

# 未来产业投资地图系列之“可控核聚变”

分析师：黎韬扬

litaoyang@csc.com.cn

SAC 编号：S1440516090001

分析师：汪正鑫

wangzhengxin@csc.com.cn

SAC编号：S1440525040001

发布日期：2026年07月14日

## 摘要：可控核聚变是人类理想的终极能源，产业链上中下游共同推进产业发展

- **核心观点：**可控核聚变因其能量密度极高、原料近乎无限、安全清洁等特性，被视为人类理想的终极能源。全球主要国家已突破科学可行性验证，正加速向工程可行性及商业化迈进，标志性装置不断刷新参数，氘氘、氘氘、氘氘3、氢硼燃料各具优势，托卡马克、仿星器、FRC等技术路径齐头并进。中国已将可控核聚变纳入“未来能源”体系，2025年首次入法、2026年首次单独写入五年规划，政策支持力度显著增强。产业链方面，上游超导材料、面向等离子体材料及氘燃料循环存在核心挑战，中游磁体系统、真空室、偏滤器、包层、电源、氘工厂等部件尤为关键，下游环节美国以商业聚变公司为主，中国科研院所与商业公司同步推进示范堆建设。
- **可控核聚变具有能量密度高、原料易得、清洁低碳及固有安全性等显著优势。**实现聚变能需要满足“劳森判据”，能量增益因子 $Q \geq 10$ 被视为商业化的门槛。当前主流技术路线包括磁约束（托卡马克、仿星器）、惯性约束及磁惯性混合约束，其中托卡马克工程成熟度最高，ITER装置正验证科学及部分工程可行性；仿星器天然适合稳态运行，惯性约束单脉冲能量密度高，场反位形（FRC）则朝向紧凑、低成本方向发展。行业目前处于科学可行性已验证、正向工程可行性迈进的阶段，面临等离子体稳态燃烧、堆芯材料耐辐照、氘自持等核心挑战。
- **产业链上游材料、中游核心设备及系统等高价值环节挑战与机遇并存。**上游燃料（氘、氘、锂-6等）、磁体材料（低温超导NbTi/Nb<sub>3</sub>Sn及高温超导REBCO）、堆内材料（面向等离子体材料如钨，结构材料如低活化钢，氘增殖材料及中子倍增材料等）均面临挑战。中游主机系统包括磁体、真空室、偏滤器、产氘包层、冷屏及杜瓦；关键支撑系统涵盖加热与电流驱动（中性束注入、电子/离子回旋共振及低杂波）、低温系统、电源系统、燃料循环系统、测量诊断与控制系统、遥操系统等；能量提取与发电系统负责热-电转换。托卡马克和仿星器装置中磁体价值占比较高，FRC及Z-FFR装置中电源系统尤为重要。
- **可控核聚变发电可期，多个国家目标在2030—2050年间建成示范堆（DEMO）并实现并网发电。**全球私营聚变公司数量及投资额快速增长，美国对商业聚变公司的投资领先，中国自2022年起明显加大力度，目前院所与商业公司同步推进，综合来看，中国聚变堆有望在2045年前后进入示范阶段，2050年前后实现商业化发电。

# 目录

- **01. 可控核聚变行业简介：人类理想的终极能源，能量密度高且原料易得**
- **02. 可控核聚变产业链：材料、核心部件、总装运营，共同构成产业链核心部分**
- **03. 上游环节分析：燃料、磁体材料及堆内材料均存在一定挑战**
- **04. 中游环节分析：包括主机系统、关键支撑系统、能量提取与发电系统、燃料循环系统等**
- **05. 下游环节分析：院所与商业公司发挥各自优势，开展总装及发电运营**
- **06. 风险提示**

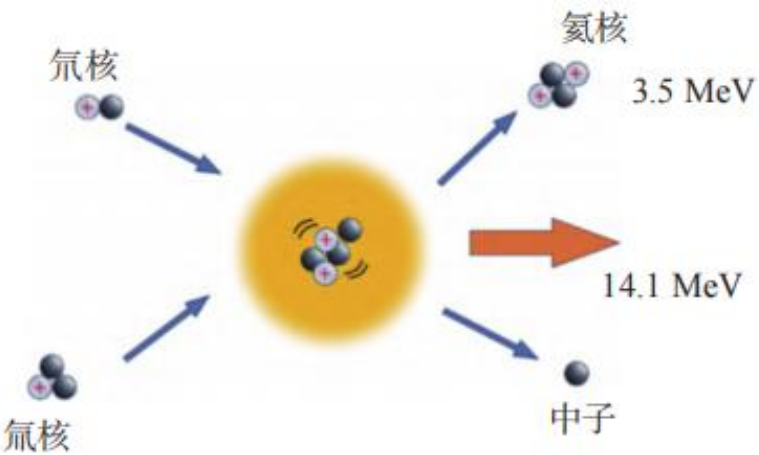
# PART 1

可控核聚变行业简介：  
人类理想的终极能源，能量密度高且原料易得

Part1.1 可控核聚变定义及原理

- 核聚变是在一定条件下（超高温、高压），由质量较小的原子核互相聚合生成新的质量更重的原子核，同时释放出巨大的能量的反应。
- 核聚变类型主要有4种：氘-氚（D-T）聚变、氘-氦3（D-3He）聚变、氢-硼（p-11B）及氘-氘（D-D）聚变。
- 现有理论和实验研究均表明，氘氚聚变是最容易获得聚变能的方式，也是当前实现可控核聚变的最为可行的发展路线。

氘-氚聚变示意图



主流聚变燃料体系关键物理参数对比

| 燃料类型               | 核心反应式                              | 特点                                                                 | 三乘积阈值               |
|--------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 氘氚/DT              | $D+T\rightarrow 4He+n+17.6MeV$     | 反应截面最大、点火温度最低、技术验证最充分；但高能中子引发结构材料活化、氚自持循环复杂、锂增殖包层工程难度大、锂资源有限、防护成本高 | $5.0\times 10^{21}$ |
| 氘氘/DD              | $D+D\rightarrow 3He+n+3.27MeV$     | 资源无限（海水提氘）、放射性极低、产物可循环利用；但反应截面小、点火难、能量效率低、燃料循环复杂、工程实现难度呈指数级增长      | $1.2\times 10^{24}$ |
| 氘氦-3/D- $^3He$     | $D+^3He\rightarrow 4He+p+18.3MeV$  | 无中子、零活化、质子直接发电效率高、维护成本低；但反应截面小、点火难、 $^3He$ 地球储量不足、月壤开采尚处于概念阶段      | $8.5\times 10^{23}$ |
| 质子硼-11/p- $^{11}B$ | $p+^{11}B\rightarrow 3^4He+8.7MeV$ | 理论上零中子、零放射性、硼资源丰富、装置可小型化；但反应截面极小、点火极难、当前任何加热手段均无法企及                | $5.0\times 10^{24}$ |

Part1.2 可控核聚变被称为人类理想的终极能源

- 可控核聚变被称为人类理想的终极能源，具有能量密度高、原料易得、安全性高、清洁低碳的特点。
- 能量密度高：燃烧1千克氘(D)相当于四千克铀-235，相当于七千吨汽油或者一万吨煤，也就是说“燃烧”1千克海水和燃烧210千克（300升）汽油所获得能量相当。
- 原料易得：每公斤海水含氘（D）0.03g，即使考虑能源消耗水平逐年增加，地球上的D也足以用上几百亿年；氚(T)可以通过中子轰击锂-6得到。
- 安全性高：不产生高放射性核废物，发生事故时核反应会迅速终止。
- 清洁低碳：不产生温室气体。

核聚变与其他发电方式优势对比

| 技术     | 评估标准 | 基荷供电 | 工业供热 | 制氢/电制燃料 | 利用率 | 土地占用 | 电网扩建 | 温室气体排放 | 环境影响 | 安全性 |
|--------|------|------|------|---------|-----|------|------|--------|------|-----|
| 聚变能    |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 太阳能    |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 风能（海上） |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 风能（陆上） |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 水电     |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 生物质能   |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 煤炭     |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 天然气    |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 核裂变    |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |
| 储能     |      |      |      |         |     |      |      |        |      |     |

有利 中等 不利

世界能源近似估计（1ZJ=10<sup>21</sup>J）

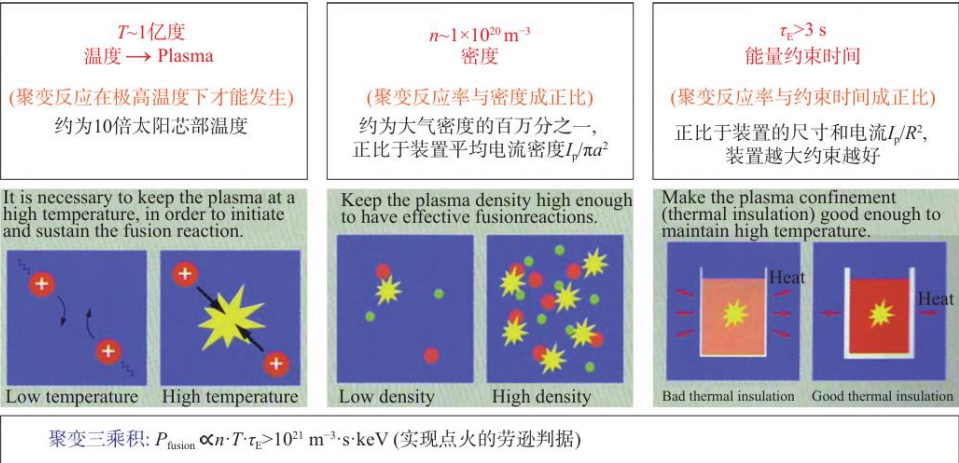
| 能源类别      | 可经济开发的（ZJ） | 储量（ZJ）                | 能源类别  | 技术潜力（ZJ/年） |
|-----------|------------|-----------------------|-------|------------|
| 化石能源      |            |                       | 可再生能源 |            |
| 煤         | 20         | 290-440               | 生物质能  | 0.16-0.27  |
| 石油        | 9          | 17-23                 | 地热能   | 0.8-1.5    |
| 天然气       | 8          | 50-130                | 水能    | 0.06       |
| 核裂变能      |            |                       | 太阳能   | 62-280     |
| U238+U235 | 260        | 1300                  | 风能    | 1.3-2.3    |
| Th232     | 420        | 4000                  | 海洋能   | 3.2-11     |
| 核聚变能      |            |                       |       |            |
| 海水中锂      |            | 1.40×10 <sup>10</sup> |       |            |
| 陆地上锂      |            | 1700                  |       |            |
| 氘         |            | 1.60×10 <sup>10</sup> |       |            |

Part1.3 聚变三乘积和能量增益因子Q是可控核聚变的关键指标

- 聚变三乘积和能量增益因子Q是可控核聚变的关键指标。
- 聚变三乘积：氢弹作为武器已实现了不可控核聚变，但要作为能源使用，就必须实现能量可控制地缓慢释放，核聚变需要苛刻的反应条件，要求等离子体温度、粒子密度和约束时间的乘积必须大于某个特定值，并在三者之间找到合适的均衡点，即“劳森判据”，也称为聚变三乘积。氘氘聚变的理想温度约为1亿度至2亿度，学术界认为聚变三乘积大于 $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ 时，聚变输出的功率才能大于等于输入功率，达到点火条件。
- 能量增益因子Q：聚变反应中输出能量和输入能量之比，Q值大于1的时候，意味着核聚变反应产生了净能量增益。一般认为：当Q值大于5的时候，核聚变反应堆能够自我维持；Q值大于10的时候核电站才能有收益；Q值大于30的时候核聚变发电站可以商业化。一般认为商业聚变堆至少需要Q值达到10。

劳森判据（聚变三乘积）

聚变能源开发的重要里程碑节点



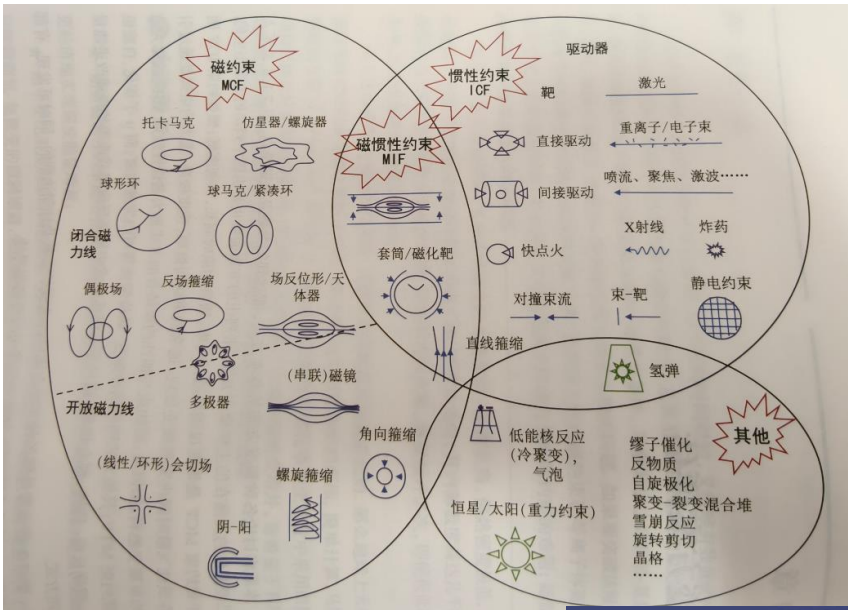
| 评价指标      | 节点 1               | 节点 2               | 节点 3               | 节点 4                |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| 能量平衡      | $Q_{\text{Sci}}=1$ | $Q_{\text{Eng}}=1$ | $Q_{\text{Eng}}=5$ | $Q_{\text{Eng}}=10$ |
| 氦自持       | 数值模拟               | 实验模块               | 扇形切片<br>或全堆        | 全堆                  |
| 可利用率      | <1%                | 25%                | 50%                | 70%                 |
| 耐辐照能力/dpa | —                  | 3~5                | 50                 | 100                 |

注：聚变放能和输入能量相等是能量“得失相当”条件 ( $Q_{\text{Sci}}=1$ )，视为聚变科学可行性的门槛；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 ( $Q_{\text{Eng}}=1$ )，视为聚变工程可行性的门槛；dpa表示平均每个原子离开平衡位置的次数。

## Part1.4 可控核聚变总体分为磁约束、惯性约束和磁惯性约束等技术路线

- 核聚变反应对于温度的要求高，通常要达到上亿摄氏度。在如此高的温度下，气体分子将被完全电离，此时物质以高温等离子体形态存在。为了持续输出反应能量，对于聚变等离子体的有效约束是关键。
- 通常对于此类高温等离子体的约束方式包括磁约束、惯性约束以及磁惯性混合约束等。
- **磁约束：**目前最有前景的实现大规模受控核聚变反应的方法，利用磁场来约束温度极高的等离子体核燃料，目前研究的装置包括托卡马克、仿星器、反向场箍缩及磁镜等。其工程成熟度、数据库完备性与国际合作深度无可替代，但项目周期长、投资规模大、建设成本高。
- **惯性约束：**通常通过高能激光或粒子束将燃料加热并压缩成等离子体，依靠等离子体自身的惯性实现约束。优势在于单脉冲能量密度极高，适用于特殊场景（如聚变—裂变混合堆、空间推进）。
- **磁惯性混合约束：**同时利用外部磁场和等离子体自身的惯性实现约束。绕过传统工程瓶颈，聚焦高价值细分场景。

聚变约束的不同途径



核聚变主要技术路线对比

|        | 托卡马克/磁约束                         | 仿星器/磁约束                    | 激光/惯性约束                          | 场反位形/混合约束                        |
|--------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 场景     | 大容量基荷供电，规模化电站                    | 大容量稳态运行，基荷供电               | 军民两用，脉冲式供能                       | 模块化、分布式中小型供电                     |
| 优势     | 技术最成熟；产业链完整；当前三乘积阈值高             | 无等离子体破裂风险；材料寿命潜力大          | 单脉冲能量高；磁体简单                      | 装置紧凑、成本低；直接发电效率高                 |
| 劣势     | 装置大造价高；等离子体破裂风险；偏滤器热负荷、材料损伤      | 制造难度极高；参数提升慢；成本高、建设周期长     | 全系统效率低；靶丸加工注入难；高重频难；工程化难         | 脉冲运行；重频可靠性待验证；控制精度要求极高           |
| 已实现三乘积 | $1.53 \times 10^{21}$            | $1.1 \times 10^{20}$       | $1 \times 10^{22}$               | $2.3 \times 10^{17}$             |
| 当前Q值   | $Q_{\text{plasma}} \approx 0.67$ | $Q_{\text{plasma}} < 1$    | $Q_{\text{target}} \approx 4.13$ | $Q_{\text{plasma}} \approx 1.07$ |
| 工程化Q值  | $Q_{\text{plasma}} \geq 10$      | $Q_{\text{plasma}} \geq 8$ | $Q_{\text{target}} \geq 20$      | $Q_{\text{plasma}} \geq 2-3$     |

- 混合堆具体又可分为磁约束聚变-裂变混合堆和惯性约束聚变裂变混合堆，后者以Z箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆（Z-FFR）为代表。

The diagram illustrates the ITER tokamak system, showing the fusion process, neutron and tritium breeding, and energy extraction systems. Key components and processes include:

- Fusion Process:** A fusion target (聚变靶) is heated by a laser (激光) to produce a fusion reaction, releasing 1.5 GJ of energy at 0.1 Hz. The reaction produces charged particles (带电粒子) and neutrons (中子).
- First Wall and Breeding Zone:** The first wall (第一壁) and breeding zone (增殖区) are shown. The breeding zone contains tritium (氚) and fission products (裂变产物). The breeding zone is divided into a breeding zone (增殖区) and a fission zone (裂变区).
- Neutron and Tritium Breeding:** Neutrons from the fusion process are used to breed tritium (氚) and fission products. The breeding zone contains tritium (氚) and fission products (裂变产物). The breeding zone is divided into a breeding zone (增殖区) and a fission zone (裂变区).
- Energy Extraction System:** The energy extraction system (能量传输系统) is shown, which converts the energy from the fusion process into electricity. The system is divided into a tritium extraction system (提氚系统) and a tritium breeding system (增殖系统).
- Operating Conditions:** The system operates at 15.5 MPa and 323 °C H<sub>2</sub>O, and 15.9 MPa and 281 °C H<sub>2</sub>O.

Part1.6

可控核聚变面临三大科学技术难题和三大工程应用难题

■ 可控核聚变目前面临三大科学技术难题和三大工程应用难题。

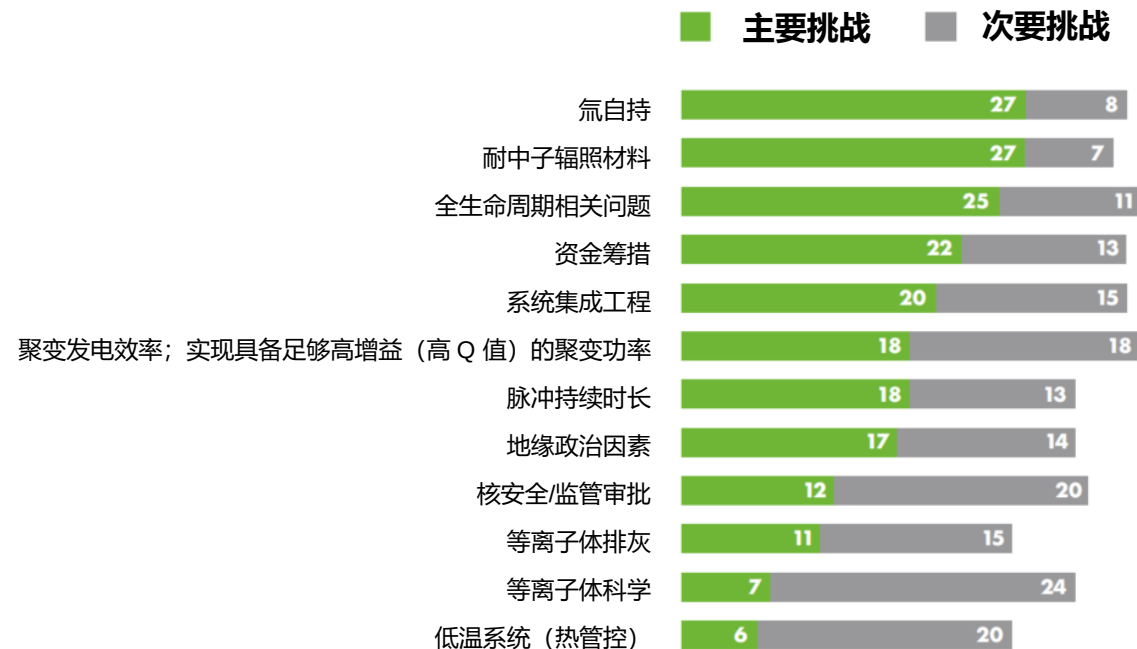
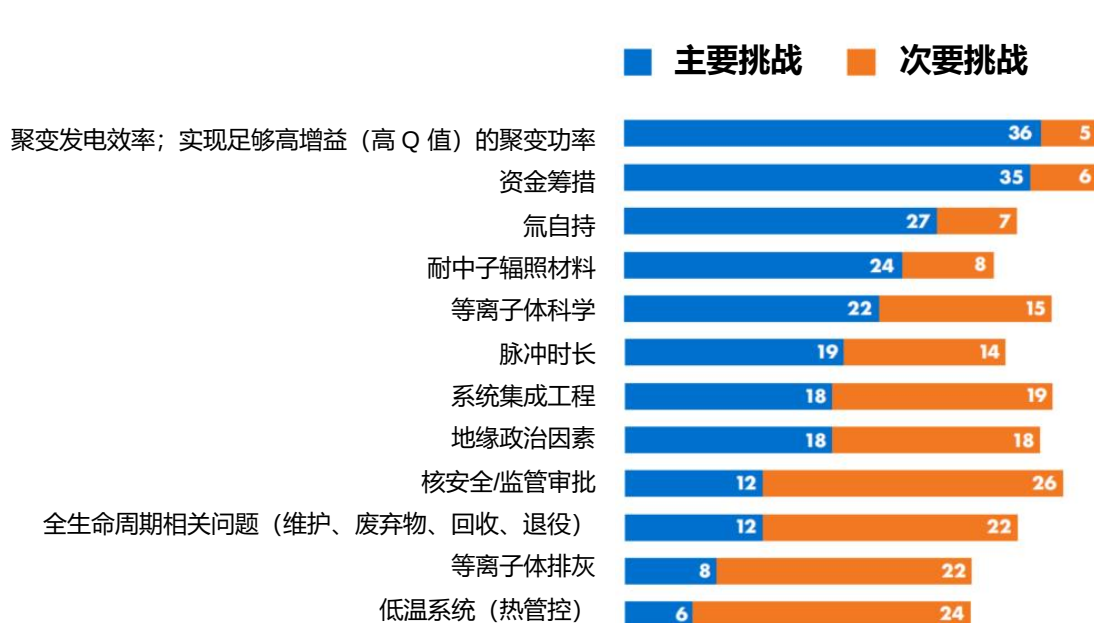
可控核聚变面临的科学技术和工程应用难题

|      | 具体挑战                                                                                       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 科学技术 | 等离子体稳态自持燃烧：需要重点攻克等离子体加热约束、α 粒子输运损耗、非感应电流驱动、宏观不稳定性调控等核心科学问题。                                |
|      | 聚变堆结构材料：堆芯第一壁、包层、偏滤器等关键部件需耐受高能聚变中子辐照与高热负荷工况，聚变中子诱发的氦脆效应易造成材料损伤，亟须研发抗辐照、耐高温、低活化的专用结构材料。     |
|      | 氚增殖与自持循环：现阶段燃烧率偏低，氚循环处理量大，包层设计需要统筹中子核反应与热工水力特性，且高温环境下氚渗透风险突出，需要构建规模化、高效率氚回收处置体系，合理控制氚库存规模。 |
| 工程应用 | 大型强场磁体技术：高温超导是实现强磁场的核心，已成为各国研发主流，但在机械应力、失超保护等方面仍需开展系统集成验证。                                 |
|      | 等离子体运行与控制：聚变堆具有多参数强耦合、运行工况严苛等特点，易发生等离子体破裂停机，亟须应用 AI 等技术开展破裂预判与应急调控，保障等离子体长期稳定运行。           |
|      | 能量的传导与转化：它包括脉冲能量平稳发电、冷却剂工程适配、氚渗透与放射性包容设计、高功率能量转换装备研制等多个方面。                                 |

