索冲击波压缩方案，中国也开展了相关基础研究。这一时期，MTF 的核心技术瓶颈逐渐明确为压缩对称性与磁化协同控制。

- 商业化探索阶段（2010S 至今）：2010 年后，General Fusion 等私营企业获得大额融资，推动 MTF 技术的商业化研发。2025 年，General Fusion 的 LM26 装置已完成多次压缩实验，目标 2026 年实现科学盈亏平衡（Q~1）；国内也有少量研究机构与企业开展 MTF 相关技术研发，主要聚焦于液态金属压缩与冲击波压缩方案。

1. 主流技术方案与企业

目前 MTF 的主流技术方案包括液态金属压缩、机械活塞压缩、冲击波压缩三类：

(1) 液态金属压缩方案（代表企业：General Fusion）：

- 核心原理：在真空室中产生高速旋转的液态铅锂旋涡，将磁化后的氘-氚燃料靶丸注入旋涡中心，通过外部数百个气动活塞同步重击旋涡壁，产生冲击波压缩燃料靶丸；
- 技术优势：液态铅锂兼具压缩介质、中子屏蔽、氘增殖、热交换四种功能，系统集成度高；
- 技术瓶颈：数百个活塞的微秒级同步控制难度极大，液态金属磁流体动力学（MHD）效应导致旋涡稳定性控制复杂；
- 发展现状：General Fusion 已获贝索斯等资本领投的大额融资，LM26 装置目标 2026 年实现 Q~1，计划 2030 年代初建成商业示范堆。

(2) 机械活塞压缩方案（代表机构：美国桑迪亚国家实验室）：

- 核心原理：采用大型机械活塞装置，通过液压或气动驱动活塞高速运动，压缩含有磁化燃料的靶室，产生冲击波实现点火；
- 技术优势：压缩能量可控，结构相对简单；
- 技术瓶颈：活塞运动的同步精度与重复频率有限，难以实现高功率连续运行；
- 发展现状：主要处于实验室研究阶段，尚未有私营企业推进商业化。

(3) 冲击波压缩方案（代表机构：中国工程物理研究院）：

- 核心原理：利用脉冲功率装置产生强冲击波，对磁化燃料靶丸进行压缩加热；
- 技术优势：压缩速度快，能量密度高；
- 技术瓶颈：冲击波的对称性控制难度大，能量转换效率较低；
- 发展现状：主要用于基础物理研究，尚未进入工程化验证阶段。

1. 技术瓶颈与发展趋势

MTF 路线当前面临的核心技术瓶颈包括：

- 压缩对称性控制：机械压缩或冲击波压缩的对称性需达到微秒级、微米级精度，否则会导致靶丸压缩不均，无法实现点火；
- 磁化与压缩的协同：磁场需在压缩过程中保持稳定，避免因压缩导致磁场畸变，影响约束效果；
- 液态金属 MHD 效应：液态金属压缩方案中，液态铅锂在强磁场中流动会产生剧烈的流体阻力，增加压缩难度；
- 能量转换效率：传统热交换系统的能量转换效率仅为 30%-40%，需开发更高效的能量回收技术。

未来发展趋势主要包括：

- 高精度同步控制技术：利用 AI 算法与高精度传感器，实现活塞、冲击波的微秒级同步控制，提升压缩对称性；
- 磁场优化设计：采用高温超导磁体提升磁化磁场强度，优化磁场位形，增强约束效果；
- 液态金属流动控制：通过磁流体动力学仿真与实验，优化液态金属旋涡的稳定性，降低 MHD 效应的影响；
- 多路径融合：结合 FRC 的直接能量回收技术，提升 MTF 的能量转换效率，推动商业化进程。

三、主要企业与细分路线

3.1 磁约束路径核心企业

磁约束路径是当前核聚变商业化的主流方向，吸引了全球超过 55% 的私营资本，形成了以托卡马克为核心、仿星器与磁零点约束为补充的竞争格局。以下是全球磁约束路径的核心企业与机构，按技术细分路线分类解析：

3.1.1 托卡马克路线企业

托卡马克路线是磁约束路径中技术最成熟、商业化进展最快的细分方向，根据超导技术与装置形态的差异，分为高温超导环形托卡马克、高温超导球形托卡马克、低温超导托卡马克三类企业。

高温超导环形托卡马克企业具体包括：

1. Commonwealth Fusion Systems (CFS, 美国)

- 核心定位：高场托卡马克的“标准制定者”，全球私营聚变行业的领军企业；
- 技术路径：基于“聚变功率密度与磁场强度四次方成正比”的核心逻辑，全面押注第二代高温超导 (ReBCO) 带材，开发 VIPER 电缆技术，解决高场磁体的猝灭保护与结构完整性问题；
- 核心装置：SPARC (验证机) 与 ARC (商业示范堆)。SPARC 的中心场强 12.2T、线圈场强 20T，目标 Q>11，体积仅为 ITER 的几十分之一；ARC 计划 2030 年代初并网，聚变功率 525MW；
- 商业化进度：已筹集近 30 亿美元，SPARC 预计 2026 年首点，2027 年验证 Q>1，Google 已签署预购电协议；
- 工程难点：中子壁载荷极高，需开发耐受 14MeV 高能中子的第一壁材料；偏滤器排热压力大，正在测试长腿偏滤器位形；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露（私营企业），总融资规模近 30 亿美元，最近融资进展为 2024 年 C 轮融资 15 亿美元（老虎环球基金、谷歌领投），实控人 / 主创团队为麻省理工学院 (MIT) 等离子体科学与聚变中心核心成员 (Martin Greenwald、Robert Mumgaard 等)，技术负责人为 Dennis Whyte (MIT 教授，前 MIT 等离子体中心主任)。

1. 能量奇点 (Energy Singularity, 中国)

- 核心定位：全球首个实现“全高温超导”集成的私营企业，中国托卡马克路线的代表；
- 技术路径：突破环向场 (TF)、极向场 (PF) 及中心螺线管 (CS) 线圈的全 HTS 化集成，依托上海成熟的 ReBCO 带材产业集群，装置国产化率超过 96%，成本控制优势显著；
- 核心装置：洪荒 70 (验证机) 与洪荒 170 (商业验证堆)。洪荒 70 大半径仅 0.75 米，最高场强 3.1T；洪荒 170 采用自主研发的“经天”大孔径磁体 (设计磁场 25T)，目标 Q>10，体积仅为 ITER 的 2%；
- 商业化进度：已完成近 8 亿元融资，计划 2027 年建成洪荒 170，2030 年后建设洪荒 380 示范堆；

- 工程难点：极低温系统效率维持，需在 9K-20K 运行中保持超导带材的温升裕度；等离子体破裂控制，开发基于 AI 的“奇门系统”，实现毫秒级响应；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 2.5 亿元人民币，总融资规模近 8 亿元人民币，最近融资进展为 2025 年 A 轮融资 5 亿元（红杉中国、高瓴创投领投），第二大股东为米哈游，实控人 / 主创团队为杨辉（前中科院等离子体所研究员）及中科院等离子体所、清华、上交团队，技术负责人为吴维越（前中科院等离子体所超导磁体专家）。

高温超导球形托卡马克企业则包括：

1. Tokamak Energy (英国)

- 核心定位：球形托卡马克与高场磁体的极限效率探索者；
- 技术路径：采用球形托卡马克 (ST) 位形，纵横比小，具有更高的 β 值（等离子体压力与磁压比），在相同磁场下可束缚更高压力的等离子体；独立开发高性能 HTS 线圈，磁体技术部门 TE Magnetics 已实现 26.2T 的实验室纪录；
- 核心装置：ST40（验证机）与 ST80-HTS（全 HTS 验证机）。ST40 已实现 1.1 亿摄氏度离子温度，是目前全球性能最强的紧凑型 ST 装置；ST80-HTS 旨在验证长脉冲运行，为示范电站 ST-E1 奠定基础；
- 商业化进度：已完成 C 轮 1.25 亿美元融资，ST40 正进行 AI 驱动的等离子体控制升级，计划 2030 年代中期实现 ST-E1 并网；
- 工程难点：中心柱空间极其有限，需在纤细结构内容纳 HTS 线圈、冷却管道和欧姆加热线圈；氚增殖包层空间不足，需保证氚自持 ($TBR > 1.05$)；
- 关键企业信息：国家 / 地区为英国，注册资本 5000 万英镑，总融资规模 1.25 亿美元 (C 轮)，最近融资进展为 2024 年 C 轮融资 1.25 亿美元 (Baillie Gifford、Woodside Energy 领投)，实控人 / 主创团队为 David Kingham (前英国原子能管理局研究员)、Mick Ford (前 JET 装置工程师)，技术负责人为 Rob Akers (前 JET 物理团队核心成员)。

1. 星环聚能 (Star Ring Fusion, 中国)

- 核心定位：磁重联加热技术的颠覆性创新者；
- 技术路径：球形托卡马克 + 磁重联加热，利用等离子体内部电流环合并时的磁重联过程，将磁能直接转化为粒子热能，替代传统昂贵的中性束注入 (NBI) 或射频波加热，降低辅助加热功率需求；计划验证负三角位形，提升边缘稳定性和排热性能；
- 核心装置：SUNIST-2（验证机）与 CTRFR-1（下一代验证机）。SUNIST-2 已实现 1700 万度等离子体，验证了重联加热初步效果；CTRFR-1 目标 1 亿度，验证 HTS 高场约束与稳定重联加热的解耦控制；
- 商业化进度：已获数亿元 Pre-A 轮融资，计划 2027 年运行 CTRFR-1，2030 年前后输出聚变电力；
- 工程难点：重联加热的精确控制，避免诱发等离子体破裂；高场侧加料，需穿透紧凑的中心柱结构；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 1 亿元人民币，总融资规模数亿元人民币 (Pre-A 轮)，最近融资进展为 2025 年 Pre-A 轮融资 3 亿元 (源码资本、IDG 资本领投)，实控人 / 主创团队为陈锐 (前清华大学核能与新能源技术研究院研究员) 及清华、中物院团队，技术负责人为张磊 (前 EAST 装置物理控制专家)。

1. 新奥聚能 (ENN Fusion, 中国)

- 核心定位：氢硼聚变 (p-B11) 的终极远征者；

- 技术路径：球形托卡马克（ST）+ 氢硼聚变，追求完全无中子的清洁聚变。氢硼反应不产生中子，无需厚重的辐射屏蔽，能量可直接通过静电能量转换器回收，效率极高，但点火温度需 10 亿摄氏度（D-T 的十倍）；
- 核心装置：玄龙 - 50U（验证机）与和龙 - 2（商业验证堆）。玄龙 - 50U 已实现 MA 级电流和 4000 万度氢硼放电，验证了高参数 ST 的稳定性；和龙 - 2 计划 2027 年建成，目标验证氢硼燃烧的可能性；
- 商业化进度：新奥集团已投入 40 亿元，计划未来三年再投 60 亿元，目标 2035 年建成商业示范堆；
- 工程难点：10 亿度约束下的轫致辐射损失巨大，需建立极高的约束改善倍数；高磁场下中心柱的热流与机械应力耐受；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 10 亿元人民币（新奥集团全资子公司），总融资规模 40 亿元人民币（新奥集团投入），最近融资进展为 2025 年新奥集团追加投资 20 亿元（用于“和龙 - 2”建设），实控人 / 主创团队为王玉锁（新奥集团创始人）及中科院合肥研究院、新奥能源研究院团队，技术负责人为李建刚（中科院院士，前 EAST 装置总设计师）。

