

电力

2025 年 08 月 26 日

可控核聚变技术百花齐放，终极能源梦想照进现实

——行业投资策略

投资评级：看好（维持）

周磊（分析师）

zhoulei1@kysec.cn

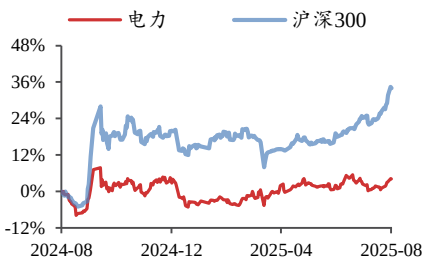
证书编号：S0790524090002

黄懿轩（联系人）

huangyixuan1@kysec.cn

证书编号：S0790125070014

行业走势图



数据来源：聚源

相关研究报告

《火电商业模式迎来拐点，盈利稳定性有望提高——行业投资策略》

-2025.7.21

《绿电消纳考核范围拓宽，有望持续提升绿电环境溢价——行业投资策略》

-2025.7.14

《水电商业模式稳定，低利率时代价值凸显——行业投资策略》-2025.5.31

● 可控核聚变技术路线多元化发展，公共资金和私营资本踊跃入局

核聚变反应指轻核碰撞融合形成重核并释放大量能量的过程。可控核聚变技术路线百花齐放，磁约束、Z 箍缩、FRC 等技术路线均迎来重要变化。当前全球在运/在建的核聚变项目主要由公共资金主导，多采用磁约束技术路线；规划中的核聚变项目主要由私营资本主导，技术路线趋于多元化；全球聚变竞赛已拉开帷幕，各国聚变公司融资活动频繁，美国科技巨头谷歌、亚马逊、微软等踊跃入局核聚变公司投资。参考当前国内裂变堆每年 10GW 级的核准建设节奏，若核聚变电站顺利实现商业化，未来批量建设情景下年投资额或将达数千亿元。

● 托卡马克装置有望受益于高温超导带材量产率先突破，2030s 实现并网发电

托卡马克装置聚变功率与环形磁场强度的四次方成正比；即理论上，每当环形磁场强度提升 1.8 倍，装置聚变功率就能够提升一个数量级。低温超导材料 NbTi 和 Nb₃Sn 分别在 10T 和 20T 磁场强度下载流能力大幅下降；而二代高温超导材料 REBCO 在 40T 磁场强度下仍保持较强的载流能力。近年来，随着高温超导材料实现工业化量产，采用高温超导方案的装置理论上限大幅提升，新一代聚变公司涌现，CFS、Tokamak Energy、星环聚能、能量奇点等均采取高温超导方案。

● 国内 Z 箍缩混合堆有望加速落地，FRC 装置获私营资本青睐

2008 年，彭先觉院士提出 Z 箍缩驱动聚变-裂变混合堆（Z-FFR）；2025 年 3 月，先觉聚能成立，国内 Z 箍缩混合堆建设有望提速。2008-2020 年，Helion 团队累计获奖金/融资约 0.74 亿美元，完成场反位形（FRC）装置原型机的六次迭代，并成功实现 1 亿度等离子体温度。FRC 装置有望成为聚变领域的黑马，私营资本加速布局。2021-2025H1，Helion 累计完成 9.6 亿美元融资，国内瀚海聚能、星能玄光、诺瓦聚变相继成立；2025 年 8 月，诺瓦聚变完成 5 亿元天使轮融资。

● 可控核聚变行业进入快速孵化阶段，有望逐渐迈向商业化阶段

技术进步和资金投入共同推动行业进入快速孵化阶段，建议关注聚变项目资本开支加速带来的上游装备、材料等环节投资机会。受益标的：（1）磁体：西部超导（低温超导线材）、永鼎股份（高温超导带材）、上海超导（高温超导带材）、联创光电（高温超导磁体服务）等；（2）真空室和堆内构件：合锻智能（真空室、第一壁、包层和偏滤器）、国光电气（第一壁、包层和偏滤器）、安泰科技（第一壁、包层和偏滤器）等；（3）电源总成：英杰电气（磁体电源和 PSM 电源）、爱科赛博（磁体电源和 PSM 电源）、四创电子（PSM 电源）、新风光（磁体电源）、赛晶科技 H（脉冲电源）等；（4）微波和电源器件：旭光电子（真空脉冲功率器件等）、国力股份（氢闸流管、回旋管、速调管）、宏微科技（IGBT）、王子新材（电容）等；（5）燃料增殖和循环：国光电气（氚工厂）等；（6）检测设备：皖仪科技（氦检漏、真空检漏）等。

● 风险提示：商业化进度不及预期、资金投入不及预期、技术路线变化风险。

目 录

1、可控核聚变技术路线多元化发展，公共资金和私营资本踊跃入局	5
1.1、可控核聚变技术路线多样，商业化落地渐行渐近	5
1.2、全球核聚变竞赛已拉开帷幕，私营资本和科技巨头踊跃入局	10
2、托卡马克：受益于高温超导量产，2030s 有望并网发电	13
2.1、基本原理：磁场约束下持续发生的聚变反应，类似燃煤锅炉	13
2.2、核心催化：高温超导材料实现工业量产，装置理论上限大幅提升	14
2.3、工程进度：国内外重点项目建设有序推进，2030s 有望并网发电	16
2.4、主要部件：托卡马克装置总投资额较高，零部件价值量较分散	18
2.4.1、磁体系统：托卡马克装置核心，实现等离子体初步加热和约束	19
2.4.2、真空室与堆内构件：提供和维护聚变反应环境，并实现燃料增殖	20
2.4.3、加热和电源系统：托卡马克装置的“心脏”，能量输入的核心环节	21
3、Z 箍缩：先觉聚能成立，Z 箍缩混合堆有望加速落地	25
3.1、Z 箍缩：美国 Zap Energy 力争 2030 年代初期交付聚变发电模块	25
3.2、Z 箍缩聚变-裂变混合堆：先觉聚能成立，项目有望加速落地	26
3.3、主要部件：驱动器在 Z 箍缩聚变装置中价值量占比约 50%	28
4、场反位形：技术路线得到初步验证，私营资本加速布局	30
4.1、基本原理：磁化靶 FRC 装置脉冲式发生聚变反应，类似柴油发动机	30
4.2、核心催化：Helion 初步验证技术路线可行性，FRC 获私营资本青睐	33
4.3、主要部件：高频脉冲电源价值量占比或超 50%	35
5、受益标的：重视主流技术路线装置核心环节的投资机会	39
6、风险提示	42

图表目录

图 1：核聚变反应中，轻核碰撞融合生成重核并释放能量	5
图 2：温度、密度、约束时间三者的乘积称为聚变三乘积	5
图 3： Q_{Eng} 与能量输入输出过程中的电能转换效率 η_E 、 η_{elec} 以及 Q_{Sci} 成正比	8
图 4：磁约束聚变装置实现 $Q_{eng}=1$ 大约需要 $Q_{sci}=6$	8
图 5：更高的装置效率能够在更低的 Q_{sci} 实现 $Q_{eng}=1$	8
图 6：当前在运的聚变装置中，较高的 Q 值和三乘积记录基本由托卡马克和惯性约束聚变装置实现	9
图 7：SPARC 装置和 ITER 装置分别计划在 2028 年、2040 年前后实现 $Q=10$	9
图 8：四代钠冷快堆使用没有中子减速作用的钠（Sodium）为导热剂	10
图 9：聚变-裂变混合堆整体能量倍增系数 M 较高，聚变环节 Q 值要求大幅降低	10
图 10：在运/在建的核聚变项目主要由公共资金主导，采取磁约束技术路线（单位：个）	11
图 11：规划中的核聚变项目主要由私营资本主导，技术路线趋于多元化（单位：个）	11
图 12：聚变项目主要分布在美国、日本、俄罗斯、中国（单位：个）	11
图 13：各国聚变公司权益融资活动频繁	11
图 14：截至 2024 年，全球共 15 家聚变公司计划在 2031-2035 年间建成首座商业化聚变电站	12
图 15：聚变电站有望具备经济竞争力，未来批量建设阶段年投资额有望达数千亿规模	12
图 16：托卡马克装置将聚变反应产生的热量用于产生蒸汽，推动汽轮机发电	13
图 17：托卡马克装置中等离子体电流与外部磁体共同形成旋转的磁场	14
图 18：仿星器磁体结构复杂，制造精度要求较高	14

图 19: 托卡马克装置功率与磁场强度的四次方和等离子体截面半径的四次方正相关	14
图 20: 基于铜氧化物的高温超导材料临界温度高于液氮	15
图 21: 高温超导材料在 40T 强磁场下仍能维持超导性能	15
图 22: 上海超导二代高温超导带材单位成本快速下降	16
图 23: 上海超导二代高温超导带材产能迅速提升	16
图 24: 根据我国聚变能发展路线图, 预计在 2030s 实现工程验证和示范验证	17
图 25: 托卡马克装置的主要组成部分包含真空室、磁体、包层、偏滤器、杜瓦等	18
图 26: ITER 项目中磁体和堆内构件成本占比较高	18
图 27: ITER 磁体系统由环向场、极向场、中心螺线管、矫正四类线圈组成	19
图 28: 真空室内依次为屏蔽层、增殖层、第一壁	20
图 29: 偏滤器位于真空室底部, 负责排出氦灰和杂质	20
图 30: D-T 聚变反应及氦增殖过程	21
图 31: 聚变反应生成的中子在增殖层实现中子倍增和燃料增殖	21
图 32: ITER 采用射频波和中性束加热	22
图 33: ITER 射频波和中性束加热装置分布	22
图 34: ITER 电源系统主要包含磁体电源、辅助加热电源和无功补偿和滤波系统	23
图 35: 每个变流器单元由 4 个晶闸管桥和一个旁通桥组成	23
图 36: 开关网络单元主要由机械开关和晶闸管组成	24
图 37: 快速放电单元主要由真空开关和晶闸管组成	24
图 38: PSM 模块主要由二极管桥、IGBT 斩波器、撬棒电路 SCR 等装置组成	24
图 39: 电流产生的磁场对自身形成向心的洛伦兹力压强	25
图 40: 经典 Z 箍缩中的香肠不稳定性及扭结不稳定性	25
图 41: Zap Energy 采用剪切流稳定技术延长等离子体的稳定时间	26
图 42: Zap Energy 聚变装置做功过程可分为电离、加速、Z 箍缩、聚变四个阶段	26
图 43: Z 箍缩驱动次临界能源堆实现核燃料增殖、核废料嬗变、电力生产等功能	27
图 44: 天府创新能源研究院、燧人聚能、国光电气等共同出资成立先觉聚能	27
图 45: Z-FFR 主要由 Z 箍缩驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等构成	28
图 46: 在 Z-FFR 中, 驱动器价值量占比约 33%	28
图 47: 在 Z 箍缩装置中, 驱动器价值量占比约 50%	28
图 48: 单个 LTD 模块由若干低电感电容器和开关组成的放电支路并联组成	29
图 49: 次临界能源堆包层由内而外分别为第一壁、燃料区、工程通道、产氦区	29
图 50: FRC 装置没有中心螺线管, 等离子体接近球形	30
图 51: FRC 具有开放磁力线区域和闭合磁力线区域	30
图 52: FRTP 过程可分为预电离、场反转、磁重联、收缩平衡四个阶段	30
图 53: FRTP 电源系统中包含四个支路	31
图 54: 四条支路将依次触发为磁体系统供电	31
图 55: FRC 聚变装置通过 FRTP 形成等离子体并传输至中心区域碰撞融合	31
图 56: TAE 采用中性束注入方案加热和维持融合后的 FRC 等离子体	32
图 57: TAE 公司第 6 代原型 Copernicus 将在 2025 年前后验证净能量产出	32
图 58: Helion 装置单次循环包含等离子体形成、对撞、压缩、能量回收四个阶段	33
图 59: Helion 累计融资额超 10 亿美元, 有望在第七代装置 Polaris 上展示聚变发电	34
图 60: FRC 装置主要由电源、磁体、真空室、控制系统等组成	36
图 61: FRC 装置驱动系统可简化为 LC 电路, 能量在电容和电感之间反复传递	37
图 62: HFRC 装置电源系统采用 IGBT+氢闸流管方案	38

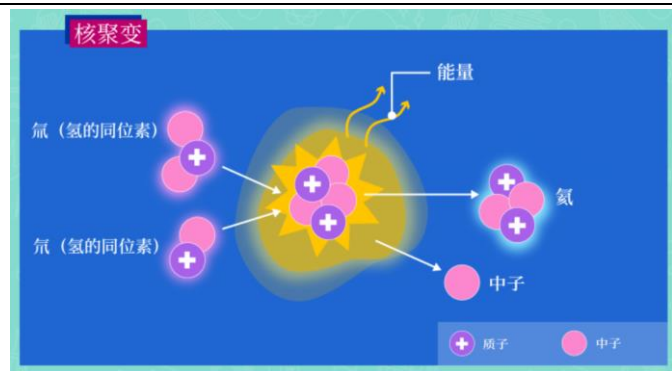
表 1: 实现 D-T 聚变所需的温度较低, 但原料 T 较为稀缺, 且反应会产生较强的中子辐射	6
表 2: 磁约束、惯性约束、磁-惯性混合约束、Z 箍缩等主要技术路线各有优劣	7
表 3: 科技巨头踊跃入局核聚变装置投资, 技术路线选择多元化	12
表 4: 第二代高温超导材料 YBCO 已逐渐成熟, 单价较低温超导材料略高	15
表 5: 我国在运托卡马克装置 8 台, 在建、拟建托卡马克装置 5 台	17
表 6: ITER 装置中磁体线圈需要承载较大的电流, 超导线材总长度 187.4 公里	19
表 7: 固态增殖包层主要采用锂化合物作为增殖剂、铍作为种子倍增剂	21
表 8: 不同频率的射频波使用不同的微波器件产生	22
表 9: 装机容量 1GW 的 Z-FFR 建造成本约 30 亿美元, 低于纯聚变堆	27
表 10: FRC 装置相较于托卡马克装置, 理论上具有建造与运行成本更低等优势	33
表 11: 2022-2025 年间, 瀚海聚能、星能玄光、诺瓦聚变三家公司相继成立, 均采用 FRC 技术路线	35
表 12: FRC 装置中电源系统价值量占比或超过 50%	36
表 13: 气体开关与半导体开关各有优劣	38
表 14: 可控核聚变产业链受益标的梳理	40
表 15: 2021-2024 年受益标的销售毛利率与销售净利率存在差异	41
表 16: 2021-2024 年受益标的资产负债率与 ROE 存在差异	41
表 17: 受益标的盈利预测与估值	42

1、可控核聚变技术路线多元化发展，公共资金和私营资本踊跃入局

1.1、可控核聚变技术路线多样，商业化落地渐行渐近

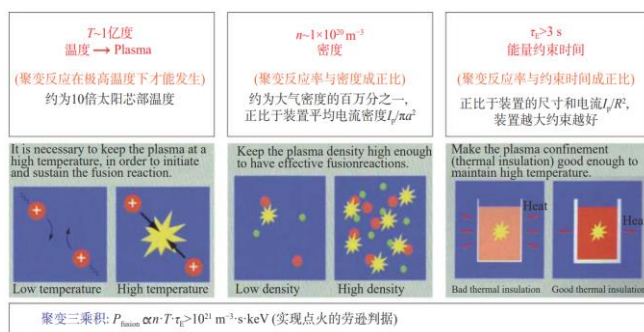
核聚变反应指的是两个较轻的原子核碰撞融合合并形成一个较重的原子核的过程，核聚变反应过程中会损失一部分质量，根据质能方程 $E=\Delta mc^2$ ，反应会释放大能量。实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：足够高的温度、一定的密度和一定的等离子体约束时间。其中，温度是微观粒子动能的宏观表现，1keV 大约对应 1.16×10^7K ，实现聚变反应首先需要将反应物加热至极高温度达到电离状态，使原子核与电子分离，形成等离子体，并且粒子须具备足够的动能以克服库仑势垒发生融合。磁约束聚变装置中氘氘反应要求粒子动能/等离子体温度达到 10keV/ 10^8K 数量级；更高的等离子体密度以增加发生碰撞的可能性；更长的约束时间将具有膨胀倾向的等离子体保持在限定的体积内，为反应发生创造条件。劳逊判据 (Lawson Criterion) 是判断受控核聚变能否实现能量净输出的阈值条件，等离子体温度、密度、约束时间三者的乘积称为聚变三乘积，磁约束聚变装置中，氘-氘聚变要实现功率输出需将三乘积提高到 $10^{21}keV\cdot s\cdot m^{-3}$ 数量级。聚变不排放温室气体，能够提供基荷电力，没有融毁和核扩散的风险，也无需处理大量长寿命放射性废物，是较为理想的能源。

图1：核聚变反应中，轻核碰撞融合生成重核并释放能量



资料来源：IAEA

图2：温度、密度、约束时间三者的乘积称为聚变三乘积



资料来源：王腾《超导磁体技术与磁约束核聚变》

在可控核聚变研究中，常见的聚变反应有氘-氘反应、氘-氚反应、氘-氦3反应、氦-硼11反应四种。

D-T (氘-氚反应)：反应产生一个氦4原子核 (α 粒子) 和一个中子，氘-氚反应在相对较低的温度下就能发生，且释放的能量较高，是目前具备科学可行性的反应，也是目前磁约束聚变堆的主要方向。但反应产生的大部分能量 (约 80%) 由中子携带，中子不带电荷不受磁场约束，反应发生后高能中子会脱离等离子体并直接撞向反应容器内壁，反应容器面临较强的中子辐射，反应自持燃烧难度较大，并且同位素氚是放射性元素，半衰期仅 12 年，在反应堆实现氚增殖之前获取成本较高。

D-D (氘-氘反应)：反应 50% 产生一个氚原子核和一个质子，50% 产生一个氦3原子核和一个中子；氘-氘反应产生的中子携带较少能量，中子辐射问题相较于氘-氚反应有所缓解，且同位素氘的获取相对简单；但对等离子体温度和密度要求较高。

D- ^3He (氘-氦3反应)：反应不产生中子，不存在中子辐射问题；但氦3获取相对困难，且反应点火温度要求较高。

p-¹¹B（氢-硼 11 反应）：反应不直接释放中子，但对温度的要求较高。

表1：实现 D-T 聚变所需的温度较低，但原料 T 较为稀缺，且反应会产生较强的中子辐射

反应	D-T	D-D	D- ³ He	p- ¹¹ B
产量(%)和产物 (MeV)	D+T→ ⁴ He(3.5)+n(14.1)	50%:D+D→T(1.0)+p(3.0); 50%:D+D→ ³ He(0.8)+n(2.45)	D+ ³ He→ ⁴ He(3.6)+p(14.7)	p+ ¹¹ B→3 ⁴ He+8.7
中子	有，14MeV	有，2.45MeV	少	极少
氚增殖	需要	不需要	不需要	不需要
最佳聚变温度	10-30keV	约 50-100keV	约 50-100keV	约 100-300keV
最低三乘积 (keV·m ⁻³ ·s)	2.8e21	1.9e23	5.1e22	6.6e23
反应率(m ⁻³ ·s ⁻¹)	6e-22@25keV	5e-23@100keV	2e-22@100keV	4e-22@300keV
原料	D 丰富，T 稀缺	丰富	D 丰富， ³ He 稀缺	丰富、便宜
直接发电	不可	不可	可	可
单次反应释能	17.6MeV	3.3-4.0MeV	18.3MeV	8.7MeV

资料来源：可控核聚变公众号、核聚变与等离子体物理公众号、开源证券研究所

全球核聚变的主要技术路线包括磁约束、惯性约束、磁-惯性混合约束、Z 箍缩等其他前沿探索；目前实现核聚变的技术路径主要分为以下几类：

磁约束聚变（Magnetic Confinement Fusion, MCF）：利用强磁场束缚高温等离子体，例如托卡马克（Tokamak）和仿星器（Stellarator）。磁约束原理是带电粒子在磁场中运动形成封闭轨道，从而将上亿度的等离子体限制在真空容器中，避免高温等离子体接触容器壁。其优势在于**物理基础成熟、稳态运行潜力大**，但挑战在于装置规模庞大且等离子体不稳定性（如托卡马克中的破裂）需主动控制。

惯性约束聚变（Inertial Confinement Fusion, ICF）：利用强激光或粒子束在瞬间压缩燃料靶丸，依靠燃料自身惯性维持超高密度和温度足够长时间以发生聚变。惯性约束的优点是**物理过程快（脉冲级别），不需要长时间稳定等离子体**。缺点是能量利用效率低（目前激光能量耦合效率仅约 1%，远低于商用所需的 10%~20%），且重复频率和靶丸制造供应环节面临较大的工程挑战。

磁-惯性约束聚变（Magneto-Inertial Fusion, MIF）：结合磁场和惯性双重约束机制，典型如磁化靶聚变和脉冲磁约束等。这类方案在燃料被快速压缩前先施加磁场预先约束或加热，以降低能量损失、提高效率。磁-惯性路径的优势是**装置规模相对较小、对超导磁体或巨型激光依赖较少**，挑战在于需同步掌控磁场施加与快速压缩的协调，以及机械系统的寿命。该方向近年来得到商业关注，多家初创公司以此为**基础探索实用反应堆**。

箍缩聚变（Pinch Fusion）：通过强电流在等离子体内自生磁场实现瞬时压缩，如 Z 箍缩（Z-pinch）方式。在 Z 箍缩中，几百万安培的电流通过等离子体柱，产生环向磁场将等离子体猛然压向轴心。该方法历史悠久，**装置简单且无需大型磁体或激光，理论上装置可以非常紧凑**，但经典 Z 箍缩易出现不稳定使等离子体过早瓦解。