## Part1.7 可控核聚变2030年前和2030年后面临的主要挑战

- 2030年前，可控核聚变面临的重大挑战主要是高Q值、资金投入以及氦自持；2030年后，预计重大挑战主要为氦自持、耐中子辐照材料和全生命周期工程。

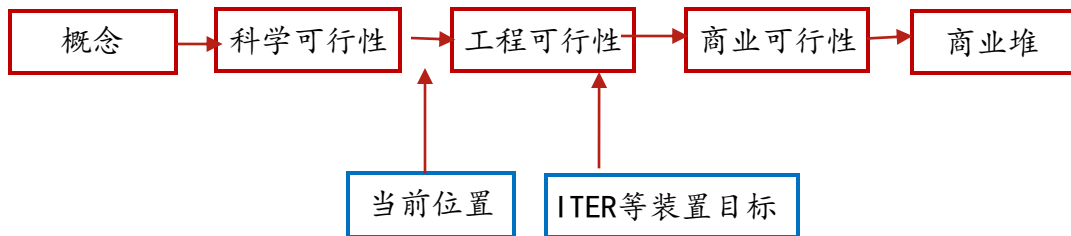
可控核聚变2030年前（左）和2030年后（右）面临的主要挑战



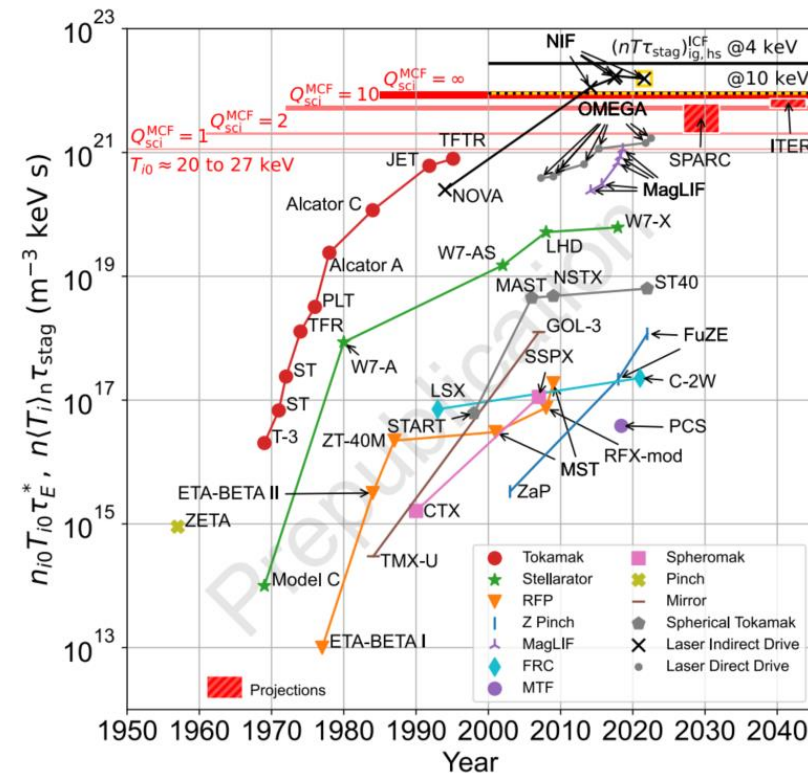
## Part1.8 可控核聚变产业正在加速从科学研究向工程示范迈进

- 可控核聚变的研究可分为概念可行性、科学可行性、工程可行性和商业可行性、商业堆五大阶段。聚变能源的概念可行性已得到验证，英国JET、美国TFTR和日本的JT60U的实验基本实现了接近氘氘聚变的能量得失相当条件，验证了科学可行性，以ITER为代表的装置将进一步验证科学可行性，同时部分验证工程可行性。后续的DEMO装置将验证聚变电站的商业可行性，为最终的商业堆打下基础。
- 当前核聚变能正在加速从科学研究向工程示范迈进。

当前聚变能源研究所处阶段



全球聚变装置实现的聚变三乘积情况



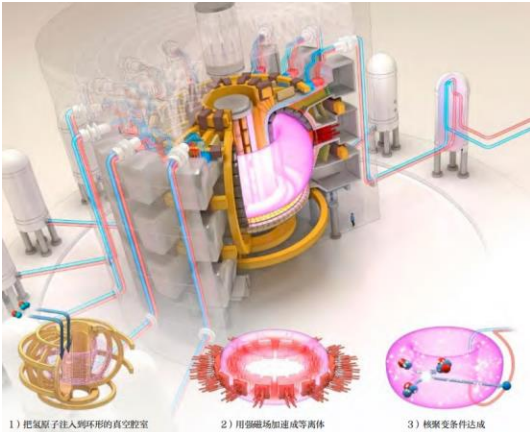
# PART 2

可控核聚变产业链：  
材料、核心部件、总装运营，共同构成产业链核心部分

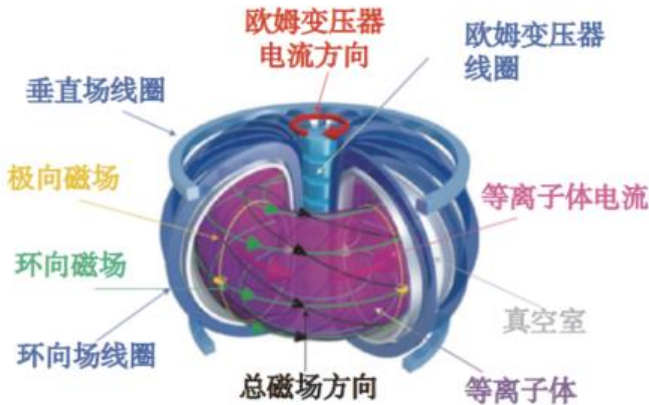
Part2.1 不同类型的可控核聚变装置组成——托卡马克

- 托卡马克磁约束聚变为国际的主流技术路线，其可行性得到了验证。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）这4个单词的组合，由位于苏联库尔恰托夫研究所的Artsimovich等人在20世纪50年代提出，因其具有环向等离子体电流，所以也被称为环流器。托卡马克通过在环形真空室中构造出一个闭合的螺旋磁场，完成对高温等离子体的约束，聚变燃料在周而复始的运动中完成核聚变反应。
- 托卡马克的约束性能很大程度上取决于装置的直径R和磁场强度B，因此大尺寸/强磁场是关键。增大装置尺寸一定程度上与经济性原则背离，增强磁场需要通过增大电流来实现，为了减少电流的热效应，需要采用超导磁体，其可进一步分为低温超导和高温超导两大类。
- 托卡马克装置主要由堆芯部件（主机系统）、关键支撑系统、能量提取与发电系统、堆燃料循环系统等组成。

托卡马克磁约束装置原理图



现代托卡马克物理模型



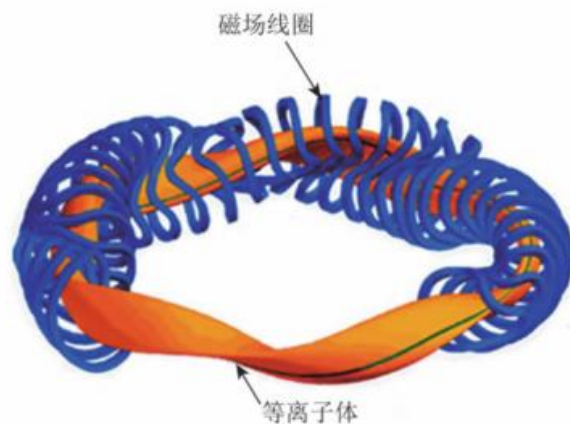
托卡马克装置主要组成

| 主要系统      | 分系统及核心零部件                              |
|-----------|----------------------------------------|
| 堆芯部件      | 磁体、真空室、偏滤器、产氦包层、冷屏与杜瓦                  |
| 关键支撑系统    | 加热与电流驱动系统、测量（诊断）与控制系统、真空系统、低温系统、遥操系统   |
| 能量提取与发电系统 | 一回路、二回路、中间储能回路                         |
| 堆燃料循环系统   | 内循环系统、产氦包层与外循环系统、水除氦系统、氦安全及包容系统、氦测量与计量 |

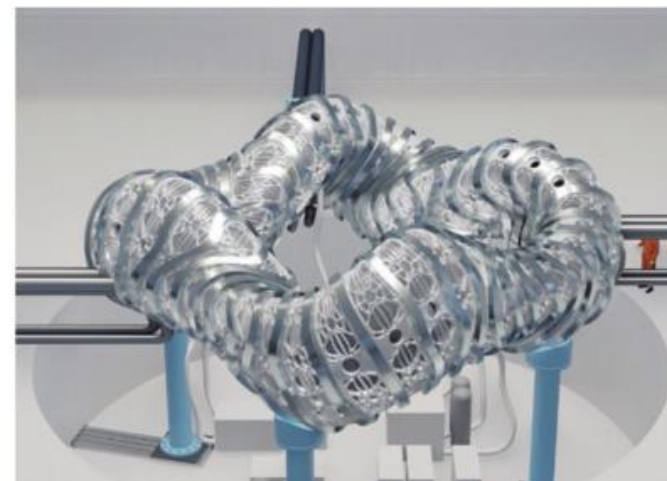
## Part2.2 不同类型的可控核聚变装置组成——仿星器

- 仿星器是磁约束技术路线的重要分支之一，天然适合稳态运行。托卡马克装置需要大电流驱动，不稳定性高，容易引起电流大破裂，对装置产生较大破坏。仿星器通过复杂的三维线圈产生扭曲的三维磁场结构对等离子体进行约束，其等离子体电流可以很小，无大电流破裂问题，天然适合稳态运行。
- 仿星器装置结构基本与托卡马克装置类似，区别在于磁体与真空室的三维结构极为复杂，对加工精度要求极高。

仿星器磁体及等离子体示意图



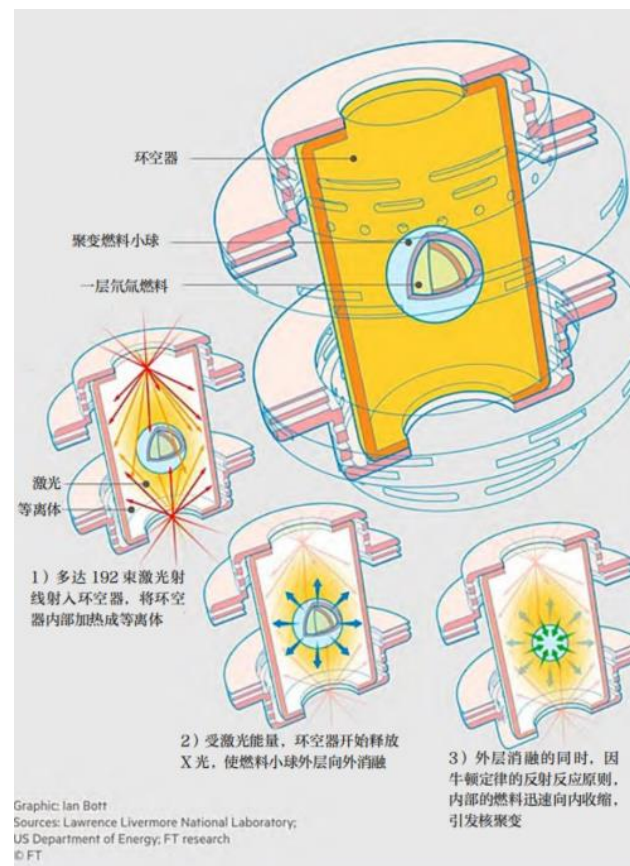
Infinity one仿星器装置概念图



## Part2.3 不同类型的可控核聚变装置组成——惯性约束

- 惯性约束是利用外壳的惯性限制聚变规模，通过内爆对热核燃料进行压缩，使其达到高温高密度条件，进而实现热核点火并燃烧，其中最有名的是用激光作为驱动源的惯性约束。优势在于单脉冲能量密度极高，适用于特殊场景（如聚变—裂变混合堆、空间推进）。
- 惯性约束装置主要由环空器、聚变燃料小球、激光器等部分组成。

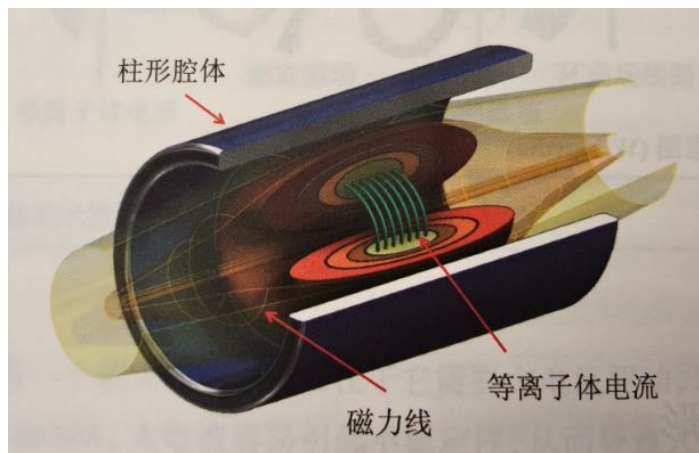
惯性约束装置原理图



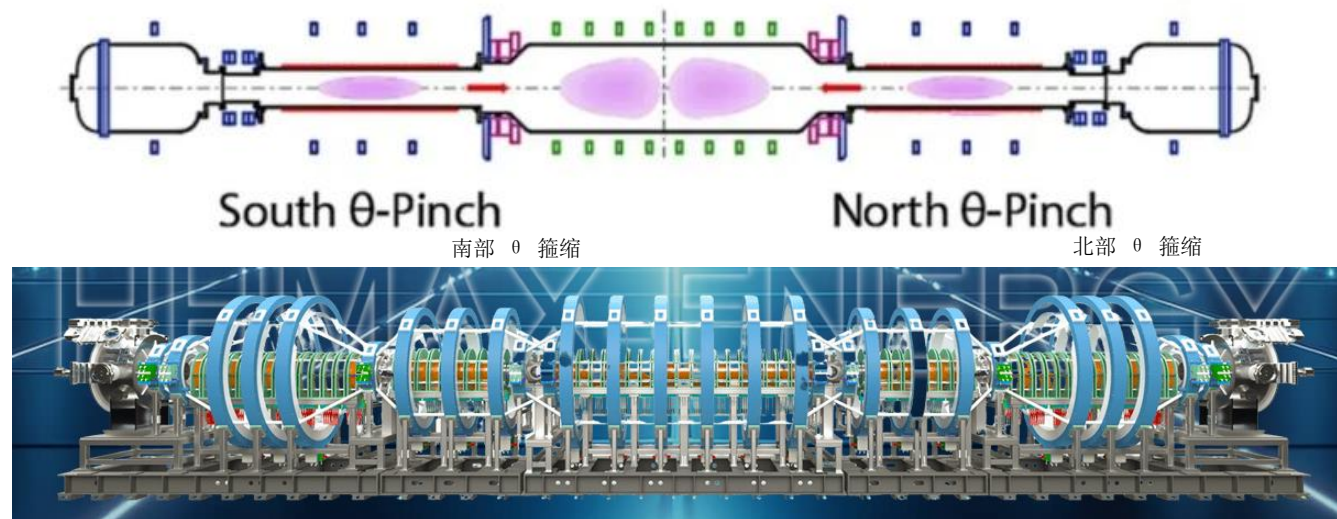
## Part2.4 不同类型的可控核聚变装置组成——FRC

- 场反位形（FRC）聚变装置是一种直线型装置，其本底磁场由磁镜或 $\theta$ 箍缩提供，同时通过内部反向的等离子体电流，产生反向磁场，使得中心区域形成闭合磁面从而比磁镜更好地约束等离子体。FRC装置具有高比压、易转移、可直接发电等优点，系统结构相对简单、造价与运行成本低、商业化潜力大。
- FRC装置主要由主机系统、电源系统、关键支撑系统等组成，电源系统在FRC装置中的重要性极高。
- 基于FRC发展出的磁惯性约束综合了磁约束和惯性约束的优点，达到聚变三乘积所需的密度和约束时间处于二者之间。

FRC原理示意图

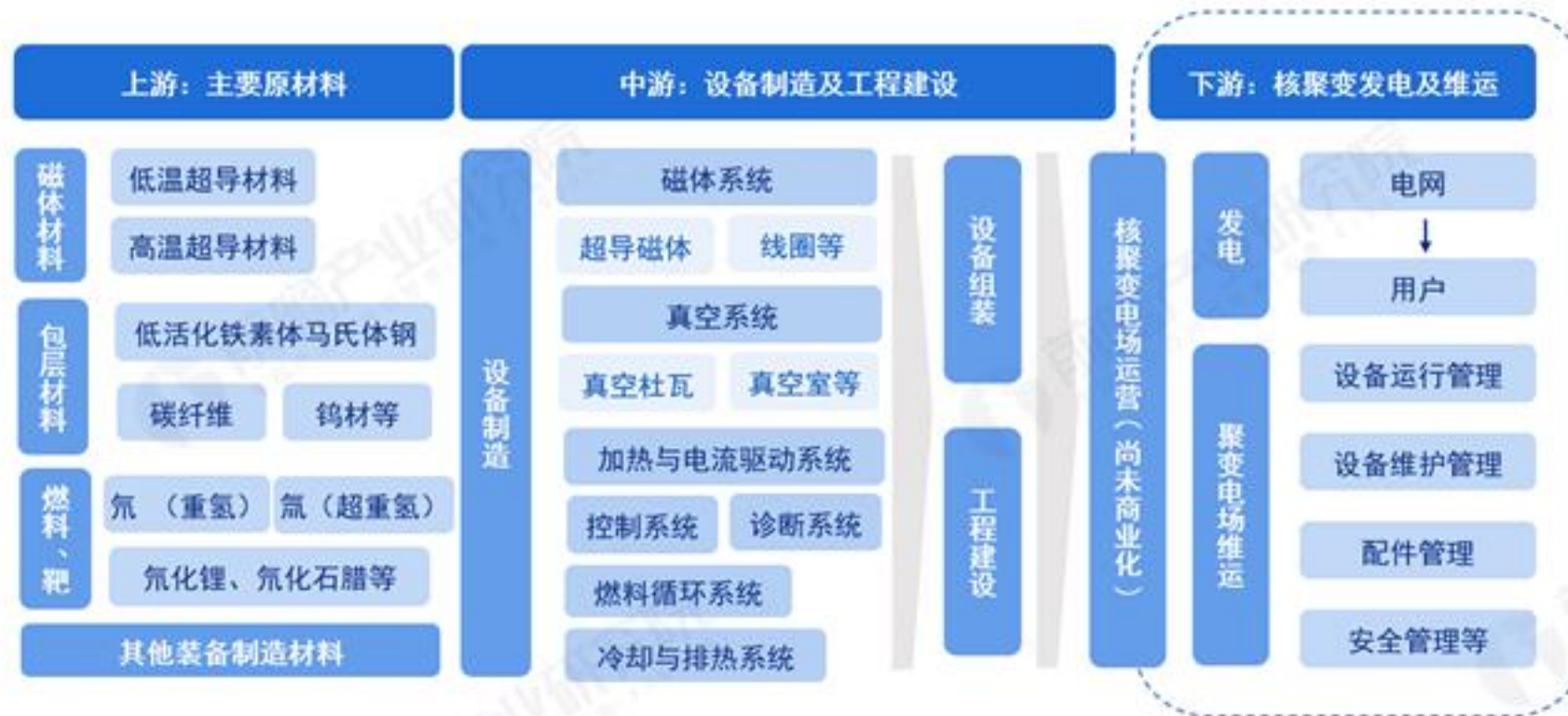


FRC装置示意图



## Part2.5 可控核聚变产业链总体结构

- 可控核聚变产业链上游主要为各类原材料，包括超导磁体材料、金属钨、钼等稀有金属、特种钢材、氘和氚等燃料等。中游主要为各类设备以及反应堆工程建设，以最常见的托卡马克核聚变实验装置为例，相关设备包括磁体系统、真空系统(包括偏滤器、第一壁)、加热与电流驱动系统等核聚变主机设备以及压力容器、蒸汽发生器、汽轮机、各类泵阀等其他设备。下游主要为核电站运营，用于科研及发电。