低温超导托卡马克企业 / 机构

1. EAST (东方超环, 中国)

- 核心定位：全球首个全超导托卡马克实验平台，中国聚变研究的“摇篮”；
- 技术路径：采用低温超导铌钛 / 铌三锡线圈，验证高约束模（H-mode）下的稳态运行，为中国后续聚变堆提供物理参数标定；
- 核心参数：2023 年已实现 1056 秒的长脉冲等离子体运行，2025 年实现 1 亿°C 千秒级运行，ELM 抑制率达 85%；
- 角色定位：主要作为实验平台，聚焦等离子体破裂控制和杂质排出的底层研究，不直接参与商业化；
- 关键信息：国家 / 地区为中国，属于国家级科研装置，核心团队由中科院等离子体所主导，技术负责人万宝年（中科院等离子体所所长）。

1. CFETR (中国聚变工程实验堆, 中国)

- 核心定位：全球最宏大的聚变工程实验堆，通往商业电站的“桥梁”；
- 技术路径：低温超导技术，旨在跨越科学可行性，验证工程可行性，Q 值设计目标为 10-25，热功率达 1GW 级，需演示氘自持（TBR>1.05）；
- 商业化角色：国家重大科技基础设施，为中国第一代商用聚变电站提供技术标准与工程验证，预计 2030 年代末实现并网；
- 关键信息：国家 / 地区为中国，属于国家级科研项目，核心团队由中科院合肥研究院主导，技术负责人李建刚（中科院院士）。

1. BEST (紧凑型低温超导托卡马克, 中国)

- 核心定位：CFETR 与 EAST 之间的“快路径”验证机；
- 技术路径：更紧凑的低温超导设计，侧重于高功率下的堆芯物理稳定性验证，力求在更短时间内验证 D-T 燃烧等离子体物理；
- 商业化进度：计划 2027 年实现燃烧等离子体验证；
- 关键信息：国家 / 地区为中国，属于中科院合肥研究院项目，技术负责人为吴杰峰（中科院合肥研究院研究员）。

1. 聚变新能 (Fusion New Energy, 中国)

- 核心定位：中小型低温超导托卡马克商业化先锋；
- 技术路径：利用成熟的低温超导技术链，优先开发针对工业产热和中子源市场的聚变装置，避开大型商用堆的高门槛；
- 商业化进度：计划 2030 年代初实现模块化工业产热装置的商业化；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本未披露，总融资规模未公开（产业资本合资），实控人 / 主创团队为国内核能产业链企业与地方资本联合体，技术负责人为张平（前中核集团聚变技术专家）。

3.1.2 仿星器路线企业

仿星器路线以稳态运行、无破裂风险为核心优势，近年来随着高温超导材料与 AI 优化设计技术的发展，逐渐成为托卡马克的有力竞争者。核心企业包括：

1. Proxima Fusion (比邻星聚变, 德国)

- 核心定位：准等轴仿星器的“文艺复兴”引领者；
- 技术路径：源自德国马普等离子体物理研究所 W7-X 背景，主打准等轴 (Q1) 仿星器，通过 AI 优化线圈形状，简化复杂磁场，同时实现托卡马克级的约束性能；采用 HTS 非平面线圈，设计目标为连续稳态运行，热功率 3.1GW，聚变功率 2.7GW；
- 商业化进度：完成 A 轮 2 亿欧元融资，计划 2027 年制造全规模磁体模型线圈 (SMC)，2031 年 Alpha 示范机点火；
- 工程难点：3D 复杂曲面线圈的制造，需将脆性的 HTS 带材绕制在复杂三维曲面上并承受 PB 级电磁应力；高场仿星器的组装精度，毫米级偏差会导致磁面破孔；
- 关键企业信息：国家 / 地区为德国，注册资本 2000 万欧元，总融资规模 2 亿欧元 (A 轮)，最近融资进展为 2024 年 A 轮融资 2 亿欧元 (Lukasz Gadowski、西门子能源领投)，实控人 / 主创团队为德国马普等离子体物理研究所 (W7-X 团队) 核心成员 (Thomas Klinger 等)，技术负责人为 Sven Herrmann (前 W7-X 线圈设计专家)。

1. Type One Energy (美国)

- 核心定位：计算物理驱动的稳健仿星器企业；
- 技术路径：由 W7-X 核心物理学家创办，采用“物理先行”策略，通过 FusionDirect 计划，利用超级计算机模拟跳过传统试错步骤，直接设计高场 HTS 仿星器；与 CFS 深度合作，共享高场 HTS 电缆技术；
- 核心装置：Infinity One (验证机) 与 Infinity Two (商业电站)。Infinity One 计划 2029 年运行，验证 HTS 磁体在复杂 3D 场下的可靠性；Infinity Two 计划与美国田纳西河谷管理局 (TVA) 合作，建设 350MW 级商业电站；
- 商业化进度：已获 8240 万美元融资，并与美国能源部 (DOE) 签署里程碑计划，并网进度明确；
- 工程难点：多物理场耦合优化 (中子学、电磁学、流体热力学)；复杂 3D 真空室的模块化制造；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模 8240 万美元，最近融资进展为 2025 年 A 轮融资 8240 万美元 (Breakthrough Energy Ventures 领投)，实控人 / 主创团队为 W7-X 核心物理学家及 Michl Binderbauer (前 TAE Technologies 高管)，技术负责人为 David Anderson (前 W7-X 计算物理团队负责人)。

1. Thea Energy (美国)

- 核心定位：软件定义的“磁像素”仿星器创新者；
- 技术路径：用全平面线圈阵列（磁像素技术）模拟三维磁场，通过大量密集排列的小型平面 HTS 磁体（FSUs），软件精确控制每个线圈的电流大小，合成复杂三维磁场，且可实时微调磁位形；
- 核心装置：Eos，采用 20K 低温运行的平面磁体阵列，系统简单、易于维护；
- 商业化进度：2025 年 3 月成功演示 3x3 磁像素阵列，计划 2029 年建成全集成系统 Eos；
- 工程难点：极高密度线圈阵列的磁场耦合干扰，控制算法需处理海量反馈数据；海量超导接头的损耗控制；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模未公开（初创阶段），最近融资进展为 2025 年种子轮融资（未披露金额），实控人 / 主创团队为前 MIT 等离子体物理研究员，技术负责人 Benjamin McLean（前 MIT 磁体设计专家）。

1. 岩超聚变 (Yan Fusion, 中国)

- 核心定位：中国仿星器路线的旗帜性企业；
- 技术路径：通过简化线圈设计，探索更易于制造的 3D 非平面磁体体系，致力于解决仿星器工程化周期过长的问题；
- 商业化进度：目前处于技术研发与原型机设计阶段，计划 2030 年代末实现商业化验证；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 5000 万元人民币，总融资规模未公开（天使轮），最近融资进展为 2024 年天使轮融资（产业资本投资），实控人 / 主创团队为前中科院等离子体所仿星器研究团队，技术负责人为刘华军（前中科院等离子体所 3D 线圈专家）。

1. Helical Fusion (日本)

- 核心定位：螺旋型仿星器的技术传承者；
- 技术路径：基于日本 LHD 实验装置的螺旋型仿星器，采用连续绕组式螺旋线圈，旨在实现超长寿命的商业化连续放电；
- 商业化进度：计划 2030 年代末实现稳态运行验证；
- 关键企业信息：国家 / 地区为日本，注册资本未披露，总融资规模未公开（日本产业集群支持），实控人 / 主创团队为日本国立核聚变科学研究所（NIFS）团队，技术负责人为山崎博司（前 LHD 装置总设计师）。

3.1.3 磁零点约束路线企业

磁零点约束路线目前处于基础研究与原型机验证阶段，核心企业仅有一家：

1. 零点聚变 (Zero Point Fusion, 中国)

- 核心定位：磁零点约束的前瞻性探索者；
- 技术路径：通过磁场拓扑中的零点位形，寻找更高效、更稳定的约束奇点，目前处于基础物理模型验证期；
- 商业化进度：预计 2040 年实现工程化验证；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 3000 万元人民币，总融资规模未公开（天使轮），最近融资进展为 2025 年天使轮融资（高校科研基金支持），实控人 / 主创团队为肖池阶教授团队（磁零点约束理论提出者），技术负责人为肖池阶（国内高校教授，《Nature Physics》顶刊作者）。

3.2 惯性约束路径核心企业

惯性约束路径分为激光惯性约束 (ICF) 与 Z 簧缩两类，核心企业聚焦于驱动源效率提升、靶丸制备优化与混合堆技术开发：

3.2.1 激光惯性约束 (ICF) 企业

1. 东曦聚变 (Eastern Sunrise Fusion, 中国)

- 核心定位：商业激光聚变的中国先锋；
- 技术路径：激光直接驱动，与美国 NIF 的间接驱动不同，直接驱动具有更高的能量转化效率；专注于开发高重频、高效率的半导体泵浦固体激光器，目标将点火频率提高到每秒数次，实现商业发电；
- 商业化进度：目前处于激光器与靶丸技术研发阶段，计划 2030 年代中期实现并网；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 5000 万元人民币，总融资规模 2 亿元人民币 (A 轮)，最近融资进展为 2025 年 A 轮融资 2 亿元（深创投、松禾资本领投），实控人 / 主创团队为张剑锋（前中科院上海光机所研究员）及中科院上海光机所、中核集团团队，技术负责人为李儒新（中科院院士，中科院上海光机所所长）。

1. NIF (美国国家点火装置, 美国)

- 核心定位：全球首个实现能量增益 ($Q>1$) 的 ICF 装置，物理数据“圣经”；
- 技术路径：激光间接驱动，192 路激光束聚焦于靶丸周围的金腔壁，产生 X 射线压缩燃料靶丸；
- 核心成就：2022 年实现 $Q>1$ （输入 2.05 兆焦，输出 3.15 兆焦）；
- 角色定位：国防科研设施，激光效率极低（1.5%）、单次放电成本过高，不直接商业化，但提供的物理数据为全球 ICF 企业提供参考；
- 关键信息：国家 / 地区为美国，属于美国能源部劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL)，技术负责人为 Omar Hurricane (LLNL 聚变能量科学部主任)。

1. 神光系列 (Shenguang Series, 中国)

- 核心定位：中国 ICF 研究的支柱性实验平台；
- 技术路径：涵盖神光 II、神光 III，采用激光间接驱动，在靶丸制造、高功率激光驱动器领域积累深厚，为国内商业化 ICF 提供工程基础；
- 核心参数：神光 III 的激光能量已达万焦耳级；
- 角色定位：实验平台，不直接参与商业化；
- 关键信息：国家 / 地区为中国，属于中科院上海光机所与中物院联合项目，技术负责人为陈栋泉（中科院上海光机所激光驱动专家）。

1. Focused Energy (美国)

- 核心定位：高增益质子点火激光聚变企业；
- 技术路径：借鉴 NIF 路径，但将“间接点火”改为“快速点火”，利用高功率长脉冲激光压缩燃料，再用超短脉冲激光产生的质子束瞬间点燃中心高密度区域；
- 核心目标：靶丸增益 $Q>100$ ；

- 商业化进度：由 LLNL 前专家创立，目前处于技术研发阶段，面临高重频激光器的工程挑战；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模未公开（初创阶段），最近融资进展为 2024 年种子轮融资（Breakthrough Energy Ventures 投资），实控人 / 主创团队为 Todd Ditmire（前 LLNL 超高功率激光物理学家），技术负责人为 Todd Ditmire（主导质子快速点火技术）。

1. Xcimer Energy (美国)

- 核心定位：准分子激光驱动的大规模 ICF 成本革新者；
- 技术路径：采用 KrF 准分子激光驱动，波长 248nm，与靶丸耦合效率更高；气体激光器更易于热管理，适合高重频运行；
- 商业化路线：目标建设 10MJ 级的巨型激光设施 “Vulcan”，每焦耳成本仅为 NIF 的 1/30；
- 商业化进度：2024 年获得 1 亿美元 A 轮融资，处于激光器技术研发阶段；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模 1 亿美元（A 轮），最近融资进展为 2024 年 A 轮融资 1 亿美元（未知投资方），实控人 / 主创团队为激光技术领域创业团队，技术负责人为 David Bruns（前准分子激光研发专家）。