其他新概念：此外还有一些较前沿或特殊的聚变机制，如 μ 子催化聚变、致密等离子体聚焦、静电惯性约束等。这些方法在实验室尺度有所研究，但在能量产出和可控制性方面远不及前述主流路线，目前主要停留在探索阶段。

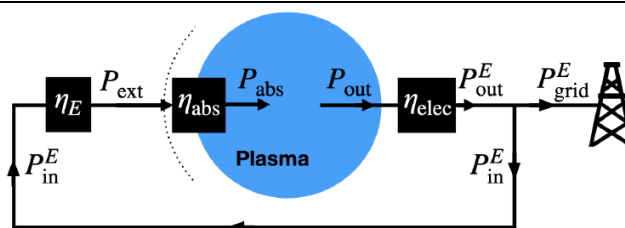
表2：磁约束、惯性约束、磁-惯性混合约束、Z 箍缩等主要技术路线各有优劣

聚变路径	等离子体稳定性	可扩展性与规模	成本预期（LCOE）	商业成熟度
磁约束 (托卡马克/仿星器)	高温性能佳, 但等离子体易出现破裂等不稳定, 需主动控制和耗能电流驱动。仿星器更稳定(无环电流)但等离子体温度较低。	已证明可扩展到大型装置(ITER 体量), 高场磁体可使新一代装置更紧凑。单机功率可达 GW 级, 但建设复杂度高, 周期长。	初期资本开支巨大, ITER 等效每 GW 造价\$200-250 亿。私企高场托卡马克瞄准每 100-500MW 需\$20-50 亿投资, LCOE 约\$50-100/MWh。批量建造后成本有望下降, 与先进裂变和带储能的可再生能源相当。	科研基础成熟, 数十台实验堆运行经验。ITER 施工中, 私营原型机即将运行。多家公司计划 2030 年代并网发电, 技术进入示范验证期。
惯性约束 (激光惯性约束)	每次脉冲为微秒级燃烧, 不存在长期约束稳定性问题, 但要求较高的压缩对称性和等离子体均匀性, 否则燃烧难以充分进行。	理论上可通过增加脉冲频率和并行反应腔提高功率。单机规模可灵活调整(由脉冲频率决定)。但需大量靶丸和高功率激光器同时工作, 工程复杂度随功率线性上升。	激光驱动器效率低和靶丸成本是主要成本源。若激光效率提升 10 倍且靶丸廉价量产, LCOE 可降至 \$80/MWh 以下; 极限情况下成熟技术甚至展望\$25/MWh。但当前 NIF 模式的实际 LCOE 远高于火电核电数十倍, 需重大技术突破。	科学上已验证点火, 但离连续运行商用尚有很长距离。NIF 作为实验装置, 不适合重复运行发电。数家初创正研制更优方案, 时间表在 2030 年代中期实现每秒数次脉冲、验证发电可行。整体技术尚处于物理原理验证向工程样机过渡阶段。
磁-惯性融合(直线型场反位形装置/磁化靶)	先用磁场稳定等离子体再压缩, 等离子体初始稳定性较高, 脉冲压缩阶段在数微秒内完成避免长时间失稳。需解决压缩过程中的对称性和 MHD 不稳定。总体稳定性介于磁约束和惯性约束之间。	单机一般设计为中等规模(百兆瓦级), 可通过增加脉冲频率或并行多个腔体扩展功率。机械压缩(如活塞)频率受限, 每分钟数次至数十次脉冲, 适中可行。模块化建设可逐步扩容。	设备相对紧凑简单, 若证明有效, 资本成本有望低于大型托卡马克。估计初代原型 LCOE 或仍在 \$100/MWh 左右, 随着技术成熟有下降空间。General Fusion 等声称无需昂贵磁体/激光, 可大幅节省成本。实际成本需等演示堆数据验证。	正在快速发展中。General Fusion 等计划 2025 年前后达成科学破零, Helion 计划 2028 年直接商用上网。多数公司瞄准 2030 年左右出示范成果。本路线技术多样, 领军企业的中期成果将决定其商业可行性。目前处于从实验验证向工程原型过渡阶段。
Z-箍缩 (脉冲电流压缩)	自身磁场约束简单直接, 但历史上较不稳定。新技术(剪切流等)有望抑制不稳定性。若成功, 等离子体可稳定维持足够长时间完成聚变燃烧。稳定性仍是此路线成败关键。	装置较为紧凑, 可微缩至实验室规模。规模放大主要靠提高电流和等离子体长度, 工程复杂度低。易于模块化并联多个小装置提升功率。	由于设备简洁, 建造和维护成本潜力低。无需超导和大型激光, LCOE 有望具竞争力。一些分析认为简化装置可显著降低资本成本。但前提是解决等离子体稳定和电极寿命, 否则成本优势无法体现。	小型实验已实现高温等离子体。Zap Energy 等正建设更大装置, 预计本年代末观察是否产生净增益。若成功, 将迈入原型电厂研发。总体技术成熟度较低、上升势头快。
其他创新 (μ 子催化、聚焦等)	各方案情况不同。 μ 子催化无需等离子体稳定, 但受限于 μ 子寿命; 等离子体聚焦装置存在等离子体回旋不稳等问题。	多数方案难以大规模扩展。如 μ 子催化受限于 μ 子源强度; 静电聚变可堆叠模块但单个效率较低。	短期看成本高昂且效率低下。例如 μ 子催化每 J 能量成本远高于其他路线, 暂无经济可行方案。	仍在基础研究或小规模演示阶段, 暂无明确商业时间表。近期未有重大突破报道, 商业前景不明朗。

资料来源：聚变汇公众号、开源证券研究所

聚变反应堆能量增益用因子 Q 表示, 定义为聚变反应产生的能量输出与能量输入之比。聚变反应输出的能量和引发聚变反应输入能量相等是科学意义上的能量“得失相当”条件, $Q_{Sci}=1$ 为聚变反应堆科学可行性的门槛, Q_{Sci} 与聚变反应输入能量吸收效率 η_{abs} 和燃料增益 Q_{fuel} 正相关。但由于能量转化和输入输出过程存在损耗, 输出电能与输入电能相等是工程意义上的能量“得失相当”条件, $Q_{eng}=1$ 为聚变工程可行性的门槛, Q_{eng} 与能量输入输出过程中的电能转换效率 η_E 、 η_{elec} 以及 Q_{Sci} 正相关。

图3: Q_{Eng} 与能量输入输出过程中的电能转换效率 η_E 、 η_{elec} 以及 Q_{Sci} 成正比

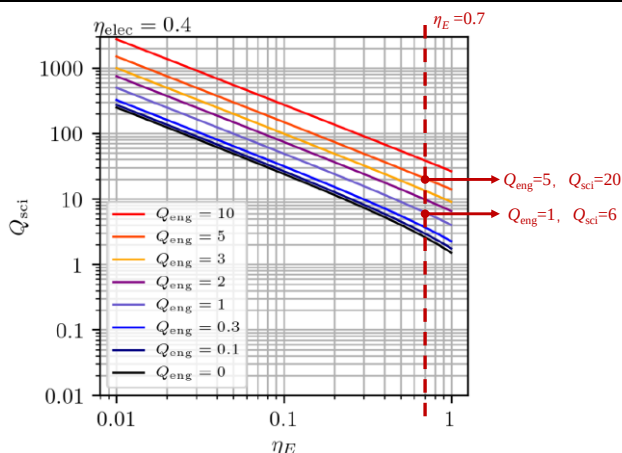


资料来源: Wurzel et al. 《Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion》

磁约束聚变装置需要较长时间将等离子体温度维持在点火温度, 因此通常使用点火温度最低的氘氘聚变反应。磁约束聚变装置 η_E 约为 0.7、 η_{elec} 约为 0.4, 实现电能得失得当 $Q_{\text{eng}}=1$ 需要 $Q_{\text{sci}}=6$ 。由于磁场仅对带电粒子有约束作用, 反应产生的高能中子会将 80% 的能量带离等离子体, 用于产生蒸汽推动汽轮机发电; 而剩余 20% 的能量由 α 粒子携带停留在等离子体中, 继续加热等离子体。因此, 虽然氘-氘聚变点火温度相对较低, 但实现自持燃烧要求的增益因子较高, 理想状态下磁约束氘氘聚变装置 Q_{sci} 达到 5 可实现等离子体自持; 考虑到反应堆的建设和运营成本, 反应堆在 $Q_{\text{sci}}=10$ 时有望达到经济平衡; 在 $Q_{\text{sci}}>30$ 时有望实现商业化发电。

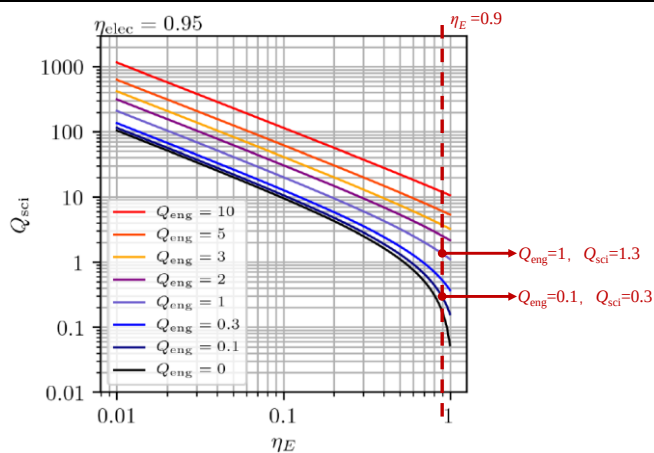
部分直线型场反位形 (FRC) 装置能量输出过程绕过了“烧开水”环节, 回收聚变能的过程与电动汽车动能回收过程类似, 将聚变产生的高能带电粒子携带的动能以电磁感应的方式直接转换为电能; 并且 FRC 装置不需要长时间将等离子体维持在点火温度, 因此通常使用点火温度较高但反应产物中带电粒子更多的氘氘聚变和氘氘 3 反应。理论上, FRC 装置 η_{elec} 更高, 实现 $Q_{\text{eng}}=1$ 所需的 Q_{sci} 更低。

图4: 磁约束聚变装置实现 $Q_{\text{eng}}=1$ 大约需要 $Q_{\text{sci}}=6$



资料来源: Wurzel et al. 《Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion》、开源证券研究所

图5: 更高的装置效率能够在更低的 Q_{sci} 实现 $Q_{\text{eng}}=1$



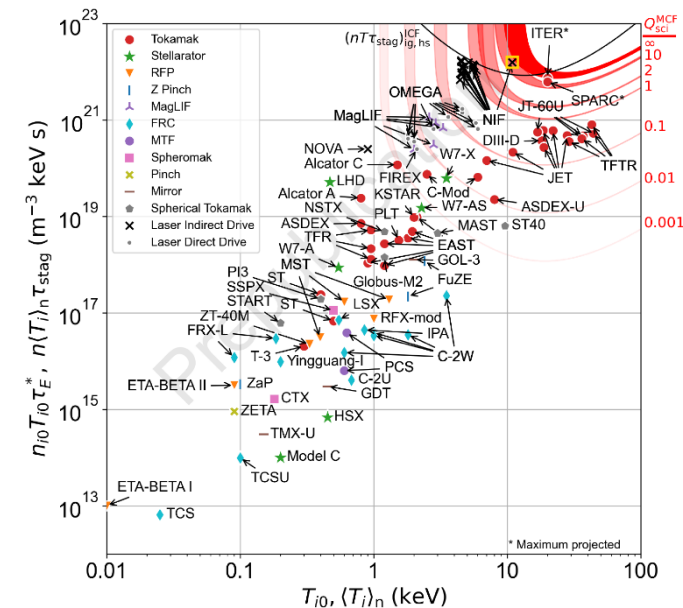
资料来源: Wurzel et al. 《Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion》、开源证券研究所

当前在运的聚变装置中, 较高的 Q 值 (若无特殊说明, 后文中 Q 值均指代 Q_{sci}) 和三乘积记录基本由托卡马克和惯性约束聚变装置实现。左图中的红色轮廓表示在磁约束聚变 (MCF) 实验中达到指定科学能量增益所需的条件, 黑色曲线表示在惯性约束聚变 (ICF) 实验中实现点火和燃烧所需的条件。磁约束聚变装置中, 托卡马

克已基本实现 $Q=1$ ；惯性约束装置中，美国国家点火装置（National Ignition Facility, NIF）在 2025 年第八次点火实验中实现 Q 值 4.13。但 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 Q_{Sci} ，未考虑激光器系统的损耗（激光器需要消耗约 300MJ 电能才能输出 2MJ 耳激光能量， η_E 较低），实际上 Q_{Eng} 远小于 Q_{Sci} 。

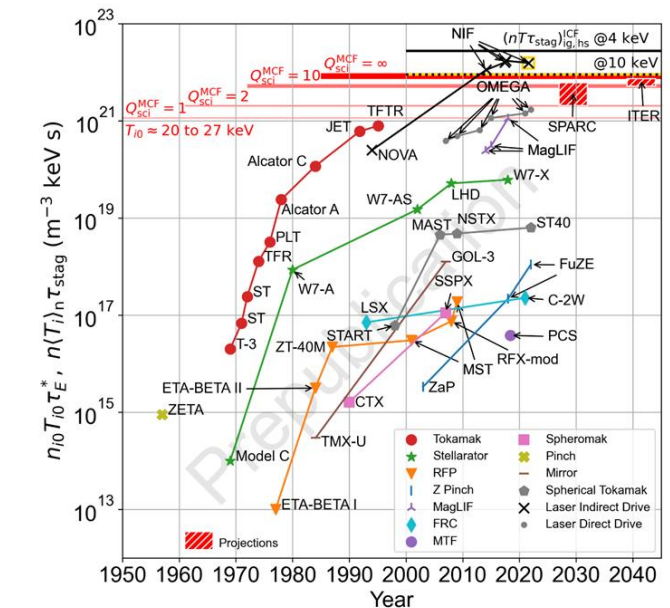
右图中水平线表示在指定离子温度下，实现不同水平的科学能量增益（对于 MCF）或点火和燃烧（对于 ICF）所需的条件。根据规划中的项目时间表，SPARC 装置计划在 2028 年前后实现 $Q=10$ ，ITER 装置计划在 2040 年前后实现 $Q=10$ 。

图6：当前在运的聚变装置中，较高的 Q 值和三乘积记录基本由托卡马克和惯性约束聚变装置实现



资料来源：Wurzel et al. 《Continuing progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criteria》

图7：SPARC 装置和 ITER 装置分别计划在 2028 年、2040 年前后实现 $Q=10$



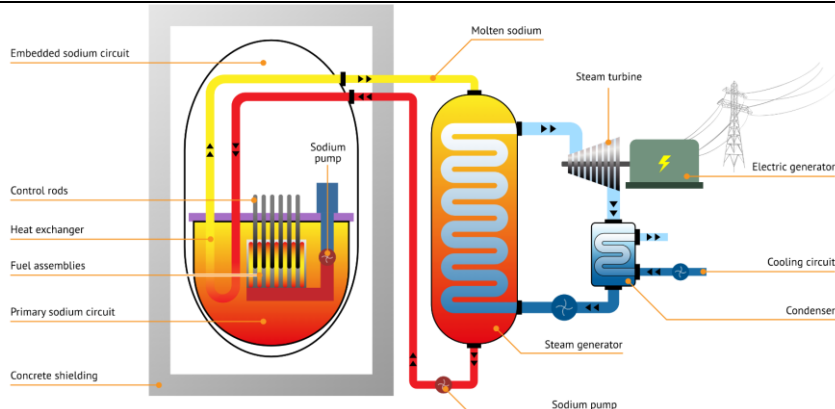
资料来源：Wurzel et al. 《Continuing progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criteria》

利用聚变产生的高能中子可构建聚变-裂变混合堆（Fusion-Fission Hybrid Reactor），实现核裂变燃料的增殖、核废料嬗变、发电、氦自持。聚变-裂变混合堆是一种结合聚变中子源与次临界裂变包层的核能系统，旨在实现核燃料增殖（聚变产生的高能中子轰击铀-238 或钍-232，生产钚-239 或铀-233，供给裂变电站）、核废料嬗变（中子轰击次锕系核素，将其裂变为短寿命同位素，减少放射性危害）、能量生产输出（裂变环节释放的能量可达聚变环节的 20 倍以上）及氦自持等功能。

与四代裂变快堆相比，聚变-裂变混合堆具有可控优势；与聚变堆相比，聚变-裂变混合堆对聚变环节的能量增益要求大幅降低。按照中子能量的不同，可将中子分为三类，快中子（0.5MeV~10MeV）、中能中子（~0.02MeV）和热中子（<0.5keV）。铀-235 对热中子的裂变截面（入射粒子使靶核裂变的概率）更大，铀-238 对快中子的裂变截面更大。裂变热堆大多使用铀-235 为核燃料，使用水、重水等材料作为中子慢化剂，将铀-235 裂变反应产生的快中子慢化为热中子，从而提高裂变反应概率并维持链式反应不失控。裂变快堆使用无中子减速作用的液态钠、铅等作为导热介质，利用铀-235 裂变产生的快中子“点燃”铀-238 或钍-232 进而发生裂变反应，快堆的持续燃烧仍依托链式反应。聚变-裂变混合堆使用氦聚变产生的高能中子（~14MeV）“点燃”铀-238 或钍-232；混合堆不需要达到链式反应条件且聚变反应

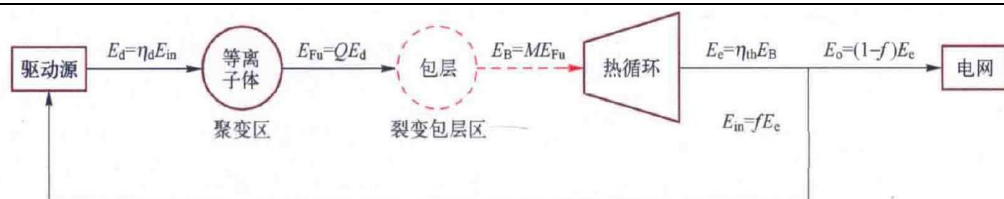
过程依赖稳定可控的外部能量输入，混合堆相较于裂变快堆更加可控；同时，混合堆整体能量倍增系数 $M \geq 10$ 使聚变环节 Q 值仅需达到 1-2 即可实现商业化运行，混合堆对聚变环节的能量增益要求较聚变堆大幅降低。目前国内在建高温超导托卡马克混合堆星火一号项目，拟建 Z 箍缩混合堆先觉聚能 Z-FFR 项目。

图8：四代钠冷快堆使用没有中子减速作用的钠（Sodium）为导热剂



资料来源：Energy Encyclopedia

图9：聚变-裂变混合堆整体能量倍增系数 M 较高，聚变环节 Q 值要求大幅降低

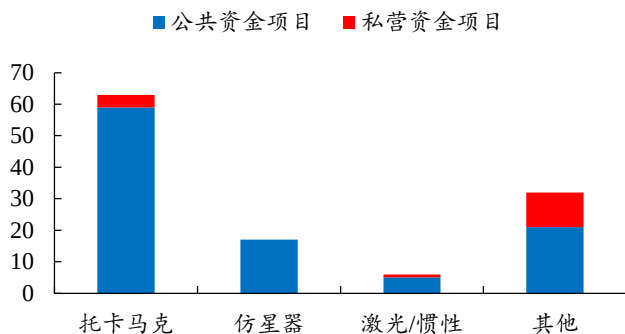


资料来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》

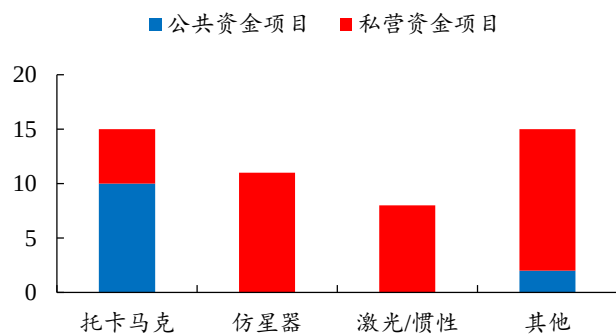
1.2、全球核聚变竞赛已拉开帷幕，私营资本和科技巨头踊跃入局

根据聚变行业协会（FIA）《2024 年全球聚变行业报告》，聚变行业 2021-2024 年已累计吸引了超过 71 亿美元的投资，2024 年新增 9 亿美元投资，其中政府资助增加至 4.26 亿美元、增幅 57%；全球范围内的私营聚变公司也随之增加到 45 家。

全球范围来看，在运/在建的核聚变项目主要由公共资金主导，采取磁约束技术路线；规划中的核聚变项目主要由私营资本主导，技术路线趋于多元化。根据国际原子能机构（IAEA）聚变装置信息（FusDIS）的统计，截至 2025 年 7 月，全球共有 167 个聚变装置，其中 101 个在运，17 个在建，49 个规划中。在运和在建的 118 个装置中，公共资金主导的项目共有 102 个，占比 86.4%；公共资金主导的项目中，采用磁约束技术路线（托卡马克和仿星器）的装置共有 76 个，占比 74.5%。规划的 49 个项目中，私营资本主导的项目共有 37 个，占比 75.5%；私营资本主导的项目中采用磁约束技术路线的装置共有 26 个，占比 53.1%。

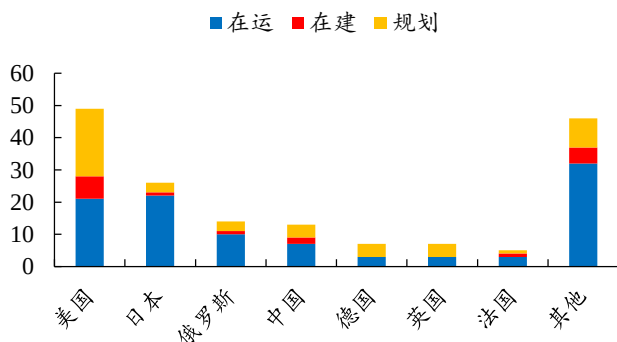
图10：在运/在建的核聚变项目主要由公共资金主导，采取磁约束技术路线（单位：个）