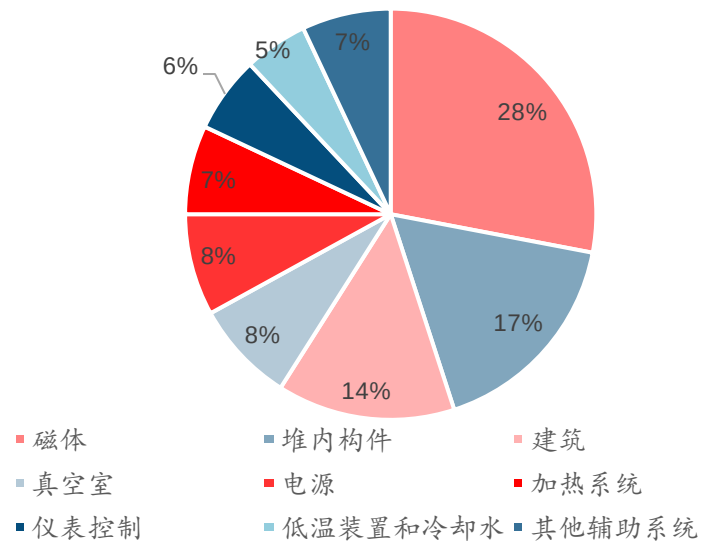


资料来源：前瞻产业研究院，中信建投

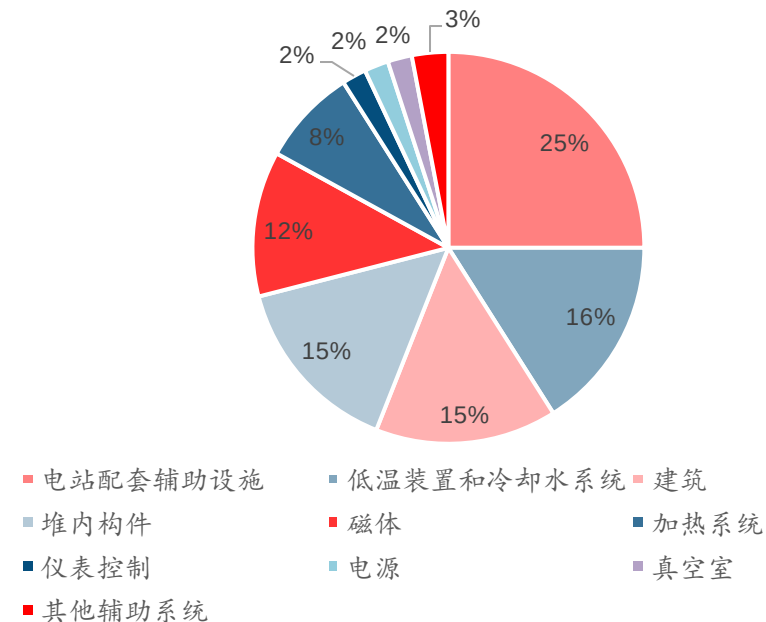
## Part2.6 可控核聚变产业链价值分布

- 对于低温超导托卡马克装置，实验堆阶段，以ITER为例，超导磁体的投入占比最高，达到28%，其次是堆内构件，占比17%，真空室和电源各占8%，加热系统占7%；示范堆阶段，以DEMO为例，占比最高的是电站配套辅助设施，达到25%，主机系统中价值占比最高的为低温装置和冷却水系统、堆内构件、磁体，分别占16%、15%、12%，真空室和电源占比下降到2%。
- 对于高温超导托卡马克装置，磁体价值占比预计有所提高，其余部分价值占比有所缩减。
- 对于FRC以及Z-FFR装置，电源系统及其内部的电容和开关尤为重要，预计电源系统价值占比高。

ITER预计投入占比情况（排除工程成本）



DEMO预计投入占比情况（排除工程成本）



## Part2.7 从不同维度筛选可控核聚变产业链企业

- 1. 从不同技术路线角度，建议关注聚变三乘积、 $Q$  值等核心参数的实现情况。因当前可控核聚变技术路线尚未收敛，磁约束托卡马克、仿星器、FRC、惯性约束等技术路线各具优势，托卡马克实验验证最充分，但装置体积大，投资成本高，更适合国央企开展相关工作，仿星器更适合长期稳态运行，FRC具备低投资门槛优势，适合民营企业快速迭代。相关技术路线头部企业均大力推动装置建设及技术验证，整体来看各条技术路线的首要挑战均为攻克 $Q>1$ 难题，因此需密切关注各技术路线聚变三乘积的实现情况，若某条技术路线实现突破，有望最快获得市场认可。
- 2. 从不同产业链环节角度，当前处于实验堆、工程验证堆阶段，上游建议重点关注超导材料和面向等离子体材料，中游聚焦高价值量/低国产化率核心部件，对于托卡马克和仿星器，对应超导磁体、真空室、堆内构件及辅助加热系统、低温装置等，对于FRC、惯性约束聚变堆/混合堆，主要对应电源系统；若行业逐步过渡到DEMO或商业电站阶段，建议重点关注氦燃料循环系统、诊断控制、遥操运维等稳态运营及维护方向。
- 从公司核心团队的角度，重点关注研发、管理、商业化和融资能力：当前国内外可控核聚变人才稀缺，兼具等离子物理理论、大装置工程落地、产业化运营复合背景的专家是核心壁垒，优先选择核心团队来自国内外头部科研机构/企业，如等离子体所、西物院等院所且拥有完整装置建造经验的团队。商业化方面，关注链主企业招投标后配套企业的订单获取情况或长期框架协议；融资能力上，优先关注获得科技巨头、能源巨头、产业基金大额战略投资标的。

# PART 3

上游环节分析：  
燃料、磁体材料及堆内材料均存在一定挑战

## Part3.1 上游燃料：不同聚变燃料优缺点明显

### ■ 各种聚变燃料均有明显优缺点。

- 氘-氘（D-T）聚变最容易维持，且氘的储量丰富，但氘的半衰期只有12.3年，在地球上储量极低，目前主要由重水堆生产，聚变反应堆预计通过中子轰击锂6来产氘。
- 氘-氦3（D-<sup>3</sup>He）聚变反应条件略高于氘-氘，但氦3在地球的储量有限且价格昂贵，后续可能在月球开采氦3。
- 氘-氘（D-D）聚变最大优势在于原料丰富，海水中的氘储量极高且价格低廉，但反应条件比氘-氘高两个数量级。
- 氢-硼（p-<sup>11</sup>B）聚变的优势在于氢和硼的储量丰富，但反应条件严苛，不考虑辐射的情况下反应条件比氘-氘聚变高近3个数量级。

### 4种主要的聚变核反应优缺点对比

| 核反应                                         | D-T                   | D-D                   | D- <sup>3</sup> He    | p- <sup>11</sup> B    |
|---------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 中子                                          | 有，14 MeV              | 有，2.45 MeV            | 少                     | 极少                    |
| 氘增殖                                         | 需要                    | 无须                    | 无须                    | 无须                    |
| 最佳聚变温度                                      | 10~30 keV             | 50~100 keV            | 50~100 keV            | 100~300 keV           |
| 反应率<br>( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | $6.0 \times 10^{-22}$ | $5.0 \times 10^{-23}$ | $2.0 \times 10^{-22}$ | $4.0 \times 10^{-22}$ |
| 原料                                          | 稀缺、放射性、管制             | 丰富                    | 稀缺、部分管制               | 丰富、便宜                 |
| 直接发电                                        | 不可                    | 不可                    | 可                     | 可                     |
| 单次反应放能                                      | 17.59 MeV             | 3.27~4.04 MeV         | 18.35 MeV             | 8.68 MeV              |

### 聚变原料价格和大致储量

| 燃料              | 地球储量                         | 价格（美元/g） | 20TW·年所需用量                   | 可供人类使用年数 |
|-----------------|------------------------------|----------|------------------------------|----------|
| 氢               | 地壳丰度<br>$1.4 \times 10^{-3}$ | ~0.01    | $7.6 \times 10^5 \text{ kg}$ | 无限       |
| 氘               | 海水中45万吨                      | ~2       | $7.2 \times 10^6 \text{ kg}$ | 约百亿年     |
| 氚               | 1-10kg                       | ~100万    | $1.1 \times 10^6 \text{ kg}$ | 小于 1 天   |
| 氦3              | 易开采量约<br>500kg               | ~1万      | $1.1 \times 10^6 \text{ kg}$ | 小于 1 天   |
| 锂6              | 约 100 万吨                     | ~1       | $9.8 \times 10^6 \text{ kg}$ | 约百年      |
| <sup>11</sup> B | 地壳丰度<br>$9 \times 10^{-6}$   | ~5       | $8.3 \times 10^6 \text{ kg}$ | 大于百万年    |

资料来源：《聚变点火原理概述》，中信建投

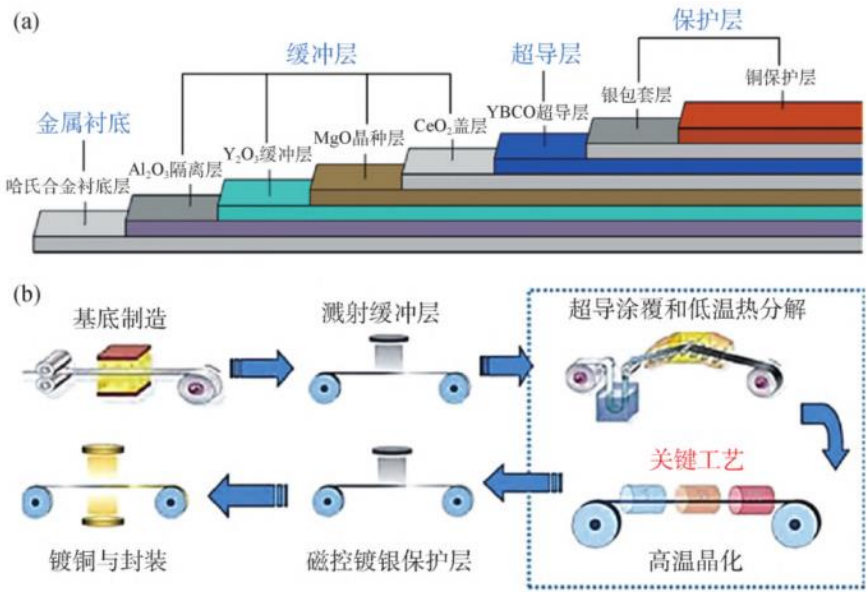
Part3.2 上游磁体材料：高温超导为确定发展方向

- 磁场是磁约束核聚变的最基本需求，通常需要达到数特斯拉，需要通过电流的磁效应实现，为了提高电流密度，需要采用低电阻材料。
- 当前已经建成的绝大多数聚变研究装置采用常规磁体，磁体材料主要为铜及铜合金。未来的聚变装置必须具有稳定的强磁场，以确保能量的增益和聚变功率的提升，对磁体的电流密度提出极高要求，因此需要采用超导材料制备磁体。
- 超导材料分为低温超导材料和高温超导材料，核聚变装置中高温超导为确定发展方向。目前已实现产业化的主要为铌合金超导材料，即 NbTi 和 Nb3Sn，需要在液氦环境（4.2K，即-269℃）下工作，因此使用成本较高。此外，低温超导材料在高场环境下电流密度衰减速度快，目前主要应用于 15T 以下场景；高温超导材料对于工作环境要求较低，如第二代高温超导带材可在液氮环境（77K，即-196℃）下工作，而液氮资源丰富，制备技术成熟，价格远低于液氦，在制冷成本及制冷能耗上具有明显优势。此外，高温超导材料能够提供更高场强的稳定磁场，适配核聚变场景。
- 目前第二代高温超导带材（稀土钡铜氧 REBCO）是综合性能最高、应用最广泛的高温超导材料，广泛应用于高温超导托卡马克装置。

不同超导材料对比

| 类别      | 功能性能                               | 原材料                   | 制备难度                                     | 下游应用领域                 | 使用寿命  | 市场规模                  | 使用效果                     | 使用成本                                      | 商业化情况                |
|---------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------------|------------------------|-------|-----------------------|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------|
| NbTi    | 临界温度 9K，适用 <10T 磁场，优良机械加工性能，稳定超导电性 | 铌、铌、钛、锆、铜等            | 金属复合材料集束拉拔法，工艺成熟，实现大规模生产                 | 医用 MRI、MCZ、核聚变、加速器     | >30 年 | 2024 年全球市场规模约 6 亿美元   | 液氦环境，高电流，适合低磁场高精度设备      | 材料较便宜，6-15 元/米；制冷成本较高，液氦价格 150-300 元/升    | 非常成熟，全球产能万吨级         |
| Nb3Sn   | 临界温度 18K，适用 <15T 磁场，性能优于 NbTi      | 铌、锡、铜等                | 青铜法/内锡法，涉及复杂热处理工艺，脆性较高，成型工艺困难            | 核聚变、NMR                | >30 年 | 2024 年全球市场规模约 4.5 亿美元 | 液氦环境，高电流，适合中磁场高精度设备      | 材料较便宜，30-70 元/米；制冷成本较高，液氦价格 150-300 元/升   | 相对成熟                 |
| Bi-2223 | 临界温度 110K，电流密度高，热/电稳定性好，但临界磁场低     | 银、氧化铋、碳酸铋、碳酸钙、氧化铜等氧化物 | 粉末套管法，工艺较成熟                              | 超导电力                   | >30 年 | 2024 年全球市场规模不足亿元      | 液氮/液氦环境，高电流，适合电力应用       | 材料较昂贵，100-130 元/米；制冷成本较低，液氮价格 1-3 元/升     | 市场规模较小，且逐渐被 REBCO 替代 |
| Bi-2212 | 临界温度 85K，可制各向同性圆线，适合低温高场，机械性能较差    | 氧化铜等氧化物               | 粉末套管法，工艺较 Bi-2223 难                      | 低温高场内插磁体               | >30 年 | 2024 年全球市场规模不足亿元      | 液氮/液氦环境，高电流，国外用作低温高场内插磁体 | 材料较昂贵，100-200 元/米，制冷成本较低，液氮价格 1-3 元/升     | 有限商业化                |
| REBCO   | 临界温度 93K，强磁场载流能力优异                 | 哈氏合金基带、氧化钇、氧化钼、氧化镁等   | 薄膜沉积法，超导层采用 MOD/PLD/MOCVD/RCE 等工艺，制备难度较高 | 核聚变、超导电力、MCZ、加速器、磁悬浮列车 | >30 年 | 2024 年全球市场规模约 7.9 亿元  | 液氮/液氦环境，强电和高场应用均适合       | 材料较昂贵，70-150 元/米（4mm）；制冷成本较低，液氮价格 1-3 元/升 | 受多应用领域牵引，加速发展中       |
| MgB2    | 临界温度 39K，可制各向同性圆线                  | 镁粉末、硼粉末               | 多种工艺路线的拉拔法，工艺较成熟，原材料成本低                  | 医用 MRI、超导电力            | >30 年 | 2024 年全球市场规模不足亿元      | 液氮/液氦环境，低场性能稳定           | 材料较便宜，25-30 万元/吨；制冷成本中等，液氮价格 30-100 元/升   | 有限商业化                |

第二代高温超导带材结构及制备工艺

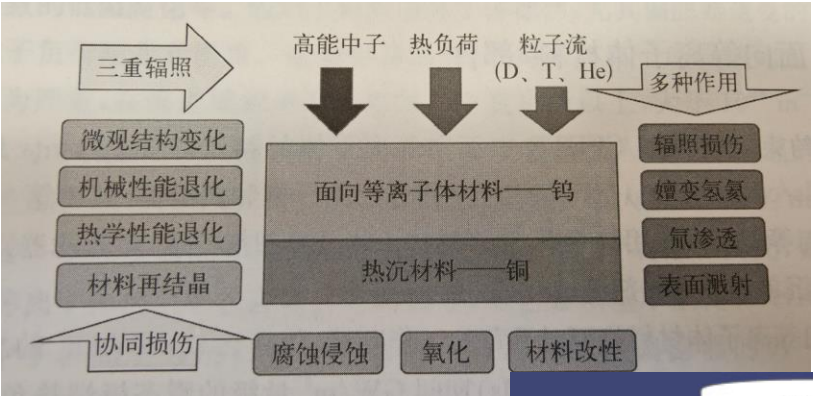
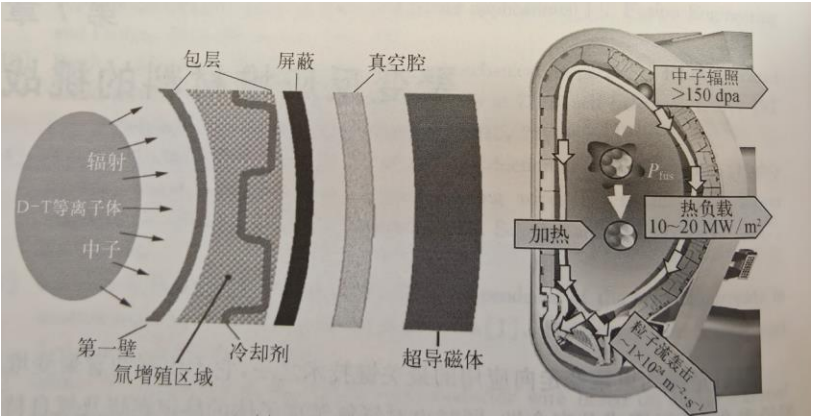


资料来源：上海超导招股说明书、《超导成

Part3.3 上游堆内材料：面向等离子体材料、结构材料、氚增殖材料、中子倍增材料等

- 堆内材料是磁约束聚变走向应用的关键技术之一，不仅制约聚变堆的服役寿命、运行模式及安全性，同时也对氦氚等离子体的稳定燃烧及氦自持产生重要影响。
- 对于聚变堆内部的结构材料和面向等离子体的材料，其耐中子辐照、高热流和等离子体轰击的性能对于设计和建造聚变堆至关重要。面向等离子体材料包括碳、钢、钨、铍、钨等，热沉材料一般选用铜合金。钨是PFM的主要候选材料，包层结构材料主要选用钢，氚增殖材料采用锂，中子倍增材料采用铍。

磁约束聚变堆内材料服役环境



磁约束聚变堆堆内关键材料的功能与要求

| 部件       | 第一壁                                | 偏滤器                                         | 增殖包层                                    |
|----------|------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 功能/目标    | 屏蔽其他部件免受热负荷与粒子等离子体轰击               | 去除粒子或氦灰，耐受高热负荷                              | 利用 14 MeV 中子进行氚增殖，屏蔽其他部件免受中子辐照，提取热能用于发电 |
| 面向等离子体材料 | 钨、钨基合金、钨镀层-碳化硅、铍、钨镀层-ODS/低活化钢、液态锂流 | 钨基合金，钨镀层-碳化硅，钨镀层-ODS/RAFM 钢，液态金属流：锂、镓、锡、锡-锂 | 同第一壁                                    |
| 结构材料     | 低活化钢、ODS 钢、钒合金、碳化硅                 | ODS 钢、钨基合金                                  | 低活化钢、ODS 钢、钒合金、碳化硅                      |
| 氚增殖材料    | —                                  | —                                           | 液态锂、液态锂铅、锂陶瓷小球                          |
| 中子倍增材料   | —                                  | —                                           | 铍、铍钛合金、铍钒合金、液态锂铅                        |
| 冷却剂      | —                                  | 水、氦气                                        | 水、氦气、液态锂铅、液态锂                           |