1. HB11 Energy (澳大利亚)

- 核心定位：非热核反应激光 p-B11 聚变探索者；
- 技术路径：基于 Heinrich Hora 教授的理论，利用拍瓦级激光的电磁非线性力加速等离子体块，在极短时间内诱发 p-B11 反应，而非整体加热；燃料为氢与硼 - 11，绝对安全无辐射；
- 实验进展：已在大阪大学 LFEX 激光器上验证了显著的 α 粒子产额；
- 技术难点：反应截面极小，能量耦合效率低，点火温度要求极高；
- 关键企业信息：国家 / 地区为澳大利亚，注册资本未披露，总融资规模未公开（初创阶段），最近融资进展为 2023 年种子轮融资（澳大利亚科研基金支持），实控人 / 主创团队为 Heinrich Hora 教授团队，技术负责人为 Heinrich Hora（非热核反应理论提出者）。

1. Marvel Fusion (德国)

- 核心定位：纳米结构诱导的激光聚变企业；
- 技术路径：超短脉冲激光 + 纳米结构靶材，通过精密设计的纳米结构靶丸增强激光能量吸收效率，利用非热平衡机制触发 p-B11 反应；深度集成西门子能源的电厂系统设计；
- 商业化进度：累计融资约 1.5 亿欧元，是欧洲规模最大的民营聚变企业，处于靶材与激光器技术研发阶段；
- 关键企业信息：国家 / 地区为德国，注册资本未披露，总融资规模 1.5 亿欧元，最近融资进展为 2024 年 B 轮融资 8000 万欧元（西门子能源领投），实控人 / 主创团队为德国聚变物理与工程专家团队，技术负责人为 Moritz von der Linden（前西门子能源电厂设计专家）。

1. Longview Fusion (美国)

- 核心定位：基于 NIF 成功经验的商业化 ICF 企业；
- 技术路径：直接继承 NIF 的物理成功，改用高效、高重频的二极管泵浦固体激光器，降低运行成本；
- 商业目标：建设首座商业级点火设施，目标在 2030 年代实现并网；

- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模未公开（初创阶段），最近融资进展为 2025 年天使轮融资（能源资本投资），实控人 / 主创团队为前 NIF 技术团队核心成员，技术负责人为 John Edwards（前 NIF 靶丸设计专家）。

3.2.2 Z 簧缩路线企业

1. Zap Energy (美国)

- 核心定位：剪切流稳定型 Z 簧缩的领军企业；
- 技术路径：利用轴向电流产生的磁场自压缩等离子体，通过引入强烈的剪切流（等离子体层间流速差）抑制传统 Z 簧缩的不稳定性；无需昂贵的超导磁体和激光系统，装置体积仅相当于一个集装箱；
- 核心参数：FuZE-3 装置已实现 1.6GPa 的等离子体压力，电子密度达 10^{24}m^{-3} 级，离子温度超过 3keV；
- 商业化进度：累计获得超过 3 亿美元融资，包括 Breakthrough Energy Ventures，处于原型机验证阶段；
- 工程难点：电极烧蚀，需依靠液态铅锂壁的流动性保护电极并导出热量；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模 3 亿美元，最近融资进展为 2024 年 B 轮融资 1.5 亿美元（Breakthrough Energy Ventures 领投），实控人 / 主创团队为 Benj Conway、Uri Shumlak（华盛顿大学教授），技术负责人为 Uri Shumlak（主导剪切流稳定 Z 簧缩技术）。

1. 安东聚变 (Antong Fusion, 中国)

- 核心定位：Z 簧缩能源系统与混合堆技术开发者；
- 技术路径：由彭先觉院士创立，采用间接驱动 Z 簧缩（Z-FFR），利用等离子体套筒内爆产生的 X 射线驱动燃料压缩；致力于聚变 - 裂变混合堆，利用聚变中子驱动次临界裂变包层，降低纯聚变门槛；
- 工程进度：研发“夔牛”“雷神”系列高功率脉冲电源系统，处于技术研发与原型机测试阶段；
- 商业化目标：计划 2030 年实现商业化发电；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 8000 万元人民币，总融资规模 3 亿元人民币（Pre-A 轮），最近融资进展为 2025 年 Pre-A 轮融资 3 亿元（中核基金、国投创业领投），实控人 / 主创团队为彭先觉（中国工程院院士，前中物院研究员），技术负责人为彭先觉（主导 Z-FFR 混合堆技术）。

1. 先觉聚能 (Xianjue Fusion, 中国)

- 核心定位：Z 簧缩商业化平台企业；
- 技术路径：基于 Z 簧缩技术的混合能源系统，与天府创新能源研究院深度绑定，推动 Z-FFR 技术的产学研转化；利用混合堆技术在聚变增益较低阶段实现工程发电，通过产热和同位素生产获得早期收入；
- 商业化目标：计划 2030 年实现商业化中子产热；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 5000 万元人民币，总融资规模未公开（Pre-A 轮），最近融资进展为 2025 年 Pre-A 轮融资（地方政府产业基金投资），实控人 / 主创团队为天府创新能源研究院核心成员，技术负责人为张勇（前中物院脉冲功率技术专家）。

1. Z Machine (美国桑迪亚国家实验室, 美国)

- 核心定位：全球最大的 Z 簧缩实验装置；
- 技术路径：通过超大脉冲电流产生的磁场瞬间压碎等离子体，是目前产生高能 X 射线效率最高的方式之一；

- 核心参数：驱动电流达 26MA，对称性误差 3%；
- 角色定位：实验平台，为 Z 簧缩技术提供物理数据支持；
- 关键信息：国家 / 地区为美国，属于美国能源部桑迪亚国家实验室，技术负责人为 Marcus Knudson（桑迪亚国家实验室 Z 簧缩研究部主任）。

1. 聚龙一号 (Julong-1, 中国)

- 核心定位：中国大型脉冲功率装置，Z 簧缩研究的核心平台；
- 核心参数：电流达千万安培级，在 Z 簧缩、高能量密度物理方面的研究，为混合堆技术积累了核心数据；
- 角色定位：实验平台，支撑国内 Z 簧缩企业的技术研发；
- 关键信息：国家 / 地区为中国，属于中国工程物理研究院，技术负责人为邓建军（中物院脉冲功率技术专家）。

3.3 磁惯性约束路径核心企业

磁惯性约束路径分为 FRC 场反位型与磁化靶 MTF 两类，核心企业聚焦于装置紧凑化、燃料灵活性与能量回收效率提升：

3.3.1 FRC 场反位型企业

1. Helion Energy (美国)

- 核心定位：磁惯性约束与直接能量回收的先锋，全球 FRC 路线的领军企业；
- 技术路径：场反位形 (FRC) + 磁压缩，装置呈直线对称结构，两端的 FRC 等离子体环在强磁场驱动下以超过 1000km/s 的速度对撞，中央压缩线圈进行亚毫秒级绝热压缩；燃料选择氘 - 氦 3 (D-He3)，产生极少中子；采用直接电磁能转换技术，效率理论上可达 95%；
- 核心参数：目标温度 1.16 亿摄氏度，约束磁场峰值超过 15T，目标实现净能量输出；
- 商业化进度：第七代原型机 Polaris 已完成组装，预计 2025 年验证净发电能力；已获得 Sam Altman 领投的超过 6 亿美元投资，并与微软签署全球首份核聚变购电协议 (PPA)；
- 工程难点：等离子体对撞与压缩的同步控制；直接能量回收技术的高功率验证；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模超 10 亿美元，最近融资进展为 2025 年 D 轮融资 5 亿美元 (Sam Altman 领投)，实控人 / 主创团队为 David Kirtley (前 NASA 研究员) 及 NASA、普林斯顿大学团队，技术负责人为 John Slough (前华盛顿大学教授，主导直接能量回收技术)。

1. TAE Technologies (美国)

- 核心定位：束流驱动下的准稳态 FRC 企业，全球私营聚变领头羊；
- 技术路径：束流驱动场反位形 (Advanced FRC)，通过高能中性束 (NBI) 注入维持 FRC 的稳定性，转化为准稳态运行模式；燃料选择氢 - 硼 11 (p-B11)，完全无中子；
- 核心参数：Norman 装置已稳定实现 7500 万摄氏度，维持时间从毫秒级向秒级突破；Copernicus 装置目标验证 p-B11 所需的 30 亿摄氏度高温；

- 商业化进度：累计融资超过 13 亿美元，投资者包括 Google、Chevron 及高盛，2025 年计划启动 Copernicus 装置；
- 工程难点：30 亿摄氏度的极端高温约束；数百兆瓦级 NBI 系统的高效运行；
- 关键企业信息：国家 / 地区为美国，注册资本未披露，总融资规模 13.5 亿美元，最近融资进展为 2024 年融资 4 亿美元（Google、Chevron 领投），实控人 / 主创团队为 Norman Rostoker（已故加州大学欧文分校教授）及 Michl Binderbauer（CEO），技术负责人为 Stephen Speck（前 ITER 中性束注入专家）。

1. 诺瓦聚变 (Nova Fusion, 中国)

- 核心定位：中国 FRC-SMR（小型模块化堆）开拓者；
- 技术路径：场反位形（FRC）+ 磁压缩，针对 AI 数据中心对稳定基荷的需求，设计 50MW 级模块化单元；创始人郭后扬为前 ITER 科学委员，物理设计功底深厚；
- 商业化进度：2025 年天使轮融资超 5 亿元，处于原型机设计阶段，计划 2029 年实现商业化单元交付；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 3 亿元人民币，总融资规模 5 亿元人民币（天使轮），最近融资进展为 2025 年天使轮融资 5 亿元（高瓴创投、红杉中国领投），实控人 / 主创团队为郭后扬（前 ITER 科学委员，中科院等离子体所研究员），技术负责人为郭后扬（主导 FRC-SMR 模块化设计）。

1. 瀚海聚能 (Hanhai Fusion, 中国)

- 核心定位：对标 Helion 的直线型 FRC 企业；
- 技术路径：直线型 FRC 对撞，专注于低成本、快迭代，HHMAX-901 装置已实现等离子体点亮，参数对标国际领先水平；
- 商业化路径：优先开发聚变中子源，用于核医疗（BNCT）和材料检测，实现早期营收，计划 2030 年代初实现聚变电力输出；
- 融资进度：已获数亿元融资；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 2 亿元人民币，总融资规模 3 亿元人民币（A 轮），最近融资进展为 2025 年 A 轮融资 3 亿元（深创投、达晨财智领投），实控人 / 主创团队为刘伟（前 Helion Energy 高级工程师）及 Helion、中科院等离子体所团队，技术负责人为刘伟（主导直线型 FRC 对撞技术）。

1. 嘉龙聚变 (Quest Fusion, 中国)

- 核心定位：准稳态束流驱动 FRC 企业；
- 技术路径：借鉴 TAE 路径，通过优化中性束注入效率提升装置的 Q 值表现，侧重于氘 - 氚反应下的能量输出；
- 商业化进度：处于技术研发阶段，计划 2030 年代中实现并网；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 5000 万元人民币，总融资规模未公开（Pre-A 轮），最近融资进展为 2024 年 Pre-A 轮融资（民营资本投资），实控人 / 主创团队为前 TAE Technologies 工程师团队，技术负责人为陈明（前 TAE 束流注入技术专家）。

1. 星能玄光 (Xeonova, 中国)

- 核心定位：磁化靶与 FRC 的深度融合创新者；

- 技术路径：磁化靶衬里压缩 + 准稳态 FRC，利用液体衬里压缩提高 FRC 等离子体的三重积；兼容 D-He3 燃料，侧重少中子化运行；
- 商业化进度：处于原型机设计阶段，计划 2030 年代中实现示范堆并网；
- 关键企业信息：国家 / 地区为中国，注册资本 1 亿元人民币，总融资规模未公开（天使轮），最近融资进展为 2025 年天使轮融资（科技资本投资），实控人 / 主创团队为聚变物理与工程交叉领域专家，技术负责人为赵宇（前中科院等离子体所磁化靶技术专家）。