数据来源：IAEA、开源证券研究所（注：数据截至 2025 年 7 月）

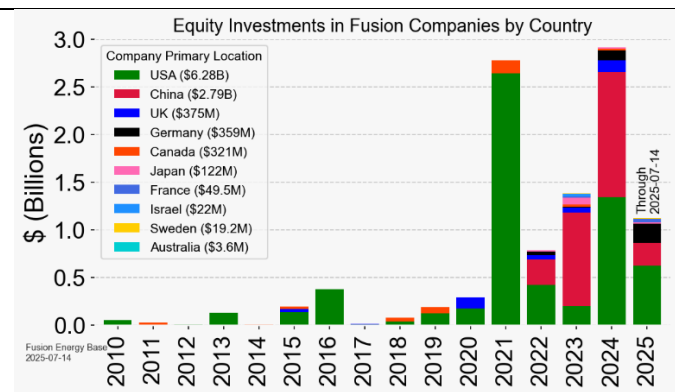
图11：规划中的核聚变项目主要由私营资本主导，技术路线趋于多元化（单位：个）


数据来源：IAEA、开源证券研究所（注：数据截至 2025 年 7 月）

全球核聚变竞赛已拉开帷幕，各国聚变公司权益融资活动频繁。从聚变项目分布来看，全球 167 个聚变装置中，美国、日本、俄罗斯、中国分别拥有 49 个、26 个、14 个、13 个。从各国聚变公司融资情况来看，2021 年起，聚变公司权益融资额迅速提升；美国、中国的聚变公司融资额较高；2022 年起中国的聚变公司融资额逐年提升。2024 年全球聚变公司累计权益融资额近 30 亿美元；2025 年 1-7 月，全球聚变公司权益融资额已超 10 亿美元。

图12：聚变项目主要分布在美国、日本、俄罗斯、中国（单位：个）


数据来源：IAEA、开源证券研究所（注：数据截至 2025 年 7 月）

图13：各国聚变公司权益融资活动频繁


资料来源：Fusion Energy Base

科技巨头踊跃入局核聚变公司投资，技术路线选择多元。美国 Commonwealth Fusion Systems (CFS) 公司总融资额已超过 20 亿美元；2025 年 B2 轮融资已获得超过 10 亿美元的认购，融资完成后预计估值将超过 80 亿美元；投资者包括比尔·盖茨、索罗斯、谷歌母公司 Alphabet 等。2025 年 6 月，CFS 与 Alphabet 签订供电协议，计划在 2030 年代通过 ARC 电站（总发电量 400 兆瓦）向谷歌供应 200 兆瓦电力。美国核聚变初创公司 Helion Energy 总融资额已超过 10 亿美元，估值超过 54 亿美元，投资者包括 OpenAI 创始人 Sam Altman、马斯克等，2023 年与微软签署供电协议，计划在 2028 年向微软供电 50MW。

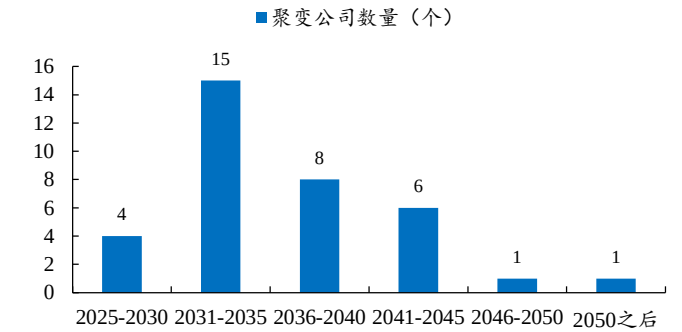
表3：科技巨头踊跃入局核聚变装置投资，技术路线选择多元化

美国科技公司	聚变初创企业	聚变技术路线	投资/融资事项
谷歌/Alphabet	TAE Technologies	磁-惯性约束； 场反位形（FRC）	2021 年 4 月 8 日，TAE 完成 2.8 亿美元融资，谷歌参与； 2022 年 7 月，TAE 完成 2.5 亿美元 G+轮融资，谷歌参与。
	Commonwealth Fusion Systems（CFS）	磁约束；托卡马克	2021 年，CFS 完成 18 亿美元的 B 轮融资，谷歌参与； 2025 年 5 月，B2 轮融资已获得超过 10 亿美元认购。
亚马逊 （贝索斯个人）	General Fusion Inc	磁-惯性约束； 磁化靶（MTF）	2011 年，完成 B 轮融资，贝索斯通过 Bezos Expeditions 参与； 2019 年 12 月，完成 0.65 亿美元 E 轮融资，贝索斯参与； 2021 年 11 月，完成 1.3 亿美元 E 轮追加融资，贝索斯参与。
微软 （比尔·盖茨名下 BEV 公司）	Zap Energy	Z 箍缩	2022 年 6 月，完成 1.6 亿美元 C 轮融资，BEV 公司参与； 2024 年 9 月，完成 1.3 亿美元 D 轮融资，BEV 公司参与。
	Pacific Fusion	磁-惯性约束； 脉冲磁聚变	2024 年 10 月，完成 9 亿美元 A 轮融资，BEV 公司参与。
	Commonwealth Fusion Systems（CFS）	磁约束；托卡马克	2019 年 7 月，完成 1.15 亿美元 A 轮融资，BEV 公司参与； 2021 年 12 月，完成 18 亿美元 B 轮融资，BEV 公司参与。
OpenAI （Sam Altman 个人）	Helion Energy	磁-惯性约束； 场反位形（FRC）	2021 年 11 月，完成 5 亿美元 E 轮融资，Sam Altman 领投； 2025 年 1 月，完成 4.25 亿美金 F 轮融资，Sam Altman 参与。

资料来源：Fusion Energy Base 官网、核聚变与等离子体物理公众号、可控核聚变公众号等、开源证券研究所

2030s 有望密集建成商业化聚变电站，若未来进入批量建设阶段，年投资额有望达数千亿规模。根据聚变行业协会（FIA）的统计，截至 2024 年，有 23 家聚变公司计划在 2031-2040 年间建成首座商业化聚变电站。按照 ITER 的初期测算，电功率为 1GW 的聚变堆，建造成本至少千亿人民币；私营资本高场托卡马克每 100-500MW 目标造价约 150-350 亿人民币。参考裂变堆运行寿命与年利用小时数，假设托卡马克装置运行寿命 40 年，年利用小时数 7500；假设不同情景下，聚变电站年均新增装机随单位造价下降、商业化发电临近而逐渐增加；若单位造价下降至 60 元/瓦，LCOE 将下降至约 0.61 元/千瓦时，有望具备经济竞争力，从而进入批量建设阶段；参考当前国内裂变堆每年 10GW 级的核准建设节奏，未来批量建设情景下，托卡马克装置年投资额或将达数千亿元。

图14：截至 2024 年，全球共 15 家聚变公司计划在 2031-2035 年间建成首座商业化聚变电站



数据来源：FIA 《The global fusion industry in 2024》、开源证券研究所（注：图中数据均来源于 FIA 的报告。）

图15：聚变电站有望具备经济竞争力，未来批量建设阶段年投资额有望达数千亿规模

	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5
托卡马克单位投资（元/瓦）	100.00	90.00	80.00	70.00	60.00
托卡马克LCOE（元/千瓦时）	1.01	0.91	0.81	0.71	0.61
托卡马克年均新增装机容量（GW）	0.20	1.00	2.00	5.00	10.00
托卡马克年均投资额（亿元）	200.00	900.00	1600.00	3500.00	6000.00

资料来源：聚变汇公众号、能源新媒公众号等、开源证券研究所（注：LCOE 计算过程中，假设年运维费率为初始投资额的 2%，折现率 6%，所得税率 15%。）

2、托卡马克：受益于高温超导量产，2030s 有望并网发电

2.1、基本原理：磁场约束下持续发生的聚变反应，类似燃煤锅炉

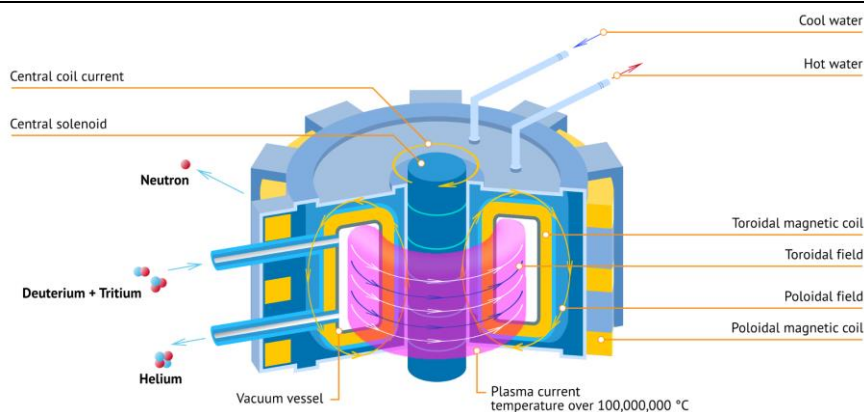
托卡马克装置音译自“Tokamak”，名字源自环形（Toroidal）、真空室（Kamera）、磁（Magnet）、线圈（Kotushka）四个单词的组合，由苏联科学家在 20 世纪 50 年代提出。托卡马克装置利用强大的磁场来约束高温等离子体，使其在有限的空间内达到足够的高温和压力，以达到聚变反应条件。

托卡马克等离子体放电流程可分为零时刻前、零时刻以及零时刻后三个阶段。

在零时刻之前，需向环形真空室注入用于聚变的气体，并将中心螺线管的电流提升至峰值。至零时刻，中心螺线管（Central Solenoid, CS）的电流迅速下降，此过程在环形真空室内形成快速变化的磁通，激发感应电场，将气体燃料电离；由于未完全电离和加热的等离子体具有一定的电阻，电流通过等离子体时，会产生焦耳热效应，导致等离子体温度进一步升高，即粒子动能提升，这一过程为欧姆加热。但一方面，中心螺线管中电流变化产生的磁场与电流变化率（ $\Delta i/\Delta t$ ）正相关，螺线管电流承载能力（ $\pm I_{\max}$ ）有限，无法长时间维持快速变化的磁通，欧姆加热无法持续做功（ $t_{\max}=2I_{\max}/\Delta i \times \Delta t$ ）；另一方面，随着等离子体完全电离和加热，粒子温度/动能达到约 $10^7\text{K}/1\text{keV}$ 数量级时，电阻率迅速下降，欧姆加热效率迅速下降。

零时刻后，为了获得更高的粒子动能达到并维持最低点火温度（氘氚聚变最低点火温度/动能约为 $10^8\text{K}/10\text{keV}$ 数量级），必须采用中性束注入、射频加热、磁重联等额外的加热方法。当等离子体被加热至最低点火温度，并满足点火三乘积条件时，实现聚变点火。氘氚聚变产生一个氦核（ α 粒子）和一个中子，氦核带有电荷，受托卡马克磁场的影响，被限制在等离子体中并持续加热等离子体，后通过特殊磁场结构将低温 α 粒子从偏滤器处排出；氘氚聚变产生的 80% 能量由中子携带，中子不带电荷，不受磁场束缚，高能中子将能量带离等离子体并被托卡马克装置的器壁吸收。中子动能以热量的形式转移到壁上，这些热量将被容器壁内循环的冷却介质捕获，最终用于产生高温高压蒸汽，推动汽轮机发电。

图16：托卡马克装置将聚变反应产生的热量用于产生蒸汽，推动汽轮机发电

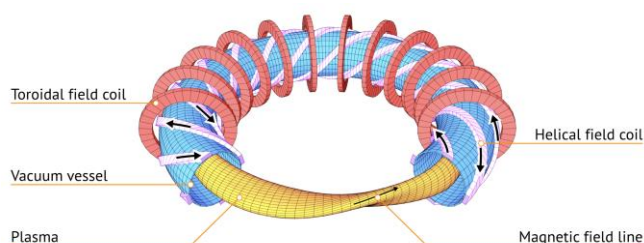
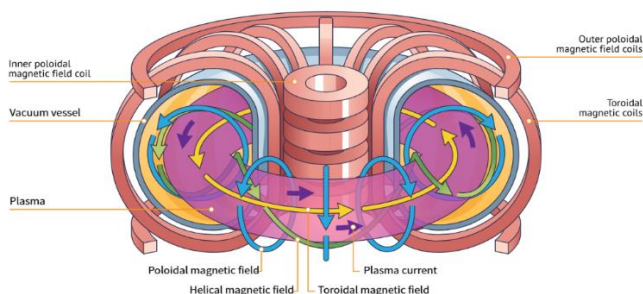


资料来源：Energy Encyclopedia

托卡马克装置依赖等离子体电流产生的磁场形成稳定约束，由于磁场强度与电流大小正相关，生成较大的等离子体电流至关重要。仅在环形磁场中（左图黄色箭头方向），带电粒子会因离心力和磁场非均匀性的影响而发生漂移，导致电子与离子分离，在等离子体产生显著分层，由此产生的空间电场会促使等离子体向外扩张，导致等离子体破裂。等离子体电流会产生一个辅助的周向磁场（左图蓝色箭头方向；电流定义为单位时间通过某一截面的电荷量；带电粒子在托卡马克装置中做圆周运动，形成电流），与外部磁场组合形成环绕等离子体流方向的旋转磁场（左图绿色箭头方向），粒子沿着磁场既环向运动又上下翻转，从而抵消电荷分离，维持等离子体稳定。相比之下，仿星器使用复杂的外部线圈直接产生扭转的环形磁场（类似三通的莫比乌斯带），不依赖于较大的等离子体电流，但仿星器装置磁体复杂，制造精度要求较高，且当前实验装置三乘积水平较低。

图17：托卡马克装置中等离子体电流与外部磁体共同形成旋转的磁场

图18：仿星器磁体结构复杂，制造精度要求较高



资料来源：Energy Encyclopedia

资料来源：Energy Encyclopedia

2.2、核心催化：高温超导材料实现工业量产，装置理论上限大幅提升

根据 IAEA《Fundamentals of Magnetic Fusion Technology》，托卡马克装置功率与环形磁场强度 B_t 的四次方和等离子体截面半径 a 的四次方正相关，与装置主半径 R 的一次方反相关；即理论上，每当装置环形磁场强度等或离子体截面半径提升 1.8 倍，装置理论聚变功率就能够提升约一个数量级。因此，提升托卡马克装置的理论聚变功率，可以通过增加等离子体截面半径 a 来实现，即构建大型装置（ITER）或球形装置（球形托卡马克）；也可通过增大磁场强度 B_t 来实现，即提升环形线圈匝数或线圈中的电流大小。

图19：托卡马克装置功率与磁场强度的四次方和等离子体截面半径的四次方正相关

$$P_{\text{fus}} \sim \frac{R^3 B_t^4}{A^4}, \text{ where } A = \frac{R}{a}$$

资料来源：IAEA《Fundamentals of Magnetic Fusion Technology》

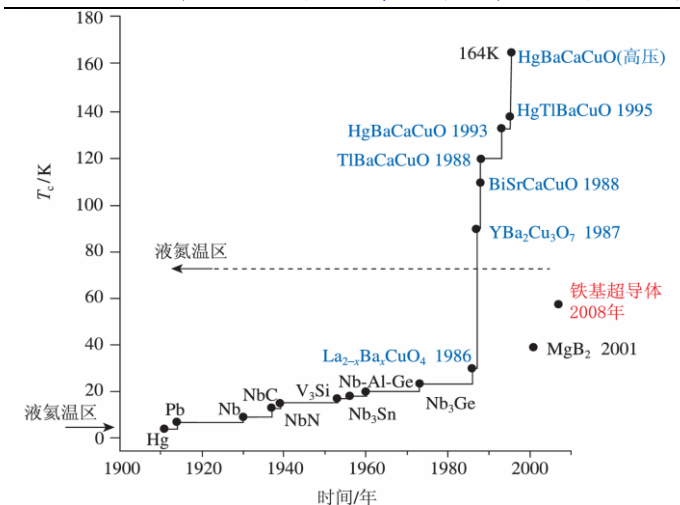
托卡马克装置需要长时间维持强磁场以约束等离子体，磁体线圈需要长时间承载较高的电流，若采用铜线等传统导体会带来较高的热损耗；而超导材料在低温等特定工况下，能够承载更大的电流，产生更强的磁场，同时降低能量损耗。

低温超导材料（LTS）在上世纪中叶被发现，大多是基于金属铌（Nb）的合金，

如铌钛合金 (NbTi) 和铌锡合金 (Nb₃Sn)，超导临界温度通常低于 10K，使用液氮 (4.2K) 冷却，成本较高。并且 NbTi 和 Nb₃Sn 临界磁场较低，分别在 10T 和 20T 磁场强度左右载流能力大幅下降，超导性能迅速降低。由于低温超导材料技术成熟且性能稳定，目前全球部分核聚变项目（如 ITER）仍采用低温超导磁体。

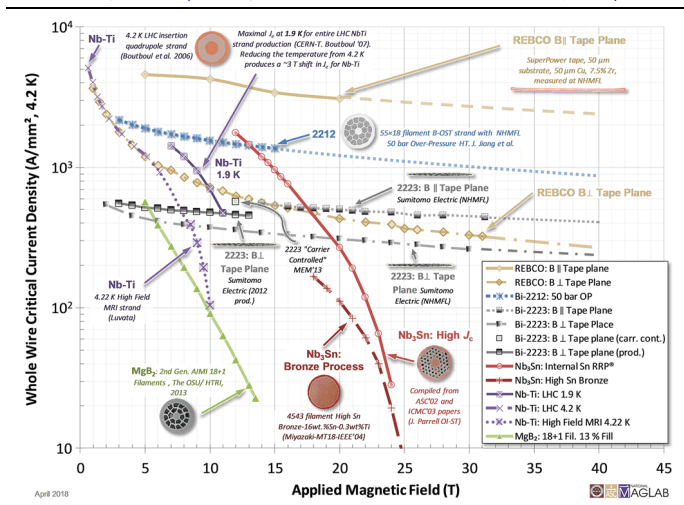
高温超导材料 (HTS) 在上世纪末被发现，主要包括第一代高温超导材料（铋锶钙铜氧 BSCCO）、第二代高温超导材料（稀土钡铜氧 REBCO）、二硼化镁超导材料和铁基超导材料等。二代高温超导具有较高的临界温度（77K 液氮温区）、较高的载流能力、较高的临界场强（40T 下保持较强的载流能力）、较高的力学强度，以及相对廉价的生产原料等优势；但由于高温超导材料发展起步较晚，制备技术较为复杂，规模化生产未能充分显现，使得过去一段时间产品价格较低温超导材料更高。

图20：基于铜氧化物的高温超导材料临界温度高于液氮



资料来源：马衍伟《实用化超导材料研究进展与展望》

图21：高温超导材料在 40T 强磁场下仍能维持超导性能



资料来源：MAGLAB

目前低温超导带材价格较为低廉，但需要在昂贵的液氮环境下工作，应用于核磁共振成像、粒子加速器、核聚变等，商业化程度高。高温超导载流能力强，可以在普通的液氮环境中工作，第一代 BSCCO 部分原材料为银，成本难以下降，第二代 YBCO 带材价格下降、产品良率提升，推动高温超导技术产业化应用加速，新型铁基超导材料的发现也为行业带来了新的发展方向。

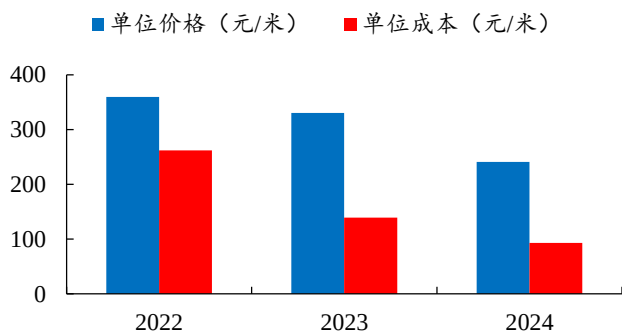
表4：第二代高温超导材料 YBCO 已逐渐成熟，单价较低温超导材料略高

	低温超导		高温超导		
	NbTi	Nb ₃ Sn	BSCCO	YBCO	铁基超导
生产工艺	挤压拉伸	青铜法 内锡法	粉末装管法 (PTT)	脉冲激光沉积 (PLD) 气相沉积法 (CVD)	粉末装管法 (PTT)
特点	优点：批量加工； 缺点：使用成本高。		达到商业化水平， 已被 Y 系替代	优点：使用成本低，应用范围广； 缺点：加工难度大，材料质地较脆，规模化应用推进速度慢。	
商业化程度	成熟	成熟		逐渐成熟	技术研发阶段
价格	5 元/米	50 元/米	200 元/米	100-150 元/米	-

资料来源：赛迪顾问公众号、开源证券研究所

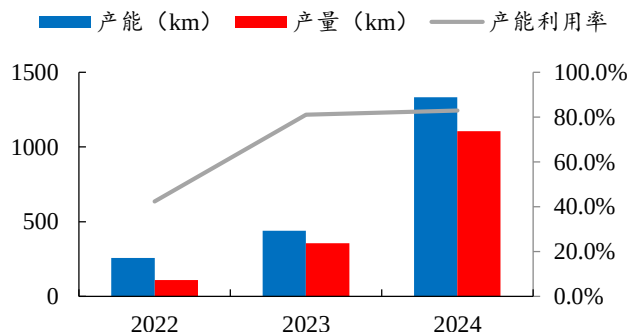
高温超导材料企业规模效应开始显现，成本快速下降，产能持续扩张。根据上海超导招股书，2022-2024 年，公司二代高温超导带材单位价格由 360 元/米下降至 241 元/米，降幅 33.0%；单位成本由 262 元/米下降至 93 元/米，降幅 64.5%；公司二代高温超导带材产能由 257km 扩张至 1334km，增幅 419.6%。公司拟投资 12 亿元用于产能扩建，项目完全达产后预计每年可新增 6000km 二代高温超导带材产能。新一代聚变公司，如 CFS、Tokamak Energy、星环聚能、能量奇点等均选择高温超导材料，以实现紧凑设计、提升装置性能并降低冷却成本。