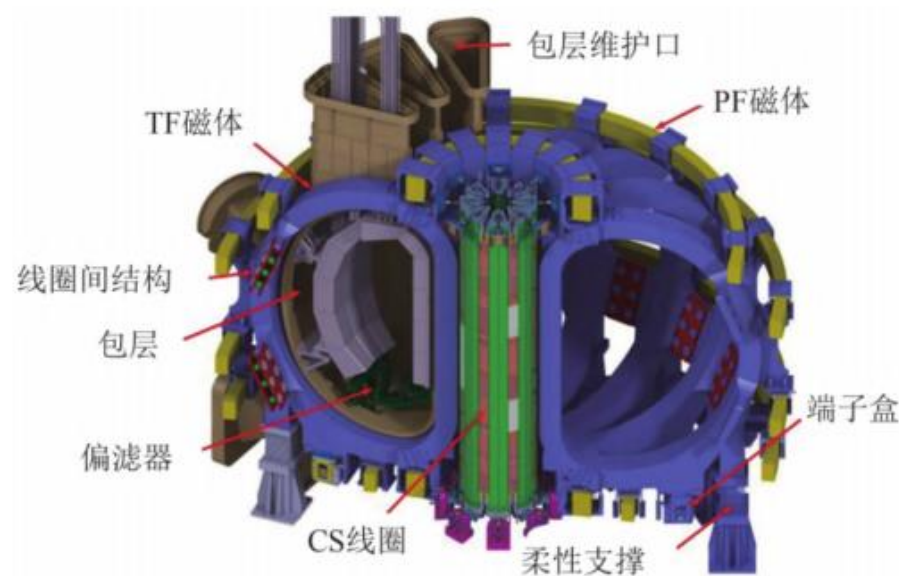
# PART 4

中游环节分析：  
包括主机系统、关键支撑系统、能量提取与发电系统、燃料循环系统等

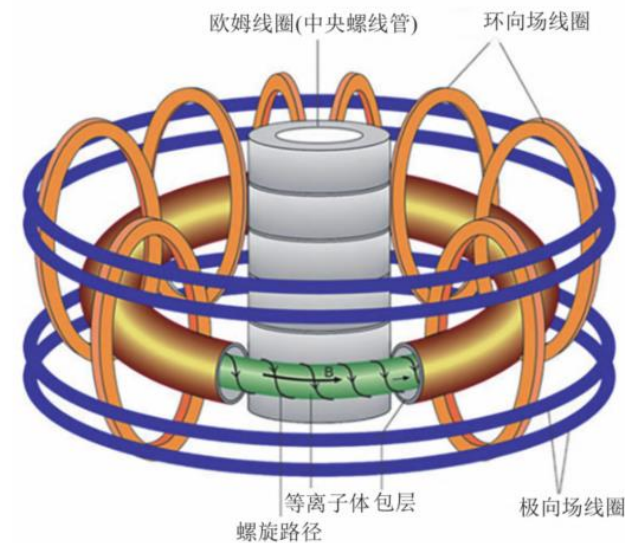
## Part4.1 磁体系统：用于生成及约束等离子体

- 主机系统主要包括磁体系统、真空室、偏滤器、产氦包层、冷屏与杜瓦等。
- 磁约束可控核聚变装置中，产生约束磁场的磁体系统扮演着核心角色，其磁场强度与均匀性对于整个装置的性能与效率均有着重要影响。
- 磁体系统主要由环向场（TF）磁体、极向场（PF）磁体、中心螺线管（CS）磁体、误差场磁体及其馈线系统组成。中心螺线管线圈的变化磁通激励等离子体产生环向电流，该环向电流产生的极向磁场分量与环向磁场耦合，形成约束等离子体的磁场构型，并保障磁面闭合态。此外，其还需要极向场线圈来抵消等离子体电流回路及等离子体压力所引起的膨胀力，并保持等离子体形状与稳定性。误差场磁体用于调节磁场、控制等离子体运行。

托卡马克装置主机系统示意图



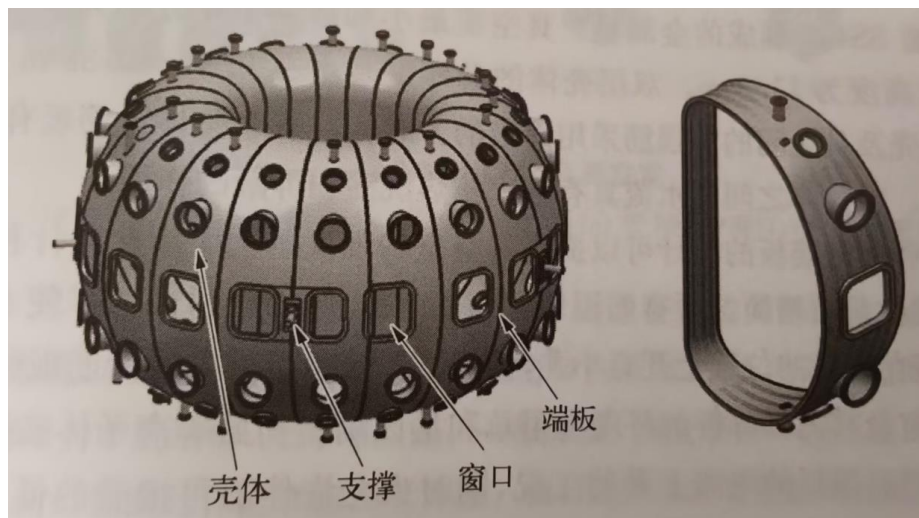
托卡马克装置磁体系统示意图



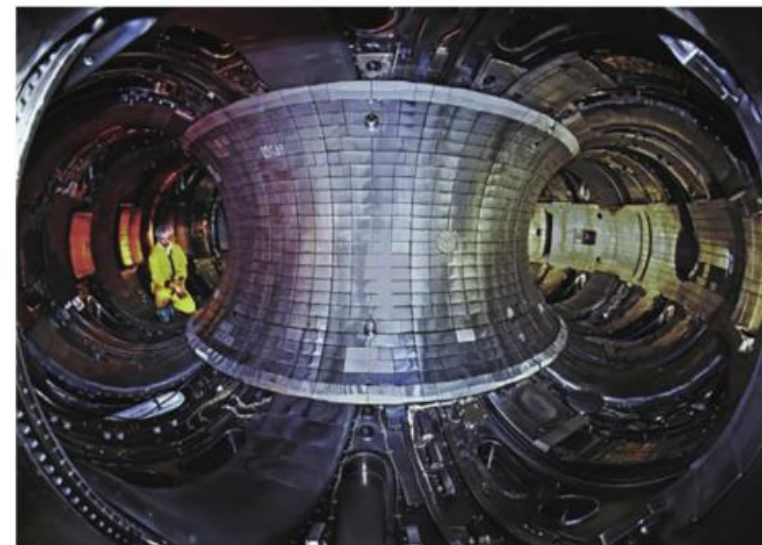
## Part4.2 真空室及真空系统：为高温等离子体提供真空环境

- 真空室位于磁体系统内部，室内部件包括包层、偏滤器、诊断、内线圈、孔栏、加热天线等。真空室的设计、材料选择、制造、组装以及提供的超真空环境、密封性能，直接影响等离子体的放电品质。
- 真空室有如下特点：（1）提供高质量的超真空环境，容纳高温等离子体。（2）提供等离子体与外界联系的通道，如诊断、加热、维护、安装、真空、热工流体等。（3）感应出涡流，抑制等离子体扰动。（4）支撑真空室的内部部件以及自身重量。（5）承受因破裂或垂直位移事件导致等离子体熄灭时释放的巨大电磁力冲击。（6）屏蔽核辐射。
- 真空系统主要由真空抽气系统、加料系统、壁处理系统、真空测量与控制系统等组成，为真空室提供良好的真空环境和壁条件，并对真空度、气体成分进行实时监测。

HL-3真空室示意图



TFTR装置真空室内部结构示意图



## Part4.3 偏滤器：面向等离子体，排除靶板热载并排出杂质

- 偏滤器位于真空室腔体内，且属于面向等离子体部件，是托卡马克聚变堆的关键部件。
- 偏滤器是托卡马克中用于排除能量和杂质粒子的主要部件，是发生等离子体与器壁相互作用的主要区域。一方面，聚变反应产生的大量杂质和能量在刮削层中沿磁场输运最终要沉积到偏滤器靶板；另一方面，高能粒子和热流对偏滤器靶板的性能和寿命提出了极高的要求和挑战。偏滤器已经成为制约核聚变能实现的关键问题之一。

CFETR 氨冷偏滤器示意图

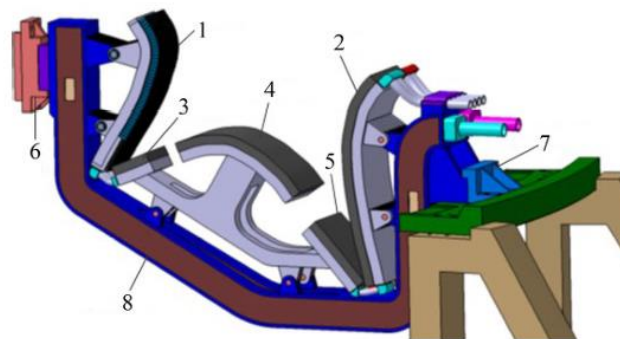


图2 CFETR 氨冷偏滤器示意图

1——内靶板；2——外靶板；3——外返流板；4——DOME板；5——内返流板；6——内侧定位支撑；7——外侧定位支撑；8——Cassette结构。

资料来源：《CFETR产氦包层与偏滤器部件在热室内维修与退役流程的概念设计》、中信建投

Part4.4 包层：承担氦增殖、能量转换及输出、辐射屏蔽等功能

- 产氦包层位于真空室内部，围绕等离子体排布，承担产氦、排热、屏蔽等重要功能，是聚变堆的核心部件之一，其结构安全性和稳定性直接影响聚变堆的稳态自持运行。
- 氦氦反应释放的能量80%以中子动能的形式出现，高能中子穿透包层时，实现中子能量沉积、产氦等功能，通过冷却回路把产氦包层中的热量带出，实现能量转换进行发电，通过提氦回路将产氦包层中产生的氦回收利用，实现氦自持，同时将14MeV中子沉淀在其中，使得离开产氦包层的放射性水平降低到较低水平。
- 产氦包层的材料涉及冷却剂、结构材料、氦增殖剂、中子倍增剂、面向等离子体材料等。

CFETR氦冷固态产氦包层示意图

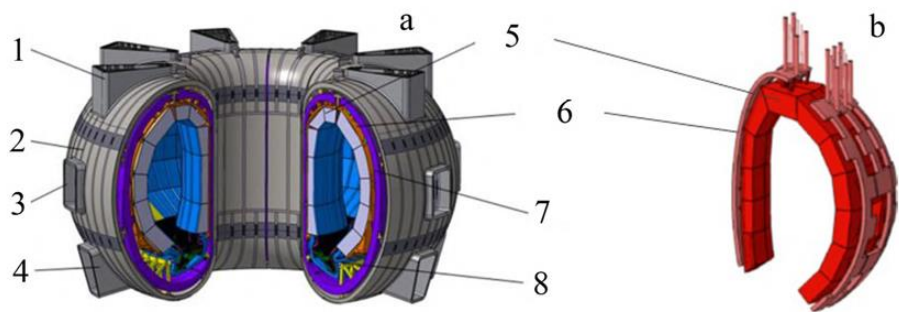


图1 CFETR 氦冷固态产氦包层

a——CFETR 包层模块布置；b——氦冷包层单个扇区。1——上窗口；2——真空室；3——中窗口；4——下窗口；5——增殖包层；6——背板式支撑；7——屏蔽包层；8——偏滤器。

未来聚变堆产氦包层材料选择

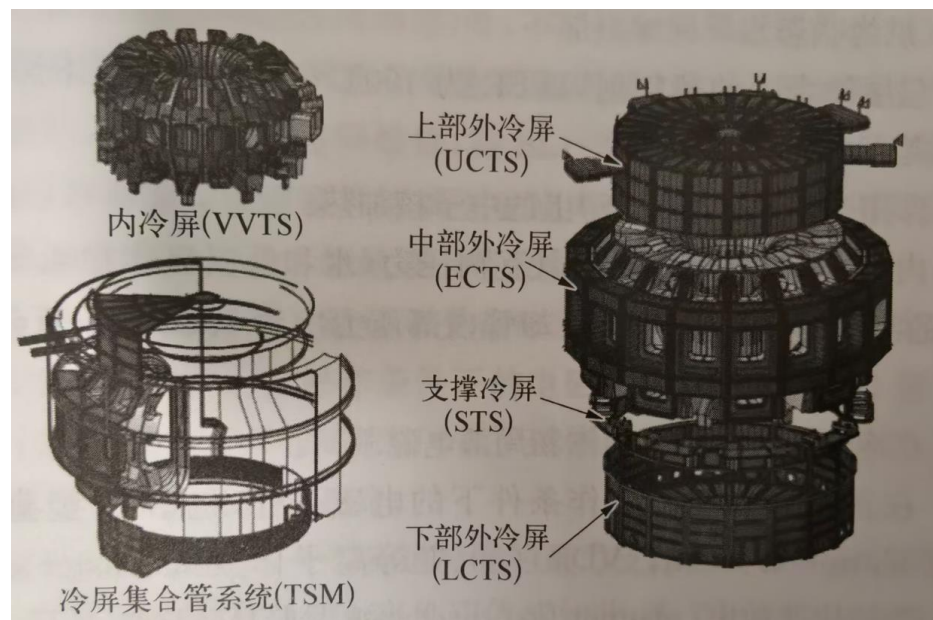
| 产氦包层材料   | 近期      | 远期                      |
|----------|---------|-------------------------|
| 冷却剂      | 氦气、水    | 氦气、液态锂铅共晶体、超临界水、超临界二氧化碳 |
| 氦增殖剂     | 锂基陶瓷    | 液态锂铅共晶体                 |
| 中子倍增剂    | 铍/铍合金   | 液态锂铅共晶体、铍合金             |
| 结构材料     | 低活化铁素体钢 | ODS铁素体钢、钒合金             |
| 面向等离子体材料 | 铍、石墨    | 碳纤维增强复合材料、钨/钨合金         |

资料来源：《CFETR产氦包层与偏滤器部件

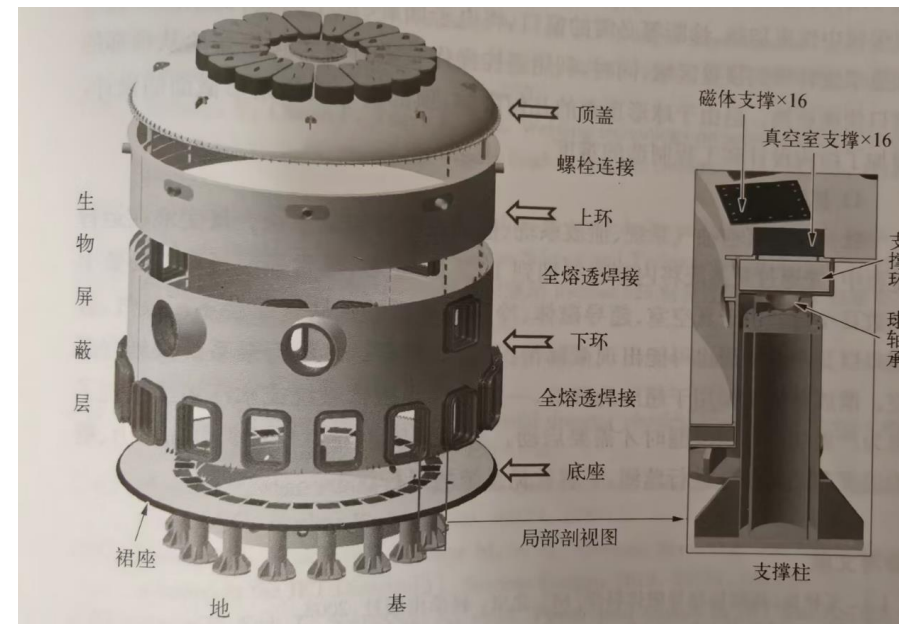
## Part4.5 冷屏和杜瓦：屏蔽热量同时提供结构支撑

- 冷屏和杜瓦是保障聚变堆超导磁体稳定运行的必要系统，起到降低热负荷和结构支撑功能，同时需考虑与周边子系统的接口。
- 冷屏是聚变装置中的隔热部件，用于阻隔来自真空室、杜瓦、集合管、中子源的热量，并将热量带走，以维持超导磁体的低温运行。
- 杜瓦系统为超导磁体、冷屏以及冷却管路提供真空环境，并将真空室、超导磁体、冷屏等系统的惯性力、电磁力与热应力传递到地基和生物屏蔽层，还通过不同规格的窗口为内部系统提供通道，实现加热、送料、控制、诊断、供电、维护等功能，最后，杜瓦是聚变堆放射性物质的二级约束部件，在发生泄漏事故时防止放射性物质直接释放到环境中。

冷屏的主要子系统示意图



杜瓦结构示意图



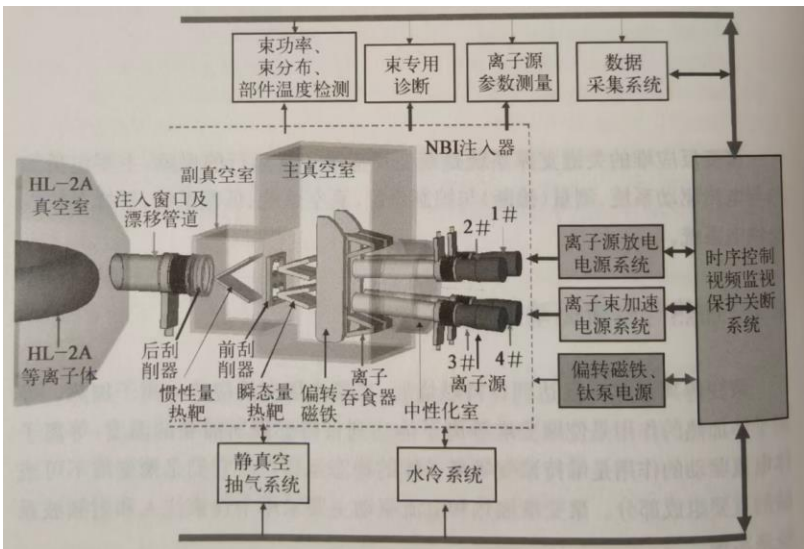
## Part4.6 低温系统：主要用于保障超导磁体正常运行、提供超高真空环境等

- 核聚变低温系统主要用于保障超导磁体正常运行、提供超高真空环境等。
- 1、保障超导磁体正常运行：超导磁体需要在极端低温环境下才能保持超导特性，大型低温装置通过压缩、循环氦气等方式，为核聚变装置创造稳定的低温条件，确保超导磁体等关键部件正常工作。
- 2、提供超高真空环境：ITER装置为例，其大型低温泵将吸附板冷却至接近绝对零度，在注入聚变燃料前，为1400m<sup>3</sup>的大型真空腔体提供超高真空环境。
- 3、吸附提取未燃烧燃料和清除反应产物：大型低温泵可以通过吸附的方式，提取氘 - 氚聚变反应中未燃烧的燃料，以便循环利用，同时清除反应过程中产生的物质，维持反应环境的纯净度。
- 4、用于精密测量设备：超导技术在核聚变中的应用不仅限于磁体，还包括超导量子干涉器件（SQUID）等精密测量设备。这些设备需要在低温环境下工作，用于测量微弱的磁场变化，对于监测和控制等离子体的稳定性至关重要。（1）维持等离子体的稳定性。（2）保证设备的安全运行。（3）促进燃料的注入和循环

## Part4.7 加热与电流驱动系统：主要包括ECRH、ICRH和LHCD等辅助加热系统

- 等离子体加热与电流驱动是聚变堆不可或缺的组成部分，等离子体加热的作用是使等离子体达到自持燃烧所需要的温度，等离子体电流驱动的作用是维持聚变等离子体的稳态运行。在中大型装置中，仅靠欧姆加热无法将等离子体温度加热到目标温度，必须采用辅助加热。
- 聚变堆加热和电流驱动主要采用中性束注入和射频波系统来实现。
- 中性束（NBI）注入加热具有加热机制清楚、加热效率高、不受等离子体位形影响等优点。
- 射频波注入等离子体中时，如果注入波的频率或者经过模式转换后的波频率与等离子体中某个固有频率相同，便会产生与射频波的共振吸收，从而产生加热效应。射频波主要包括电子回旋共振加热（ECRH）、离子回旋共振加热（ICRH）和低杂波电流驱动（LHCD），其微波源分别为电子回旋管、大功率真空四极管、速调管。
- ICRH和NBI是有效的加热离子的方式，ECRH是加热电子的有效手段，LHCD频率介于ICRH和ECRH之间，可作用于高能电子。

HL-2A装置中性束束线结构和布局示意图



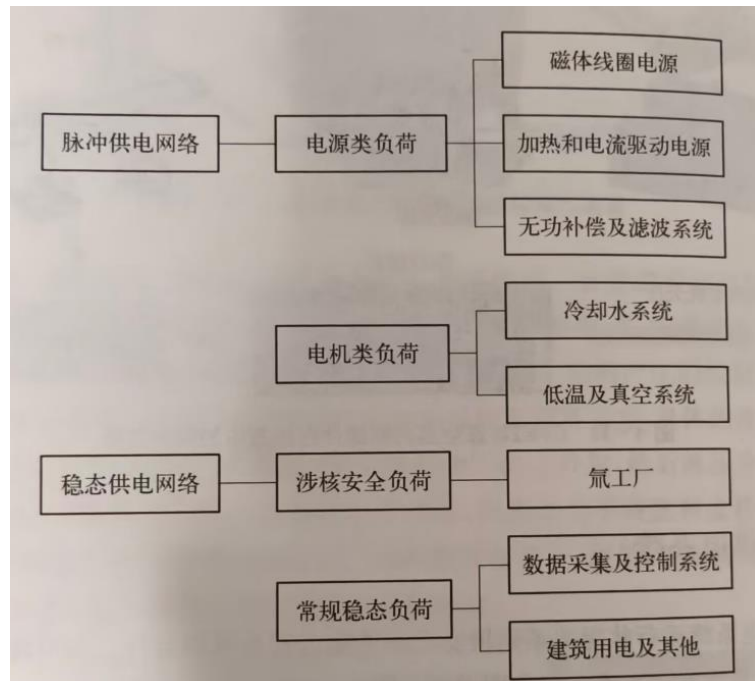
射频波的主要分类及特点

|      | 工作频率       | 微波源 | 主要加热机制 |
|------|------------|-----|--------|
| ICRH | 0—100 MHz  | 电子管 | 离子回旋阻尼 |
| ECRH | 28—170 GHz | 回旋管 | 电子回旋阻尼 |
| LHCD | 1—10 GHz   | 速调管 | 电子朗道阻尼 |