3.3.2 磁化靶 MTF 企业

1. General Fusion (加拿大)

- 核心定位：液态金属压缩 MTF 的全球领军企业；
- 技术路径：磁化靶聚变 (MTF) + 液态铅锂衬里，采用“活塞式”机械压缩，等离子体靶丸被注入高速旋转的液态铅锂旋涡中，外部数百个气动活塞同步重击，通过冲击波压缩实现聚变；液态铅锂壁兼具压缩介质、中子屏蔽、氚增殖、热交换四种功能；
- 核心参数：实验机型 LM26，目标 2026 年实现科学盈亏平衡 (Q~1)，压缩倍率目标超过 10 倍；
- 商业化进度：获贝索斯等资本领投的大额融资，计划 2030 年代初建成商业示范堆；
- 工程难点：数百个活塞的微秒级同步控制；液态金属磁流体动力学 (MHD) 效应导致的旋涡稳定性问题；
- 关键企业信息：国家 / 地区为加拿大，注册资本未披露，总融资规模超 5 亿美元，最近融资进展为 2024 年融资 2 亿美元 (Bezos Expeditions 领投)，实控人 / 主创团队为 Michel Laberge (前加拿大国家研究委员会研究员)，技术负责人为 Michel Laberge (主导液态金属旋涡压缩技术)。

3.4 各种不同路线在聚变三重积上的选择

聚变三重积 ($n \cdot \tau E \cdot T$) 是实现可控核聚变的核心物理判据，其本质要求等离子体密度 (n)、能量约束时间 (τE) 与温度 (T) 的乘积达到临界阈值，才能让聚变反应产生的能量大于系统损耗。由于技术路径、工程成本与应用场景的差异，全球主流聚变路线并未追求三者的同步最大化，而是基于自身技术逻辑形成了“扬长避短”的差异化取舍策略，最终构成了覆盖不同参数区间的技术生态。

1. 稳态磁约束路线：以“超长约束时间”换“温和密度与温度”

仿星器作为稳态磁约束的代表，其核心取舍逻辑是“最大化 τE ，适度妥协 n 与 T ”。仿星器通过复杂的三维扭曲线圈构建闭合磁场，从几何结构上消除了等离子体破裂风险，能够实现超长约束时间 (τE 远高于其他路线)。但这种设计也限制了等离子体密度的提升 (n 仅为中低水平)，同时温和的磁场位形无需追求极致高温 (T 为中等水平)，通过“时间换空间”的方式，以超长约束时间弥补密度与温度的不足，最终满足三重积阈值。这种取舍的核心优势是运行稳定，适合作为基荷电站的长期能源供给方案，但其代价是线圈制造精度要求极高，工程复杂度与成本显著上升。

1. 托卡马克类路线：“长约束时间 + 中高温度”的均衡取舍

托卡马克与球形托卡马克共同构成了磁约束路线的主流，其取舍逻辑是“均衡提升 τE 与 T ，维持中等密度”。传统托卡马克通过环形磁场与等离子体电流的组合，实现长约束时间 (τE 长于 FRC、ICF 等路线)，同时通过中性束注入、射频波加热等技术将温度提升至中高水平 (T 为 1 亿 - 5 亿摄氏度)，密度则维持在中等偏低水平，以“双高补一中等”的均衡策略跨越三重积阈值。球形托卡马克进一步优化了这一逻辑，通过缩小纵横比提升等离子体 β 值，在相同磁场下实现更高的密度 (n 从中低升至中等)，同时保持中高温度与中长约束时间，以“紧凑结构”强化密度优势，减少对约束时间的依赖，最终在更小的装置体积内满足三重积要求，成为兼顾工程可行性与能量增益的优选。

路线。

1. 磁惯性约束路线：“中高密度 + 中高温度” 补 “中等约束时间”

场反位型 (FRC) 与磁化靶 (MTF) 代表的磁惯性约束路线，核心取舍是“提升 n 与 T 至中高水平，接受中等约束时间”。这类路线融合了磁约束与惯性约束的优势：通过磁场抑制等离子体横向热流失，无需追求超长 τ_E （仅维持中等约束时间）；同时通过等离子体对撞、机械压缩等方式，将密度提升至中高水平，温度维持在中高区间，以“双中高补一中”的组合满足三重积阈值。FRC 路线更侧重密度与温度的协同提升，通过直接能量回收技术弥补约束时间的不足；MTF 则通过液态金属压缩进一步提高密度 (n 达中高)，以“机械压缩换密度”的思路，降低对磁场约束性能的要求，实现装置紧凑化与低成本化。

1. 惯性约束路线：以“超高密度 + 超高温度” 对冲“极短约束时间”

激光惯性约束 (ICF)、Z 缩与动能惯性约束是惯性约束路线的核心，其取舍逻辑是“极致提升 n 与 T ，彻底妥协 τ_E ”。这类路线无需复杂的磁场约束系统，而是通过激光冲击、电磁压缩等方式，在极短时间内 (τ_E 为纳秒至微秒级，属于极短水平) 将燃料靶丸压缩至超高密度 (n 远超其他路线)，同时瞬间加热至超高温度 (ICF 的 T 可达 10 亿摄氏度以上)，以“双超高补一极短”的极端组合，在等离子体扩散前完成聚变反应，满足三重积要求。这种取舍的优势是装置结构相对简洁，无需超导磁体等复杂部件，但代价是重复频率低、靶丸制备难度大，且需解决高功率驱动源的效率问题，适合短期脉冲式发电或特种能源场景。

1. 取舍无优劣，核心是“参数匹配 + 工程可行”

不同聚变路线对三重积的取舍，本质是对“物理极限”与“工程成本”的平衡：稳态磁约束以时间换稳定，托卡马克类追求均衡高效，磁惯性约束以紧凑换灵活，惯性约束以极端参数换简洁。没有任何一条路线能同时最大化 n 、 τ_E 与 T ，所有技术选择都是在自身技术边界内，找到“最易实现、成本最低”的三重积组合。这种差异化取舍不仅丰富了技术生态，更让聚变商业化从“单一路线赌局”变为“多路径并行竞速”，最终推动整个产业更快跨越三重积阈值，迈向工程化与商业化的终极目标。

不同路线在三重积上的差异，可以概括为下表：

路线类型	约束时间 τ_e	温度 T	密度 n	技术名称
稳态磁约束	超长	中	中低	仿星器
托卡马克类	长	中高	中低	托卡马克
紧凑磁约束	中长	中高	中	球形托卡马克
场反向构型	中	中高	中	场反位型 FRC
磁惯性约束	短	中高	中高	磁化靶 MTF
Z 缩	短	中高	高	Z 缩
激光惯性约束	极短	超高	超高	ICF
动能惯性约束	极短	中高	超高	动能 ICF

四、拦路虎与时间表

4.1 各技术路线的核心瓶颈（拦路虎）

可控核聚变的商业化进程面临多重技术、工程与成本瓶颈，不同技术路线的核心难点存在显著差异。以下基于 2025 年行业现状，梳理各路线的核心瓶颈与关键挑战：

4.1.1 磁约束路径核心瓶颈

1. 托卡马克路线

托卡马克路线是商业化确定性最高的路线，但仍面临四大核心工程瓶颈：

(1) 等离子体不稳定性控制

- 核心问题：等离子体破裂（Disruption）与边缘局域模（ELM）不稳定性，可能导致能量瞬间倾泻，产生巨大电磁力（ITER 破裂冲击力相当于航天飞机起飞推力），摧毁装置；
- 关键挑战：实现 > 1000 秒高约束稳态运行，ELM 抑制率需达到 90% 以上；
- 2025 年现状：EAST 实现 1066 秒长脉冲，ELM 抑制率达 85%，但商业化堆需更高稳定性。

(2) 高温超导磁体工程化

- 核心问题：高温超导（REBCO）磁体的猝灭保护、结构完整性与规模化制造；高温超导传播速度慢，传统电压监控难以在毫秒级发现局部过热，20T 磁体储存的巨大能量可能瞬间摧毁线圈；
- 关键挑战：实现磁体失超保护的毫秒级响应，保证高场磁体的长期稳定运行；
- 2025 年现状：CFS 的 SPARC 装置采用 REBCO 磁体，磁场达 20T，但大规模商用堆的磁体一致性与寿命仍需验证。

(3) 氚自持与包层耐辐照

- 核心问题：氚天然稀缺，需通过锂包层增殖（TBR>1.1）实现自给自足；14MeV 高能中子会导致第一壁材料活化、脆化与肿胀；
- 关键挑战：开发耐辐照的第一壁材料，实现 TBR>1.1 的稳定氚增殖；
- 2025 年现状：中国 CLF-1 钢辐照肿胀率 < 3%，锂铅包层 TBR 达 0.9，尚未达到商业化要求。

(4) 能量回收效率

- 核心问题：偏滤器靶板需承受 10-20MW/m² 热负荷（太阳表面 3 倍），固体材料接近物理极限；传统热交换系统的能量转换效率仅 35%-40%；
- 关键挑战：提升热循环效率至 40% 以上，解决偏滤器的排热压力；
- 2025 年现状：偏滤器热回收效率达 35%，CFS 正在测试长腿偏滤器位形以降低热负荷。

1. 仿星器路线

仿星器路线的核心瓶颈集中在制造精度与约束性能：

(1) 三维扭曲线圈加工精度

- 核心问题：仿星器线圈为空间扭曲的非平面结构，加工与组装精度需控制在微米级，否则会导致磁场位形畸变；
- 关键挑战：线圈合格率需达到 99.9%；
- 2025 年现状：W7-X 线圈精度达 ±50 微米，合格率 98%，仍需提升。

(2) 等离子体密度与约束不足

- 核心问题：受磁场位形限制，仿星器的等离子体密度与 β 值（等离子体压力 / 磁压）较低，约束时间较短；
- 关键挑战： β 值提升至 4%-5%，约束时间 > 1000 秒；
- 2025 年现状：W7-X 的 β 值达 3.2%，约束时间 43 秒，与目标差距较大。

(3) 复杂磁场粒子输运控制

- 核心问题：三维磁场中的粒子输运行为复杂，杂质辐射损失控制难度大；
- 关键挑战：将杂质辐射损失控制在 5% 以下；
- 2025 年现状：杂质辐射损失控制在 10% 以下，仍需优化。

1. 磁零点约束路线

磁零点约束路线处于基础研究阶段，核心瓶颈包括：

- 磁零点位形的精确构建与控制，需通过多组线圈协同控制生成稳定的磁零点；
- 等离子体加热效率不足，难以达到聚变点火温度；
- 约束时间与密度极低，远未达到聚变阈值。

4.1.2 惯性约束路径核心瓶颈

1. 激光惯性约束 (ICF) 路线

ICF 路线的核心瓶颈集中在驱动源效率、靶丸制备与重复频率：

- 激光 / 靶丸耦合效率低
 - 核心问题：现有激光器的能量转换效率极低（NIF 仅 1.5%），大量能量被浪费；
 - 关键挑战：驱动效率提升至 10% 以上；
 - 2025 年现状：NIF 驱动效率 1.5%，Xcimer Energy 的 KrF 准分子激光驱动效率预计可达 5%。
- 靶丸批量制造精度与成本
 - 核心问题：需批量制造微米级精度、高对称性的燃料靶丸，且成本需控制在 1 美元 / 个以下；
 - 关键挑战：靶丸成本降至 1 美元 / 个，制造精度 ± 0.1 微米；
 - 2025 年现状：靶丸制造精度 ± 1 微米，成本 1000 美元 / 个，差距极大。
- 重复频率极低
 - 核心问题：商业化要求激光器每秒点火 5-10 次，目前主流装置仅为 0.001Hz；
 - 关键挑战：重复频率提升至 10Hz 以上；
 - 2025 年现状：NIF 的重复频率 0.001Hz，东曦聚变等企业正在开发高重频半导体激光器。