图22：上海超导二代高温超导带材单位成本快速下降



数据来源：上海超导招股说明书、开源证券研究所

图23：上海超导二代高温超导带材产能迅速提升



数据来源：上海超导招股说明书、开源证券研究所

2.3、工程进度：国内外重点项目建设有序推进，2030s 有望并网发电

ITER 国际热核实验堆：全球最大的托卡马克实验，由 35 国合作在法国兴建。ITER 设计等离子体功率 500 兆瓦、放大系数 $Q \geq 10$ ，但它是科研装置，不发电。ITER 土建安装已完成大半，但因技术难题进度延误，首次等离子体放电已推迟至 2030 年代中期。预计 2035 年前后 ITER 将开展氘-氚燃料实验，验证聚变点火与持续燃烧。

美国 SPARC/ARC 原型堆：美国麻省理工与私企 Commonwealth Fusion Systems (CFS) 合作开发的高场托卡马克路线。SPARC 为示范装置，采用 REBCO 高温超导磁体产生 20T 以上强磁场，体积远小于 ITER。CFS 已在 2021 年验证了全尺寸高场磁体。按照计划，SPARC 计划于 2025-2026 年实现首次放电并很快实现净能量产出 ($Q > 1$)；随后 CFS 将建设首座商业原型电站 ARC，计划 2020 年代后期动工，2030 年代初并网发电约 400MW。

英国 STEP 计划：英国原子能管理局 (UKAEA) 正推进 Spherical Tokamak for Energy Production (STEP) 原型堆计划，目标 2040 年前后建成一座球形托卡马克示范电厂，实现净电输出并验证商用可行性。英国私企 Tokamak Energy 在该方向上进展显著，其 ST40 装置在 2022 年实现了 1 亿度等离子体温度。Tokamak Energy 正建造新一代高场球形托卡马克 ST80-HTS (2026 年建成) 以验证长脉冲高功率输出，并计划 2030 年代早期建成 ST-E1 聚变电厂，净发电功率目标达 200MW。

中国 CFETR 计划：中国在 EAST 超导托卡马克取得长脉冲高参数记录的基础上，计划建设 ITER 与商业堆之间的桥梁。紧凑型聚变实验装置 (BEST) 计划在 2027 年底投运，工程目标成为全球首个实现聚变能量净增益 ($Q > 1$) 的紧凑型装置；中国聚变工程试验堆 (CFETR) 有望在 2030s 建成；建成后第一阶段目标实现 200MW 聚变功率与氘自给 (增殖比 > 1)；第二阶段目标将聚变功率提高到 1GW 以上。

图24：根据我国聚变能发展路线图，预计在 2030s 实现工程验证和示范验证



资料来源：王腾《超导磁体技术与磁约束核聚变》

表5：我国在运托卡马克装置 8 台，在建、拟建托卡马克装置 5 台

建设单位	装置名称	装置类型	项目重要时间点	装置状态	装置地址
中国核工业西南物理研究院（西物院）	HL-2A （中国环流二号 A 装置）	托卡马克	国内首台偏滤器位形装置，2002 年底完工；2009 年实现国内首次 H 模放电。	运行中	成都市
	HL-3 （中国环流三号）	托卡马克	2020 年建成并实现首次等离子体放电；2025 年 3 月底，国内首次实现双亿度。	运行中	成都市
联创超导（联创光电子公司）与中核聚变	星火一号	高温超导托卡马克混合堆	计划 2027 年建成，2030 年目标实现连续发电功率 100MW。	建设中	南昌市
中国聚变能源有限公司（中核集团）	未披露	托卡马克	2025 年 7 月在上海挂牌成立，获增资 115 亿元，增资后注册资本累计达 150 亿元。	未披露	未披露
中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所（等离子所）	EAST（东方超环）	托卡马克（全低温超导）	首个全超导托卡马克；2006 年建成；实现在电子温度 1 亿度高约束模 1066 秒运行。	运行中	合肥市
	CRAFT（聚变堆主机关键系统综合研究设施）	托卡马克（全低温超导）	2018 年 12 月，获批开工建设；预计 2025 年底全面建成。	建设中	合肥市
聚变新能（等离子所唯一成果转化平台）	BEST （紧凑型聚变能实验装置）	托卡马克（高温+低温）	2025 年 5 月启动总装；计划 2027 年建成；目标实现聚变能量净增益（Q>1）。	建设中	合肥市
中科院合肥物质科学研究院和中科大	CFEDR （中国聚变工程示范堆）	托卡马克（全低温超导）	有望在 2020 年代开工，2030 年代建成；一阶段目标 200MW 聚变功率和氦自给。	建设中	合肥市
星环聚能（联合清华大学建设）	SUNIST-2（中国联合球形托卡马克 2 号）	球形托卡马克（全高温超导）	2023 年 7 月建成并首次放电。	运行中	西安市
华中科技大学聚变与等离子体研究所	J-TEXT （前身 TEXT-U）	托卡马克	2003 年在国内恢复重建；2007 年 9 月实现第一次等离子体放电。	运行中	武汉市
南昌大学牵头、等离子所参与建设	NCST 球形托卡马克	球形托卡马克	2018 年启动建设；2020 年建成启用；2021 年 1 月投入运行并实现首次放电。	运行中	南昌市
新奥科技	玄龙-50U	球形托卡马克	2023 年，基于“玄龙-50”升级改造；2025 年 4 月实现 MA 级氢硼等离子体放电。	运行中	廊坊市
能量奇点	洪荒 70	托卡马克（全高温超导）	2023 年 8 月启动总装；2024 年 6 月实现等离子体放电，装置国产化率超过 96%。	运行中	上海市

资料来源：各公司/机构官方公众号、聚变汇公众号、可控核聚变公众号等、开源证券研究所（注：统计截至时间为 2025 年 6 月）

2.4、主要部件：托卡马克装置总投资额较高，零部件价值量较分散

按照 ITER 的初期测算,电功率为 1GW 的聚变堆,建造成本至少为 150 亿美元;托卡马克装置的主要组成部分包含磁体、堆内构件、加热和电流驱动系统等。

磁体系统 (Magnets): 磁体系统由环向场线圈、极向场线圈、校正线圈以及中心螺线管组成, ITER 项目中成本占比约 28% (ITER 采用全低温超导, 若采用高温超导材料, 磁体系统成本占比将有所提升)。

真空室 (Vacuum Vessel): 真空室创造高真空环境, 避免等离子体与其他物质接触, 减少热损失并保持超高温状态; ITER 项目中成本占比约 8%。

第一壁 (First Wall Panel) 和包层模块 (Blankets): 位于真空室内侧, 主要作用是隔热和辐射屏蔽, 保护外部结构和设备免受炽热等离子体辐射的伤害; 包层中的增殖模块用于实现氚的增殖。

偏滤器 (Divertor): 位于托卡马克装置的底部, 负责从等离子体中排除氦灰和其他杂质; ITER 项目中包层、偏滤器等堆内构件成本占比合计约 17%。

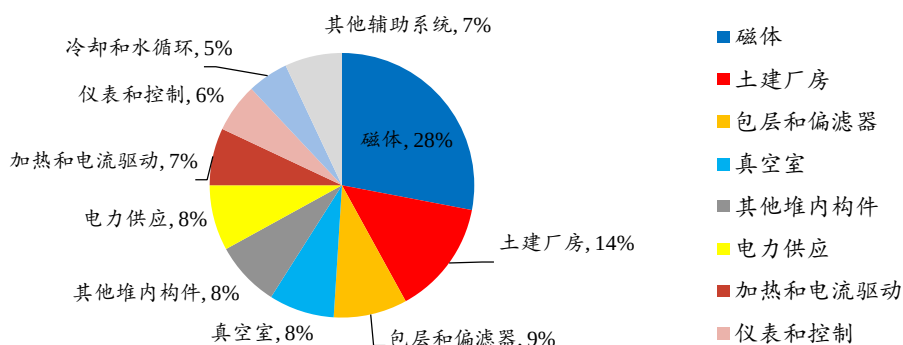
加热和电源系统: 欧姆加热上限温度/动能为 $10^7\text{K}/1\text{keV}$ 数量级; 为了获得更高的粒子动能达到并维持最低点火温度 (氘氚聚变最低点火温度/动能为 $10^8\text{K}/10\text{keV}$ 数量级), 必须采用中性束注入、射频加热等额外的加热方法。在 ITER 项目中, 电力供应系统 (含变压器等) 成本占比约 8%, 加热和电流驱动系统成本占比约 7%。

图25：托卡马克装置的主要组成部分包含真空室、磁体、包层、偏滤器、杜瓦等



资料来源：Energy Encyclopedia

图26：ITER 项目中磁体和堆内构件成本占比较高



资料来源：Mitchell et al.《Superconductors for fusion: a roadmap》、ITER《Final Report of the ITER EDA (2001)》、开源证券研究所

2.4.1、磁体系统：托卡马克装置核心，实现等离子体初步加热和约束

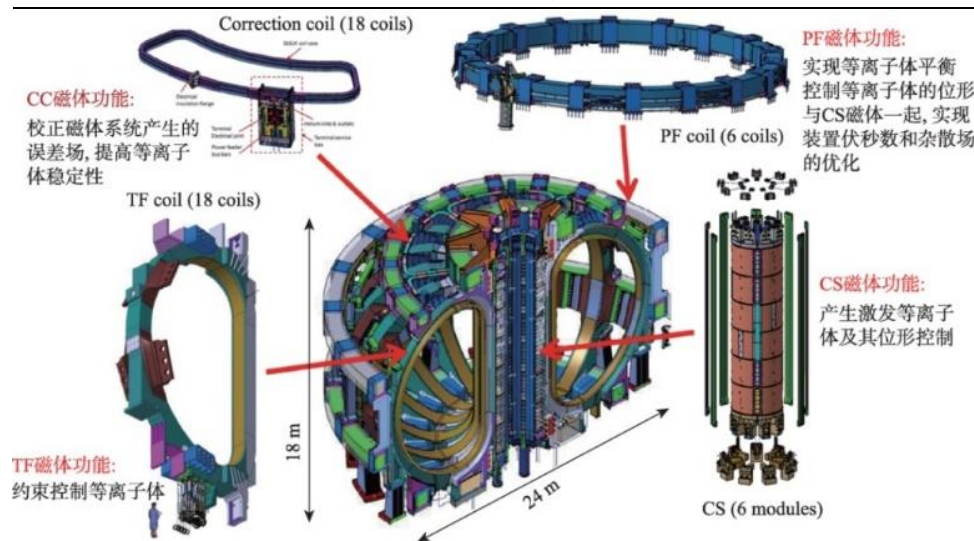
ITER（国际热核聚变实验反应堆）磁体系统由四个主要子系统组成，包括 18 个环向场线圈（Toroidal Field Coil, TFC）；6 个极向场线圈（Poloidal Field coil, PFC）；18 个校正线圈（Correction coil, CC）以及中心螺线管（Central Solenoid, CS），磁体系统所需的超导线材总长度 187.4km，总重量近万吨。等离子体电流会产生周向磁场，与外部磁场组合形成环绕等离子体流方向的旋转磁场；带电粒子在磁场约束下沿磁感线运动。校正线圈实时响应，维持等离子体稳定运行。

环向磁体产生环向磁场（左图黄色箭头方向），约束等离子体流在有限的截面半径范围内运动，最大磁场 11.8T，总电流 164MA，线材长度 82.2km。

极向磁体产生垂直于地面的磁场，约束等离子体环在有限的主半径范围内运动，最大磁场 6.0T，总电流 58.2MA，线材长度 61.4km。

中心螺线管利用变压器原理，通过变化的电流、生成变化的磁场和感应电场，电离并加热等离子体，最大磁场 13.0T，总电流 147MA，线材长度 35.6km。欧姆加热能够使粒子温度/动能达到 $10^7\text{K}/1\text{keV}$ 数量级，是托卡马克装置中重要的加热手段。

图27：ITER 磁体系统由环向场、极向场、中心螺线管、校正四类线圈组成



资料来源：秦经刚等《超导磁体在磁约束托卡马克中的应用与展望》

表6：ITER 装置中磁体线圈需要承载较大的电流，超导线材总长度 187.4 公里

磁体	磁能 (GJ)	最大磁场 (T)	总电流 (MA)	线材及长度 (km)	线圈总重量/ 单个重量 (t)
环向线圈 (TFC)	41.0	11.8	164.0	82.2 (Nb ₃ Sn)	6540/396
中心线圈 (CS)	6.4	13.0	147.0	35.6 (Nb ₃ Sn)	974/118
极向线圈 (PFC)	4.0	6.0	58.2	61.4 (NbTi)	2163/224
校正线圈 (CC)	/	4.2	3.6	8.2 (NbTi)	85/5

资料来源：IAEA《Fundamentals of Magnetic Fusion Technology》、开源证券研究所

2.4.2、真空室与堆内构件：提供和维护聚变反应环境，并实现燃料增殖

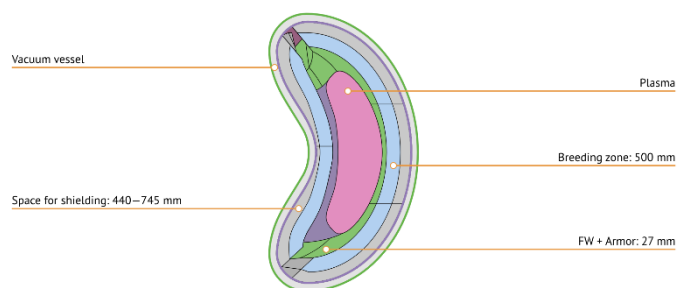
核聚变反应中的等离子体必须被约束在真空容器真空室（Vacuum Vessel）中；真空室向内分别为中子屏蔽层、燃料增殖层、第一壁。真空室维持反应容器内部高真空度，隔绝大气组分干扰，为氦氘聚变反应创造洁净的环境，并提供结构支撑。

第一层壁板（First wall panel）直面聚变等离子体，需要承受较强的中子流（以及氦离子、氢离子等）和热流（中子碰撞反应堆壁，把自身携带的动能转化为热）的考验，并把热量导出用于发电，要求具有较强的耐热性、高热导率、耐辐射能力和一定的强度，还要避免发生溅射对等离子体造成干扰。

偏滤器（Divertor）位于聚变装置真空容器的底部，负责排出氦灰和其他反应杂质。为保持等离子体洁净，托卡马克装置通过特殊的磁场结构，将等离子体中的杂质驱赶到真空容器底部，并通过真空泵排出氦灰等杂质和少量氦，通过氦工厂筛选过滤得到洁净的氦后重新作为燃料注入反应容器。

ITER 第一壁与偏滤器主材为钨。第一壁与偏滤器表面热流密度达 MW/m^2 量级，中心区中子通量达 $10^{18}\text{n}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ 量级，高能中子会导致材料迁移和损伤。**钨因熔点高（ 3410°C ）且溅射阈值高，被选为偏滤器和第一壁装甲的主要材料；**第一壁和偏滤器的表面材料需定期更换，紧凑型聚变装置第一壁中子辐照损伤会显著增加，更换周期相应缩短。结构件一般采用低放射性铁素体/马氏体钢，在数年运行后出现氦脆和膨胀，同样需要定期更换。创新方案例如液态金属锂壁（在壁面流动一层锂液吸收热量和中子）可动态自修复、并提高等离子体性能（锂可吸附杂质），已在实验装置上测试。材料供应链方面，大规模聚变部署将需要大量特种钢锭、钨材和锂资源。

图28：真空室内依次为屏蔽层、增殖层、第一壁



资料来源：Energy Encyclopedia

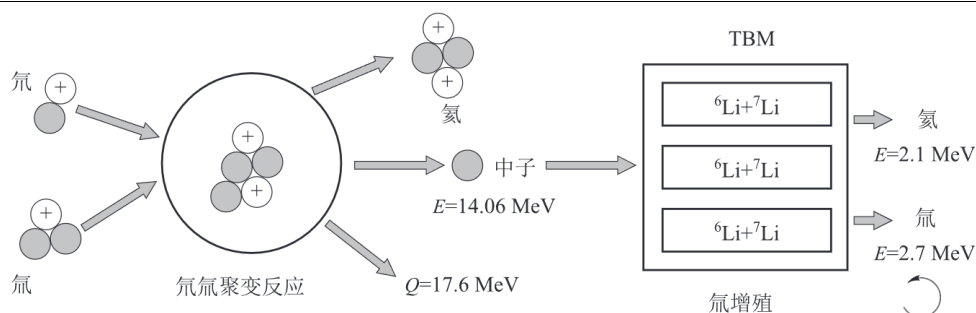
图29：偏滤器位于真空室底部，负责排出氦灰和杂质



资料来源：ITER 官网

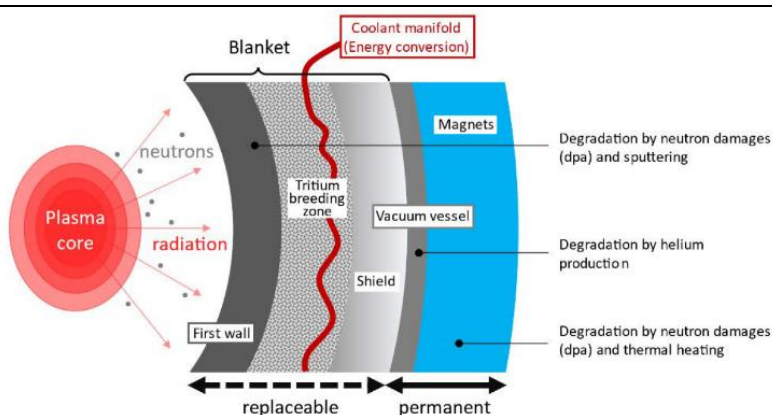
氦是聚变反应优选燃料之一，但自然界稀少，必须在聚变堆内实现氦增殖。目前氦主要从重水堆副产获得，全球年产量不足 5kg、商用氦库存不足 40kg；而在功率为 1GW 的聚变反应堆中，氦的消耗量约为 152g/d、55.5kg/a，仅依赖现有来源远远不够。必须在聚变堆内实现氦增殖，即利用聚变放出的高能中子与锂-6 反应，生产新的氦。为此，聚变堆需要在真空室内侧配备增殖包层（Breeding Blanket），填充锂化合物并伴以中子倍增剂（如铅 Pb 或铍 Be），以确保产氦率>消耗率。铍（Be）是中子倍增剂的主流选择，但资源比较稀缺，加工成小球后价格高达 10 万元/kg；中国聚变工程实验堆（CFETR）设计方案中的铍球用量>300t。

图30：D-T 聚变反应及氦增殖过程



资料来源：黄学龙等《基于蒙特卡罗方法的固态氦增殖剂聚变中子辐照损伤行为分析》

图31：聚变反应生成的中子在增殖层实现中子倍增和燃料增殖



资料来源：IAEA《Fundamentals of Magnetic Fusion Technology》

表7：固态增殖包层主要采用锂化合物作为增殖剂、铍作为种子倍增剂

国家	设计	增殖剂	${}^6\text{Li}$ 丰度	形状	冷却剂	中子倍增剂	结构材料	表面热负载 (MW/m ²)	中子壁负载 (MW/m ²)
欧盟	He 冷球床包层	Li_4SiO_4	30%	小球	He	Be 小球	RAFM	0.5	2.4
日本	水冷陶瓷包层	Li_2TiO_3	90%	小球	H_2O	Be 小球	RAFM	1.0	3.2
中国	He 冷固态包层	Li_4SiO_4	60%	小球	He	Be 小球	RAFM	0.5~0.8	2.64

资料来源：赵林杰等《固态氦增殖剂研究进展》、开源证券研究所

2.4.3、加热和电源系统：托卡马克装置的“心脏”，能量输入的核心环节

由于欧姆加热仅能够使粒子温度/动能达到 $10^7\text{K}/1\text{keV}$ 数量级，为了获得更高的粒子动能达到并维持最低点火温度（氘氚聚变最低点火温度/动能为 $10^8\text{K}/10\text{keV}$ 数量级），必须采用射频波（Radio Frequency, RF）和中性束（Neutral Beam Injection, NBI）等额外的加热方法。合适的波频率和极化方向会产生波-粒子间的相互作用，当相互作用过程在粒子速度分布上正负对称时产生等离子体加热效应，非对称时则兼具电流驱动效应。射频加热主要包括离子回旋共振加热（ICRH）、电子回旋共振加热（ECRH）和低杂波加热（LHRF）。

电子回旋共振加热（ECRH）以 170GHz 的频率（电子的共振频率）的电磁辐射

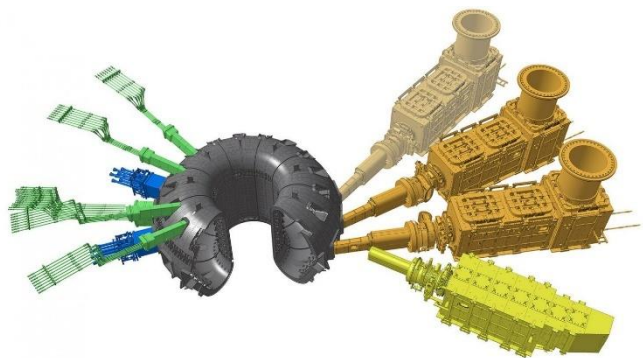
束加热等离子体中的电子；电子又通过碰撞将吸收的能量传递给离子。在 ITER 中，ECRH 系统在运行初始阶段为等离子体提供 40MW 的加热功率，在运行后期阶段提供 67MW 的加热功率；ECRH 系统由 80 个 1MW 回旋管（Gyrotrons）组成。