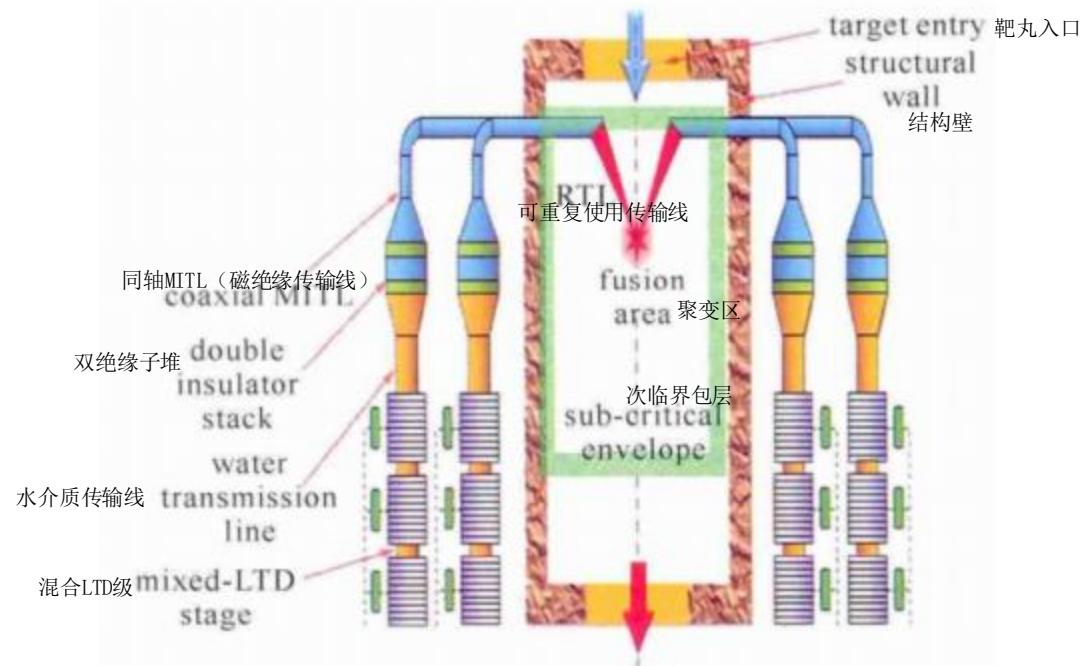
## Part4.8 电源系统：磁体电源、不同辅助加热电源差异较大

- 电源系统需要满足磁体线圈、辅助加热系统、真空、低温、冷却水、数据采集等系统的用电需求。
- 电源系统主要可划分为交流配电系统、无功补偿及谐波滤波系统、磁体线圈电源系统、辅助加热高压电源系统、接地和防雷系统。
- 磁体线圈电源系统包括供电的变压器、变流器、开关以及失超保护单元等，要求快速响应。
- 辅助加热系统采用高压电源，射频波加热系统采用PSM电源，NBI所需电压超过了PSM电源的最适宜电压范围，因此需要采用逆变型电源。
- 对于FRC以及Z-FFR装置，脉冲电源耐压和响应速度要求极高，开关和电容为其中核心器件。

托卡马克装置电源负荷分类



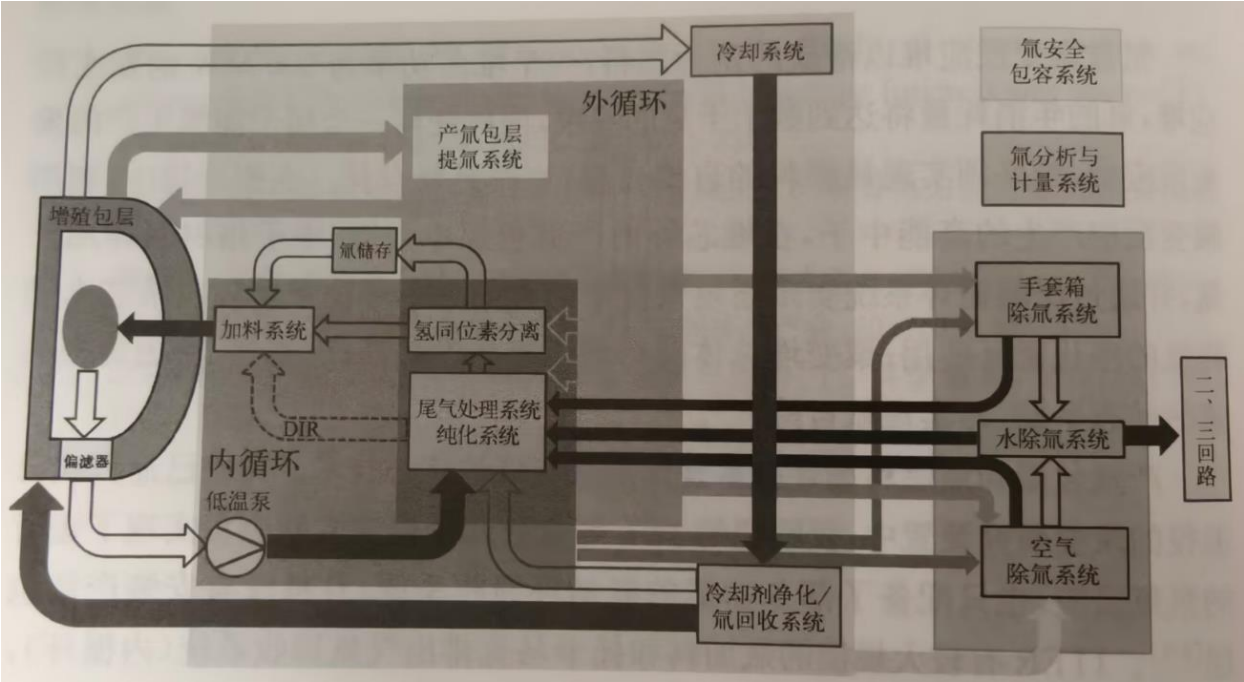
Z-FFR驱动器总体结构示意图



Part4.9 燃料循环系统：主要用于氦相关的处理

- 产氦包层和氦燃料循环总体构成聚变堆燃料循环系统，其功能主要包括：（1）未燃烧氦气的回收和循环再利用。（2）反应堆氦的自持。（3）氦的包容与回收。
- 燃料循环系统按照功能可划分为内循环、外循环及氦安全包容系统三部分。

聚变堆氦循环系统示意图



聚变堆氦工厂子系统技术总结

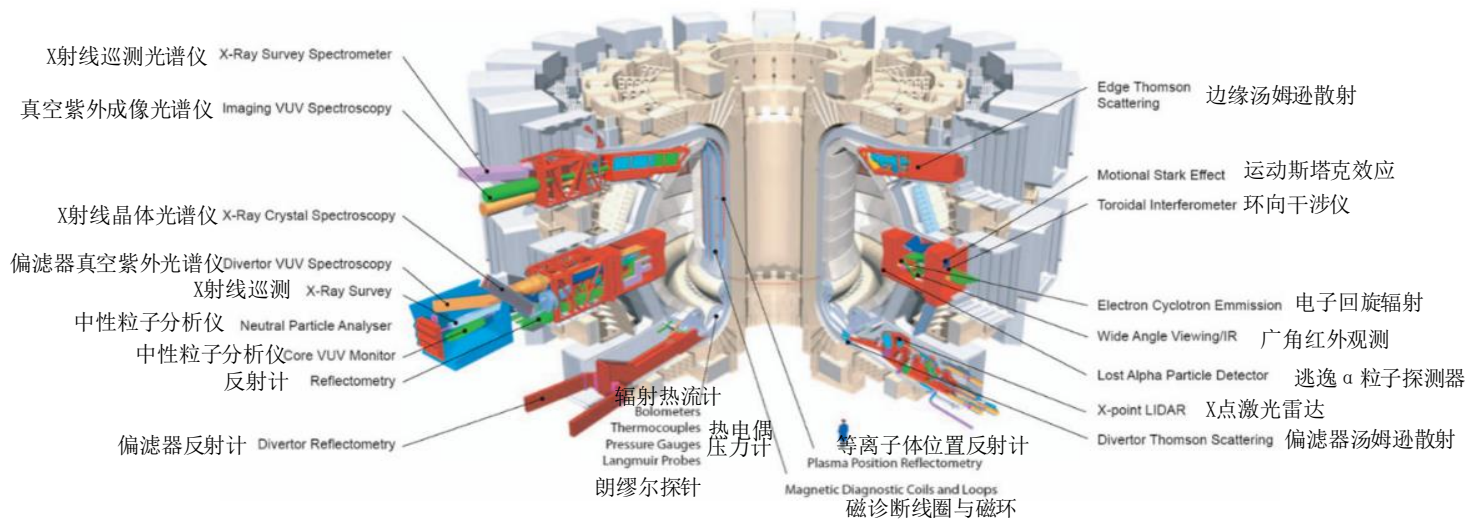
| 氦工厂子系统                                    | 氦处理功能特点                                              | 相关氦技术举例                        |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 托卡马克排出气处理系统<br>氦同位素纯化系统                   | 氦同位素含量高；<br>去除氦同位素中的其他气体（氮气等）                        | 低温分子筛吸附、金属床吸附、钯膜反应器、扩散器、催化反应器等 |
| 同位素分离系统                                   | 氢、氦、氖的分离                                             | 低温精馏、热循环吸附、色谱法                 |
| 氦储存系统                                     | 氦的高效储存                                               | 储氦材料（贫铀、锆钴合金等）                 |
| 包层提氦系统<br>氦冷系统净化系统<br>空气除氦系统<br>手套箱气氛除氦系统 | 将氦从固态/液态金属氦增殖剂中载带出来；<br>从大规模气体（氦气、空气、氮气等）中分离出微量的氦同位素 | 催化氧化、常温分子筛吸附、低温分子筛吸附、湿法洗涤      |
| 水除氦系统                                     | 去除水中的微量氦                                             | 联合电解催化交换（CECE）等                |
| 氦分析、计量系统                                  | 氦浓度监测，用于工艺控制、安全控制等；<br>氦存量计量、衡算                      | 电离室、量热计、气相色谱等                  |
| 氦包容系统                                     | 多级包容、降低正常运行及事故下的氦释放风险                                | 多级包容系统、手套箱、防氦涂层等               |
| 热室、放射性废物除氦                                | 降低替换部件和放射性废物中的氦存量                                    | 加热除氦炉等                         |

资料来源：《聚变反应堆工程技术导论

## Part4.10 测量（诊断）与控制系统：保障装置运行安全、实现稳态聚变反应

- 控制系统是聚变反应堆的神经中枢，承担协调聚变反应堆上百项子系统协同工作、保障装置运行安全、实现稳态聚变反应等核心任务。其有两大重要目标：（1）通过精准控制加热、加料、磁体线圈等执行机构，稳定实现聚变三乘积达标，产生聚变功率。（2）对运行期间的异常事件紧急处理。
- 测量与诊断系统是装置安全、正常运转不可或缺的关键子系统，为装置的运行提供关键参数信息，主要包括工程参数的测量、控制参数的测量和性能参数的测量。ITER的诊断根据优先级进行了三个层级的分类，优先级最高的是装置保护，其次是用于等离子体基本控制的关键参数诊断，最后是装置运行性能评价和物理研究相关的诊断。
- 未来聚变堆面临诊断窗口有限、面临中子辐照、高热通量等关键难题，未来诊断的方式和测量的参量需要较大程度地精简。

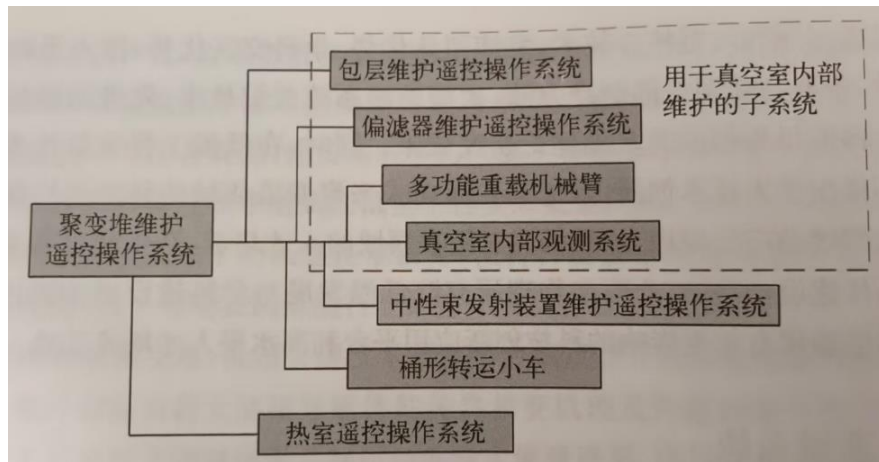
ITER装置中的诊断系统



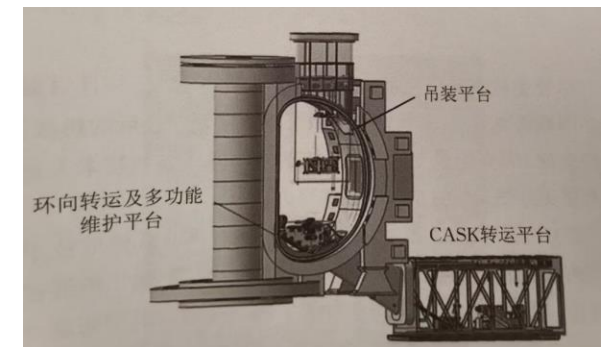
## Part4.11 遥操系统：对堆芯部件进行性能监测和远程维护

- 聚变堆芯部件需要通过遥控操作机器人系统（遥操系统）来接受性能监测和远程维护，由于操作对象的特殊性以及系统本身的复杂性，加上维护任务对遥操系统的实时性、安全性、可靠性以及抗辐照能力等方面的严苛要求，其工程研制与测试均有极大的技术难度。
- 聚变堆遥操系统主要分为真空室内部维护遥操系统、杜瓦内部遥操系统以及用于中性束发射装置维护的遥操系统等。
- 真空室内部遥操系统主要用于包层模块、偏滤器、窗口插件等的安装、拆卸、管道切割/焊接及部件转入/转出真空室等。

聚变堆遥控操作系统的主要构成



包层遥操作维护系统（左）和偏滤器遥操作系统（右）



# PART 5

下游环节分析：  
院所与商业公司发挥各自优势，开展总装及发电运营

Part5.1 下游：全球可控核聚变发展情况

- 美国、欧盟、中国、日本、俄罗斯、韩国、印度等国家高度重视可控核聚变的发展。国家层面预计在2030年前后突破工程能量“得失相当”问题，正在研究工程实验堆之后的示范堆（DEMO），随后进入商业化开发阶段，目标实现Q值30~50以及氦自持。

全球主要国家/地区可控核聚变的进展及规划

| 国家/地区 | 可控核聚变进展                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 美国    | <p>美国在惯性约束、托卡马克、仿星器、Z箍缩等方式都有投入，其中托卡马克在美国聚变基金中占据较大比例。美国系统部署聚变中子源（FPNS）、材料一等离子辐照实验（MPEX）装置、热排出与约束研究的托卡马克（EXCITE）等科学设施；普林斯顿等离子物理实验室（PPPL）依托TFTR装置开展过氘氘实验，聚变功率约10.7MW；还建设了球形托卡马克设施NSTX-U，探索新型聚变堆途径。2025年5月，NIF宣布实现Q=4.13。</p> <p>美国已经宣布了一项战略，通过制定监管框架、资助研发、支持必要的供应链、提供教育和培训以及吸引公众参与，为商业融合能源扫清道路。通过对国家实验室、大学和私营企业的公开支持，美国正在促进不同DEMO概念的发展和出现。美国能源部加大力量多次组织开展聚变能开发路线评估，制定聚变路线，核心目标是依托“建设－创新－壮大”三维战略，打通聚变全链条技术瓶颈，推动美国私营聚变产业在2030年代实现聚变示范电厂（FPP）落地、商业化并网，巩固全球聚变技术领导地位。</p>                                                  |
| 欧盟    | <p>依托JET、ITER等国际项目欧盟开展了聚变研究，经验丰富。JET装置大规模开展2轮氘氘实验，2021年创下了聚变能量59MJ的世界纪录；与日本合作建设JT-60SA、IFMIF等研究设施、成员国建设DONES、DTT、JULE-PSI等设施，攻克ITER不能解决的聚变堆工程技术问题。同时，欧盟也在积极部署核聚变研究科研设施，支持各成员国装置（ASDEX-U、TCV、WEST等）的运行、升级，进一步丰富等离子体物理研究经验。除了托卡马克，欧盟还开展了其他聚变技术路线研究，德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所依托Wendelstein7-X开展仿星器研究。</p> <p>欧洲计划在2050年前建设一座DEMOstration电厂（DEMO），作为继ITER之后的发电机器。该设施的概念设计正在推进中，旨在通过生产约500兆瓦净电力以及氦自给自足，展示聚变能源的技术和经济可行性。设计团队目前专注于繁殖毯、分流技术和第一面墙设计的选择，正在考虑多种设计方案。近期计划建设基于等离子体的体积中子源（VNS）设施，用于测试正在考虑的聚变核技术。欧盟首个融合战略计划于2026年发布。</p> |
| 中国    | <p>在磁约束方面，中国科学院合肥等离子体物理研究所的“东方超环”EAST和中核工业西南物理研究院的环流器三号HL-2M达到国际先进水平；在惯性约束方面，神光二号是我国2002年成功研制的大型激光装置，技术路线与NIF类似。</p> <p>中国计划通过建设中国聚变工程示范反应堆（CFETR）来制造一个演示级装置。CFETR将作为ITER与商业聚变电站之间的桥梁，目标是展示1.5至3 GW的聚变功率输出，Q值为15至30，并实现氦自给自足。此外，聚变技术综合研究设施（CRAFT）正在探索DEMO器件的关键技术，如超导磁铁和偏转器技术；而BEST项目（燃烧等离子体实验性超导托卡马克，预计2027年完成）将作为中国聚焦燃烧等离子体研究的国际科学计划的一部分，向国际研究人员开放。</p>                                                                                                                                                           |

Part5.1

下游：全球可控核聚变发展情况

- 美国、欧盟、中国、日本、俄罗斯、韩国、印度等国家高度重视可控核聚变的发展。国家层面预计在2030年前后突破工程能量“得失相当”问题，正在研究工程实验堆之后的示范堆（DEMO），随后进入商业化开发阶段，目标实现Q值30~50以及氦自持。

全球主要国家/地区可控核聚变的进展及规划（续）

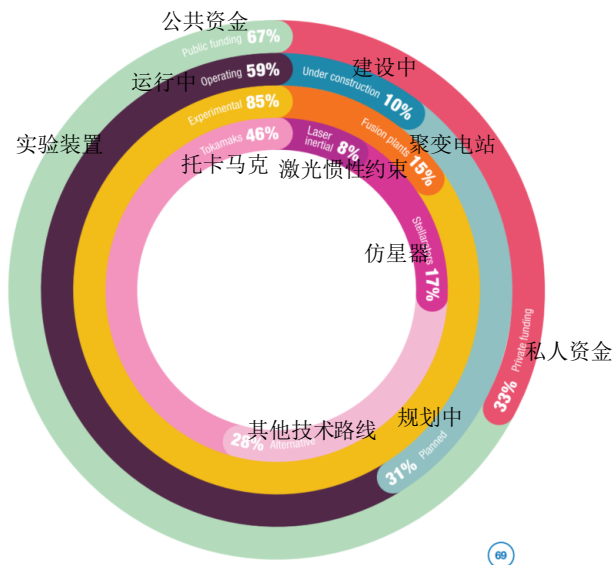
| 国家/地区 | 可控核聚变进展                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 日本    | <p>日本聚变技术路线以托卡马克为主，通过ITER等国际合作项目与欧洲紧密合作，工程技术雄厚，其聚变装置JT-60U具有国际上最高的聚变三乘积（<math>1.5\times10^{21}</math>）。日本通过BA计划与欧盟紧密合作，以JT-60SA为载体，掌握聚变堆的等离子体物理和技术。在仿星器领域，日本还建造了大型螺旋装置LHD，开展技术研究。</p> <p>日本计划在2040年代至2050年代完成JA-DEMO装置，以展示数百兆瓦以上的稳定发电和1500兆瓦及以上的聚变输出。JA-DEMO将旨在展示氦自给自足、工厂可用性以及整个工厂的正能量平衡。日本也在推动创新和国家聚变产业的发展。<a href="#">点击这里查看日本政府发布的最新聚变战略。</a></p>                                  |
| 俄罗斯   | <p>俄罗斯依托T-15MD、ITER开展长脉冲燃烧等离子体物理研究，布局混合堆概念DEMO-FNS，开展材料等聚变技术研发。俄罗斯将全力支持ITER计划成功放在其聚变计划的首要地位，并在ITER计划建设过程中独立开展本国的聚变研究工作。</p> <p>俄罗斯计划在2055年前使用基于托卡马克的DEMO-RF发射，以展示用氘-氚（D-T）聚变反应实现吉兆瓦级电力。正在考虑的是一个聚变-裂变混合设施，配备高温超导磁铁和面向液态金属等离子体的部件（第一壁和偏转器）。在DEMO-RF之前，俄罗斯计划在2033年前建造DEMO-FNS，这是一座具有40兆瓦D-T聚变功率的（聚变-裂变）混合反应堆。还有计划配备反应堆技术（TRT）的托卡马克。</p>                                                  |
| 韩国    | <p>韩国依托全超导聚变装置（KSTAR）开展ITER前的等离子体高参数稳态运行研究。韩国的聚变能计划是基于其大型超导托卡马克装置KSTAR过渡到ITER。</p> <p>韩国计划建造一座名为K-DEMO的稳态示范反应堆，这是一种托卡马克反应堆，预计将在2050年后展示净电力能力。一个名为SUCCEX（超导体实验）的测试设施正在建设中，作为开发峰值磁场为16特斯拉的K-DEMO环形场磁铁的前提条件。作为2024年加速聚变能源实现战略的一部分，韩国宣布了K-DEMO之前的新中间步骤——紧凑型导向装置（CPD）。CPD的建设计划于2030年开始，目标是在十年内展示仅内部加热且氦自给自足的点燃等离子体。韩国还计划建设虚拟DEMO（V-DEMO）——基于超级计算、人工智能和数字孪生技术的数字空间聚变电厂——以协助K-DEMO的设计工作。</p> |
| 印度    | <p>印度的聚变能计划是从SST-1逐步发展到ITER，同时开展ITER工程建造、实验工作和建造国内的SST-2。</p> <p>印度计划建设一座聚变试点电站，核聚变功率为200 - 300兆瓦，以确定功率性能、氦增殖及其在足够长脉冲中的再利用，以及发电量，然后建造可商业规模复制的紧凑型DEMO反应堆。目前尚未公布具体时间表。</p>                                                                                                                                                                                                              |