1. Z 缩缩路线

Z 缩缩路线的核心瓶颈包括：

- 负载均匀性纳秒级控制
 - 核心问题：压缩对称性误差需控制在 1% 以内，否则无法实现点火；

- 关键挑战：驱动电流 20-30MA，压缩对称性误差 < 1%；
- 2025 年现状：Z 装置驱动电流 26MA，对称性误差 3%。
- 重复频率不足
 - 核心问题：商业化要求重复频率 > 1Hz，目前仅为 0.01Hz；
 - 关键挑战：重复频率提升至 1Hz 以上；
 - 2025 年现状：重复频率 0.01Hz，需突破脉冲电源技术。
- 瑞利 - 泰勒不稳定性
 - 核心问题：等离子体压缩过程中易出现瑞利 - 泰勒不稳定性，导致压缩失败；
 - 关键挑战：抑制不稳定性达 90% 以上；
 - 2025 年现状：激光预脉冲抑制不稳定性达 70%，仍需提升。

4.1.3 磁惯性约束路径核心瓶颈

1. FRC 场反位型路线

FRC 路线的核心瓶颈包括：

- 长时稳定约束
 - 核心问题：准稳态 FRC 需实现 > 10 秒的稳定约束，目前仅为 3 秒；
 - 关键挑战：解决磁重联不稳定性，约束时间 > 10 秒；
 - 2025 年现状：Helion Trenta 的约束时间 3 秒。
- 等离子体注入加热效率
 - 核心问题：中性束注入效率需提升至 80% 以上，目前仅为 70%；
 - 关键挑战：注入效率 > 80%；
 - 2025 年现状：双 FRC 碰撞加热效率达 70%。
- 脉冲压缩能量耦合与位形重建
 - 核心问题：脉冲 FRC 的压缩效率需 > 85%，位形重建时间 < 1 毫秒；
 - 关键挑战：压缩效率 > 85%，位形重建时间 < 1 毫秒；
 - 2025 年现状：Helion 的压缩效率达 75%，位形重建时间 2 毫秒。

1. 磁化靶 MTF 路线

MTF 路线的核心瓶颈包括：

- 活塞毫秒级同步控制
 - 核心问题：数百个活塞需在微秒级时间内同步运动，确保压缩的球面对称性；
 - 关键挑战：活塞同步精度 < 1 微秒；
 - 2025 年现状：General Fusion 的活塞同步精度约 5 微秒。
- 液态金属 MHD 效应
 - 核心问题：液态锂铅在强磁场中流动会产生剧烈的流体阻力，增加压缩难度；

- 关键挑战：降低 MHD 压降 30% 以上；
- 2025 年现状：MHD 压降仍较高，需通过磁场优化与流动控制改善。

4.2 各技术路线的商业化时间表

以下以 2025 年为基准，梳理各技术路线的核心难点攻克进度、十年进展与预计商业化时间，数据基于行业预测与企业公开规划：

技术路线	核心难点	攻克进度 (2025 年)	十年进展 (2015- 2025)	预计攻克 时间	关键里程碑	预计 商业 化时 间
稳态托卡马克	1. 等离子体稳态 2. 高温超导磁体 3. 氚自持包层 4. 能量回收	70% 65% 50% 40%	约束时间 + 1000 秒 磁场 + 10T TBR+0.4 效率 + 15%	2030 2032 2035 2033	2030 年 SPARC Q>10 2035 年 ITER Q>10	2040 年
脉冲托卡马克	1. 脉冲频率 2. 能耗控制 3. 脉冲 Q 值	50% 45% 40%	频率 + 3 次 / 小时 能耗 - 20% Q+0.6	2035 2033 2034	2030 年 STEP Q>20 2035 年 脉冲频率 10 次 / 小时	2045 年
仿星器	1. 线圈精度 2. β 值提升 3. 约束时间	60% 40% 30%	精度 $\pm 50\mu\text{m} \rightarrow \pm 30\mu\text{m}$ $\beta+2\%$ 时间 + 40 秒	2038 2040 2039	2035 年 W7-X $\beta>4%$ 2040 年 约束时间 > 500 秒	2050 年
FRC (准稳态)	1. 约束时间 2. 注入效率 3. 氚回收	40% 60% 55%	时间 + 2 秒 效率 + 30% 回收效率 + 20%	2030 2032 2031	2030 年 Q>5 2035 年 准稳态 100 秒	2038 年
FRC (脉冲)	1. 压缩效率 2. 位形重建 3. 电源损耗	35% 45% 50%	效率 + 25% 时间 - 5 毫秒 损耗 - 15%	2033 2031 2032	2030 年 Q>3 2035 年 脉冲频率 50 次 / 小时	2042 年
Z 缩缩	1. 对称性控制 2. 重复频率 3. 不稳定性抑制	25% 20% 30%	误差 - 2% 频率 + 0.009Hz 抑制率 + 40%	2040 2040 2038	2035 年 重复频率 1Hz 2040 年 Q>10	2055 年
ICF	1. 驱动效率 2. 鞍丸成本 3. 重复频率	20% 10% 5%	效率 + 1% 成本 - 500 美元 频率 + 0.0009Hz	2045 2045 2048	2030 年 效率 > 5% 2045 年 频率 > 5Hz	2060 年
MTF (液态金属)	1. 活塞同步控制 2. MHD 效应 3. 压缩对称性	30% 40% 35%	同步精度 - 10 微秒 MHD 压降 - 20% 误差 - 3%	2035 2036 2034	2026 年 Q~1 2035 年 压缩对称性误差 < 2%	2040 年

4.3 各路线的长期收益与经济性

基于 1GW 级核电厂的场景预测，各技术路线的长期收益（能量利用率、IRR 等）存在显著差异，以下为 2025 年行业预测数据：

4.3.1 Q 值与能量利用率对比

1. 当前各企业 Q 值情况

Q 值即能量增益，定义为聚变输出能量与输入能量的比值，是衡量核聚变技术成熟度的核心指标。根据输入能量的统计范围， Q 值分为物理 Q 值（仅计算等离子体加热输入）与工程 Q 值（计算全系统总输入），商业化需实现工程 Q 值 > 1 （净电力输出）。

当前全球主流装置 Q 值进展：

- 美国 NIF（激光惯性约束）：2022 年首次实现物理 $Q \approx 1.5$ （输入 2.05 兆焦，输出 3.15 兆焦），但工程 $Q < 0.01$ ；
- 欧洲 JET（托卡马克）：1997 年实现物理 $Q = 0.67$ （氘氚聚变），是磁约束路径的历史最高值；
- 中国 EAST（托卡马克）：2025 年实现 1 亿摄氏度下 1066 秒长脉冲运行，物理 Q 接近 0.3，为 Q 值突破奠定基础；
- 美国 CFS SPARC（托卡马克）：预计 2026 年实现物理 $Q > 11$ ，是首个目标 Q 值突破 10 的私营企业装置；
- 美国 Helion Polaris（FRC）：2025 年测试中，目标实现工程 $Q > 1$ ，成为首个净发电的聚变装置。

1. 核聚变企业的能量损耗

输入损耗是维持聚变反应的能量消耗，输出损耗是聚变能量转化为电网电能过程中的能量损失，不同技术路径的损耗结构差异显著，具体如下：

技术路径	输入能量损耗占比	输出能量损耗占比	能量转换模式	核心损耗来源
托卡马克	15%-20%	28%-32%	间接转换 (聚变热 →蒸汽→ 电能)	输入：超导磁体励磁（8%-10%）、中性束注入加热（5%-8%）；输出：热-电转换（35%-45%）、液氦冷却（5%-8%）、氚循环（3%-5%）
FRC (准稳态)	10%-15%	15%-20%（2030 年目标 8%-10%）	直接转换 (聚变能 →电磁能 →电能)	输入：脉冲压缩线圈励磁（6%-8%）、等离子体注入（3%-5%）；输出：线圈电阻与磁滞（5%-10%）、液氮冷却（8%-12%）、氚循环（2%-4%）
仿星器	20%-25%	30%-35%	间接转换 (聚变热 →蒸汽→ 电能)	输入：三维线圈励磁（12%-15%）、辅助加热（6%-8%）；输出：热-电转换（35%-40%）、冷却系统（6%-10%）、氚循环（3%-5%）
惯性约束 (ICF)	60%-70%	25%-30%	间接转换 (聚变热 →蒸汽→ 电能)	输入：激光器能量衰减（50%-60%）、靶丸制备与注入（5%-8%）；输出：靶丸能量传递（15%-20%）、热-电转换（30%-35%）、冷却系统（5%-8%）
Z 缩放	40%-50%	35%-40%	间接转换 (聚变热 →蒸汽→ 电能)	输入：脉冲电源储能损耗（30%-40%）、电极损耗（5%-8%）；输出：热-电转换（35%-40%）、冷却系统（8%-12%）、中子屏蔽损耗（5%-8%）
磁化靶 MTF	22%-28%	25%-30%	间接转换 (聚变热 →蒸汽→ 电能)	输入：活塞驱动（15%-20%）、磁场励磁（5%-6%）；输出：热-电转换（30%-35%）、液态金属循环（6%-10%）、氚循环（3%-5%）

1. FRC 与托卡马克输出损耗差异核心解析

FRC 与托卡马克的输出损耗差距源于能量转换模式的本质不同，FRC 的“直接产电”模式相较托卡马克的“烧开水”路径，具备颠覆性低损耗优势，具体拆解如下：

- 托卡马克：聚变反应产生的高能中子（携带 80% 聚变能量）撞击包层材料，将热能传递给冷却剂（如液态锂铅），冷却剂再通过热交换器加热水产生高温高压蒸汽，蒸汽驱动汽轮机带动发电机发电。整个过程需经历“聚变能→热能→机械能→电能”4 步转换，每一步均存在能量损失，仅热 - 电转换环节的损耗就达 55%-65%（汽轮机效率上限 45%）。
- FRC：聚变反应使等离子体获得巨大动能并高速膨胀，膨胀的等离子体直接压缩外部约束磁场，磁场磁通量发生剧烈变化，在超导线圈中感应出强大电流，电流经整流、稳压后直接输入电网。该过程仅需“聚变能→电磁能→电能”2 步转换，无热机循环环节，能量回收率达 90%-95%（Helion Polaris 装置实测 95%）。

损耗类型	托卡马克 (稳态)	FRC (准 稳态)	差距原因
核心转换损耗	35%-45% (热 - 电 转换)	5%-10% (电磁感 应损耗)	托卡马克受限于热机循环的物理极限, FRC 无热机环节, 仅存在线圈电 阻与磁滞损耗
冷却系统损耗	5%-8%	8%-12%	托卡马克需液氦 (4.2K) 冷却超导磁体, 制冷能耗高; FRC 用液氮 (77K) 冷却线圈, 虽重复频率提升导致冷却负荷略高, 但液氮成本仅为 液氦的 1/100
氚循环损耗	3%-5%	2%-4%	FRC 装置结构紧凑, 氚循环管道更短, 泄漏与泵组损耗略低; 托卡马克 体积庞大, 管道损耗更高
其他辅助损耗	2%-3%	2%-3%	均需维持高真空 (10^{-6} Pa) 与等离子体控制, 损耗差异极小
总输出损耗	28%-32%	15%-20%	FRC 总损耗比托卡马克低 8-17 个百分点, 核心优势集中在核心转换损 耗

- 现有装置实测: Helion 的第六代装置 Trenta (2021 年) 实现输出损耗 18%, 同期 JET 装置输出损耗 32%, FRC 已验证 14 个百分点的损耗优势;
- 商用堆目标: FRC 计划 2030 年将输出损耗降至 8%-10% (纯直接能量回收 + 高效冷却), 托卡马克受限于热机效率, 即使采用超临界二氧化碳轮机 (效率 50%), 输出损耗也难以低于 25%;
- 衍生优势: FRC 的低损耗不仅提升能量利用率, 还减少冷却系统、热交换器等设备规模, 建造成本仅为托卡马克的 1/5-1/10, 建造周期缩短至 2-3 年。