离子回旋共振加热（ICRH）以 40~55MHz 的频率（离子的共振频率）的电磁辐射束将能量传递给等离子体中的离子。在 ITER 中，ICRH 将通过等离子体加热天线的两个射频源向等离子体提供 10~20MW 的加热功率。

低杂波加热（LHRF）的工作频率和微波炉接近，利用相控天线在边缘激发一支向等离子体内部传播的准静电波，电场方向与磁场方向近似平行，当粒子平行于波场的热速度与波相速度接近时，波就会在平行方向将能量和动量传递给共振电子（即朗道阻尼），驱动等离子体电流。

中性束注入加热（NBI）将高能离子束通过电荷交换中和成高能中性束，使得高能粒子能够穿越托卡马克的磁笼进入等离子体中。ITER 将配备两个中性束喷射器，每个喷射器发射 16.5MW 的氘束，粒子能量为 1MeV，喷射器能够连续运行 3600 秒。

图32：ITER 采用射频波和中性束加热



资料来源：ITER 官网

图33：ITER 射频波和中性束加热装置分布



资料来源：ITER 官网

表8：不同频率的射频波使用不同的微波器件产生

RF 加热方式	工作频率	微波源	主要加热机制
离子回旋共振加热（ICRH）	0-100MHz	电子管	离子回旋阻尼
电子回旋共振加热（ECRH）	28-170GHz	回旋管	电子回旋阻尼
低杂波加热（LHRF）	1-10GHz	调速管	电子朗道阻尼

资料来源：颜宁等《托卡马克高约束稳态物理的探路者--东方超环》、开源证券研究所

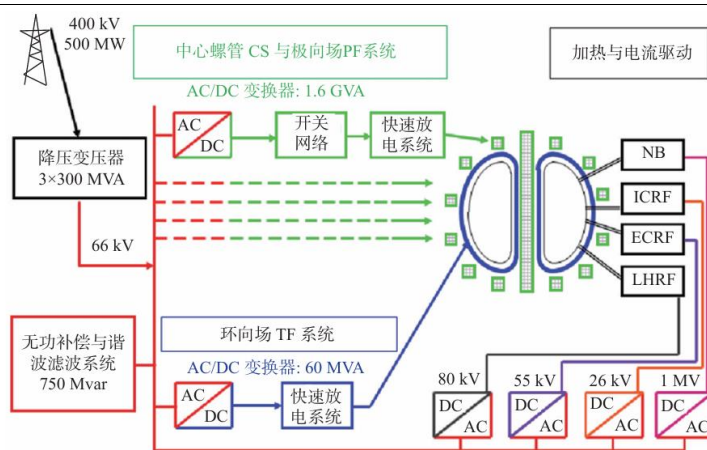
ITER 电力供应和电流驱动系统由稳态高压变电站（SSEN）、脉冲高压变电站（PPEN）、磁体电源（CPS）和辅助加热电源系统（HPS）组成。

SSEN 主要供给 ITER 装置相关分系统，包括低温系统、水冷系统、氦工厂、数控系统等，总功率约为 180MW，其中包含 750Mvar/66kV 无功补偿系统。

PPEN 主要供给磁体电源、微波电源和中性粒子电源等系统，带有 44 套电源系统，单套电源最大功率 80MVA，总电源变流器装机容量为 4600MVA。

辅助加热电源系统包括 1000kV 中性束注入（NB）电源、26kV 离子回旋（ICRF）电源、55kV 电子回旋（ECRF）电源、80kV 低杂波加热（LHCD）电源。

图34: ITER 电源系统主要包含磁体电源、辅助加热电源和无功补偿和滤波系统



资料来源：胡星光等《ITER 聚变装置及其电源系统》

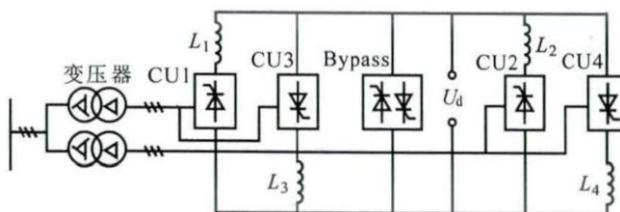
磁体电源系统通过控制数十个不同的超导线圈中的电流，实现对等离子体电流的产生、位置和形状的精准控制。在实际运行时，由于等离子体运行的不稳定性和变化，超导磁体电源产生的电流波形也是实时变化和振荡的。超导磁体电源需要实时输出任意的电流波形实施对等离子体位置和形状等的反馈控制，电压响应时间小于 2ms；同时要考虑各超导线圈之间的耦合效应。ITER 磁体电源主要由变流器单元、快速放电单元和开关网络单元组成。

变流器单元用于实现交直流转换并输出任意的电流波形。每个超导线圈回路由多个变流器单元串联而成；每个变流器单元由 4 个晶闸管桥和一个旁通桥组成；每个变流器桥由大功率晶闸管并联组成。

开关网络单元（SNU）用于切断直流电流。直流电流没有过零点，并且回路中的直流电感储存巨大的能量，开断时会形成很高的过电压；ITER 聚变装置中主要采用机械开关、晶闸管并联技术、人工过零点技术等联合实现大感性直流电流开断。

ITER 装置运行时超导磁体系统总储能达 51.4GJ；快速放电单元（FDU）的功能是在系统故障时迅速将超导线圈中储存能量转移出来，以保护超导磁体和聚变装置主机的安全。FDU 同样利用人工过零技术断开直流电流，原理和 SNU 相似。

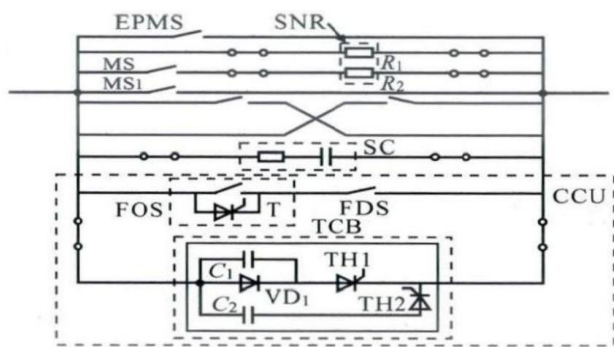
图35: 每个变流器单元由 4 个晶闸管桥和一个旁通桥组成



CU, Bypass 为晶闸管变流器桥、旁通桥； $L_1 \sim L_4$ 为环流电抗器。

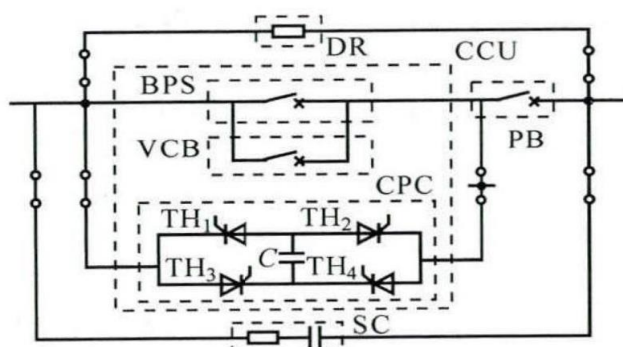
资料来源：付鹏《国际聚变堆 ITER 装置电源系统综述》

图36：开关网络单元主要由机械开关和晶闸管组成



资料来源：付鹏《国际聚变堆 ITER 装置电源系统综述》

图37：快速放电单元主要由真空开关和晶闸管组成



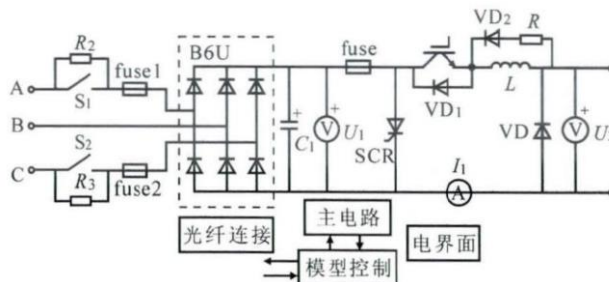
资料来源：付鹏《国际聚变堆 ITER 装置电源系统综述》

ITER 辅助加热电源主要使用脉冲跨周期调制（PSM）技术。

在 ITER 所有辅助加热电源中，中性束注入系统(NBI)高压电源技术难度最高。NBI 系统使用 1000kV 高压电源提供电场，加速注入的粒子。NBI 高压电源连接 66kV 电网，先经过降压、整流，转换成 2.5kV/30kA 直流；再由 GTO（门极可关断晶闸管，晶闸管的衍生器件，全控型器件）逆变器转换成 1kHz/2kV 交流电压；最后经过中频升压变压器和二极管整流回路输出直流电压。其 GTO 逆变器和中频升压整流电路有 5 个模块，每个模块输出 200kV/59A 电压，串联后输出 1000kV 电压。

辅助加热电源同理，变压器低压侧绕组连接各 PSM 模块，输出较低的直流电压，PSM 模块再串联输出所需的更高的直流电压；电源电压的大小控制主要依靠 PSM 模块投入和切出，因此电源电压最小精度就为一个 PSM 模块的值。射频波电源的 PSM 模块主要由二极管桥、IGBT（绝缘栅双极型晶体管，全控型器件）斩波器、撬棒电路 SCR（大功率过压保护电路）、缓冲电路 L 和 PSM 控制及保护器组成。在微波发射装置打火故障，要求高压电源迅速实施保护，所有 PSM 模块 IGBT 关断而切断高压，时间小于 5us，缓冲器用于吸收电源系统对地电容的储能。

图38：PSM 模块主要由二极管桥、IGBT 斩波器、撬棒电路 SCR 等装置组成



资料来源：付鹏《国际聚变堆 ITER 装置电源系统综述》

3、Z 箍缩：先觉聚能成立，Z 箍缩混合堆有望加速落地

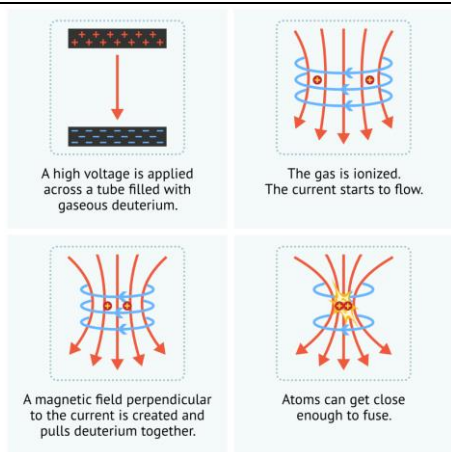
3.1、Z 箍缩：美国 Zap Energy 力争 2030 年代初期交付聚变发电模块

Z 箍缩聚变研究始于 20 世纪 50 年代中期，但直到 20 世纪末才引起全世界的广泛关注。1997 年 Sandia 实验室在驱动电流为 20MA 的 Z 装置上取得的里程碑意义的突破，之后 Sandia 实验室与 LLNL, LANL 等实验室合作，在 Z 箍缩电磁内爆实验、物理及聚变靶的研究与设计方面开展了大量工作，提出了实现聚变的两类概念模型（动态黑腔模型和双端驱动模型）；初期理论研究预计 60MA 左右的驱动电流可以实现点火，90MA 左右的驱动电流可以用于产生能源。

电流产生的角向磁场 B 与电流密度 J 正交，产生向心的洛伦兹力 $F=J \times B$ 。Z 箍缩装置利用等离子体（或细金属丝）携带的大电流（10MA 数量级）将等离子体压缩至聚变条件。在等离子体形成初期，温度和密度不高；当电极板之间施加瞬时电场导致等离子体中流过瞬时大电流，洛伦兹力使得等离子体向心箍缩；箍缩过程可近似看作绝热压缩，等离子体的温度和密度将迅速升高并达到聚变条件。

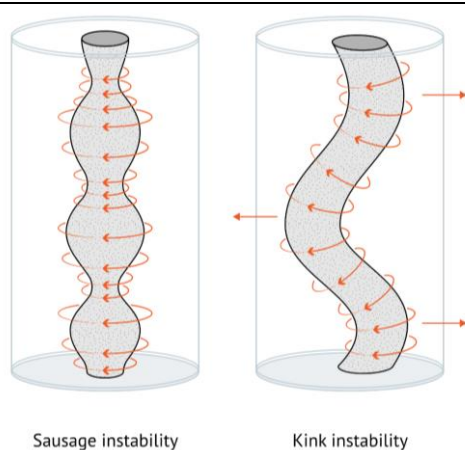
Z 箍缩装置结构简单，加热和约束均通过大电流直接或间接完成，无需大型磁体或激光装置，理论上装置可以非常紧凑；但 10MA 级大电流放电一般只有大量电容器组并联才能够承受，各个大电流开关之间的同步也很有挑战，并且经典 Z 箍缩易出现不稳定使等离子体过早瓦解。以香肠不稳定性为例，若等离子体柱不同位置因为扰动存在差异，部分位置收缩速度偏快导致电流密度 J 和磁场强度 B 同时增大，进而使得洛伦兹力 F 增大，等离子体收缩速度进一步加快，这个正反馈过程会迅速把等离子体切断，等离子体放电随之中止。

图39：电流产生的磁场对自身形成向心的洛伦兹力压强



资料来源：Energy Encyclopedia

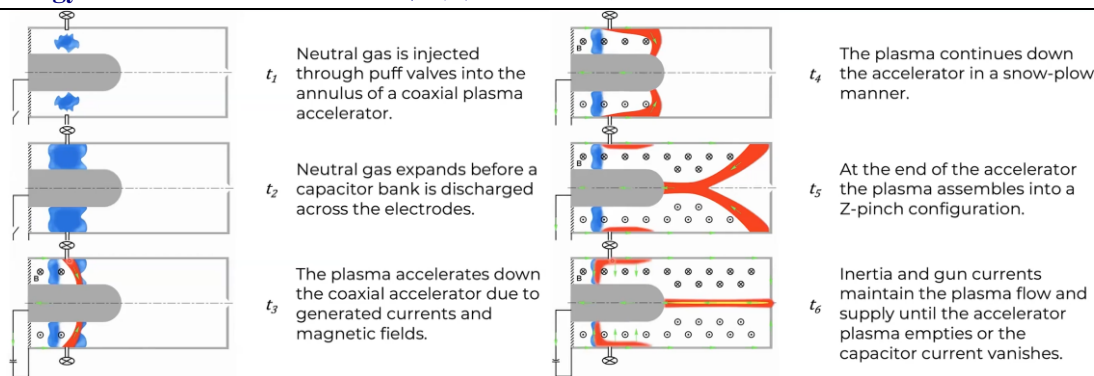
图40：经典 Z 箍缩中的香肠不稳定性及扭结不稳定性



资料来源：Energy Encyclopedia

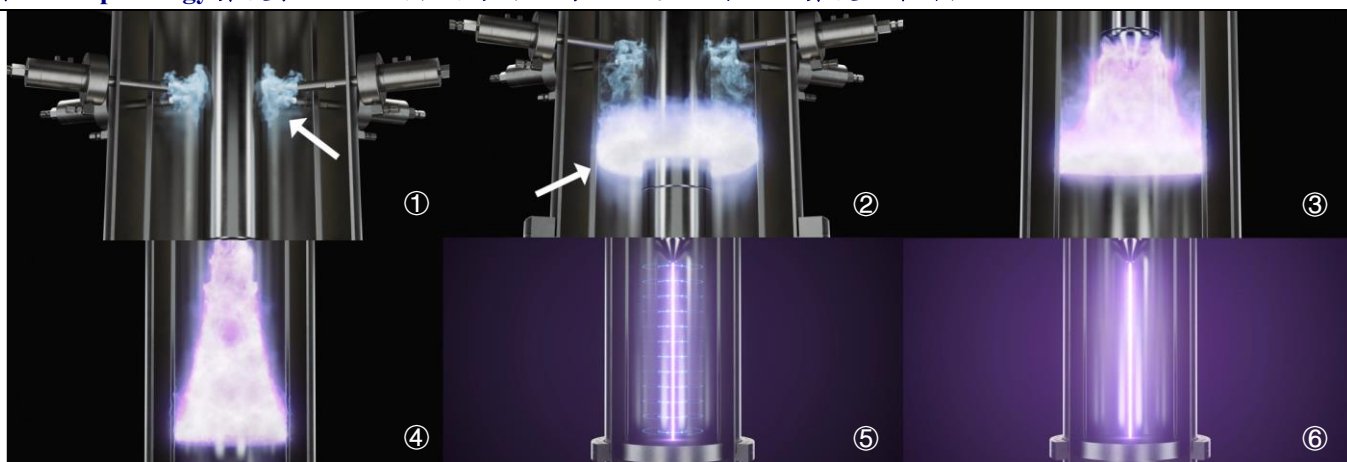
美国初创公司 Zap Energy 采用剪切流稳定（Sheared-Flow-Stabilized）技术，通过特殊装置形成内外层流动速度不同的等离子体柱，速度更快的外层可以使得速度较慢的内层保持稳定，从而延长等离子体的稳定时间、达到聚变条件，其实验装置已实现约 10^7K 电子温度。2022 年在 FuZE-Q 装置中成功产生首批等离子体；2024 年建成 Century 液态金属测试平台，验证流动金属壁对等离子体的稳态运行和高重复放电能力，实现了 3 小时内连续放电 1000 次的记录。Zap Energy 累计融资 3.3 亿美元，投资者包括比尔盖茨名下 Breakthrough Energy Ventures (BAE 公司)。Zap Energy 计划在 2020 年代后期构建中型原型机，力争 2030 年代初交付聚变发电模块。

图41: Zap Energy 采用剪切流稳定技术延长等离子体的稳定时间



资料来源: Zap Energy、PPPL 官网

图42: Zap Energy 聚变装置做功过程可分为电离、加速、Z 箍缩、聚变四个阶段



资料来源: Zap Energy、PPPL 官网

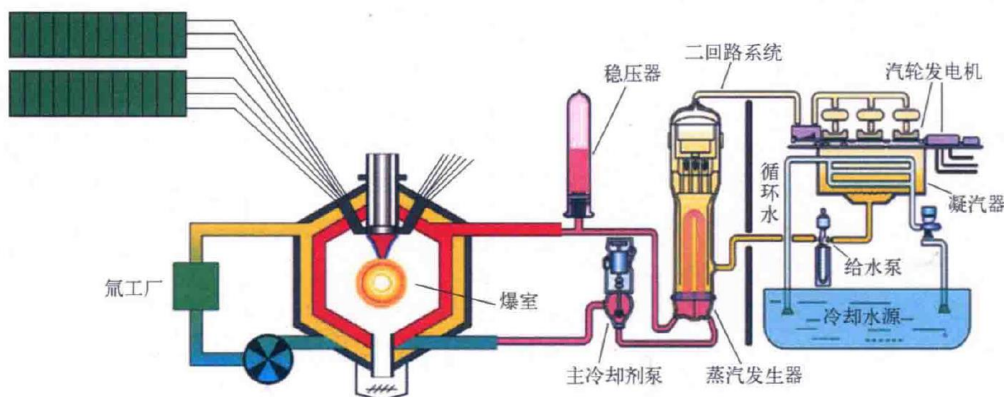
3.2、Z 箍缩聚变-裂变混合堆: 先觉聚能成立, 项目有望加速落地

利用聚变产生的高能中子可构建聚变-裂变混合堆 (Fusion-Fission Hybrid Reactor), 实现核裂变燃料的增殖、核废料嬗变、发电、氙自持。聚变-裂变混合堆使用氘氚聚变产生的高能中子 (~14MeV) “点燃”铀-238 或钍-232 并发生裂变反应, 无需燃料后处理。国内的聚变-裂变混合堆概念主要起源于彭先觉院士 2008 年提出的 Z 箍缩驱动聚变-裂变混合堆 (Z-FFR)。

Z-FFR 利用负载黑腔靶设计和“局部整体点火”的物理思想, 大幅降低对 Z 箍缩驱动器的要求, 将聚变点火所需的驱动电流降低至 30~40MA (传统 Z 箍缩为 60MA), 能源应用所需的驱动电流降至 60~70MA (传统 Z 箍缩为 90MA)。

Z-FFR 中, 电流沿 Z 轴方向流过薄金属套筒型负载, 产生径向箍缩效应, 强大的洛伦兹力驱动套筒以每秒数百千米的速度内爆, 碰靶动能>10 MJ; 套筒碰到靶外的能量转换层后产生强 X 射线辐射; X 射线能量经黑腔均匀化形成近球对称的辐射场, 在聚变靶丸的烧蚀层内形成高温和高压并对内部物质区进行压缩, 从而创造出聚变点火及燃烧所需的环境条件, 而后在次临界裂变包层中实现核燃料增殖、核废料嬗变、能量生产输出等功能。

图43: Z 箍缩驱动次临界能源堆实现核燃料增殖、核废料嬗变、电力生产等功能



资料来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》

Z 箍缩混合堆造价约 30 亿美元/GW，有望具备经济竞争力。相较激光器，Z 箍缩驱动器能量充足、电能转换为靶动能的效率较高、造价相对低廉、辐射能品质优良，更适合用作惯性约束聚变能源。Z-FFR 采用局部体点火靶，单发聚变放能可达 2000~3000MJ，若驱动器每 10s 放电 1 次，聚变功率可达 200~300MW。并且聚变产生的高能中子在深次临界裂变包层内引发裂变反应，将聚变能量放大 10 倍以上，可实现 1000MW 以上的电能输出。因此，混合堆对聚变能量增益要求降低，反应堆整体能量倍增系数 $M \geq 10$ 使聚变环节 Q 值仅需达到 1-2 即可商业化运行。装机容量 1GW 的 Z 箍缩驱动的混合堆机组建造成本约 30 亿美元，低于纯聚变堆（>100 亿美元），与快堆（50-60 亿美元）相当，有望具备经济竞争力。