资料来源：《聚变发展现状及展望》、

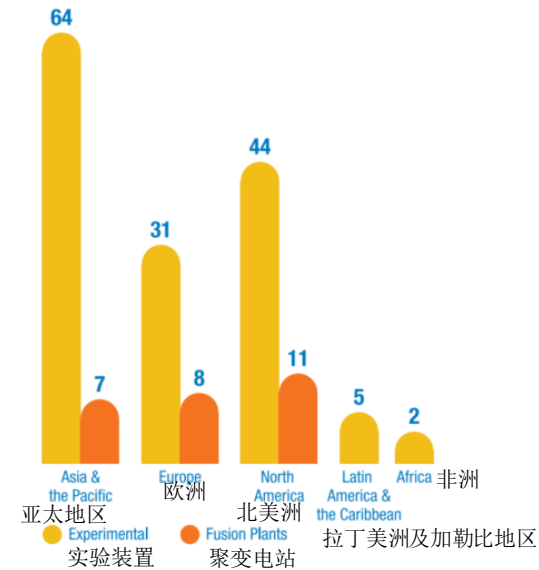
## Part5.2 下游：全球核聚变装置类型及投资情况统计

- 从全球范围来看，截至2025年，有46%的核聚变装置采用托卡马克方案，85%的装置为实验装置，聚变项目的资金67%来自于公共资金。
- 从地区来看，北美、欧洲、亚太区在电站建设进度上领先，亚太在实验堆方面数量最多，北美规划的聚变电站最多。

全球聚变装置占比情况



全球各地区聚变装置数量

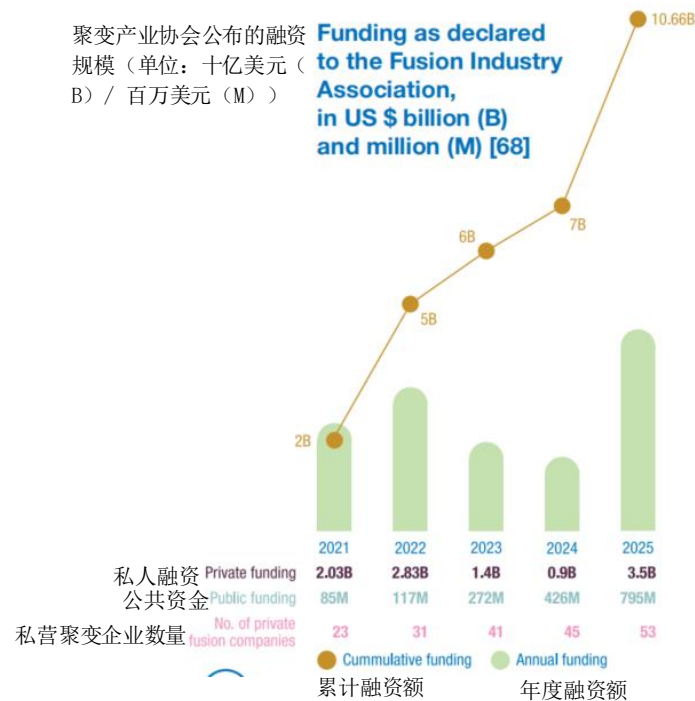


资料来源：《IAEA World Fusion Outlook 2025》，中信建投

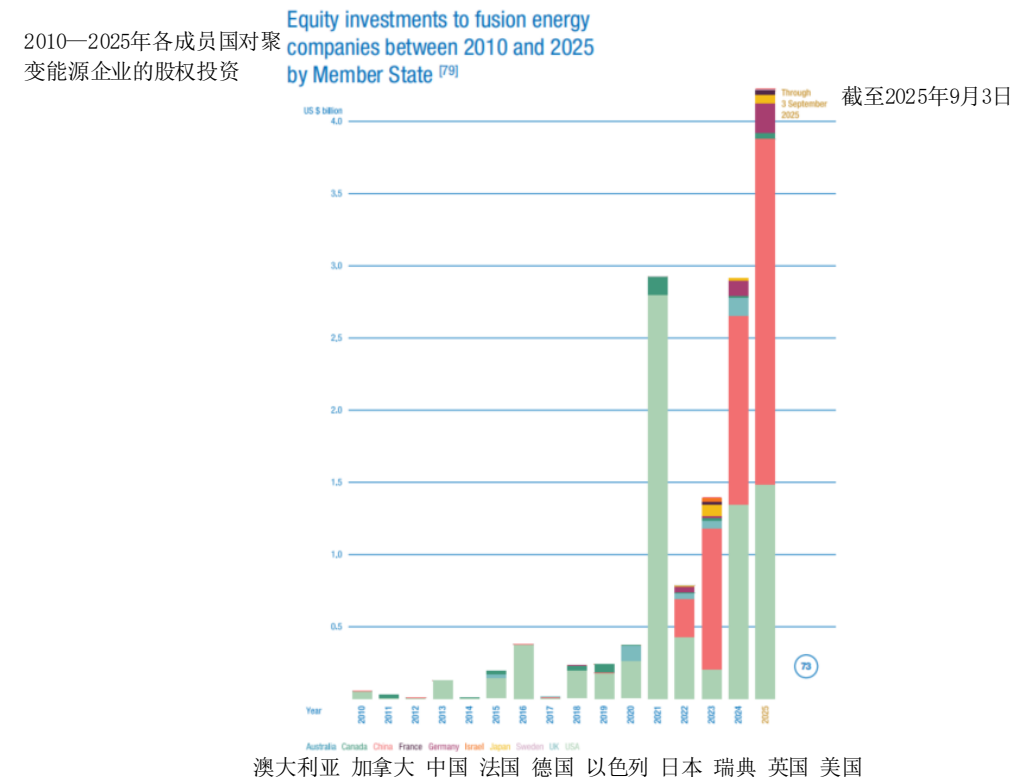
## Part5.2 下游：全球核聚变装置类型及投资情况统计

- 2025年全球对于可控核聚变的累计投资金额显著增长，从2024年的70亿美元提高到106.6亿美元，其中股权投资增长显著，2024年仅为9亿美元，2025年单年达到35亿美元，私营聚变公司的数量从2024年的45家提升到53家。
- 美国对聚变项目的股权投资在历史上领先，近三年来中国投资发力明显。历史上，对聚变能源的投资约70%发生在美国。从2023年开始除美国之外的更多的国家对于聚变能源公司的股权投资力度加强，包括中国、加拿大、法国、德国、以色列、日本和瑞典。其中，中国的投资自2022年开始明显加大。

2021-2025年全球核聚变投资情况



2010-2025年IAEA成员国对聚变公司的权益投资



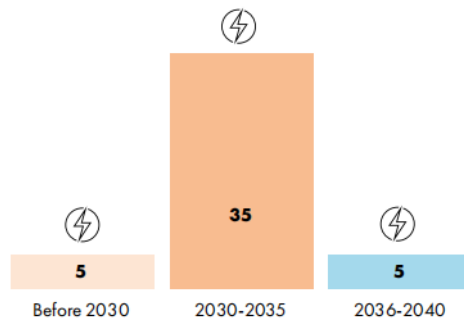
## Part5.3 下游：全球可控核聚变预计未来发电情况统计

- 对于FIA统计的聚变企业自身，大部分企业认为2030-2035年具备示范堆运营条件并实现并网，对于聚变行业，多数企业预测2031-2040年全球首台聚变电站并网发电，2031-2045年出现首个具备商业竞争力的聚变电站。

### 企业预计的聚变示范堆运营和并网时间

你预计贵公司什么时候可以运营一座具备商业盈利条件的中试工厂？

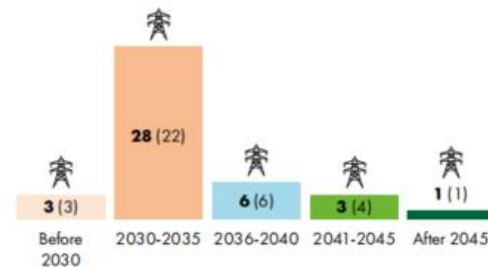
(45 responses)



你预计贵公司什么时候开始并网供电？

(41 responses)

\*last year's response in brackets



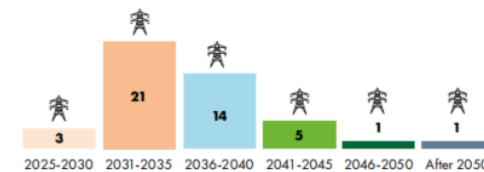
### 企业预计聚变行业实现并网发电及具备商业竞争力的时间

#### 10. Predictions

Any variations between these and previous charts are due to different respondents between questions.

首座核聚变发电厂预计何时向电网并网供电？

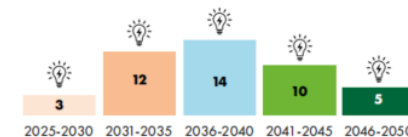
(42 responses)



首座核聚变发电站何时能实现足够低廉的成本、足够高的能量增益因子（Q 值），达到具备商业可行性的标准？

When will the first fusion plant demonstrate a low enough cost/high enough efficiency (Q) to be considered commercially viable?

(44 responses)

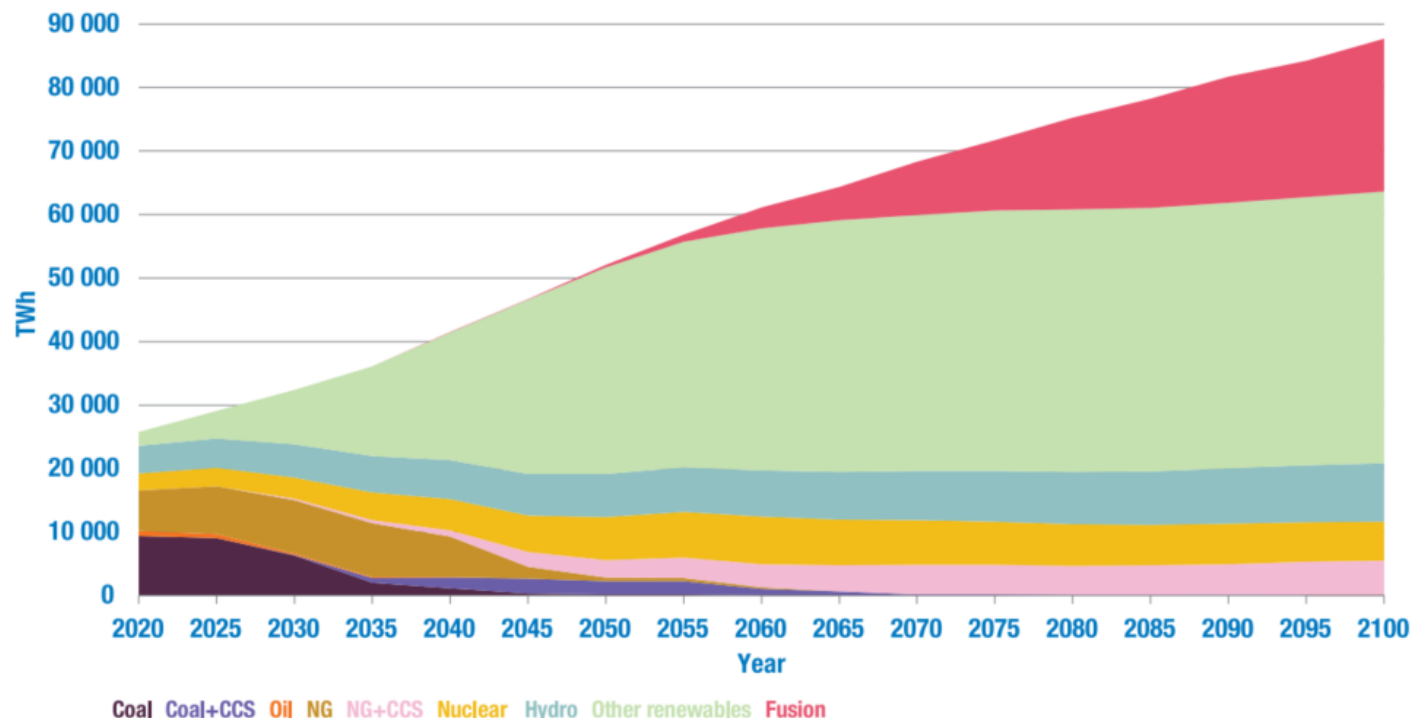


资料来源：《The global fusion industry in 2025》，中信建投

## Part5.3 下游：全球可控核聚变预计未来发电情况统计

- 根据IAEA预测的基准情景下全球的发电结构，预计核聚变发电量从2035年的2TWh增长至2050年的375TWh。在本世纪后半叶，核聚变发电量的增长更为显著，2100年几乎达到25000TWh。总体而言，在基准情景下，预计核聚变在全球发电结构中的占比在2075年达到15%，2100年达到27%。乐观情景下，如果2050年核聚变发电厂夜间运行成本降低为每千瓦2800美元，预计核聚变在全球发电结构中的占比在2075年达到30%，2100年达到50%。

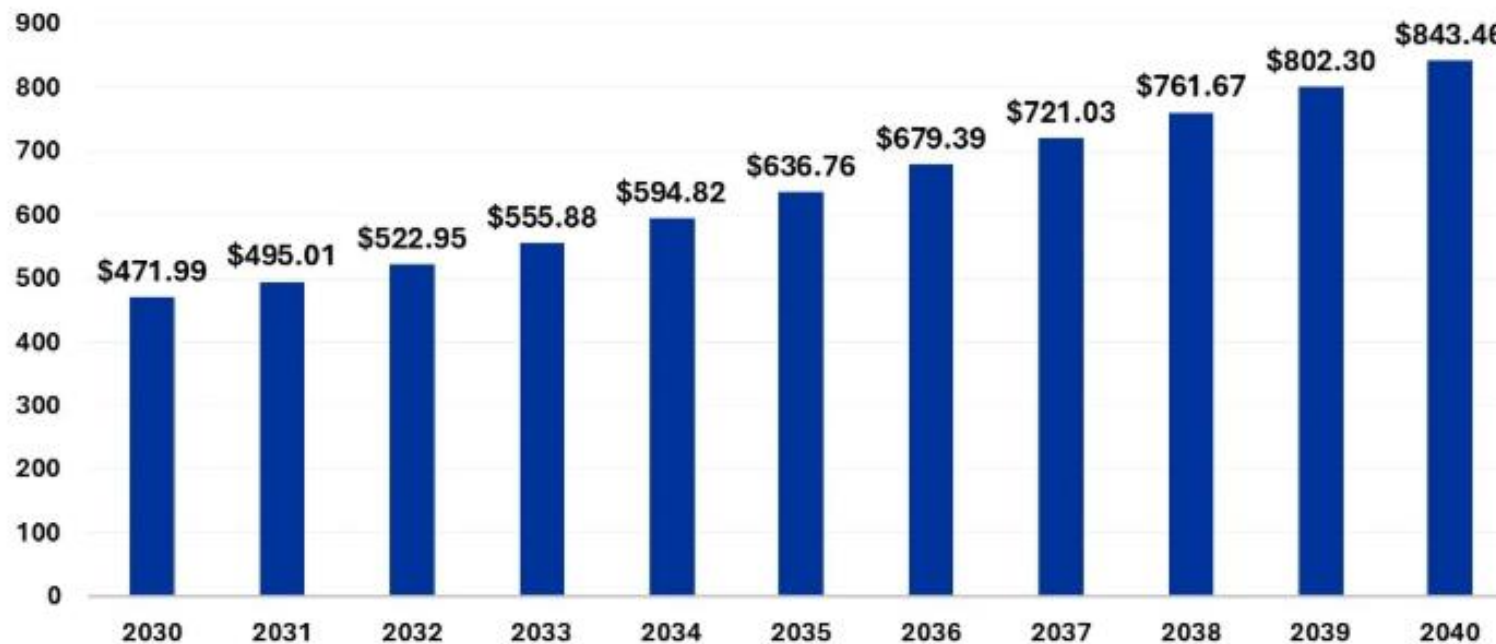
在基准情景中，全球电力发电结构的变化情况（该情景设定：到 2050 年，美国的核聚变发电厂夜间运行成本约为每千瓦 8000 美元；到 2100 年约为每千瓦 4300 美元）



## Part5.4 下游：全球可控核聚变市场规模预测

- 根据Precedence Research预测，全球核聚变市场规模预计在2030年达到4719.9亿美元，预计到2040年将达到约8434.6亿美元，2030年至2040年复合年增长率为6%。

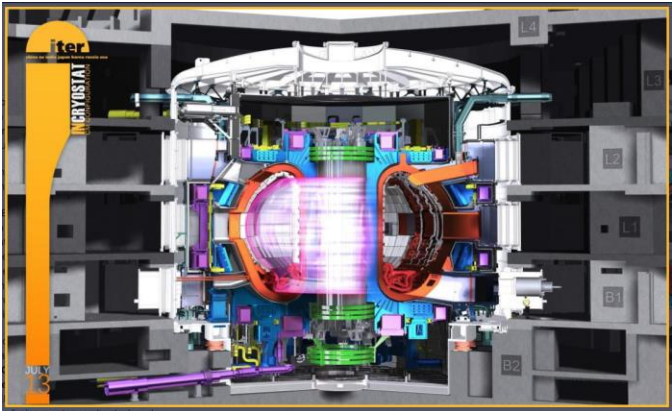
2030-2040年全球核聚变市场规模（十亿美元）



Part5.5 下游：国际可控核聚变典型装置——ITER

- ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, 国际热核聚变实验堆) 是正在建造的世界最大的托卡马克装置，目标是利用具有电站规模的实验堆证明氘、氚等离子体的受控点火和持续燃烧，验证聚变反应堆系统的工程可行性，综合测试聚变发电所需的高热流和核部件，实现稳态运行，从而为建造聚变能示范电站奠定坚实的科学基础和必要的技术基础。
- ITER装置运行第一阶段的主要目标是建设一个氘、氚燃烧能产生 $5 \times 10^5 \text{ kW}$ 聚变功率、聚变增益系数 $Q=10$ 、脉冲维持大于400s的托卡马克聚变堆；第二阶段将探索实现稳态高约束的高性能燃烧等离子体，聚变增益系数 $Q=5$ 、脉冲维持大于3000s。ITER计划在后期还将探索实现高增益的燃烧等离子体。

ITER装置示意图



ITER主要指标参数

| 参数                                   | 数值                   |
|--------------------------------------|----------------------|
| 大半径 $R/\text{m}$                     | 6.2                  |
| 小半径 $a/\text{m}$                     | 2.0                  |
| 拉长比 $\kappa$                         | 1.85                 |
| 环向磁场 $B_t/\text{T}$                  | 5.3                  |
| 等离子体电流 $I_p/\text{MA}$               | 15                   |
| 平均电子密度 $n_e/\text{m}^{-3}$           | $1.1 \times 10^{20}$ |
| 平均离子温度 $T_i/\text{keV}$              | 8.9                  |
| 峰值聚变功率 $P_{\text{fusion}}/\text{MW}$ | 500                  |

资料来源：ITER官网、《我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望》、中信建投

## Part5.5 下游：国际可控核聚变典型装置——ITER

- ITER由全球35个国家/地区合作建造，主要成员是欧盟、美国、中国、日本、韩国、印度、俄罗斯。在建设阶段，欧洲承担了约45.5%的成本，其余六个国家各承担9.1%。在运营阶段，欧洲承担34%的成本，日本和美国分别承担13%，中国、印度、韩国和俄罗斯各承担10%。
- ITER项目存在项目进度延后的问题。ITER项目于2006年正式启动，原计划2025年正式开始等离子体实验，2035年进一步开始进行全氦-氦聚变实验。但由于新冠疫情导致供应链延迟，外加部分关键机器部件需要维修，根据新路线图，氦-氦聚变实验阶段预计从2039年开始，较原计划推迟4年。