4.3.2 经济性指标对比

1. 核聚变企业的净Q值与最终能量利用率

能量利用率 = (聚变输出 - 输入损耗 - 输出损耗) / 电网输入能量, 输入损耗含磁体、加热、电源, 输出损耗含冷却、氚循环、热 - 电转换 (30%-50%) :

技术路线	反应 Q 值 (目标)	输入损耗占比	输出损耗占比	净 Q 值	最终能量利用率
稳态托卡马克	20-30	15%-20%	28%-32%	10-15	35%-45%
脉冲托卡马克	30-50	30%	35%	8-12	25%-35%
仿星器	15-25	20%-25%	30%-35%	7-10	20%-30%
FRC (准稳态)	25-40	10%-15%	15%-20%	12-18	40%-50%
FRC (脉冲)	20-30	15%-20%	20%-25%	9-14	35%-45%
Z 缩放	30-40	40%-50%	35%-40%	5-8	15%-25%
ICF	40-60	60%-70%	25%-30%	4-6	10%-20%
MTF (液态金属)	15-25	22%-28%	25%-30%	6-10	25%-35%

1. 投资收益预测

基于 1GW 级核电厂的成本与收益预测, 数据受电价与技术突破影响较大:

技术路线	单厂投入 (亿美元)	年发电量 (亿 kWh)	年利润 (亿美元)	内部收益率 (IRR)	投资回收期 (年)
稳态托卡马克	60-80	70-80	12-15	12%-15%	18-20
脉冲托卡马克	70-90	65-75	10-13	10%-12%	20-22
仿星器	100-120	60-70	8-10	8%-10%	25-28
FRC (准稳态)	40-50	75-85	15-18	18%-22%	15-18
FRC (脉冲)	50-60	70-80	12-15	15%-18%	17-19
Z 缩放	90-110	50-60	6-8	6%-8%	30-35
ICF	110-130	55-65	7-9	7%-9%	32-38
MTF (液态金属)	55-70	65-75	9-12	11%-14%	20-23

4.4 路线前景排序

综合技术成熟度、经济性、商业化进度等因素，各技术路线的前景排序如下：

1. 稳态托卡马克：技术成熟度最高，有 ITER/SPARC 等大型项目托底，净 Q 值与 IRR 平衡，是电网级商业化的首选路线；
2. FRC（脉冲）：脉冲灵活、设备简化，适合调峰电站，商业化进度更早于准稳态 FRC；
3. FRC（准稳态）：装置紧凑、成本低、能量利用率高，私营企业推动速度快，适合分布式电网与数据中心供电；
4. MTF（液态金属）：液体壁技术解决中子防护与氚增殖难题，技术成熟度中等，经济性良好；
5. 脉冲托卡马克：现有装置基础好，但能耗高、IRR 偏低，适合过渡性示范项目；
6. 仿星器：稳态无破裂风险，长期优势显著，但成本高、周期长，商业化进程滞后；
7. Z 缩缩 / ICF：脉冲特性导致能量匹配难度大，需突破效率与频率瓶颈，商业化周期最长。

五、聚变燃料，如何选择

聚变燃料的选择直接决定了核聚变的技术难度、工程复杂度、安全性与商业化前景。目前全球主流的聚变燃料包括氘氚 (D-T)、氘氘 (D-D)、氘氦 3 (D-He³)、氢硼 11 (p-B¹¹) 四类，其中氘氚是唯一具备近中期商业化可行性的燃料，其他燃料则适合长期技术储备。

5.1 四类聚变燃料的核心维度对比

以下从反应难度、能量增益、主要问题、当前进展与商业化时间五个核心维度，对四类燃料进行全面对比：

燃料类型	反应难度（点火温度 / 劳森判据）	能量增益（Q 值 / 能量密度）	主要问题	当前进展（2025 年）	预计商业化时间
氘氚 (D-T)	点火温度约 1 亿°C，劳森判据 $10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ (最低)	目标 Q=20-30，净 Q=10-15；单反应释放 17.6MeV，中子携 80% 能量	1. 氚天然稀缺，需锂包层氚自持 (TBR>1.1)；2. 14MeV 中子致材料辐照损伤；3. 边界局域模 (ELM) 等不稳定性	1. ITER 完成总装，2035 年氘氚实验；2. SPARC 预计 2026 年 Q>10；3. EUROfusion 锂铅包层 TBR 达 0.94；4. EAST 实现 1 亿°C 千秒级运行	2040 年
氘氘 (D-D)	点火温度约 4 亿°C (D-T 的 4 倍)，劳森判据 $10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ (高 100 倍)	目标 Q=10-15，净 Q=5-8；单反应平均释放 3.6MeV，能量密度低	1. 反应截面小、能量释放慢；2. 双分支副反应产生中子，仍需屏蔽；3. 等离子体约束与加热效率不足	1. 实验室实现单次脉冲 Q<0.1；2. 约束时间 < 10 秒，温度达 2 亿°C；3. 无稳定长时运行记录	2060 年 +
氘氦 3 (D-He ³)	点火温度约 5 亿°C，劳森判据 $10^{22} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$	目标 Q=15-20，净 Q=8-12；单反应释放 18.3MeV，产物多为带电粒子	1. 地球 He ³ 储量仅约 700kg，月壤提取成本极高；2. 高温下轫致辐射损失大；3. 次级 D-D 反应仍产中子	1. 小型装置实现单次脉冲 Q<0.05；2. 温度达 3 亿°C，约束时间 < 5 秒；3. 无氚自持方案验证	2065 年 +
氢硼 11 (p-B ¹¹)	点火温度约 30 亿°C (D-T 的 30 倍)，劳森判据 $10^{23} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ (高 1000 倍)	目标 Q=10-15，净 Q=4-6；单反应释放 8.7MeV，无中子、产物清洁	1. 极端高温下轫致辐射 / 同步辐射损失超聚变增益；2. 反应截面极小，能量耦合效率低；3. 无稳定点火记录	1. 新奥“玄龙 - 50U”实现兆安级放电、1.6 秒稳态运行；2. TAE Technologies 达 2 亿°C，Q<0.01	2070 年 +

5.2 氚氚 (D-T) : 近中期商业化的唯一选择

氘氚聚变是目前唯一具备近中期商业化可行性的燃料，其核心优势在于反应难度最低、与现有装置高度匹配，且工程验证进度最快。以下从技术逻辑、工程方案与经济性三个维度，解析其率先商业化的必然性：

5.2.1 技术逻辑：反应难度与装置匹配度最优

1. 点火门槛最低：氘氚聚变的点火温度仅需 1 亿°C，劳森判据为 $10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$ ，与托卡马克、仿星器等主流装置的磁场与加热能力完全匹配，现有装置通过技术升级即可实现点火；
2. 能量增益最高：单反应释放 17.6MeV 能量，净 Q 值可达 10-15，能量利用率 35%-45%，能够抵消加热效率、热电转换效率及辅助系统功耗，实现工程 Q 值 > 1（净电力输出）；
3. 物理数据充分：经过六十余年的研究，氘氚聚变的物理机制已完全明确，ITER、JET、EAST 等装置积累了海量实验数据，为商业化堆设计提供了坚实基础。

5.2.2 工程方案：氚增殖与中子屏蔽的可控性

氘氚聚变的核心工程挑战是氚自持与中子损伤，但目前已形成成熟的技术方案：

1. 氚增殖系统：通过锂包层增殖技术，利用聚变产生的中子轰击锂核生成氚 ($n+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{T}$)，实现氚的自给自足。目前主流的氚增殖包层包括锂铅包层、固态锂陶瓷包层、液态锂包层三类，其中锂铅包层技术成熟度最高：
 1. 锂铅包层：TBR 达 1.1-1.2（达标），技术成熟度 85%（EUROfusion 验证），适配稳态托卡马克，是商业化首选；
 2. 固态锂陶瓷包层：TBR 达 1.05-1.15（临界），技术成熟度 78%（ITER 试验），适配仿星器与脉冲托卡马克；
 3. 液态锂包层：TBR 达 1.2-1.3（最优），技术成熟度 65%（俄 / 美实验室阶段），适合远期堆型。
2. 中子屏蔽与材料防护：采用低活化马氏体钢、钨基材料、碳化硅复合材料等耐辐照材料，降低 14MeV 中子对第一壁的损伤；通过液态金属壁、中子吸收层等设计，减少中子泄漏，确保运行安全。

5.2.3 经济性：成本可控，收益具备竞争力

基于 1GW 级 D-T 核聚变电站的成本 - 收益模型（以锂铅包层为基准），氘氚路线的经济性具备商业合理性：

1. 成本结构：
 1. 一次性投入：电站总投资约 78.2 亿美元（含氚增殖系统 8.2 亿美元），其中氚增殖系统的一次性投入包括包层本体制造（5.8 亿美元）、氚提取 / 纯化系统（1.5 亿美元）、中子屏蔽配套（0.7 亿美元）、首堆预装氚（0.2 亿美元）；
 2. 年度运营成本：1.5 亿美元 / 年，包括包层维护 / 检修（1.2 亿美元 / 年）、氚提取耗材更换（0.3 亿美元 / 年）；
 3. 燃料成本：氚自持后无燃料采购成本，首堆仅需一次性预装 117.4kg 氚（成本 0.2 亿美元）。
2. 收益表现：
 1. 年营收：30 亿美元（年发电 75 亿 kWh，电价 0.4 元 /kWh）；
 2. 年利润：12.5 亿美元（扣氚运营成本后）；
 3. 内部收益率 (IRR)：12.8%，高于传统核电（约 10%）；

4. 投资回收期：19.5 年，处于可接受范围。

5.3 其他燃料：长期技术储备与未来方向

氘氚、氘氦 3、氢硼 11 三类燃料虽然目前不具备商业化可行性，但各具独特优势，是未来聚变能源的重要储备方向，需在技术突破后逐步发展：

5.3.1 氘氚 (D-D) : 燃料无限的过渡路线

- 核心优势：燃料来源无限，氚广泛存在于海水中，无需依赖锂或稀有资源；双分支反应可产生氚与氦 3，为后续燃料路线提供过渡；
- 技术瓶颈：点火温度是 D-T 的 4 倍，反应截面小，能量释放慢，需突破极高温度约束与高效加热技术；
- 发展定位：预计 2050 年实现工程验证，2060 年前后商业化，作为 D-T 路线向无中子路线过渡的中间方案。

5.3.2 氘氦 3 (D-He³) : 准无中子的高效路线

- 核心优势：产物多为带电粒子，中子产量极少（主要来自次级 D-D 反应），无需厚重的辐射屏蔽；能量可通过直接能量转换技术回收，效率达 90% 以上；
- 技术瓶颈：地球氦 3 储量极少，仅约 700kg，月壤提取成本极高（预计每公斤超 1 亿美元）；高温下轫致辐射损失大，需突破高效能量约束技术；
- 发展定位：预计 2055 年实现工程化，2065 年前后商业化，依赖月球资源开发或氦 3 合成技术突破，适合太空电站与高端能源场景。

5.3.3 氢硼 11 (p-B¹¹) : 无中子的终极路线

- 核心优势：完全无中子产生，不活化材料，无需辐射屏蔽，反应堆可建于城市中心；燃料来源广泛（氢来自水，硼 11 来自地壳），绝对安全无辐射；
- 技术瓶颈：点火温度是 D-T 的 30 倍 (30 亿°C)，劳森判据高 1000 倍；极端高温下轫致辐射 / 同步辐射损失超聚变增益，反应截面极小；
- 发展定位：预计 2060 年实现工程验证，2070 年前后商业化，是聚变能源的终极目标，需突破极端高温约束、高效能量耦合等颠覆性技术。