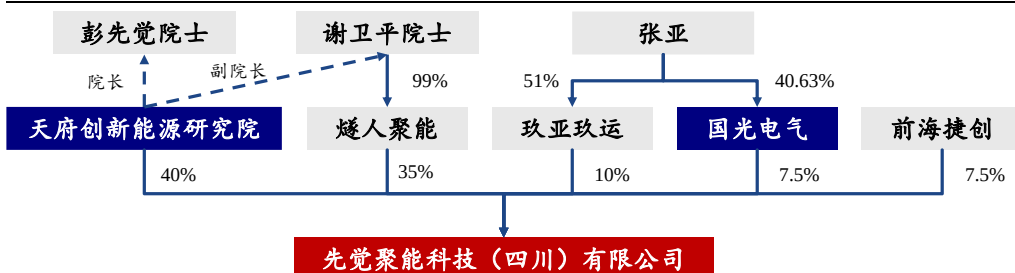
表9: 装机容量 1GW 的 Z-FFR 建造成本约 30 亿美元，低于纯聚变堆

核能系统（装机容量 1GW）	纯聚变堆	快堆	Z-FFR	热堆
建堆花费（亿美元）	≥ 100	50~60	约 30	约 20

资料来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》、开源证券研究所

先觉聚能成立，Z-FFR 项目有望加速落地。2025 年 3 月，天府创新能源研究院、燧人聚能、国光电气等股东共同出资成立先觉聚能科技（四川）有限公司。其中，天府创新能源研究院是 2021 年在成都设立的一家新型研发机构，以分步实现电磁驱动聚变裂变混合堆能源为目标；彭先觉院士、谢卫平院士分别担任院长、副院长。先觉聚能定位为支撑天府创新能源研究院发展的市场化机构，将与天府创新能源研究院共同构建起“研究院+公司”相互支撑的聚变裂变混合能源事业核心组织架构，国光电气董事长张亚先生担任先觉聚能董事长。

图44: 天府创新能源研究院、燧人聚能、国光电气等共同出资成立先觉聚能

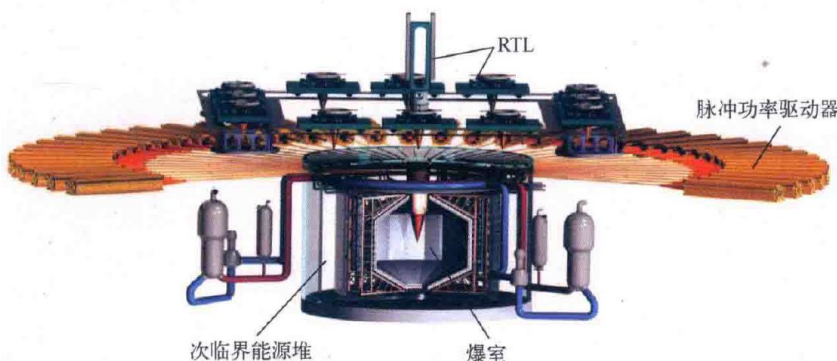


资料来源：Wind、天府创新能源研究院公众号、开源证券研究所

3.3、主要部件：驱动器在 Z 箍缩聚变装置中价值量占比约 50%

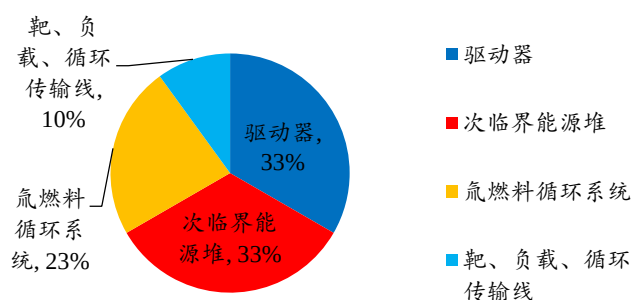
Z-FFR 主要由 Z 箍缩驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等构成。装机容量 1GW 的 Z-FFR 聚变堆造价约 30 亿美元；其中驱动器（70MA）小于等于 10 亿美元，次临界能源堆约 10 亿美元，靶、负载、循环传输线（RTL）约 3 亿美元，氦燃料循环系统约 7 亿美元。在 Z-FFR 中，驱动器价值量占比约 33%；若剔除次临界裂变包层系统，仅考虑 Z 箍缩聚变装置，驱动器价值占比将提升至 50%。

图45：Z-FFR 主要由 Z 箍缩驱动器、聚变靶与爆室、深次临界裂变包层等构成



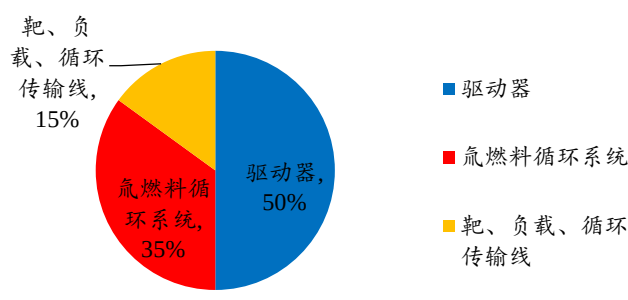
资料来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》

图46：在 Z-FFR 中，驱动器价值量占比约 33%



数据来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》、开源证券研究所

图47：在 Z 箍缩装置中，驱动器价值量占比约 50%

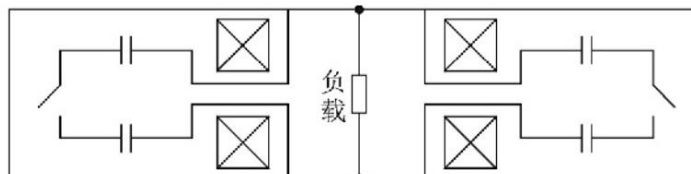


数据来源：彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆（2019）》、开源证券研究所

Z-箍缩驱动器主要设备为重复频率长寿命的初级功率源。Z 箍缩驱动器产生约 60MA 的电流，电流上升前沿约为数百纳秒；驱动器采用快脉冲直线变压器驱动源（Linear Transformer Driver, LTD）技术。LTD 本质上是一种特殊的电路拓扑结构，采用化整为零的设计思想，将储能电容分为较多容量较小的电容并联实现快脉冲直接输出，无需脉冲形成线和相应的闭合开关进行脉冲压缩；理论上任何能够满足同步触发要求的基本放电单元，都能够以 LTD 的电路拓扑结构构建任意高功率的装置。同时，LTD 将目标电压化整为零，利用磁芯的感应隔离功能将模块电压控制在较低水平，使器件工作电压与目标电压脱钩，降低开关和电容器等基本器件的功率要求，拓宽了器件选择范围，为很多能够重频长寿命运行但功率容量较小的开关器件的应用提供了可能。在基于 LTD 的电路拓扑结构确定后，驱动器的重复频率运行能力和寿命潜力就取决于开关器件及其同步触发技术。

单个 LTD 模块由若干低电感电容器和开关组成的放电支路并联组成。选择容量较小的电容器可以使每个支路的 $(LC)^{0.5}$ 值 (L 为支路电感, C 为支路电容) 较小, 从而能够实现快脉冲输出; 采用多个放电支路并联可实现大电流输出; 通过多模块串联实现高电压输出。

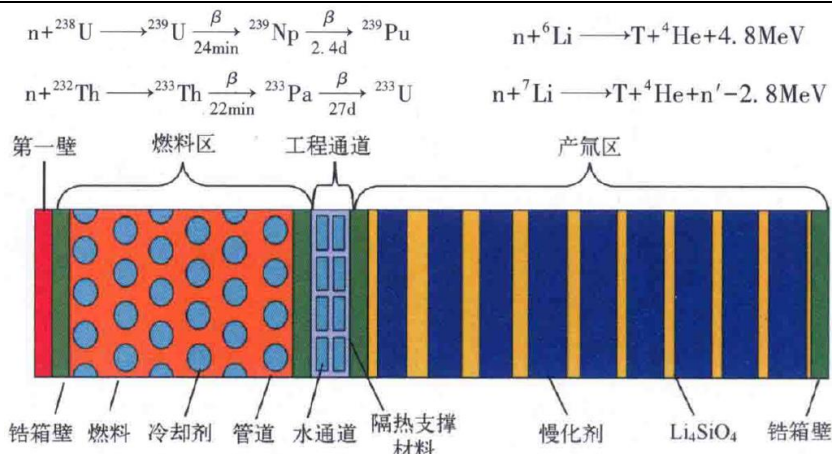
图48: 单个 LTD 模块由若干低电感电容器和开关组成的放电支路并联组成



资料来源: 陈林等《中物院快脉冲直线型变压器驱动源技术研究进展》

在 Z-FFR 中, 次临界能源堆占项目总造价的 33%; 次临界能源堆包层中由内而外分别为第一壁、燃料区、工程通道、产氚区。氚氚聚变产生的 14MeV 高能中子在次临界能源堆包层中实现核燃料增殖、核废料嬗变、能量生产输出及氚自持等功能。

图49: 次临界能源堆包层由内而外分别为第一壁、燃料区、工程通道、产氚区



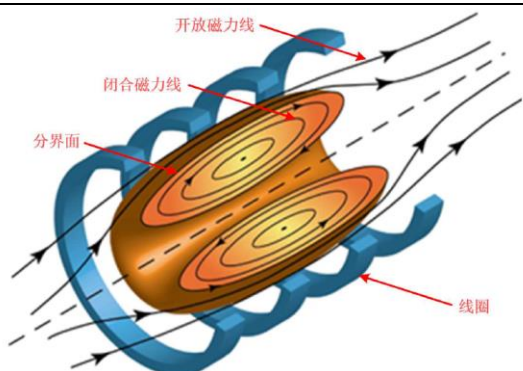
资料来源: 彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆 (2019)》

4、场反位形：技术路线得到初步验证，私营资本加速布局

4.1、基本原理：磁化靶 FRC 装置脉冲式发生聚变反应，类似柴油发动机

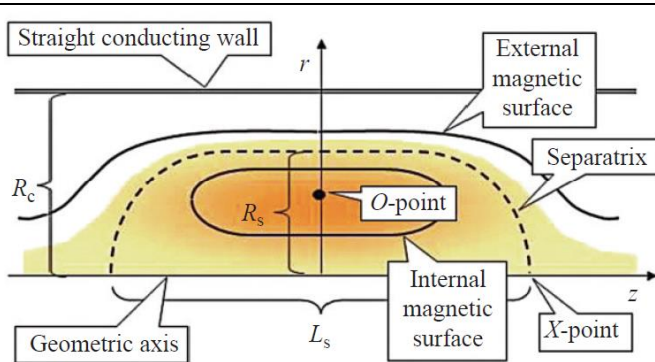
场反位形（Field Reversed Configuration, FRC）装置属于紧凑环（Compact Torus, CT）装置的一类，由角向磁场约束等离子体，具有 β 值较高的优点。磁约束核聚变装置比压 β 定义为等离子体热压与外部磁场磁压之比，装置 β 值越高，相同磁场强度下能够约束的等离子体温度越高。FRC 磁场结构中包含两个区域，封闭磁力线区域的闭合磁面不断收缩，最后形成磁场为零的 O 点；开放磁力线区域两端无限远处分别有两个磁场为零的 X 点；两区域由分形线 Separatrix 分隔开，开放磁力线区域相当于偏滤器，在此区域可进行排灰和能量输出。

图50：FRC 装置没有中心螺线管，等离子体接近球形



资料来源：赵言昊《基于氢闸流管的 HFRC 形成区电源的优化研究》

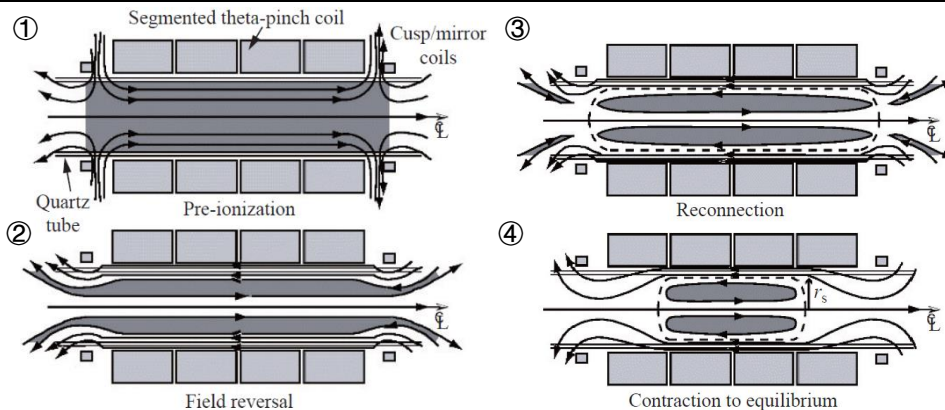
图51：FRC 具有开放磁力线区域和闭合磁力线区域



资料来源：Steinhauer et al.《Review of field-reversed configurations》

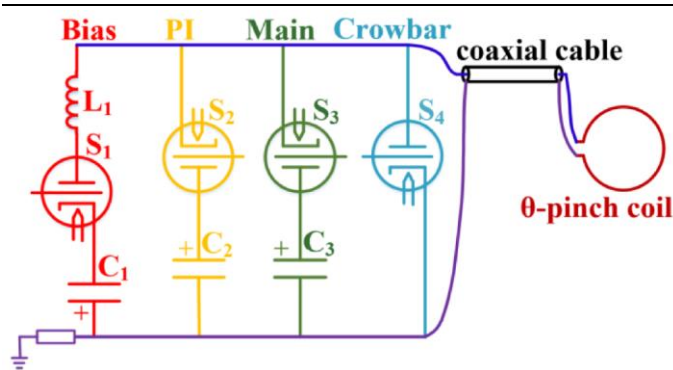
FRC 形成技术主要为场反 θ 箍缩（Field Reversed θ -Pinch, FRTP），当中性气体注入真空室后，电源系统中偏置电路、预电离电路、主电路和撬棒电路四条支路将依次触发为磁体系统供电，通过产生特定的磁场位形形成 FRC 等离子体；FRTP 过程可分为预电离、场反转&磁重联、收缩平衡三个阶段。首先加反向偏置磁场，并预电离气体产生初始等离子体，等离子体与偏置磁场冻结形成反向偏置磁通；随后 θ 箍缩线圈电流迅速上升、外部主磁场快速增强反转，等离子体内部感应出较大电场和电流，磁场径向压缩等离子体向轴心运动，同时两端磁力线重新连接，形成反平行磁场结构；最后线圈上电流下降，重联后的磁力线会轴向收缩，然后等离子体经过一系列振荡直到磁压和热压平衡形成准平衡场反位形。

图52：FRTP 过程可分为预电离、场反转、磁重联、收缩平衡四个阶段



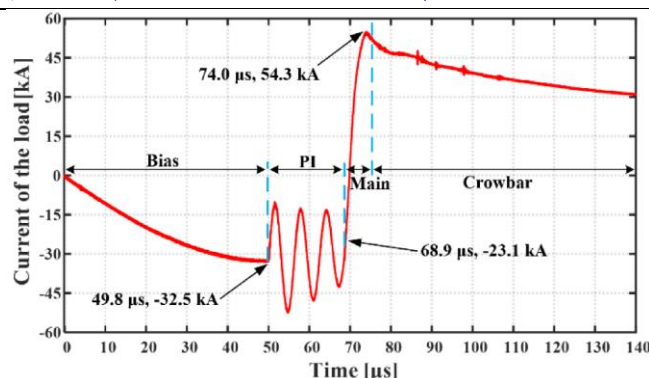
资料来源：肖池阶等《磁约束聚变方案中的磁镜、场反及偶极场位形研究进展》

图53: FRTP 电源系统中包含四个支路



资料来源: Bo Rao et al.《Improvement and test of high-voltage pulsed power supply for HFRC》

图54: 四条支路将依次触发为磁体系统供电

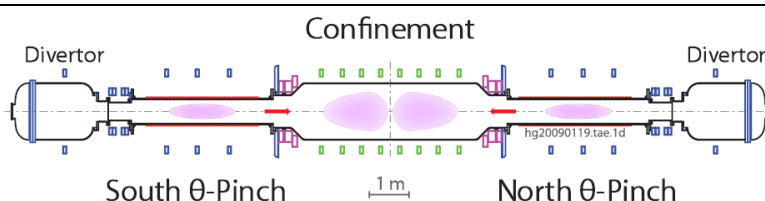


资料来源: Bo Rao et al.《Improvement and test of high-voltage pulsed power supply for HFRC》

FRC 聚变装置大多是对称的直线型装置,装置两端的 θ 箍缩线圈形成两个 FRC 等离子体并传输至中心区域碰撞融合,融合伴随的磁重联现象进一步加热等离子体。

磁重联即磁力线的断开和重新连接过程,一般伴随着内部磁能向粒子动能或内能的转化,是等离子体中磁能释放的重要途径,磁重联出现在 FRC 形成过程和两个 FRC 的碰撞融合过程中。形成 FRC 过程中,快速上升的主场在 θ 箍缩线圈两端与相反方向被冻结的偏置磁场进行磁重联,最后形成具有闭合磁力线结构的 FRC。在两个 FRC 的碰撞融合过程中,由于理想 FRC 仅有极向磁场,两个 FRC 碰撞融合过程也是两个磁环的磁场重联过程;一般相碰撞的两个 FRC 具有相同的环向电流,且对准撞点/面的磁场方向是相反的;在高速传输 FRC 提供的外力驱动下,碰撞区域的相反磁力线断开并重新连接,最终形成一个新的碰撞融合 FRC;两个 FRC 动能的 60% 在碰撞后转化为内能,导致等离子体温度升高,约 40% 的动能转化为磁场能量,碰撞融合后 FRC 的输运性质有了较大改善,增加了融合后 FRC 的存活时间。

图55: FRC 聚变装置通过 FRTP 形成等离子体并传输至中心区域碰撞融合



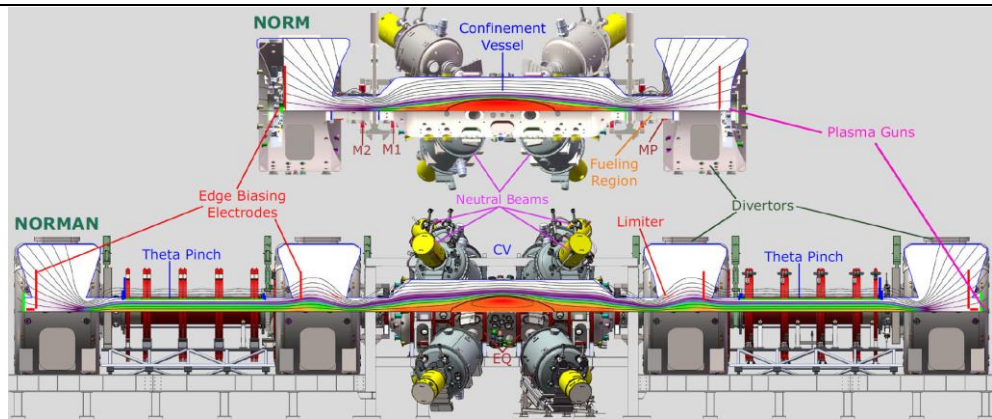
资料来源: M.W. Binderbauer et al. 《Dynamic Formation of a Hot Field Reversed Configuration with Improved Confinement by Supersonic Merging of Two Colliding High- β Compact Toroids》

两个 FRC 碰撞融合后,仍需进一步加热/压缩使等离子体温度/密度达到聚变条件。按照不同的后续加热/压缩方法,FRC 聚变装置可以大致分为两个方向,一种是走传统磁约束途径的准稳态运行,如采用中性束加热方案的 TAE Technology (美);另一种是作为磁化靶,依靠外部驱动压缩内爆 FRC 的脉冲运行,可以归类到磁-惯性混合约束途径中,如 Helion Energy (美)。

TAE Technology 选择无放射性的氢-硼 11 ($p-^{11}B$) 燃料作为终极目标,因该燃料聚变不产生中子,从环境和供应看更理想。TAE 公司第五代装置 C-2W(也称 Norman)利用可变量能量中性束(15-40 keV,总功率 20 MW)成功实现了总温度大于 3keV,

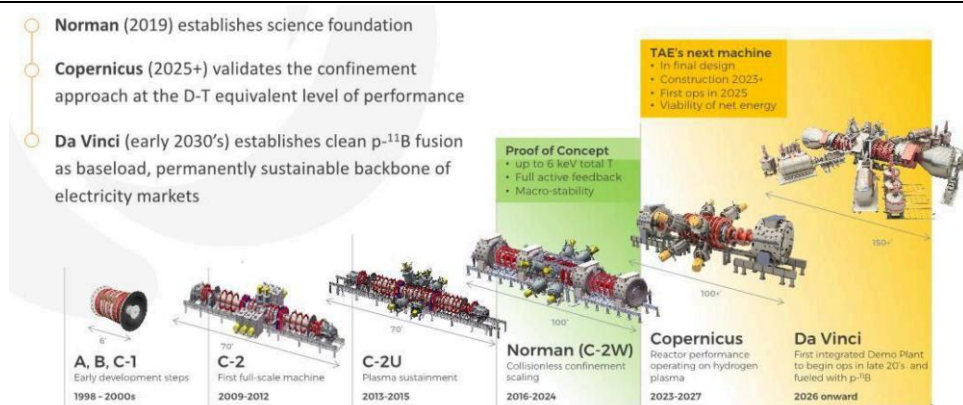
寿命大于 30ms 的 FRC 等离子体。截至 2025 年 6 月, TAE 累计融资额超 18 亿美元, 股东包含谷歌、雪佛龙等; TAE 公司正建造的第 6 代原型 Copernicus (科白尼) 将在 2025 年前后验证净能量产出; 下一步将开发演示堆实现 30 亿度以点燃氘-硼 11 燃料。TAE 的优势在于长期运营稳定 (等离子体持续被束流驱动, 非脉冲) 且远期无需依赖氘燃料; 不足在于 $p\text{-}^{11}\text{B}$ 燃料要求极高温, 短期内可能需要过渡使用氘氮 3 或氘氮反应验证发电, 再逐步转向无中子燃料。