ITER项目主要成员



ITER项目时间计划

### ITER Timeline

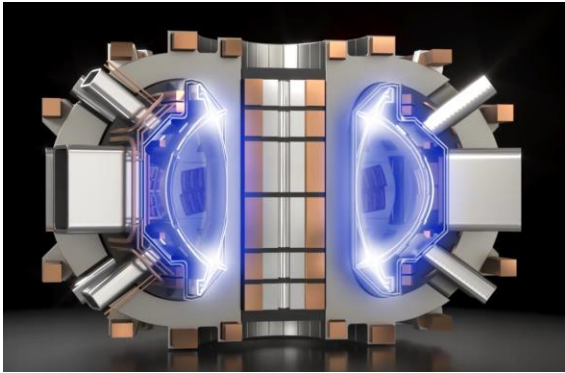
|           |                               |
|-----------|-------------------------------|
| 2005      | 敲定项目选址设于法国                    |
| 2006      | 签署《国际热核聚变实验堆协定》               |
| 2007      | ITER 组织正式成立                   |
| 2007-2009 | 场地清表与场地平整施工                   |
| 2008      | 零部件制造正式开始                     |
| 2010-2014 | 托卡马克建筑群的地面支撑结构、抗震地基施工         |
| 2012      | 核电许可关键节点：依据法国法规，ITER 被划定为基础设施 |
| 2010-2024 | ITER 主机及配套附属建筑施工（热室设施除外）      |
| 2015年起    | 大型核心构件沿 ITER 专项运输路线分批运抵现场     |
| 2020      | 装置整机装配启动                      |
| 2023      | 托卡马克建筑群土建工程竣工                 |
| 2024      | ITER 理事会审议新版项目基准方案，整体实施策略获批   |
| 2033      | 低温恒温器封盖合拢                     |
| 2033-2034 | 系统整体联动调试                      |
| 2034      | <b>科研试运行正式开启</b>              |
| 2036      | 磁场强度达到满额定磁能水平                 |
| 2039      | 氦-氦聚变工况试运行启动                  |

资料来源：ITER官网、中信建投

Part5.6 下游：美国可控核聚变典型公司——CFS

- 美国Commonwealth Fusion Systems (CFS) 公司，其通过创新的高温超导磁体技术显著缩小了托卡马克装置的尺寸，同时降低建设成本和周期。CFS与麻省理工学院合作开发的SPARC项目是一个紧凑型高场托卡马克装置，SPARC的核心创新在于采用稀土钨铜氧化物高温超导磁体HTS，这种HTS只需15吨的磁铁材料，即可产生20特斯拉的磁场强度，超过了大型托卡马克所需的400吨主磁铁的磁场强度，从而将托卡马克体积缩小至ITER的2%，单装置成本显著降低，同时减少建设周期。
- 2025年8月28日，CFS完成新一轮8.63亿美元融资，领投方包括英伟达等。目前CFS的估值达到80亿美元，融资金额超过30亿美元。
- SPARC原型堆于2026年5月建造进度已接近75%，计划在2026年实现首次等离子体放电，并在2027年实现净能量增益（Q>1），2024年12月，CFS宣布将在弗吉尼亚州建造世界上第一座商用核聚变发电厂ARC，预计将在2030年之后投入使用，可提供400兆瓦的清洁电力，足够为大约15万户家庭或大型工业设施供电。
- 2025年6月30日，谷歌与CFS签署购电协议，购电功率为200MW，并计划增加对CFS的投资金额。2025年9月22日，作为CFS的战略投资者，Eni签署了价值超过10亿美元的购电协议，购买CFS位于弗吉尼亚州切斯特菲尔德县的首座ARC电厂的清洁聚变能源。

SPARC示意图



SPARC建设里程碑

里程碑

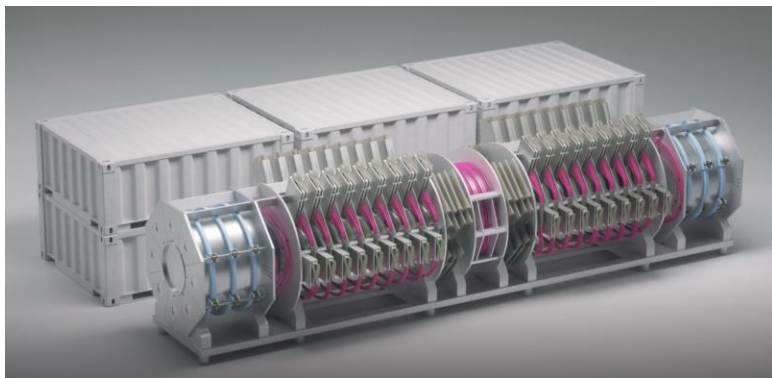
|                    | 已完成 | 正在推进 | 计划 |
|--------------------|-----|------|----|
| 完成 SPARC 场址选址与合规审批 | ●   | ○    | ○  |
| SPARC 装置建设         | ○   | ●    | ○  |
| 首次等离子体放电           | ○   | ○    | ●  |
| SPARC 实现净能量输出      | ○   | ○    | ●  |

资料来源：CFS官网，中信建投

## Part5.7 下游：美国可控核聚变典型公司——Helion

- 总部位于美国华盛顿州的Helion Energy公司采用的技术路线是磁惯性约束，通过叠加“磁场反向配置”和“脉冲不点火”实现。在2022年6月，Helion成功将等离子体加热到1亿摄氏度，这标志着Helion核聚变商业发电之路上的重要进展。目前已经完成了6代原型机，正在建造第七座反应装置“北极星”，公司预计该装置将成为世界上第一个展示净发电量的聚变发电机。采用氘-氦3聚变，反应不产生中子，生成的质子直接用于发电。
- 2022年，OpenAI首席执行官山姆·奥特曼为Helion注资3.75亿美元。2023年5月，Helion宣布将在2028年之前建成世界上第一座聚变发电厂，并已与微软签订了对赌协议，计划在建成后1年内实现至少50MW的发电能力。截至2026年7月，Helion累计融资超过20亿美元，估值达到155亿美元。
- 2025年7月30日首座聚变电厂ORION启动建设。2026年2月13日，北极星成功运行可测量的氘氘聚变反应，并实现了1.5亿摄氏度的等离子体温度。

Helion聚变装置示意图



北极星聚变装置参数

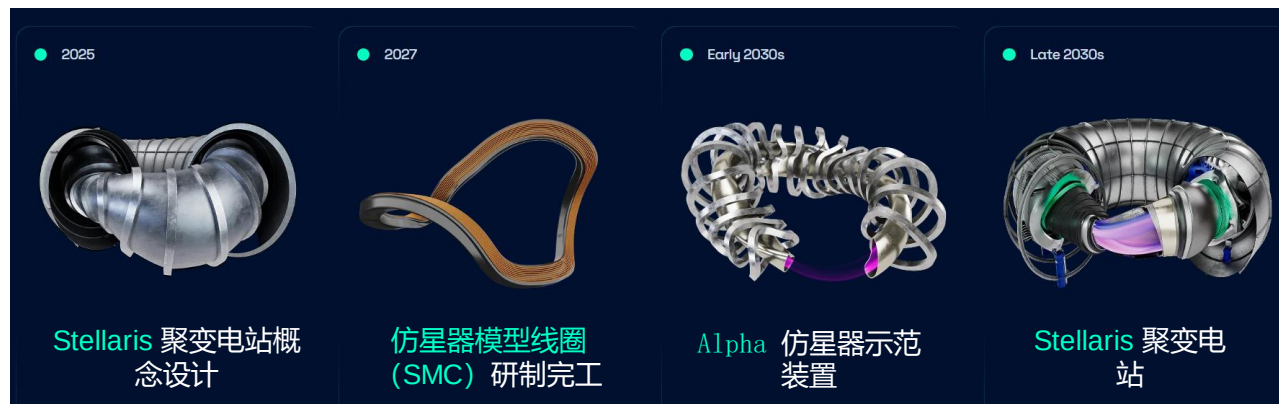
|         |                  |
|---------|------------------|
| 总长      | 19 m             |
| 燃料      | D-D, D-T, D-He-3 |
| 储能能量    | 50 MJ+           |
| 峰值磁场    | 15 T+            |
| 感应式能量回收 | Yes              |
| 气体过滤    | Yes              |
| 全套诊断系统  | 3,800            |

资料来源：Helion官网，中信建投

## Part5.8 下游：德国可控核聚变典型公司——Proxima Fusion

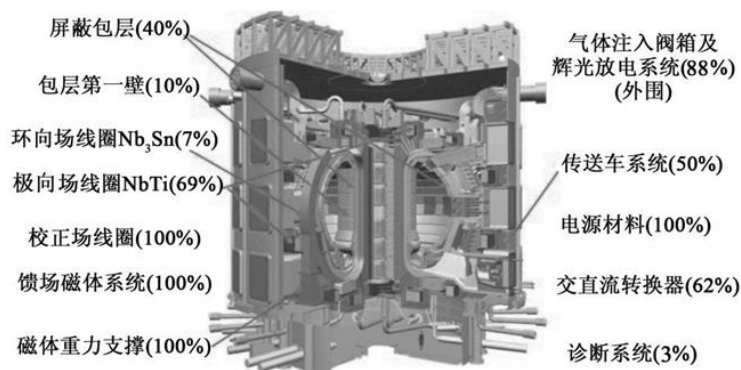
- Proxima Fusion于2023年从马克斯·普朗克等离子体物理研究所（IPP）剥离成立，专注于利用仿星器技术建造核聚变电厂。基于IPP的W7-X仿星器突破性实验成果，引领欧洲迈入清洁能源新纪元。仿星器相比托卡马克技术无等离子体电流，没有电流大破裂风险，但线圈极为复杂，加工精度要求极高。
- 公司2025年2月，公布了1GW商业级仿星器聚变电站集成概念设计“Stellaris”。将于2027年完成仿星器模型线圈（SMC）——这一关键硬件演示，将降低仿星器用高温超导（HTS）技术的风险，并推动欧洲高温超导技术创新。Proxima Fusion还将敲定其示范仿星器Alpha的选址，目前已与多个欧洲国家政府展开洽谈。**Alpha计划于2030年代初投入运营，是验证Q>1（净能量增益）并迈向首座商用核聚变电站的关键一步，2030年代末建成聚变电站。**
- 在2025年5月22日结束的实验活动中，德国Wendelstein 7-X（W7-X）仿星器团队取得重大突破：在长脉冲运行模式下，该装置以43秒的稳定持续时间刷新了等离子体三重积的世界纪录。这一成就标志着仿星器技术首次在长脉冲领域超越托卡马克装置的历史最佳性能。将约束时间提升到分钟量级。
- 2026年7月7日，完成最新一轮4.11亿欧元融资，刷新欧洲商业聚变单笔融资记录，谷歌、RWE担任战略投资方。

Stellaris仿星器聚变电站概念图及时间里程碑

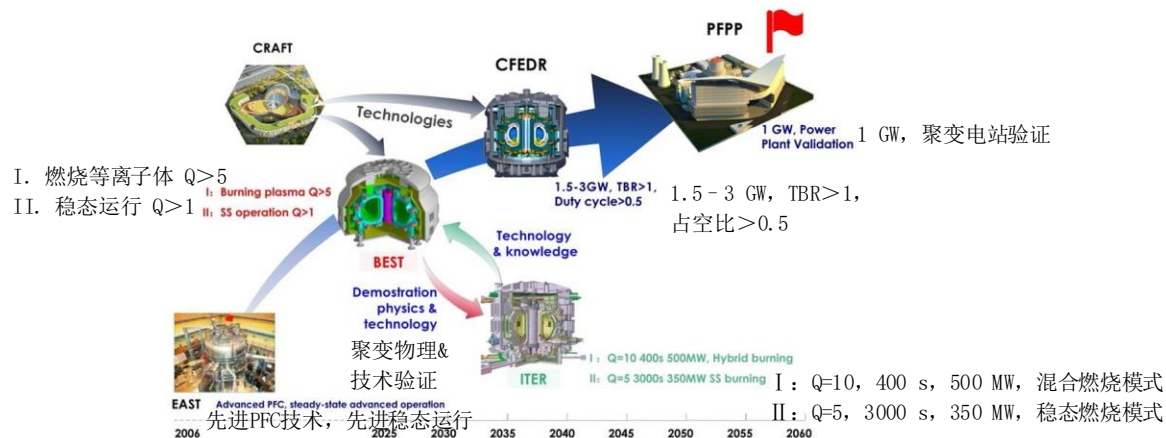


- 我国核能发展采取“热堆-快堆-聚变堆”三步走战略，在上世纪处于基础研究与技术突破阶段，21世纪初通过加入ITER计划进入快速发展与工程化阶段，目前已进入商业化探索与应用阶段。我国在2006年加入ITER项目，承担了涉核部件、磁体支撑、超导导体、诊断等多个关键系统的研制任务，突破了多个聚变堆设计建造的工程技术难题，通过深度参与ITER计划，承担ITER关键系统、技术研发，我国在支持ITER项目建设的同时，自身研发实力也将得到快速发展。
- 我国核聚变研发水平总体上已位居国际第一方阵。磁约束方面，我国已处于世界前列，先后建成了合肥超环（HT-7）（目前退役）、中国环流器二号（HL-2A）、东方超环（EAST）、环流器三号（HL-2M）等托卡马克装置，正在建设BEST、环流四号、CFEDR等装置；惯性约束方面，我国几乎与美国同一时间开展激光惯性约束路线研究，中物院激光聚变研究中心设计并搭建了神光-III主机激光装置，2015年建成并进行第一次全功率打靶，输出能181.3kJ，在目前已建成的激光装置中，神光-III主机激光装置的总体规模和性能位列世界第二、亚洲第一，仅次于美国NIF装置，此外Z箍缩聚变也处于国际先进水平。
- 我国聚变堆有望在2045年左右进入示范阶段，2050年前后实现商业化发电。

中国在ITER中承担的采购包



中国等离子体所磁约束聚变发展路线图



资料来源：《国际热核实验反应堆（ITER）计划与未来核聚变能源》、Best Research Plan，中信建投

■ 核聚变被明确列为未来能源，2025年首次入法，2026年首次以独立表述写入五年规划纲要正文。

国内可控核聚变相关政策梳理

| 政策文件/新闻名称                    | 发布部门                                                       | 发布时间                          | 相关表述                                                                                                                                                                                     |
|------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 关于推动未来产业创新发展的实施意见            | 工业和信息化部、教育部、科学技术部、交通运输部、文化和旅游部、国务院国有资产监督管理委员会、中国科学院（七部门联合） | 2024年1月29日                    | 在“未来能源”专栏中明确：“聚焦核能、核聚变、氢能、生物质能等重点领域，打造‘采集-存储-运输-应用’全链条的未来能源装备体系。”                                                                                                                        |
| 聚变装置分级分类监管要求（征求意见稿）          | 生态环境部办公厅                                                   | 2024年9月13日                    | 将聚变装置划分为等离子体物理实验装置、氦氖聚变实验装置、聚变能应用装置三个阶段。                                                                                                                                                 |
| 关于聚变装置辐射安全管理有关事项的通知          | 生态环境部办公厅                                                   | 2025年4月7日                     | 聚变装置的辐射安全由我部参照核技术利用设施实施监督管理，并颁发辐射安全许可证，日常监督检查由我部地区核与辐射安全监督站负责。基于不同类型聚变装置的辐射安全风险，我部对聚变装置进行分类管理（见附件），与现行辐射管理要求有效衔接，便于建设单位根据相应的类别办理环境影响评价手续。我部将实行环境影响评价与辐射安全许可接续办理，探索开展环境影响评价与辐射安全许可“审评合一”。 |
| 国家能源局举行例行新闻发布会               | 国家能源局                                                      | 2025年4月28日                    | 大力支持第四代核电技术、小型模块化反应堆、核聚变等前沿技术的研发攻关。                                                                                                                                                      |
| 中华人民共和国原子能法                  | 全国人民代表大会常务委员会                                              | 2025年9月12日通过<br>2026年1月15日起施行 | “聚变”首次入法，具有里程碑意义：第二条明确将聚变纳入原子能定义；第十四条：“国家鼓励和支持受控热核聚变的科学研究与技术开发。”第三十九条：“国家建立符合受控热核聚变特点、促进核聚变应用的监督管理制度，对聚变燃料、聚变装置（设施）实行分级分类管理。”                                                            |
| 环境影响评价技术导则 磁约束聚变装置（征求意见稿）    | 生态环境部办公厅                                                   | 2025年9月15日                    | 本标准规定了磁约束聚变装置（含氦氖实验）建设项目环境影响评价的一般规定、技术要求和编制要求。本标准适用于磁约束聚变装置（含氦氖实验）建设项目环境影响评价工作。其他聚变装置（如惯性约束）或其他聚变实验装置（如氦增殖）可参照执行。本标准不适用于聚变能应用装置（聚变能实验装置、聚变能示范装置或聚变电站）。                                   |
| 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议 | 中国共产党第二十届中央委员会                                             | 2025年10月28日                   | 前瞻布局未来产业，探索多元技术路线、典型应用场景、可行商业模式、市场监管规则，推动量子科技、生物制造、氢能和核聚变能、脑机接口、具身智能、第六代移动通信等成为新的经济增长点。创新监管方式，发展创业投资，建立未来产业投入增长和风险分担机制。促进中小企业专精特新发展，培育独角兽企业。                                             |
| 加快构建现代化基础设施体系                | 国家发展改革委基础设施发展司                                             | 2025年12月25日                   | 加大长时储能、绿电制氢氨醇、核聚变等技术攻关                                                                                                                                                                   |
| 中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要   | 全国人民代表大会                                                   | 2026年3月13日                    | 瞄准引领未来发展重点领域，构建未来产业全链条培育体系，推动量子科技、生物制造、氢能和核聚变能、脑机接口、具身智能、第六代移动通信等成为新的经济增长点。                                                                                                              |
| 新型能源体系建设“十五五”规划              | 国家发展改革委、国家能源局                                              | 2026年6月25日                    | 在能源创新发展重点方向的未来能源技术部分提出：“强化可控核聚变、太空电站、高温超导输电、无线传能、极地深海能源等理论研究和技术创新。                                                                                                                       |



- 国内核聚变参与者可大致分为体制内院所与民营企业两类。未来围绕核聚变能研发，院所将与市场力量进一步开展深化协作，充分发挥国资央企的科技创新主体作用，民营资本将发挥产业孵化、市场运营等方面的优势，共同促进核聚变事业高质量发展。
- 院所以中科院等离子体所与核工业西南物理研究院（585）为主，国家项目也将通过商业公司开展产业化工作，主体分别为聚变新能和聚变能源。
- 聚变新能（安徽）有限公司：成立于2023年5月，依托中科院等离子体所磁约束核聚变技术，按照“紧凑型聚变实验装置（BEST）-聚变工程示范堆（CFETR）-首个商业聚变堆”三步走战略，系统布局实验研究、工程示范及商业化应用的全链条发展路径。
- 中国聚变能源有限公司：中核集团全资子公司。2023年12月，由中核集团牵头，联合24家央企、科研院所、高校等组成的可控核聚变创新联合体在四川成都宣布成立，中国聚变能源有限公司（筹）正式揭牌。2024年9月，“中国核燃料有限公司”更名为“中国聚变能源有限公司”。

国内核聚变院所及其商业化公司相关情况

| 名称         | 简介                                                                                                                                                     | 代表性装置                                                                                                                                              | 商业化公司        |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 中科院等离子体所   | 中国科学院等离子体物理研究所是中国热核聚变研究的重要基地，世界实验室聚变研究中心，等离子体所与欧、美、俄、日、澳等三十多个国家和地区建立了稳定合作交流关系，成立国际聚变能联合中心。作为ITER中国工作组的重要单位之一，承担了ITER中国的导体、校正场线圈、超导馈线、电源、诊断等采购包任务和总装任务。 | 建成常规磁体托卡马克HT-6B、HT-6M，我国第一个圆截面超导托卡马克核聚变实验装置HT-7，世界上第一个非圆截面全超导托卡马克核聚变实验装置“东方超环”（EAST）。正在建造国家“十三五”大科学工程聚变堆主机关键系统综合研究设施CRAFT，开展中国聚变工程试验堆（CFETR）设计和预研。 | 聚变新能（安徽）有限公司 |
| 核工业西南物理研究院 | 西物院隶属于中核工业集团，是我国最早致力于可控核聚变和等离子体物理研究的专业科研院所，核能“三步走”发展战略中聚变堆研发的核心单位，我国参与国际热核聚变实验堆（ITER）计划的重要支撑单位。西物院承担了磁体支撑、屏蔽包层模块及第一壁等ITER关键部件研制。成功发布核聚变领域首个ISO国际标准。    | 建成中国环流一号装置，是我国核聚变领域第一个国家大科学工程装置；中国环流二号装置为我国核聚变研究从原理探索到大规模装置实验的跨越式发展奠定坚实的科学与工程基础；自主设计建造成功新一代人造太阳“中国环流三号”装置，是我国规模最大、参数最高的先进托卡马克装置，正在升级改造，并规划环流四号。    | 中国聚变能源有限公司   |