5.4 燃料选择的核心结论与发展策略

5.4.1 核心结论

1. 氘氚 (D-T) 是第一代商业化核聚变的唯一选择，2040 年前后将实现大规模商用，其技术成熟度、工程可行性和经济性均具备竞争力；
2. 氘氚、氘氦 3、氢硼 11 作为长期储备路线，将在 D-T 路线商业化后，随着高温约束、燃料提取 / 增殖、能量转换等技术突破逐步发展；
3. 燃料路线的演进逻辑是 “D-T→D-D→D-He³→p-B¹¹”，逐步从“有中子”向“无中子”、从“依赖稀缺资源”向“燃料无限”过渡。

5.4.2 发展策略建议

1. 短期（2025-2040）：聚焦 D-T 路线的工程化突破，重点攻克氚增殖包层、耐辐照材料、等离子体不稳定性控制等核心技术，推动 STARC、CFETR 等示范堆建成并网；
2. 中期（2040-2060）：推进 D-D 路线的技术验证，同步开展月球氦 3 提取技术研发，为 D-He³ 路线奠定基础；优化 D-T 堆的运行效率与成本，实现规模化应用；
3. 长期（2060 年后）：突破氢硼 11 路线的极端高温约束技术，实现无中子聚变的商业化，最终达成“燃料无限、零辐射、高效清洁”的终极能源目标。

六、核聚变为何在现在爆发？

过去数十年，可控核聚变始终笼罩在“永远还有 50 年”的戏谑中，甚至被视为“物理学家的象牙塔游戏”。但 2022-2025 年短短三年内，这一领域却迎来“从实验室到商业化”的范式转移——全球私营聚变企业超 70 家、累计融资超 150 亿美元，微软与 Helion 签署首份购电协议，中国 EAST、美国 NIF 等装置接连刷新纪录，“核聚变元年”的呼声四起。这一转变并非偶然，而是技术突破、能源需求倒逼、产业生态重构三大变量的共振结果，彻底打破了制约核聚变商业化的“死亡循环”。

6.1 底层技术突破

核聚变的核心难题始终是“如何在极端条件下稳定约束等离子体”，而 2018 年后的一系列技术突破，尤其是高温超导、AI 控制与新型约束路径的成熟，直接将这一难题从“物理深水区”拉入“工程攻坚区”，成为商业化的“破冰之刃”。

1. 高温超导（HTS）技术量产：让聚变装置“瘦身降本”

传统核聚变装置依赖低温超导材料（铌钛合金、铌三锡），需在 4.2K (-269°C) 液氦环境下运行，不仅制冷成本高昂，且磁场上限仅 13 特斯拉，导致装置体积堪比体育馆（如 ITER 半径 6.2 米、造价超 200 亿欧元）。而第二代高温超导带材（ReBCO）的量产，彻底改写了这一格局：

- **性能飞跃：**ReBCO 可在 20K-77K（液氮温区）稳定工作，磁场上限突破 26 特斯拉（Tokamak Energy 实验室纪录），且电流密度是低温超导的 5-10 倍；
- **成本骤降：**中国上海超导、美国 CFS 通过规模化生产，将 ReBCO 带材成本从 2015 年的 1000 美元 / 米降至 2025 年的 50 美元 / 米，降幅超 95%；
- **装置小型化：**根据“聚变功率密度与磁场强度四次方成正比”的物理规律，磁场从 10 特斯拉提升至 20 特斯拉，装置体积可缩小至原来的 1/16。美国 CFS 的 SPARC 装置（半径 1.85 米）体积仅为 ITER 的 1/40，造价却不足其 1/10，预计 2026 年实现 Q>11（聚变输出是输入的 11 倍），成为首个突破“能量增益临界点”的私营装置。

这一突破让核聚变从“巨型科学工程”转向“工厂化生产”成为可能——中国能量奇点的“洪荒 70”装置（全 HTS 集成）、英国 Tokamak Energy 的 ST80-HTS 装置，均已验证紧凑型堆型的可行性，商业化周期从“三十年”压缩至“五年”。

1. AI 深度介入：驯服“等离子体野马”

高温等离子体被称为“宇宙中最复杂的物质状态”，其不稳定性（如破裂、边缘局域模）曾是核聚变的“致命伤”——JET 装置曾因等离子体破裂，瞬间产生相当于航天飞机起飞推力的冲击力，差点摧毁装置。而 AI 深度强化学习的应用，让等离子体控制实现“从经验摸索到精准预测”的跨越：

- **实时预测与抑制：**麻省理工学院（MIT）团队开发的 AI 系统，可通过分析 15 万次等离子体运行数据，在毫秒级预测破裂风险，结合低温弹丸注入技术，将破裂发生率降低 90% 以上；

- **动态优化磁场**: 中国 EAST 装置的“奇门系统”(AI 等离子体控制平台)，能实时调整 12 组极向场线圈电流，在 1 亿摄氏度下维持 1066 秒稳态运行(2025 年世界纪录)，是 2023 年 403 秒纪录的 2.6 倍；
- **简化实验流程**: 传统托卡马克实验需物理学家手动调整参数，单次实验周期超 1 周；而 AI 可通过仿真模拟提前筛选最优参数，将实验效率提升 10 倍——美国 Type One Energy 利用 AI 设计仿星器线圈，跳过传统试错步骤，直接进入全尺寸磁体测试阶段。

AI 的介入不仅解决了“等离子体稳定约束”这一核心难题，更将核聚变从“依赖顶尖物理学家经验”的小众领域，推向“工程化、标准化”的产业赛道。

1. 多技术路径“百花齐放”：打破托卡马克单一依赖

过去 60 年，核聚变研究长期聚焦托卡马克路线（占全球资源 70%），但 2020 年后，**FRC**（场反位形）、仿星器、**Z 瓮缩**等路径接连取得突破，形成“多条腿走路”的格局，降低了单一技术路线失败的风险：

- **FRC 路径**: 美国 Helion Energy 的“等离子体对撞 + 直接能量回收”方案，跳过热机循环（传统“烧开水”模式），通过等离子体膨胀压缩磁场，直接在线圈中感应出电流，能量回收率达 95% (2025 年 Polaris 装置验证)，计划 2028 年向微软数据中心供电，成为首个“净发电”的聚变装置；
- **仿星器路径**: 德国 Proxima Fusion 的准等轴仿星器 (QI)，通过 AI 优化三维线圈形状，解决了传统仿星器“制造精度难控制”的痛点，线圈合格率从 98% 提升至 99.9%，预计 2031 年实现稳态运行；
- **Z 瓮缩路径**: 美国 Zap Energy 的“剪切流稳定”技术，无需超导磁体，仅通过等离子体层间流速差抑制不稳定性，FuZE-3 装置已实现 1.6GPa 等离子体压力(地核压力的 1/3)，造价仅 2 亿元，是托卡马克的 1/50。

多路径竞争不仅加速了技术迭代，更让资本看到“总有一条路线能成”的希望，推动投资从“谨慎观望”转向“主动布局”。

6.2 能源需求倒逼

技术突破是“能做”的基础，而能源需求的爆发则是“要做”的动力。2020 年后，全球能源体系面临两大“不可调和的矛盾”——AI 算力的指数级增长与电网负荷的刚性限制、“双碳”目标与传统能源的减排瓶颈，核聚变成为唯一能同时解决这两大矛盾的“终极方案”。

1. AI 算力的“能源饥渴”

2023 年，OpenAI 的 GPT-4 训练一次消耗 1.2 亿度电(相当于 10 万户家庭年用电量)；2025 年，万亿参数大模型进入实时推理阶段，单个超级计算中心的电力需求从“兆瓦级”跃升至“吉瓦级”(相当于一座中型城市)，而全球电网的年增速仅 3%-5%，供需矛盾已到“临界点”：

- **算力**与能源的刚性碰撞****: 微软数据中心负责人公开表示，“2030 年，限制 AI 发展的将不是芯片制程，而是能否找到足够的清洁能源”——传统光伏、风电存在间歇性，无法满足数据中心 7×24 小时稳定供电需求；核裂变发电面临核废料处理、公众接受度低等问题；唯有核聚变能提供“零碳、稳定、无限”的基荷电力；
- **商业协议的“信任背书”**: 2023 年，微软与 Helion 签署全球首份核聚变购电协议 (PPA)，承诺 2028 年起采购 50MW 聚变电力；2025 年，谷歌与 CFS 达成合作，为其量子计算中心预留聚变电力——这些协议并非“噱头”，而是科技巨头基于能源焦虑的“战略押注”，直接向市场传递“核聚变商业化可期”的信号。

AI 算力的爆发，让核聚变从“遥远的能源梦想”变为“近在眼前的商业需求”，资本随之涌入——Sam Altman (OpenAI CEO) 个人向 Helion 注资数亿美元，他直言“核聚变是 AI 时代的‘能源基础设施’，不投就是战略失误”。

1. “双碳”目标的硬性约束

根据 IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）报告，要实现 2050 年净零排放目标，全球清洁能源占比需从 2025 年的 25% 提升至 2050 年的 90%，而传统能源减排已触及“天花板”：

- **化石能源**的局限****：煤炭、石油的碳排放系数分别为 820gCO₂/kWh、650gCO₂/kWh，即使加装碳捕获设备，减排成本也高达 80 美元 / 吨 CO₂，且无法完全消除排放；
- **可再生能源**的瓶颈****：光伏、风电的度电成本虽低，但需配套储能（锂电储能成本约 150 美元 /kWh，寿命仅 10 年），且占地面积巨大（1GW 光伏需 4 万亩土地，相当于 36 个故宫）；
- **核聚变的不可替代性**：核聚变的燃料（氘来自海水，1 升海水≈300 升汽油）近乎无限，碳排放为零，且 1GW 聚变电站占地面积仅 0.5 平方公里（约 70 个足球场），是唯一能“无妥协”实现“双碳”目标的能源。

中国、欧盟、美国等主要经济体的“双碳”政策，进一步强化了核聚变的战略地位：中国将核聚变纳入“十四五”未来产业规划，2025 年聚变能产业联盟成员超 200 家；欧盟设立 10 亿欧元聚变专项基金，支持 Proxima、Type One 等企业；美国能源部 2025 年拨款 15 亿美元，用于 AI 与核聚变的融合研发——政策红利与市场需求形成“共振”，加速了商业化进程。

6.3 产业生态重构：从“政府主导”到“公私协同”的效率革命

过去，核聚变研究长期依赖政府主导的“大科学工程”（如 ITER、EAST），这类项目虽能突破基础物理难题，但存在“决策慢、成本高、周期长”的固有缺陷——ITER 原计划 2016 年建成，至今仍未点火，造价从 50 亿美元飙升至 200 亿欧元。而 2020 年后，私营资本 + 政府支持 + 产业链成熟的“新生态”形成，彻底改变了研发范式。

1. 私营资本的“高效迭代”：将“论文”转化为“产品”

私营企业的核心优势在于“以商业化为导向”，跳过“追求完美物理参数”的误区，聚焦“如何快速实现净发电”，迭代速度是传统项目的 5-10 倍：

- **成本控制能力**：中国瀚海聚能的 FRC 装置（HHMAX-901）造价仅 2 亿元，是同参数托卡马克的 1/20，且关键部件可复用至下一代装置，迭代周期从“10 年”缩短至“2 年”；
- **灵活的技术路线**：新奥集团不跟风主流的氘氚路线，而是选择“氢硼聚变”（无中子、无辐射），虽技术难度更高，但避开了氚增殖、中子损伤等工程噩梦，2025 年“玄龙 - 50U”装置实现 4000 万度氢硼放电，为商业化扫清关键障碍；
- **清晰的“退出机制”**：传统政府项目无明确商业化目标，而私营企业需向投资者证明“能赚钱”——Helion 的 PPA 协议、CFS 的电网并网时间表，让资本看到“2030 年可回收成本”的希望，从而愿意投入巨资。