图56: TAE 采用中性束注入方案加热和维持融合后的 FRC 等离子体



资料来源: Roche et al. 《Generation of field-reversed configurations via neutral beam injection》

图57: TAE 公司第 6 代原型 Copernicus 将在 2025 年前后验证净能量产出

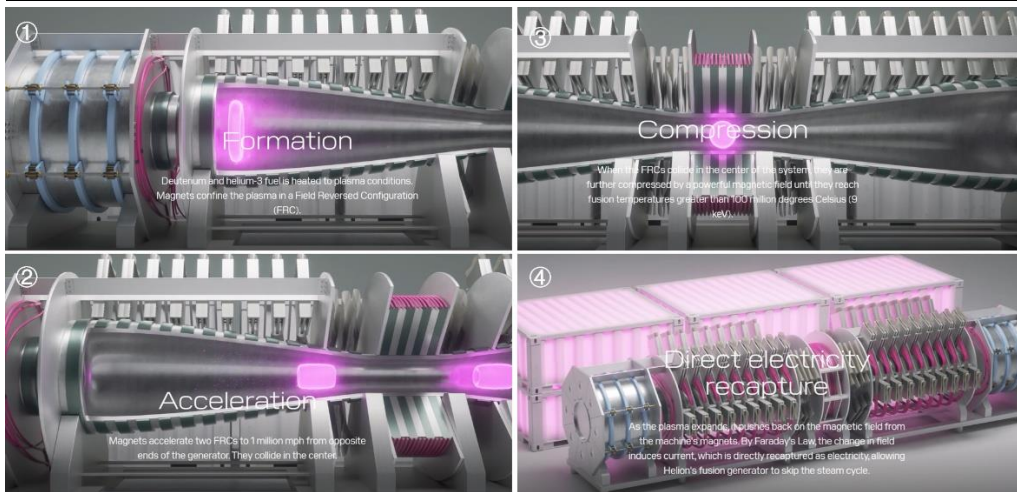


资料来源: TAE 《Overview of TAE Technologies' Fusion Program Towards Aneutronic Fusion (2023)》

Helion Energy 通过瞬时磁场压缩使融合后的等离子体达到聚变条件。Helion 利用磁场将 FRC 压缩到聚变条件, 聚变产生的高能带电粒子导致等离子体膨胀并推回外部磁场, Helion 直接利用等离子体膨胀时的电磁感应发电, 无需热交换和汽轮机, 从而提高能量转化效率; 该过程类似于柴油发动机, 利用绝热压缩使柴油达到燃点, 燃烧产生推动活塞的热膨胀气体做功; 也因此 Helion 聚变装置的做功过程是脉冲式和循环式的。由于 Helion 采取电磁感应的方式发电, 所以选择反应释放能量较高、反应产物中带电粒子数量较多, 且反应条件低于氢硼聚变的氘-氮 3 反应 (该反应产生 3.6 MeV α 粒子和 14.7 MeV 质子)。并且由于带电粒子在磁场中受到约束, 氘-氮 3 反应与氘-氘反应相比, 减少了材料磨损和屏蔽要求。虽然氮 3 在地球上并不丰富, 但可以通过氘-氘反应直接产生, 或通过反应产生的氘衰变成氮 3。

Helion 第 6 代装置 Trenta 达成 1 亿度燃料温度，第 7 代原型机 Polaris 正在运行，目标是产出人类首次“由聚变直接发电”的电。Helion 累计融资超 10 亿美元，2025 年与微软签署了全球首份聚变购电协议，承诺 2028 年交付 50MW 聚变电站的电力；并与纽柯钢铁合作开发 2030 年代的 500MW 聚变电站。Helion 路径的潜力在于装置模块小、循环快（每个脉冲仅数毫秒），可通过多机并联扩容；难点在于 FRC 等离子体的稳定合并和重复脉冲系统寿命。

图58：Helion 装置单次循环包含等离子体形成、对撞、压缩、能量回收四个阶段



资料来源：Helion Energy 官网

4.2、核心催化：Helion 初步验证技术路线可行性，FRC 获私营资本青睐

尽管 FRC 的发现很早（1950s），但由于 FRC 容易遭受不稳定性、约束较差、缺乏有效的电流驱动等，实验装置产生的大部分 FRC 的存活寿命（<1ms）、等离子体参数和劳逊参数都偏低。过去很长一段时间，由于聚变领域处于追求聚变参数和验证聚变可行性的阶段，FRC 装置的发展远不如主流磁约束聚变装置，大部分资源不可避免地偏向托卡马克等参数更高的装置倾斜。然而，相较于托卡马克装置，FRC 装置理论上具有建造与运行成本更低、能量转化效率更高、稳定性与安全性更强等优势，并且 FRC 拥有较高的 β 值，能够使用较低的磁场去约束具有较高能量密度的等离子体，使得 FRC 聚变堆更适合燃烧先进无中子燃料（这类聚变反应需要更高的等离子体温度，一般低 β 装置所需磁场大得惊人），具有一定的潜力。

表10：FRC 装置相较于托卡马克装置，理论上具有建造与运行成本更低等优势

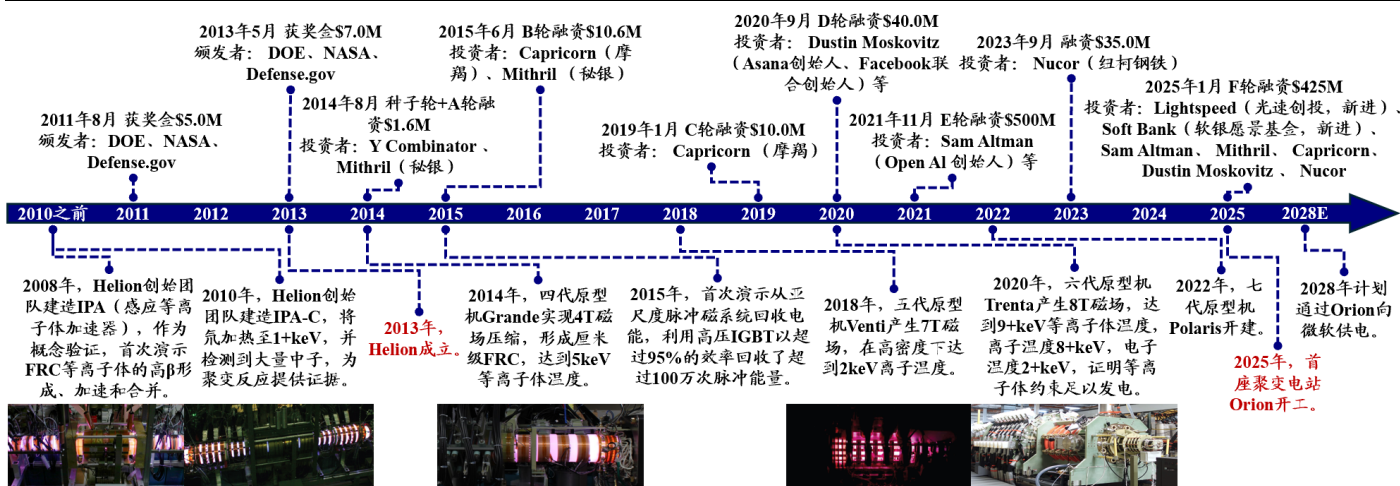
FRC 装置优势	原因
更低的建造与运行成本	FRC 装置无需庞大的磁场线圈，磁体用量减少，装置体积缩小，可采用铜导线制作磁体（非超导体），建造和运行成本降低。
更高的能量转化效率	FRC 拥有较高的 β 值，能够使用较低的磁场去约束具有较高能量密度的等离子体，使得 FRC 聚变堆更适合燃烧无中子燃料；同时 FRC 聚变能可通过电磁感应直接回收，绕过“烧开水”环节，效率大幅提升。
更强的稳定性与安全性	FRC 装置无环向磁场导致的电流破裂风险，等离子体约束稳定性显著提升；线性结构便于主动控制，可快速响应异常情况。

资料来源：廖晖《KMAX 碰撞融合 FRC 的实验研究》、可控核聚变官网、开源证券研究所

2008-2020 年，Helion 实现低成本快速迭代，并初步验证磁化靶 FRC 技术路线可行性。2008-2020 年，Helion 团队累计获政府奖金和融资约 0.74 亿美元（奖金主要来自美国能源局、美国国防部、NASA，投资人包含 Y Combinator（YC）、Mithril（秘银）、Capricorn（摩羯）、Dustin Moskovitz（Asana 创始人、Facebook 联合创始人）等），Helion 原型机完成六次迭代，2020 年在第六代原型机 Trenta 中实现超过 9keV（1 亿度）等离子体温度，证明装置的等离子体约束能力达到发电条件。

2021-2025H1，Helion 融资进度加快，期间累计融资 9.6 亿美元；其中 2021 年 E 轮融资 5.0 亿美元（投资人包含 Open AI 创始人 Sam Altman 等）；2025 年 F 轮融资 4.25 亿美元（投资人包含 Lightspeed（光速创投）、Soft Bank（软银愿景基金）、Nucor（纽柯钢铁）等）。2022 年，Helion 第七代原型机 Polaris 开建，Polaris 拥有比 Trenta 更强的磁体、更快的脉冲速度，有望成为第一台展示核聚变发电的装置；2023 年，Helion 与微软签订全球首份核聚变供电协议，计划 2028 年向微软提供 50MW 的聚变电力；2025 年，Polaris 已启动安装，世界首座聚变电站 Orion 开工建设。

图59：Helion 累计融资额超 10 亿美元，有望在第七代装置 Polaris 上展示聚变发电



资料来源：Helion Energy 官网、Fusion Energy Base 官网、Tracxn 官网、开源证券研究所

Helion 实现低成本快速迭代并初步验证 FRC 聚变可行性；FRC 装置有望成为聚变领域的黑马，私营资本加速布局。2015 年，Helion 首次演示从亚尺度脉冲磁系统回收电能，利用高压 IGBT 以超过 95% 的效率回收了超过 100 万次脉冲能量，验证聚变电磁感应能量回收方式的可行性；2020 年，Helion 在其第六代原型机 Trenta 中实现 1 亿度等离子体温度，证明装置的等离子体约束能力达到发电条件。2022-2025 年间，瀚海聚能、星能玄光、诺瓦聚变三家公司相继成立，均采用 FRC 技术路线。

瀚海聚能：中国首家专注于直线型场反位形（FRC）可控核聚变技术的商业公司；计划通过“沿途下蛋”模式，早期发展中子源中间产品。瀚海聚能创始人项江先后参与激光惯性约束聚变多项国家级重大专项的实验设计和理论研究工作，具有二十余年可控核聚变各主流技术方向的研究、工作经验。瀚海聚能规划了分步走的发展战略，至 2025 年底，研发建设第一代中子源工程样机，在医用同位素生产等领域逐渐形成商业落地；2026-2028 年，逐渐形成具有并网发电能力的工程样机；2028-2030 年，完成 10-50MW 量级的电力输出。2023 年 3 月，瀚海聚能获轻舟资本种子轮投资，2024 年 4 月完成华映资本、奇绩创坛、厚实基金领投的天使轮融资，累计融资超 5000 万元。2025 年 2 月 HHMAX-901 主机建成并成功点亮等离子体。

星能玄光：基于中科大 KMAX-FRC 十余年的理论和实践积累，致力于紧凑型聚变的创新。项目团队由中国科学技术大学孙玄、李弘两位教授领衔，孙玄教授在磁约束聚变研究领域已有 30 余年经验，在国际知名的普林斯顿等离子体物理实验室（PPPL）、洛斯阿拉莫斯国家实验室（LANL）、TAE 公司均有丰富工作经验。2024 年 11 月，星能玄光完成亿元天使轮融资，该轮融资由招商局创投和中科创星领投，民银国际、博将资本、银杏谷资本、天创资本和个人投资者跟投。2025 年 2 月，Xeonova-1 装置成功实现放电，从设备进场安装到实现放电，耗时不足两个月。

诺瓦聚变：采用场反位形（FRC）磁压缩技术路线，研发聚变小型模块化反应堆（SMR）。诺瓦聚变创始人郭后扬，曾在能量奇点、新奥集团、美国通用原子公司、美国 TAE 公司等任要职，曾参与和领导欧洲 JET、中科院 EAST 和美国 DIII-D 托卡马克的物理研究，以及美国华盛顿大学和 TAE 公司的紧凑场反位型磁约束聚变研究。诺瓦聚变短期目标实现 1 亿度离子温度，完成关键技术验证；中期目标实现聚变能量增益 $Q>1$ ，攻克经济高效获取聚变能的核心技术难题；长期目标成功实现 50MW 聚变电力输出，推动小型模块化聚变电站（FRC-SMR）商业化。2025 年 8 月 1 日诺瓦聚变宣布完成 5 亿元天使轮融资，创下国内民营核聚变公司单笔融资新高，本轮融资由顶尖产业资本、领先社会资本及实力雄厚的国有基金强强联手组成，包括社保基金中关村自主创新专项基金（君联资本担任管理人）、君联资本、光速光合、高榕创投、华控基金、明势创投及临港科创投等知名机构及重要战略投资人。

表11：2022-2025 年间，瀚海聚能、星能玄光、诺瓦聚变三家公司相继成立，均采用 FRC 技术路线

公司	成立时间	创始人	技术路线	项目进展/目标	融资进展
瀚海聚能 (成都)	2022 年 12 月	项江	场反 MIF	至 2025 年底，建设中子源工程样机； 2026-2028 年，建设发电工程样机； 2028-2030 年，实现 10-50MW 电力输出。	2023 年 3 月完成种子轮融资； 2024 年 4 月完成天使轮融资， 累计融资超 5000 万元。
星能玄光 (合肥)	2024 年 3 月	孙玄	场反磁镜	2025 年 2 月 Xeonova-1 装置成功实现放电。	2024 年 11 月，完成亿元天使轮融资。
诺瓦聚变 (上海)	2025 年 4 月	郭后扬	场反 MIF	短期目标实现 1 亿度离子温度； 中期目标实现聚变能量增益 $Q>1$ ； 长期目标成功实现 50MW 聚变电力输出。	2025 年 8 月，完成 5 亿元天使轮融资，投资机构包含社保基金、君联资本、光速光合等。

资料来源：Wind、可控核聚变官网、诺瓦聚变官方公众号等、开源证券研究所

4.3、主要部件：高频脉冲电源价值量占比或超 50%

以磁化靶 FRC 装置（不含中性束注入系统）为例，装置主要由电源、磁体（ θ 箍缩线圈）、真空室与堆内构件、控制及采集系统等部件组成。FRC 装置成本结构公开数据较少，考虑到 FRC 装置不依赖氦循环，燃料循环系统价值量占比或较 Z 箍缩装置大幅下降；FRC 装置体积较托卡马克大幅缩小，磁体、真空室和堆内构件价值量占比或较托卡马克装置大幅下降；而驱动器在 Z 箍缩聚变装置中价值量占比约 50%，磁体、真空室和堆内构件在托卡马克装置中价值量占比约 53%，我们认为，FRC 装置中电源系统价值量占比或超过 50%，磁体、真空室与堆内构件占比或低于 50%。

当前阶段多数 FRC 实验装置如华中科技大学 HFRC、中国科学技术大学 KMAX-FRC 等均使用铝合金导线制作磁体线圈，磁体价值量占比或进一步下降。

表12: FRC 装置中电源系统价值量占比或超过 50%

装置部件	价值量占比@其他装置	价值量占比@FRC 装置
电源	50%@Z 箍缩装置	或超过 50%
磁体、真空室和堆内构件	53%@托卡马克装置	或低于 50%

资料来源: Mitchell et al.《Superconductors for fusion: a roadmap》、ITER《Final Report of the ITER EDA (2001)》、彭先觉等《核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆 (2019)》、开源证券研究所

图60: FRC 装置主要由电源、磁体、真空室、控制系统等组成

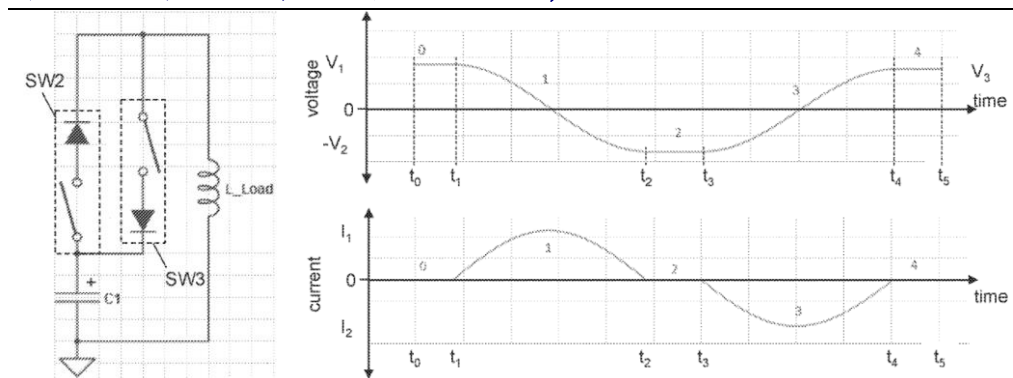


资料来源: Bo Rao et al. 《Improvement and test of high-voltage pulsed power supply for HFRC》

根据 Helion 的电回收系统专利, FRC 装置驱动系统(电源+磁体)可简化为 LC 电路, 主要由电感 L (磁体)、电容 C (电源) 和开关 S 组成。LC 电路系统中, 能量在电能(电容)和磁能(电感)之间反复转化(传递), 类似汽车发动机中的曲轴, 为系统周期性运行提供惯性; 开关和二极管用于控制系统能量输入/输出方向, 类似汽车发动机中的进气阀/出气阀; 在聚变装置实现能量净增益后, 部分能量由系统向外输送, 类似汽车发动机点火启动后不再需要电源驱动曲轴, 能够自维持运行并向外输出机械能做功。系统运行的一个完整周期可分为四个阶段, t_0-t_1 时刻, 开关 SW2 与 SW3 均关断; t_1-t_2 时刻, 开关 SW2 导通、SW3 关断, 电能由电容向电感传递; t_2-t_3 时刻, 开关 SW2 与 SW3 均关断; t_3-t_4 时刻, 开关 SW2 关断、SW3 导通, 电能由电感向电容传递; t_4 时刻, 系统回到初始状态。

在 Helion 的电回收系统专利中, 某些电路可能需要承载 MA/kV 数量级的电流/电压; 并且 LC 电路以脉冲的方式运行, 需要进行快速开关操作, 在每个周期内产生短暂的电流脉冲, 脉冲持续时间 1-500ms, 某些情况下峰值功率可能达到 GW 数量级。Helion 的电回收系统需要能够切换高电流/电压方向的开关, 主要包含晶闸管 (Silicon-Controlled Rectifier, SCR)、场效应管 (Field Effect Transistor, FET)、绝缘栅双极晶体管 (Insulate-Gate Bipolar Transistor, IGBT) 等。部分电路系统中存在电流过零点, 晶闸管可实现自换向 (正向电流下降至维持电流以下时开关自动关闭)。

图61: FRC 装置驱动系统可简化为 LC 电路, 能量在电容和电感之间反复传递



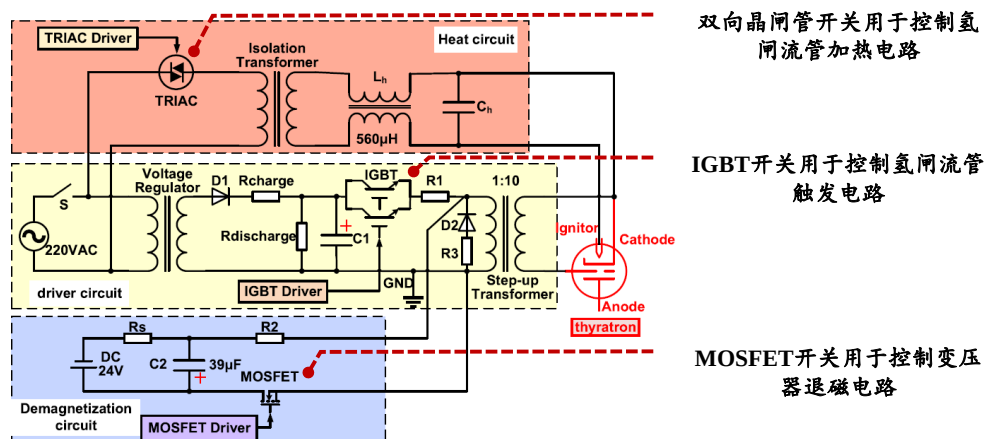
资料来源: USPTO 官网

电力电子器件(半导体)按照可否通过信号控制其导通和关断,分为不可控型器件、半控型器件和全控型器件。不可控型器件主要是电力二极管(Power Diode),具有单向导通特性,可用于整流电路;半控型器件仅能通过控制信号控制其导通,不能控制其关断,主要是晶闸管(SCR)及其派生器件,具有单向导通特性,可用于开关和整流电路;全控型器件能通过控制信号控制其导通和关断,包含场效应管(FET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)等,部分器件具有双向导通特性,可用于开关、整流、逆变、放大电路。在半导体器件出现前,主要使用真空开关器件;在半导体器件出现后,由于半导体器件体积小、损耗低,中低功率应用场景中,真空器件基本被半导体器件取代;但大功率应用场景中,真空器件依旧广泛应用。