■ 目前，中国主要的商业核聚变公司多采取校企（院）合作模式，多采用高温超导托卡马克或FRC技术，部分采用仿星器技术。

国内主要商业聚变公司情况

| 公司名称 | 成立时间     | 技术路线      | 聚变相关情况                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------|----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 能量奇点 | 2021年6月  | 全高温超导托卡马克 | 全球首台全高温超导托卡马克洪荒70于2024年6月获得第一等离子体，这标志着能量奇点成为全球首个建成运行全高温超导托卡马克的团队，和全球首个建成运行全超导托卡马克的商业公司。2026 年 2 月实现 1337 秒稳态长脉冲等离子体运行，为全球商业公司首个千秒级聚变装置运行纪录；完成 22 特斯拉大孔径 D 形高温超导磁体研发，刷新同类磁体磁场强度世界纪录。争取2027年建成Q≥10的工程样机“洪荒170”证明核聚变能源的商业可行性，2030-2035年间建设氦氖示范电站“洪荒380”实现示范性聚变发电。                 |
| 星环聚能 | 2021年10月 | 球形托卡马克    | 2023年与清华大学合作建成SUNIST-2，完成初步工程验证。NTST装置（全球首台负三角球形托卡马克装置）计划2026年内完成安装调试；上海实验基地2026年下半年完成主体建设，2027年投用。目标2028年前后完成CTRFR-1（星环一号）装置工程验证，实现等效Q≥1的聚变目标；2029年星环一号实现满参数运行；2032年前后建成可输出电能的聚变示范堆；2033年前后建成具备示范发电能力的星环二号。                                                                   |
| 瀚海聚能 | 2022年12月 | 直线型场反位形   | 2024年完成装置、控制系统、等离子体源设计；2025年7月，首台商业化直线型FRC聚变装置HHMAX-901主机建成，实现等离子体点亮。目标2026年内实现核聚变反应运行；2028年实现1亿℃以上等离子体温度、净能量增益及首次发电；2030年底前建成50MW量级聚变示范电站；2030年代前期研发100MW以上商业化核聚变装置，实现聚变电站产业化；中短期通过核医疗、中子成像等实现商业落地。                                                                           |
| 新奥科技 | 2006年8月  | 球形环氢硼     | 选择球形环氢硼聚变技术路线，2019年建成国内首座中等规模球形环物理实验装置“玄龙-50”，2023年升级为“玄龙-50U”；2022年并行启动了整体参数国际领先的球形环新装置“和龙”的建设，旨在通过该装置探索解决氢硼聚变中的各项关键技术。2025 年 12 月实现国际首次氢硼等离子体高约束模放电，离子温度突破 4000 万℃；2026 年 1 月玄龙 - 50U电子温度突破 1 亿℃，达到球形环装置国际先进水平；目标2030 年实现氢硼热核反应及能量增益验证，点亮氢硼聚变第一盏灯；2035 年进入商业化示范阶段，实现低成本并网发电。 |
| 星能玄光 | 2024年3月  | FRC+磁镜    | 基于中科大KMAX-FRC十余年的理论和实践积累，公司团队致力于紧凑型聚变的创新，目标是利用场反和磁镜的特点加速实现大型和分布式聚变堆的商业化。2025年2月，首台脉冲FRC实验装置Xeonova-1实现等离子体放电，刷新国内聚变装置建造速度纪录；2026年1月，先进场反磁镜聚变装置FLAME实现首次等离子体放电，迈入物理实验阶段；2026年5月FLAME装置实现明显等离子体加热效果。目标2030年前后实现兆瓦级聚变功率输出和Q>1的能量增益里程碑；2035年左右打造百兆瓦级聚变工程堆并推进商业化并网。                 |

■ 目前，中国主要的商业核聚变公司多采取校企（院）合作模式，多采用高温超导托卡马克或FRC技术，部分采用仿星器技术。

国内主要商业聚变公司情况（续表）

| 公司名称 | 成立时间     | 技术路线    | 聚变相关情况                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------|----------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 诺瓦聚变 | 2025年4月  | FRC-SMR | 已启动诺瓦一号装置工厂建设，完成高功率固态开关、强磁场磁体、超大口径石英管等核心技术突破。2027年前是技术验证阶段，以“诺瓦一号”为平台，攻关1亿度等离子体温度、能量增益Q>1等核心指标，完成高功率脉冲电源、大口径真空室、纳秒级控制系统、模块化磁体四大工程瓶颈的闭环验证，证明FRC-SMR路线的工程可行性。2028-2030年代前半叶是示范发电阶段，依托“诺瓦一号”技术迭代，建设国内首座小型分布式聚变示范电站，实现并网发电。2030年代中后期是规模化商用阶段，实现50-100MW级聚变小堆标准化量产。                  |
| 东昇聚变 | 2025年7月  | 氦氖3磁约束  | 在十年之内，先期打造"晨光"强磁场紧凑型实验装置，完成高温超导磁体技术路线验证，后续依次迭代两代装置，持续优化技术性能，最终达成D-He3聚变净能量增益（Q>1）目标                                                                                                                                                                                             |
| 星核聚变 | 2025年11月 | 高温超导仿星器 | "星核0号"是当前核心任务。作为公司面向未来商业化建设的第一座关键验证平台，任务是将设计方法、核心部件、系统集成和运行控制放到真实装置中检验。目前核心部件已进入制造装配阶段，计划于2026年底实现首次等离子体放电——这一节点如果达成，将标志着星核聚变完成从纸面设计到工程实体的关键跨越。"星核一号"同步推进，重点验证新一代先进仿星器磁场位形和全高温超导技术，打造通向更高参数先进仿星器装置的关键技术底座。"星核二号"瞄准中期目标，计划于2030年年底前建成采用铌钛-高温超导混合技术路线的中型超导实验装置，向更高参数、更接近商业堆的形态迈进。 |
| 聚合聚变 | 2026年3月  | FRC脉冲   | 公司规划了三代FRC脉冲磁约束聚变装置，稳步冲击国际先进FRC技术水平，最终力争实现聚变能源商业化：2027年初实现首次等离子体放电；2028年实现FRC装置全要素运行；2030年冲击聚变点火条件                                                                                                                                                                              |
| 国脉聚能 | 2026年5月  | FRC脉冲   | 公司开发的“启明星”系列 aFRC 装置，采用直线型、模块化结构，脉冲式运行；具有工程简易、成本低、迭代快、应用场景广的特点。在 aFRC 聚变能源研发过程中，可培育相关产业链，并在先进诊断与模拟、聚变中子源、硼中子俘获治疗、医用同位素制备、航空航天等前沿领域，孵化大量高端实用的技术。                                                                                                                                 |

资料来源：各公司官网及微信公众号，中信建投证券

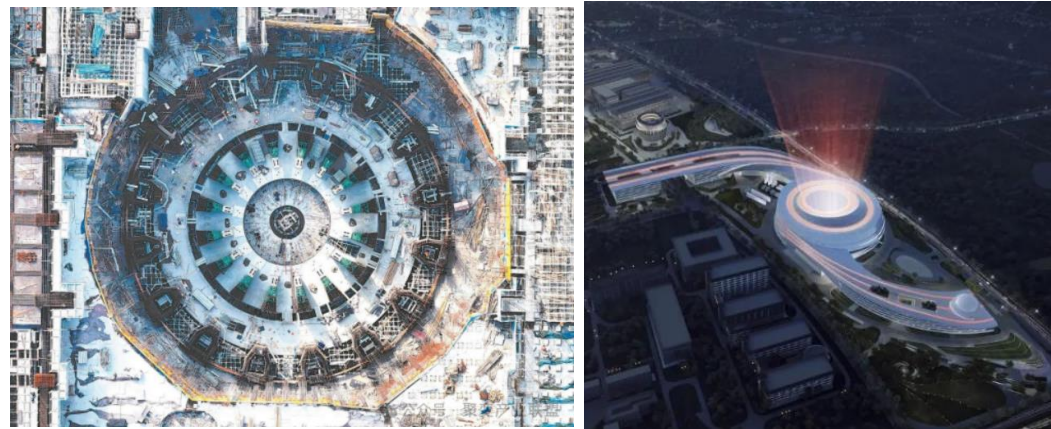
## 下游：等离子体所聚变装置——EAST/BEST

- EAST（东方超环）：等离子体物理研究所自主研制的世界上第一个全超导托卡马克实验装置EAST（东方超环），标志着聚变能发展步入全超导托卡马克时代，向着实现稳态核聚变能源方向发展。2006年建成并完成放电实验，2015年完成升级改造。
- 2025年1月20日，EAST在安徽合肥创造新世界纪录，首次完成1亿摄氏度1000秒“高质量燃烧”，标志我国聚变能源研究实现从基础科学向工程实践的重大跨越。
- 2026年1月2日，由华中科技大学与中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所组成的联合研究团队宣布，EAST等离子体运行密度达到格林沃尔德极限的1.3~1.65倍，首次证实 PWSO 理论中密度自由区真实存在，打破持续 38 年的托卡马克密度天花板，为聚变堆提升输出功率扫清关键物理障碍。
- BEST（紧凑型聚变能实验装置）是EAST的后续项目，有望率先建成世界首个紧凑型聚变能实验装置，实现从实验堆到工程化再到商业化的转化。BEST仍以低温超导托卡马克技术为主，少量采用高温超导，装置将使用真实的原料氘和氚进行可控核聚变反应，实现Q值>1，计划在 2027 年建设完成，并在2030年演示聚变能发电。2026年6月30日，BEST装置第一段主机组件顺利完成精准吊装。

EAST装置图



BEST项目及概念图



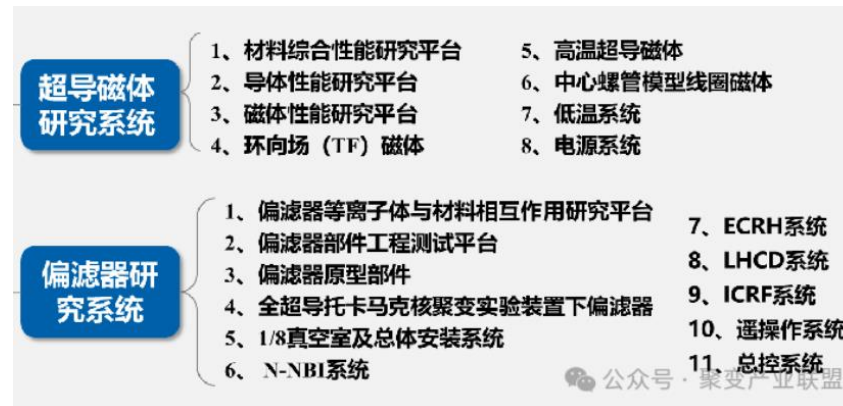
## 下游：等离子体所聚变装置——CFETR

- **CFETR**：中科院等离子体所2011年提出的聚变装置，旨在填补ITER与未来聚变商业示范堆（DEMO）之间的关键技术空白，为实现核聚变能的大规模、可持续发电提供切实可行的工程方案。CFETR项目着力突破：稳态的氘、氚等离子体运行技术，氘的增殖、循环、自持燃烧技术，适应长时间高中子辐照、高热负荷环境的聚变堆壁材料技术。
- 2025年正式升级为工程示范堆，更名为**CFETR**。核心目标包括：1.5-3GW聚变功率、能量增益 $Q=15-30$ 、运行因子 $>0.5$ （即年运行时间超4380小时）。CFETR 将在 2026 年完成工程设计,2026 年底至 2027 年初启动建设,2035 年建成投运并开展大规模科学实验。
- **CRAFT（夸父）**：聚变堆主机关键系统综合研究设施项目，重点开展聚变堆主要关键系统的设计与开发，为CFETR提供关键的技术验证和实验平台。主体工程涉及极端工况条件下偏滤器系统、大型复杂超导磁体系统等挑战性任务。2026年6月27日，环向场磁体完成最后制备工艺，并通过专家验收。同时，高温超导中心螺管线圈磁体也完成满工况参数测试，核心性能达到国际领先水平。

CFETR示意图



CRAFT主体工程的任務

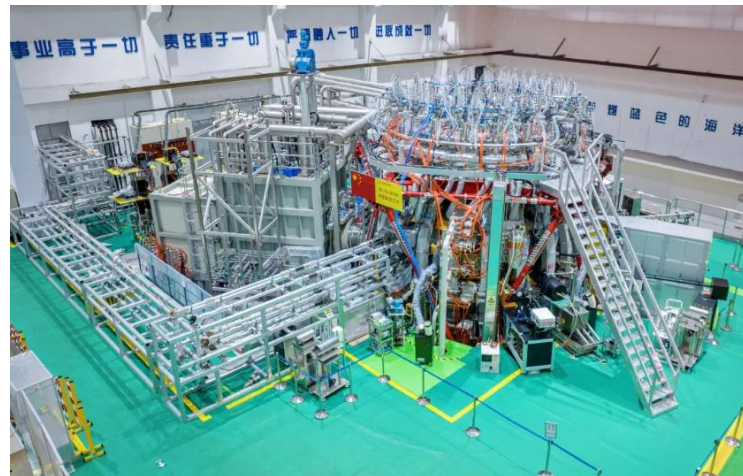


资料来源：聚变产业联盟微信公众号，中信建投

## 下游：中核集团聚变装置——环流三号/环流四号

- 西物院于1984年和1994年分别建造了中国环流器一号（HL-1）和中国环流器新一号（HL-1M）两个中型托卡马克装置，2002年，该院建设了我国第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置，即中国环流器二号A（HL-2A）装置。
- 中国环流三号（HL-2M，后改名HL-3）是核工业西南物理研究院自主设计、建造的中国新一代人造太阳，是我国目前设计参数最高、规模最大的核聚变大科学装置，2020年装置建成，目前仍处于实验研究阶段，核心任务是实现“聚变点火”，目标是验证聚变堆物理与工程可行性。预计2045年左右进入示范阶段，有望在2050年前后实现商业化发电。
- 2020年12月HL-3实现首次放电，2024年5月实现了150万安培等离子体电流下的高约束运行模式，2025年3月28日，环流三号原子核温度和电子温度突破“双亿度”，聚变三乘积实现大幅跃升。目前，HL-3正进行升级改造，计划于2027年在国内率先开展聚变燃烧实验，实现从科学探索迈向工程验证的关键跨越。
- 环流四号为高温超导托卡马克装置，主要目标有三个：验证大型高温超导磁体的运行可靠性、演示聚变堆全域智能运行控制技术、实现长脉冲高增益稳定运行。

环流三号



## 下游：混合堆中星火一号与Z-FFR齐头并进

- **星火一号：依托江西聚变公司。**2023年11月，江西省人民政府与中国核工业集团有限公司签订全面战略合作框架协议。江西联创光电超导应用有限公司和中核聚变（成都）设计研究院有限公司计划各自发挥技术优势，采用**高温超导聚变-裂变混合路线**，拟在江西省联合建设可控核聚变项目，技术目标 $Q>30$ ，实现连续发电功率100MW，工程总投资预计超过200亿元人民币。2024年6月，联创光电与中核集团就共同推进“星火一号”聚变-裂变混合示范堆的建设达成了初步合作意向。据南华早报报道，星火一号计划在**2030年前建成并实现100MW发电和并网**。目前已完成环评工作。
- **Z-FFR：依托泽塔聚变和先觉聚能。**2008年，中国工程物理研究院提出了**Z箍缩聚变裂变混合堆（Z-FFR）**概念。2013年，研究团队研制了输出电流约为10 MA的强流脉冲功率装置，接近美国的Z装置性能。2020年，研究团队研制了与50 MA驱动器单支路同等规模的LTD单路样机装置；实验定标和理论分析表明，50 MA驱动器可以实现点火和大规模放能。2021年，“电磁驱动大科学装置”项目获得立项，采用LTD技术路线，重点验证“局部体点火靶”技术，同时为Z-FFR重频驱动器研制积累工程经验。2023年，研究团队研制了大功率超快半导体开关，可以满足Z-FFR驱动器重频长寿命的应用需求。我国瞄准2040年实现Z-FFR商业化供能目标论证发展规划，提出了3个发展阶段的**任务目标**。有望**2030年前实现聚变点火**，**2040年进行发电演示**，之后进入商业推广阶段。

# 风险提示

- **关键材料与燃料供给不及预期风险。**可控核聚变装置第一壁、超导磁体、氚增殖包层所需特种合金、高温超导带材、浓缩锂-6 等核心材料产能有限、量产工艺不成熟；氚天然储量稀缺，氚自持增殖工程验证难度大，若上游供应链配套、氚循环技术研发滞后，将制约聚变装置工程化落地进度。
- **多技术路线迭代竞争与路线变更风险。**当前磁约束、Z 箍缩、惯性约束等多条聚变技术路线并行研发，各路线核心设备、材料体系差异显著；若后续主流技术路线发生切换，已布局特定路线零部件、装置研发的企业将面临前期研发投入沉没、订单需求萎缩的不利影响。
- **行业监管细则与核安全审评落地滞后风险。**国内聚变装置、氚燃料、中子辐照相关监管、安全审评标准尚处于完善阶段，示范堆、商业化聚变电站审批流程未完全定型；若核安全、辐射防护、氚管控相关细则出台节奏不及预期，会延缓项目立项、建设与运营审批进度。
- **长期大额资本投入与商业化回报不确定风险。**可控核聚变从实验样机、示范堆到商业电站全周期投入规模巨大、研发周期长达十至二十年，短期难以形成规模化发电收益与稳定现金流；若一级市场融资遇冷、企业持续烧钱压力加大，相关企业存在研发放缓、项目延期甚至阶段性停工风险。
- **替代能源经济性挤压市场空间风险。**光伏、风电、储能、小型模块化裂变堆等清洁能源持续降本扩容，具备成熟产业链与平价供电能力；若上述替代能源成本下降速度超预期，即便核聚变实现技术突破，其度电成本、投资回报周期劣势也将压缩远期商业化市场需求与盈利空间。

# 分析师介绍

**黎韬扬：**现任中信建投证券股份有限公司研发部执行总经理、军工与新材料团队首席分析师，2025年4月-2026年4月挂职任中信投资控股战略投资部一级高级经理，北京大学硕士，中信智库专家。2015-2017年新财富、水晶球、  
军工行业第一名团队核心成员，2018-2024年水晶球军工行业上榜，2018-2020年  
军工行业第一名，2019-2022年金牛奖最佳军工行业分析团队，2024-2025年新浪金麒麟军工行业上榜，2018-2024年新财富军工行业上榜、入围。

**汪正鑫：**军工与新材料分析师，硕士毕业于北航能源动力专业，本科毕业于北航飞行器动力工程专业，2023年加入中信建投军工团队，新财富国防军工行业入围团队核心成员。

## 评级说明

| 投资评级标准                                                                                                                                           |      | 评级   | 说明            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|---------------|
| 报告中投资建议涉及的评级标准为报告发布日后6个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的6个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A股市场以沪深300指数作为基准；新三板市场以三板成指为基准；香港市场以恒生指数作为基准；美国市场以标普 500 指数为基准。 | 股票评级 | 买入   | 相对涨幅15%以上     |
|                                                                                                                                                  |      | 增持   | 相对涨幅5%—15%    |
|                                                                                                                                                  |      | 中性   | 相对涨幅-5%—5%之间  |
|                                                                                                                                                  |      | 减持   | 相对跌幅5%—15%    |
|                                                                                                                                                  |      | 卖出   | 相对跌幅15%以上     |
|                                                                                                                                                  | 行业评级 | 强于大市 | 相对涨幅10%以上     |
|                                                                                                                                                  |      | 中性   | 相对涨幅-10-10%之间 |
|                                                                                                                                                  |      | 弱于大市 | 相对跌幅10%以上     |
|                                                                                                                                                  |      |      |               |
|                                                                                                                                                  |      |      |               |

## 分析师声明

本报告署名分析师在此声明：（i）以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，结论不受任何第三方的授意或影响。（ii）本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

## 法律主体说明

本报告由中信建投证券股份有限公司及/或其附属机构（以下合称“中信建投”）制作，由中信建投证券股份有限公司在中华人民共和国（仅为本报告目的，不包括香港、澳门、台湾）提供。中信建投证券股份有限公司具有中国证监会许可的投资咨询业务资格，本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格证书编号已披露在报告首页。

在遵守适用的法律法规情况下，本报告亦可能由中信建投（国际）证券有限公司在香港提供。本报告作者所持香港证监会牌照的中央编号已披露在报告首页。

## 一般性声明

本报告由中信建投制作。发送本报告不构成任何合同或承诺的基础，不因接收者收到本报告而视其为中信建投客户。

本报告的信息均来源于中信建投认为可靠的公开资料，但中信建投对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载观点、评估和预测仅反映本报告出具日该分析师的判断，该等观点、评估和预测可能在不发出通知的情况下有所变更，亦有可能因使用不同假设和标准或者采用不同分析方法而与中信建投其他部门、人员口头或书面表达的意见不同或相反。本报告所引证券或其他金融工具的过往业绩不代表其未来表现。报告中所含任何具有预测性质的内容皆基于相应的假设条件，而任何假设条件都可能随时发生变化并影响实际投资收益。中信建投不承诺、不保证本报告所含具有预测性质的内容必然得以实现。

本报告内容的全部或部分均不构成投资建议。本报告所包含的观点、建议并未考虑报告接收人在财务状况、投资目的、风险偏好等方面的具体情况，报告接收者应当独立评估本报告所含信息，基于自身投资目标、需求、市场机会、风险及其他因素自主做出决策并自行承担投资风险。中信建投建议所有投资者应就任何潜在投资向其税务、会计或法律顾问咨询。不论报告接收者是否根据本报告做出投资决策，中信建投都不对该等投资决策提供任何形式的担保，亦不以任何形式分享投资收益或者分担投资损失。中信建投不对使用本报告所产生的任何直接或间接损失承担责任。

在法律法规及监管规定允许的范围内，中信建投可能持有并交易本报告中提公司的股份或其他财产权益，也可能在过去12个月、目前或者将来为本报告中所提公司提供或者争取为其提供投资银行、做市交易、财务顾问或其他金融服务。本报告内容真实、准确、完整地反映了署名分析师的观点，分析师的薪酬无论过去、现在或未来都不会直接或间接与其所撰写报告中的具体观点相联系，分析师亦不会因撰写本报告而获取不当利益。

本报告为中信建投所有。未经中信建投事先书面许可，任何机构和/或个人不得以任何形式转发、翻版、复制、发布或引用本报告全部或部分内容，亦不得从未经中信建投书面授权的任何机构、个人或其运营的媒体平台接收、翻版、复制或引用本报告全部或部分内容。版权所有，违者必究。

### 中信建投证券研究发展部

北京  
朝阳区景辉街16号院1号楼18层

电话：(8610) 8513-0588  
联系人：李祉瑶  
邮箱：lizhiyao@csc.com.cn

上海  
浦东新区浦东南路528号南塔2103室

电话：(8621) 6882-1600  
联系人：翁起帆  
邮箱：wengqifan@csc.com.cn

深圳  
福田区福中三路与鹏程一路交汇处广电金融中心  
35楼

电话：(86755) 8252-1369  
联系人：曹莹  
邮箱：caoying@csc.com.cn

### 中信建投（国际）

香港  
中环交易广场2期18楼

电话：(852) 3465-5600  
联系人：刘泓麟  
邮箱：charlene.liu@csci.hk