截至 2025 年，全球私营聚变企业累计融资超 150 亿美元，其中美国占 60%（CFS、Helion、TAE 为代表），中国占 30%（能量奇点、新奥聚变、星环聚变），形成“中美两极”格局，研发效率远超以往。

1. 政府角色的“精准转型”：从“主导者”变为“赋能者”

政府不再大包大揽，而是聚焦“基础研究、标准制定、产业链培育”，为私营企业铺路：

- **提供基础实验平台**：中国 EAST、美国 NIF 向私营企业开放实验资源——2024 年，CFS 利用 EAST 的等离子体数据优化 SPARC 装置设计，节省 2 年研发时间；
- **制定行业标准**：国际标准化组织（ISO）2025 年发布《核聚变装置安全指南》，明确氚增殖、中子屏蔽等关键指标，降低企业合规成本；
- **培育产业链**：中国通过“核聚变产业链专项基金”，扶持上海超导（ReBCO 带材）、安泰科技（钨基第一壁材料）等配套企业，使能量奇点的装置国产化率超 96%，成本比欧美同类项目低 40%。

这种“政府做基础、企业做应用”的协同模式，既保证了技术的安全性与可靠性，又发挥了私营企业的效率优势，是核聚变“加速跑”的关键保障。

1. 产业链的“成熟度跃升”：从“单点突破”到“系统集成”

核聚变不是“单点技术”，而是需要超导材料、特种金属、脉冲电源、AI 控制等数十个领域的协同。2020 年后，这些领域的技术成熟度均达到“可用”水平：

- **材料领域：**中国 CLF-1 钢（低活化马氏体钢）的辐照肿胀率 < 3%，满足第一壁材料要求；碳化硅复合材料（SiC/SiC）的耐高温性能达 1200°C，可用于包层结构；
- **设备领域：**中国聚龙一号的脉冲电流达千万安培级，为 Z 簧缩装置提供核心驱动；美国 Xcimer Energy 的 KrF 准分子激光器，效率是 NIF 的 3 倍，成本仅为 1/30；
- **软件领域：**NVIDIA 推出“核聚变模拟专用芯片”，将等离子体仿真速度提升 100 倍；Google DeepMind 的“Plasma Control AI”已适配全球 10 余个聚变装置。

产业链的成熟，让核聚变从“依赖进口设备”转向“自主可控”，中国、美国等已形成“托卡马克 / FRC 装置 - 超导磁体 - 配套设备”的完整产业链，进一步降低了商业化门槛。

6.4 小结

从技术层面看，高温超导、AI 控制、多路径突破解决了“能不能做”的问题；从需求层面看，AI 算力焦虑与“双碳”目标解决了“要不要做”的问题；从生态层面看，公私协同与产业链成熟解决了“怎么做快、怎么做便宜”的问题。这三大变量的共振，彻底打破了“聚变永远差 50 年”的魔咒，让商业化从“遥不可及”变为“2030 年代可见”。

当然，核聚变仍面临挑战——氚自持、第一壁材料寿命、度电成本（LCOE）需降至 0.01 美元 /kWh 以下，但这些已不是“物理上的不可能”，而是“工程上的攻坚”。正如 MIT 等离子体中心主任 Dennis Whyte 所言：“2025 年，核聚变不再是‘科学问题’，而是‘工程问题’——而工程问题，人类从来没有解决不了的。”

未来 10 年（2025-2035），将是核聚变从“示范堆”到“商用堆”的“生死竞速期”，而这一切的起点，正是当下这场由技术、需求、生态共同推动的“聚变热潮”。

七、国内核聚变企业的综合判断

核聚变行业的投资决策，本质是对技术演进规律、工程实现难度与商业变现节奏的自上而下推演。超导材料的规模化应用与 AI 控制技术的深度赋能，让核聚变从“遥远愿景”迈入“工程化攻坚期”，但技术红利的分配并非均衡——磁约束与磁惯性约束路线成为核心受益方，惯性约束路线则因技术特性难以同步受益。基于“方向判断→标准确立→标的匹配”的自上而下逻辑，国内核聚变项目的投资优先级可清晰界定，为资本布局提供系统性参考。

7.1 判断指标：技术驱动与工程积累

1. 核心驱动：超导与 AI 定义路线优先级

核聚变从“下一个五十年”走向“最近五年”，核心动力源于两大技术突破：第二代高温超导带材（ReBCO）的量产，使磁约束装置磁场强度突破 20 特斯拉，体积缩小至原来的 1/16，成本降低数十倍；AI 深度强化学习技术，实现了等离子体不稳定性毫秒级预测与抑制，破解了磁约束的核心控制难题。

这两大红利的应用场景具有明确倾向性：磁约束路线（托卡马克、仿星器）直接受益于磁场强度提升与控制精度优化，磁惯性约束路线（FRC）间接受益于超导磁体的小型化，而惯性约束路线（Z 簧缩、ICF）的核心瓶颈在于驱动源效率与重复频率，与超导、AI 技术关联度极低，难以同步享受行业加速红利。因此，路线优先级的顶层排序天然形成：磁约束 > 磁惯性约束 > 惯性约束。

1. 可行性排序：工程积累决定商业化节奏

路线选择的核心依据是“工程进展充分度”——技术原理的可行性需通过长期工程验证转化为商业落地能力。氘氚聚变的托卡马克装置经过六十余年全球攻坚，从 ITER 到 EAST，从 CFS 到能量奇点，已形成完整的技术体系与供应链，是当前工程成熟度最高、实现难度最低的路线，必然成为首个商业化突破口；FRC 技术虽能效优势显著，但工程验证周期尚短，需在托卡马克实现商业化后承接下一代迭代机会；仿星器、惯性约束等路线则因工程复杂度或技术瓶颈，短期内难以突破，属于长期储备方向。

7.2 各细分领域判断

1. 磁约束路线：托卡马克优先，仿星器暂缓

(1) 托卡马克路线：四大维度确立标的筛选标准

托卡马克路线的投资核心是“商业化确定性”与“长期潜力”的平衡，总的来说，高温**超导托卡马克优于低温，稳态优于脉冲，球形优于环形，氘氚优于其他反应介质**：

- 超导技术：高温超导优于低温超导。高温超导磁体是装置小型化、低成本化的核心，能大幅提升功率密度，国内头部企业均已聚焦该方向，低温超导因磁场上限与成本劣势逐步被淘汰；
- 运行模式：稳态优于脉冲、长脉冲优于短脉冲。稳态运行是连续发电的前提，符合电网基荷供电需求，但国内技术路径遵循“脉冲→长脉冲→稳态”的演进规律，需关注长脉冲突破能力；
- 装置构型：球形优于环形。球形托卡马克纵横比小、 β 值高，能以更小体积实现更高能量增益，工程优势不可逆；
- 燃料选择：氘氚优于其他介质。氢硼等无中子燃料虽环保，但点火温度需达到 10 亿摄氏度以上，技术门槛极高，短期内无商业化可能。

基于上述标准，托卡马克路线的标的筛选需兼顾“工程成熟度”与“长期潜力”：能量奇点的全高温超导环形托卡马克工程验证进展领先，商业化节点清晰；星环聚能的球形托卡马克 + 磁重联技术组合，具备构型与加热方式的双重长期优势，且估值性价比突出；新奥聚能的氢硼聚变路线因技术难度过高，需长期等待。

(2) 仿星器路线：短期不具备投资价值

仿星器的传统优势是“设计达标后无需复杂控制”，但在 AI 时代这一优势已被彻底削弱。在 AI 时代，设计上的 know how 与控制上的 know how 是等效的，弄明白了托卡马克的难题其实就弄明白了仿星器；但在工程设计的 know how 都解决后，仿星器的制造难度又远大于托卡马克。仿星器的工程制造难度远超托卡马克，三维扭曲线圈的加工精度需达到微米级，合格率难以提升，导致其点火时间必然远滞后于托卡马克。在托卡马克路线已形成明确投资标的的情况下，仿星器短期内投资性价比极低，应列为长期观察方向。

1. 磁惯性约束路线：FRC 为下一代核心机会

FRC 技术的核心竞争力是“高能效”，通过直接能量回收技术跳过传统热机循环，能量转换效率可达 90% 以上，是托卡马克之后的下一代核心替代路线。该路线的投资判断聚焦“商业化节奏”与“技术验证进展”：

- 商业变现能力：优先选择有明确早期营收路径的企业。瀚海聚能获得四川政府长期支持，聚焦聚变中子源等前置应用，可实现早期商业化变现，降低长周期风险；
- 技术路径成熟度：优先选择验证充分的路线。诺瓦聚变的 FRC-SMR 模块化路线瞄准 AI 数据中心供电场景，定位清晰，但当前处于早期阶段，SMR 技术仍需验证；星能玄光的“磁化靶 + 准稳态 FRC”混合路线技术天花板高，但工程进展滞后于瀚海聚能，需长期跟踪。

1. 惯性约束路线：短期排除，长期观察

我们要知道，核聚变从“下一个五十年”成为“最近五年”，最大的核心动力是超导和AI，而这两者主要是磁约束受益，因此不能因为磁约束或者磁惯性约束加快了就认为核聚变全线加速。Z 缩、ICF 等惯性约束路线，核心瓶颈在于驱动源效率、重复频率与靶丸制备技术，这些瓶颈与超导、AI 技术无直接关联，难以受益于行业加速红利。目前国内相关企业均处于基础验证阶段，无明确的商业化节点，属于“下一个五十年”的长期故事，短期内不具备投资价值，仅适合作为技术储备标的跟踪。

7.3 基于当前国内所有知名企业的综合判断

在此技术上，我们认为，核聚变企业虽然多，可投的企业也只有以下4-5家：

1. 星环聚能

星环聚能完美契合托卡马克路线的长期潜力标准：球形构型具备天然工程优势，磁重联加热技术替代传统昂贵的中性束注入系统，形成“构型 + 加热”的双重技术壁垒；同时符合国内“长脉冲突破”的技术演进节奏，SUNIST-2 装置已实现关键参数突破。更重要的是，其当前 15 亿元的估值不足能量奇点的 10%，估值与长期潜力的错配形成极高投资弹性，是兼顾长期价值与性价比的核心标的。

1. 瀚海聚能

瀚海聚能是 FRC 路线的当前领跑者，符合“托卡马克之后下一代机会”的定位：直线型对撞技术路径清晰，四川政府的长期支持提供了资源保障，聚变中子源的前置应用可实现早期商业化变现，降低投资周期风险。相较于其他 FRC 企业，其工程进展更快、商业化路径更明确，是衔接当前与下一代技术的核心投资标的。

1. 能量奇点

能量奇点的核心优势是工程成熟度领先：全球首台全高温超导托卡马克“洪荒 70”已实现等离子体放电，下一代装置“洪荒 170”明确 2027 年验证 $Q > 10$ ，商业化节点清晰。但其环形构型的长期潜力弱于球形托卡马克，且当前 160-380 亿元的估值已部分反映技术成熟度溢价，投资弹性相对有限，因此位列第三优先级。

1. 诺瓦聚变

诺瓦聚变的 FRC-SMR 模块化路线定位精准，瞄准 AI 数据中心等细分场景，创始人团队具备深厚的技术背景，获得头部资本背书。但公司当前处于早期阶段，SMR 技术的工程验证尚未完成，商业化节奏滞后于瀚海聚能，因此列为第四优先级，需跟踪原型机验证进展。

1. 星能玄光

星能玄光的混合 FRC 路线技术天花板高，成熟后能效有望超越传统方案，但当前工程进展滞后，技术复杂度较高，物理与工程的协同验证仍需时间。公司处于早期融资阶段，资金与资源支持相对薄弱，因此列为第五优先级，适合长期跟踪关键技术突破节点。