根据林木楠《场反位形等离子体装置的研制》,在高功率快脉冲领域,主要使用的开关有球间隙开关(Sphere Gap Switch)、氢闸流管(Hydrogen Thyatron)以及引燃管(Ignitron)等,该系类开关的脉冲峰值电流/电压能达到 100kA/10kV 数量级,具有低电感、短击穿时间延时等特点。高校实验装置中大多将半导体开关作为高压脉冲触发器,控制主回路脉冲功率开关。HFRC 装置电源系统采用 IGBT+氢闸流管方案;KMAX-FRC 装置电源系统采用晶闸管+氢闸流管/引燃管方案。

HFRC 装置电源系统采用 IGBT+氢闸流管方案实现小于 1μs 的精确延时控制。HFRC 装置的 θ 箍缩电源系统的开关需要承受高达 70kV/200kA 的瞬态电压/电流,为兼顾严苛的工况以及低时延的精确控制,HFRC 选用具备耐高压和大电流能力的 TDI 系列氢闸流管作为功率模块中的脉冲开关,并基于 IGBT 设计相应的触发电路。氢闸流管的触发主要分为两步,首先使用 5-7V 交流电压预热氢闸流管 5 分钟,然后使用 IGBT 控制升压变压器初级回路,在次级回路中形成 2-5kV 的高压脉冲,触发氢闸流管,实现对氢闸流管导通的精确控制。由于升压变压器单方向放电会导致磁饱和,因此额外设计一个消磁电路重置变压器并保护 IGBT 免受过流损害。

图62: HFRC 装置电源系统采用 IGBT+氢闸流管方案



资料来源: Ming Zhang et al. 《Design of High Voltage Pulsed Power Supply for HFRC》、开源证券研究所

根据邓建军等《面向 Z 箍缩驱动聚变能源需求的超高功率重复频率驱动器技术》(2014), 气体火花开关在限定电流 ($<20\text{kA}$) 的条件下, 寿命可望达到 10^6 甚至更高, 但开关的导通延时及其抖动会发生较大变化; 基于低气压放电机理的气体开关 (氢闸流管、钨火花开关和 BLT) 在重复频率长寿命性能方面具有独特的潜力, 不足之处在于“个性较强”, 即每个开关由于个体差异导致触发控制条件均有所不同, 要想精确同步, 每个开关都需配置独立的触发控制系统, 而开关的触发控制系统本身较为复杂, 所以整个触发控制系统将极为庞杂。如果开关的一致性能够较好保证, 同时多个开关间由于不同步造成的相互影响能够解决, 则用一套触发控制系统可以控制多个开关, 此类开关用于大型驱动器系统是较为理想的选择。半导体开关器件拥有较高的寿命和可靠性, 但功率容量低、电流上升速率低且价格昂贵; 未来随着半导体开关价格逐渐下降, 驱动器采用半导体开关有望逐渐具有性价比优势。

表13: 气体开关与半导体开关各有优劣

器件	优势	劣势
气体火花开关	限定电流下寿命可观	开关的导通延时及抖动
气体开关 (氢闸流管、钨火花开关和 BLT)	在重复频率长寿命性能方面具有独特的潜力	每个开关由于个体差异导致触发控制条件均有所不同, 系统控制难度大
半导体开关 (晶闸管、GTO、MOSFET、IGBT 等)	较高的寿命和可靠性	功率容量低、电流上升速率低且价格昂贵

资料来源: 邓建军等《面向 Z 箍缩驱动聚变能源需求的超高功率重复频率驱动器技术》、开源证券研究所

5、受益标的：重视主流技术路线装置核心环节的投资机会

近年来，人工智能与算力的快速发展使得可控核聚变中等离子体建模与仿真能力大幅提升；高温超导带材的量产突破大幅提升了托卡马克装置的理论上限，使得磁约束核聚变距离商业化发电渐行渐近；采用 FRC 技术路线的 Helion 实现低成本快速迭代，并成功实现 1 亿度等离子体温度，初步验证了 FRC 技术路线的可行性，私营资本加速布局；聚变-裂变混合堆也为核能发展提供了新的思路，先觉聚能、星火一号项目有序推进。公共资金和私营资本有望合力推动聚变行业进入快速孵化阶段，行业有望开启景气度周期，建议关注聚变装置部件、材料等环节投资机会。

托卡马克装置：关注磁体（28%）、真空室和堆内构件（25%）、电力、电源和加热系统（15%）投资机会。参考 ITER 项目期初预算的成本结构（2001），全低温超导托卡马克中磁体价值量占比 28%（含绕制、结构件等）；假设超导线材价值量占磁体系统的一半，其余环节价值量均不变，高温超导带材单价为低温超导线材单价的 2-3 倍，则全高温超导托卡马克装置超导带材成本占比 25%-33%。（注：不同装置可能存在规模、材料、技术路线等方面的差异，装置成本结构可能发生变化。）

Z 箍缩和 FRC 装置：关注驱动器/电源环节开关与电容器件投资机会。Z 箍缩装置中驱动系统价值量占比约 50%。FRC 装置成本结构公开数据较少，考虑到 FRC 装置不依赖氚循环，燃料循环系统价值量占比或较 Z 箍缩装置大幅下降；且装置体积较托卡马克大幅缩小，磁体、真空室和堆内构件价值量占比或较托卡马克装置大幅下降；而驱动器在 Z 箍缩聚变装置中价值量占比约 50%，磁体、真空室和堆内构件在托卡马克装置中价值量占比约 53%，我们认为，FRC 装置中电源系统价值量占比或超过 50%，磁体、真空室与堆内构件占比或低于 50%。

受益标的：（1）磁体环节：西部超导（低温超导线材）、永鼎股份（高温超导带材）、上海超导（高温超导带材）、联创光电（高温超导磁体服务）等；**（2）真空室和堆内构件：**合锻智能（真空室、第一壁、包层和偏滤器）、国光电气（第一壁、包层和偏滤器）、安泰科技（第一壁、包层和偏滤器）等；**（3）电源总成：**英杰电气（磁体电源和 PSM 电源）、爱科赛博（磁体电源和 PSM 电源）、四创电子（PSM 电源）、新风光（磁体电源）、赛晶科技 H（脉冲电源）等；**（4）微波和电源器件：**旭光电子（真空脉冲功率器件等）、国力股份（氢闸流管、回旋管、速调管）、宏微科技（IGBT）、王子新材（电容）等；**（5）燃料增殖和循环：**国光电气（氚工厂）等；**（6）检测设备：**皖仪科技（氦检漏、真空检漏）等。

表14：可控核聚变产业链受益标的梳理

装置部件	相关公司	细分环节（价值量占比）	托卡马克装置相关业务/合作/订单情况
磁体	西部超导	低温超导线材	ITER 项目低温超导国内独供, 承担 69% 的 NbTi 和 7% 的 Nb ₃ Sn 超导线生产；超导线材应用于 HL-3、CRAFT、CFETR 项目。
	永鼎股份	高温超导带材	子公司东部超导（持股约 60%）实现二代高温超导带材量产，与中科院、能量奇点、星环聚能、西物院等密切合作。
	上海超导	高温超导带材	二代高温超导带材供货 CFS（美）、Tokamak Energy（英）、星环聚能、能量奇点等；二代高温超导产能居全球前列。
	联创光电	高温超导托卡马克混合堆磁体	子公司联创超导与中核聚变公司联合推进星火一号项目，总投资达 200 亿元；联创超导主要提供高温超导磁体服务。
真空室和堆内构件	合锻智能	真空室、第一壁、包层和偏滤器	2024 年中标 2.09 亿元 BEST 真空室项目；参与 BEST 真空室、偏滤器、包层、第一壁研制，该项目预计 2025 年下半年招标。
	国光电气	第一壁、包层和偏滤器	为 ITER 项目提供偏滤器、包层、第一壁等；偏滤器已应用于 EAST、HL-2A、HL-3 等托卡马克装置；持股先觉聚能 7.5%。
	安泰科技	第一壁、包层和偏滤器	子公司安泰中科（持股 51%）钨铜偏滤器和第一壁产品应用于 ITER、EAST、HL-2M、CRAFT 等项目。
电源总成	英杰电气	磁体电源、PSM 电源	产品范围覆盖 PSM 电源、磁控电源、超导电源；公司产品用于 EAST、HL-3 项目。
	爱科赛博	磁体电源、PSM 电源	公司核聚变电源产品覆盖磁体电源和辅助加热电源；曾参与 EAST、DIII-D（美）、HL-2M、HL-3 项目。
	四创电子	PSM 电源	子公司华耀电子（持股约 91%）2024 年中标并交付 EAST 项目 PSM 电源系统（4×400 万元）。
	新风光	磁体电源	等离子体垂直位移快速控制电源曾用于 EAST 装置。
	赛晶科技 H	脉冲电源	子公司瑞士 Astrol 吸纳 ABB 电力电子事业部，脉冲电源曾用于 TAE（美）等，已形成 100kV、数百 kA 的脉冲电源解决方案。
微波和电源器件	旭光电子	真空脉冲功率器件、大功率发射管和失超保护开关等	与国内托卡马克、FRC、惯性约束混合堆等项目密切合作，与瀚海聚能签订战略合作协议；已获聚变领域兆瓦级电子管订单。
	国力股份	真空电容器、氩闸流管、回旋管、速调管	公司的真空电容器产品已经在可控核聚变领域应用；氩闸流管、回旋管、速调管等产品已具备一定技术积累。
	宏微科技	IGBT	与瀚海聚能达成战略合作。
	王子新材	电容	子公司宁波新容（持股 85%）生产的薄膜电容可用于磁体电源；与瀚海聚能签订战略合作协议。
燃料增殖和循环	国光电气	氚工厂	研制 CFETR 排灰气氚燃料内循环演示系统（氚工厂）。
检测设备	皖仪科技	氦质谱检漏仪、真空箱检漏系统	公司为聚变产业联盟理事单位；2025 年 6 月与合肥综合性国家科学中心能源研究院共同成立真空测量设备研发实验室。

资料来源：Wind、各公司公告、各公司官网等、开源证券研究所

表15：2021-2024 年受益标的销售毛利率与销售净利率存在差异

公司代码	公司名称	销售毛利率				销售净利率			
		2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
688122.SH	西部超导	40.8%	39.5%	31.9%	33.6%	25.5%	25.9%	18.4%	19.0%
600105.SH	永鼎股份	10.0%	13.4%	17.3%	16.6%	3.7%	5.4%	2.6%	1.8%
A25019.SH	上海超导	-	24.3%	56.3%	60.7%	-	-77.0%	-5.0%	30.1%
600363.SH	联创光电	14.0%	14.7%	18.2%	18.2%	7.9%	9.9%	12.4%	9.3%
603011.SH	合锻智能	31.5%	30.3%	30.9%	24.7%	5.3%	0.7%	0.9%	-4.3%
688776.SH	国光电气	49.8%	35.0%	30.0%	33.2%	27.9%	18.2%	12.1%	8.8%
000969.SZ	安泰科技	17.1%	16.4%	17.6%	17.5%	4.2%	3.9%	4.2%	5.7%
300820.SZ	英杰电气	42.2%	39.1%	37.2%	38.5%	23.8%	26.4%	24.4%	18.8%
688719.SH	爱科赛博	39.4%	44.1%	45.2%	35.1%	10.5%	12.1%	16.2%	7.4%
600990.SH	四创电子	19.8%	19.5%	18.4%	13.1%	6.0%	2.5%	-28.6%	-15.3%
688663.SH	新风光	28.2%	26.3%	27.6%	23.3%	12.3%	9.8%	9.8%	9.1%
0580.HK	赛晶科技	30.5%	28.5%	31.8%	32.3%	2.0%	2.5%	2.4%	5.3%
600353.SH	旭光电子	22.3%	26.9%	26.7%	22.8%	7.8%	10.5%	8.5%	5.8%
688103.SH	国力股份	40.9%	38.8%	36.5%	29.4%	14.4%	12.3%	9.2%	3.9%
688711.SH	宏微科技	21.6%	20.9%	22.2%	15.4%	12.4%	8.5%	7.6%	-1.7%
002735.SZ	王子新材	20.7%	17.7%	20.1%	16.8%	5.4%	4.0%	4.0%	-3.8%
688776.SH	国光电气	49.8%	35.0%	30.0%	33.2%	27.9%	18.2%	12.1%	8.8%
688600.SH	皖仪科技	50.6%	48.0%	49.0%	46.5%	8.7%	7.5%	5.6%	1.9%

数据来源：Wind、开源证券研究所

表16：2021-2024 年受益标的资产负债率与 ROE 存在差异

公司代码	公司名称	资产负债率				ROE			
		2021	2022	2023	2024	2021	2022	2023	2024
688122.SH	西部超导	37.8%	43.7%	44.3%	46.6%	18.2%	19.0%	12.2%	12.3%
600105.SH	永鼎股份	58.6%	60.6%	62.8%	58.2%	4.7%	7.9%	1.5%	2.1%
A25019.SH	上海超导	-	21.1%	20.8%	24.4%	-	-5.6%	-0.8%	13.3%
600363.SH	联创光电	41.3%	40.1%	39.1%	40.9%	7.4%	7.6%	8.7%	5.9%
603011.SH	合锻智能	43.5%	45.4%	48.6%	52.7%	3.7%	0.7%	0.8%	-4.1%
688776.SH	国光电气	19.5%	22.4%	22.3%	24.5%	15.1%	9.9%	5.0%	2.6%
000969.SZ	安泰科技	40.5%	42.6%	41.3%	42.7%	3.7%	4.4%	5.0%	7.0%
300820.SZ	英杰电气	42.6%	47.3%	44.9%	38.8%	14.0%	25.1%	23.6%	14.2%
688719.SH	爱科赛博	59.9%	55.8%	20.0%	24.9%	21.7%	21.3%	12.6%	4.1%
600990.SH	四创电子	64.6%	63.0%	66.7%	68.3%	7.0%	2.4%	-22.6%	-12.1%
688663.SH	新风光	41.0%	52.7%	53.3%	53.6%	14.4%	11.7%	13.7%	13.1%
0580.HK	赛晶科技	24.3%	23.3%	32.3%	34.2%	0.9%	1.3%	1.7%	5.4%
600353.SH	旭光电子	26.3%	36.2%	38.1%	40.8%	5.0%	7.0%	5.5%	5.8%
688103.SH	国力股份	26.1%	30.6%	45.1%	48.3%	9.5%	8.7%	6.0%	2.7%
688711.SH	宏微科技	31.6%	42.8%	54.1%	58.6%	12.4%	8.5%	11.0%	-1.3%
002735.SZ	王子新材	41.3%	47.2%	38.2%	40.9%	10.2%	8.1%	4.5%	-3.9%
688776.SH	国光电气	19.5%	22.4%	22.3%	24.5%	15.1%	9.9%	5.0%	2.6%
688600.SH	皖仪科技	25.9%	28.3%	35.0%	34.1%	5.6%	5.5%	5.0%	1.7%

数据来源：Wind、开源证券研究所

表17：受益标的盈利预测与估值

公司代码	公司名称	评级	总市值 (亿元)	归母净利润（亿元）				PE				PB (MRQ)	分红 比率	股息 率
				2024A	2025E	2026E	2027E	2024A	2025E	2026E	2027E			
688122.SH	西部超导	未评级	380.7	8.0	10.0	12.1	14.4	47.5	37.9	31.5	26.4	5.6	61%	1.3%
600105.SH	永鼎股份	未评级	146.5	0.6	3.6	1.5	1.9	238.5	40.5	99.8	76.0	4.4	119%	0.8%
600363.SH	联创光电	未评级	292.2	2.4	6.0	7.4	9.6	121.2	48.4	39.4	30.3	6.9	10%	0.1%
603011.SH	合锻智能	未评级	83.2	-0.9	0.4	1.3	2.6	-93.5	224.8	62.1	32.2	3.9	-	-
688776.SH	国光电气	未评级	94.5	0.5	1.2	1.7	2.4	200.9	76.1	55.1	39.4	5.1	43%	0.2%
000969.SZ	安泰科技	未评级	147.0	3.7	3.5	4.1	4.8	39.5	42.6	35.9	30.5	2.6	56%	1.4%
300820.SZ	英杰电气	未评级	114.1	3.2	4.3	5.2	6.6	35.3	26.7	22.0	17.2	4.7	27%	0.8%
688719.SH	爱科赛博	买入	46.2	0.7	1.0	1.4	1.8	63.2	48.5	33.1	25.5	2.7	30%	0.5%
600990.SH	四创电子	未评级	87.4	-2.5	-0.9	0.8	1.5	-35.6	-94.5	112.1	56.8	4.7	-	-
688663.SH	新风光	未评级	47.5	1.7	-	-	-	27.2	-	-	-	3.4	48%	1.8%
0580.HK	赛晶科技	未评级	27.9	1.0	1.4	2.2	3.3	25.2	19.9	12.7	8.6	-	-	1.1%
600353.SH	旭光电子	未评级	134.9	1.0	1.7	2.1	2.8	131.6	79.3	64.1	48.9	7.3	49%	0.4%
688103.SH	国力股份	未评级	63.5	0.3	1.2	2.1	3.0	210.0	52.7	30.5	21.0	5.7	66%	0.3%
688711.SH	宏微科技	未评级	59.0	-0.1	0.1	0.5	1.0	-407.7	509.3	124.9	60.5	5.7	-	-
002735.SZ	王子新材	未评级	61.9	-0.7	1.5	2.5	3.6	-90.4	41.8	24.7	17.2	3.6	-7%	0.1%
688776.SH	国光电气	未评级	94.5	0.5	1.2	1.7	2.4	200.9	76.1	55.1	39.4	5.1	43%	0.2%
688600.SH	皖仪科技	未评级	31.8	0.1	0.6	0.9	1.2	220.7	51.5	36.1	27.1	4.3	87%	0.4%

数据来源：Wind、开源证券研究所

注：选取 2025 年 8 月 26 日收盘价；盈利预测均来自于 Wind 一致预期；分红比率取 2024 年度数据。

6、风险提示

商业化进度不及预期：当前磁约束核聚变装置距离持续、稳定、净能量输出仍存在工程挑战，若长期无法实现工程意义上的高能量增益，商业化前景可能受到质疑，从而影响投资积极性，进而影响相关产品需求。

资金投入不及预期：虽然全球范围内不断有私营资本加入可控核聚变投资，但当前国内外在建的磁约束核聚变装置投资仍由公共资金主导，如果公共资金投资不及预期，将会影响产业发展，进而影响相关产品需求。

技术路线变化风险：当前可控核聚变行业仍处于较为初期的研究验证阶段，从核聚变技术路线到设备环节的选择均有较大的不确定性，如果技术路线发生变更，相关公司的产品需求可能受到较大影响。

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已于2017年7月1日起正式实施。根据上述规定，开源证券评定此研报的风险等级为R4（中高风险），因此通过公共平台推送的研报其适用的投资者类别仅限定为专业投资者及风险承受能力为C4、C5的普通投资者。若您并非专业投资者及风险承受能力为C4、C5的普通投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研报中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师承诺

负责准备本报告以及撰写本报告的所有研究分析师或工作人员在此保证，本研究报告中关于任何发行商或证券所发表的观点均如实反映分析人员的个人观点。负责准备本报告的分析师获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户的反馈、竞争性因素以及开源证券股份有限公司的整体收益。所有研究分析师或工作人员保证他们报酬的任何一部分不曾与，不与，也将不会与本报告中具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

股票投资评级说明

	评级	说明
证券评级	买入（Buy）	预计相对强于市场表现 20%以上；
	增持（outperform）	预计相对强于市场表现 5%~20%；
	中性（Neutral）	预计相对市场表现在-5%~+5%之间波动；
	减持（underperform）	预计相对弱于市场表现 5%以下。
行业评级	看好（overweight）	预计行业超越整体市场表现；
	中性（Neutral）	预计行业与整体市场表现基本持平；
	看淡（underperform）	预计行业弱于整体市场表现。

备注：评级标准为以报告日后的 6~12 个月内，证券相对于市场基准指数的涨跌幅表现，其中 A 股基准指数为沪深 300 指数、港股基准指数为恒生指数、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）、美股基准指数为标普 500 或纳斯达克综合指数。我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议；投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者应阅读整篇报告，以获取比较完整的观点与信息，不应仅仅依靠投资评级来推断结论。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

法律声明

开源证券股份有限公司是经中国证监会批准设立的证券经营机构，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告仅供开源证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的机构或个人客户（以下简称“客户”）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给开源证券客户的，属于商业秘密材料，只有开源证券客户才能参考或使用，如接收人并非开源证券客户，请及时退回并删除。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他金融工具的邀请或向人做出邀请。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。客户应当考虑到本公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。本公司未确保本报告充分考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。本公司建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。若本报告的接收人非本公司的客户，应在基于本报告做出任何投资决定或就本报告要求任何解释前咨询独立投资顾问。投资者应自主作出投资决策并自行承担投资风险，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。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的开源证券网站以外的地址或超级链接，开源证券不对其内容负责。本报告提供这些地址或超级链接的目的纯粹是为了客户使用方便，链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

开源证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。开源证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

本报告的版权归本公司所有。本公司对本报告保留一切权利。除非另有书面显示，否则本报告中的所有材料的版权均属本公司。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

开源证券研究所

上海

地址：上海市浦东新区世纪大道1788号陆家嘴金控广场1号楼3层
邮编：200120
邮箱：research@kysec.cn

深圳

地址：深圳市福田区金田路2030号卓越世纪中心1号楼45层
邮编：518000
邮箱：research@kysec.cn

北京

地址：北京市西城区西直门外大街18号金贸大厦C2座9层
邮编：100044
邮箱：research@kysec.cn

西安

地址：西安市高新区锦业路1号都市之门B座5层
邮编：710065
邮箱：research@kysec.cn