

证券研究报告 | 机械设备 | 2025年04月10日

机械团队·行业深度报告

核聚变订单加速落地，三四代机组进入交付上行期，迎接核能行业大时代

分析师

赵璐

登记编号：S1220524010001



并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

“热堆-快堆-聚变堆”核能“三步走”发展战略，是我国1983年在“核能发展技术政策论证会”上首次提出的核能发展总战略，其核心内容是解决我国核能可持续发展、核燃料长期安全有效供应的问题。随着核电机组创近年新高、四代商业堆的首次批复、示范快堆的建成投运、聚变项目的招标加速，以及海外算力需求推动SMR的发展，核能行业呈现欣欣向荣的发展态势，中国核电2022-2024年连续三年投资计划增速在50%左右，行业资本开支上行趋势明显，值得重视。本文将着重介绍聚变行业的发展现状及未来趋势。

三代核电：投资逻辑主要为此前几年批复机组数量的增加对应到未来几年业绩的逐渐兑现、国产替代，以及天然良好竞争格局带来的较稳定的高毛利。建议重点关注：中国核电、中国广核、中核科技、江苏神通、佳电股份、兰石重装、科新机电。

四代核电：2024年11月，国常会批复了中核集团所属的江苏徐圩一期工程。随着24年机组开工，25年四代核电设备企业也将逐渐进入交付期，建议关注：佳电股份、海陆重工。

聚变，是两个轻原子核相互碰撞形成重原子核，并释放出大量能量的过程。目前主流技术路径包括磁约束聚变、惯性约束聚变。目前，ITER项目预计于2035年启动，美国Helion承诺在2028年之前开始通过聚变发电，日本FAST预计2025年完成初步设计，目标2030年代完成发电示范，韩国型创新聚变反应堆CPD计划于2030年代投入运行，而我国中国聚变工程试验堆（CFETR）也计划2030年代建成，各国开启军备竞赛。

此外，自25年开年以来，尤其3月以来我国BEST项目招标进展明显加快，叠加未来CFETR项目的启动，资本开支上行明显，聚变设备企业将逐渐从预研订单阶段进入工程订单阶段，真正在产业端见到相应的收入与利润，实现从0-1的跨越。

聚变领域建议关注：

- 1) 磁体相关：西部超导、联创光电、永鼎股份、精达股份。
- 2) 主机相关：国光电气（偏滤器、第一壁、氦兼容增压系统、屏蔽模块热氦检漏设备、其他工艺设备）
合锻智能（真空室扇区、窗口延长段、重力支撑）
航天晨光（杜瓦系统）
安泰科技（钨铜偏滤器、钨铜限制器、包层第一壁、钨硼中子屏蔽材料）
久立特材（TF、PF导管）
海陆重工（结构件）、弘讯科技（聚变电源器）、旭光电子（大功率电子管）

风险提示：核聚变技术研发不及预期风险、投资不及预期风险、核电机组批复不及预期风险、交付节奏不及预期风险、原材料价格波动风险

1. 核电：三、四代机组进入交付上行期

1.1 核能三步走战略：热堆—快堆—聚变堆

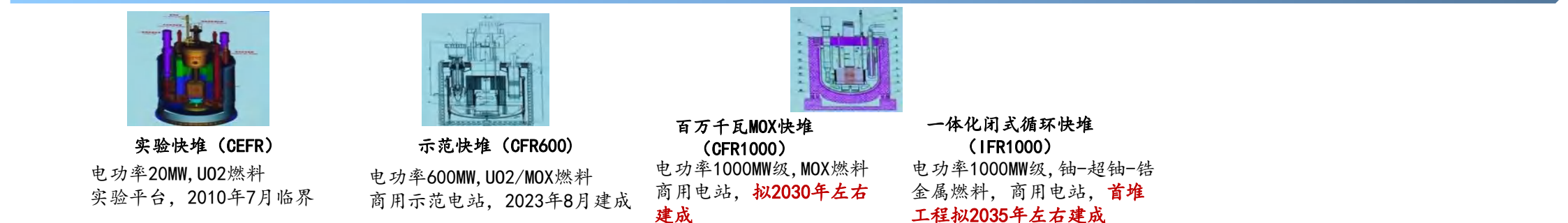
热堆

核能发展的第一步，主要关注的是核裂变技术的成熟应用。热堆技术相对成熟，是当前核能发电的主要形式。



快堆

主要是采用快中子反应，能够实现核燃料的增殖，提高资源利用效率。



聚变堆

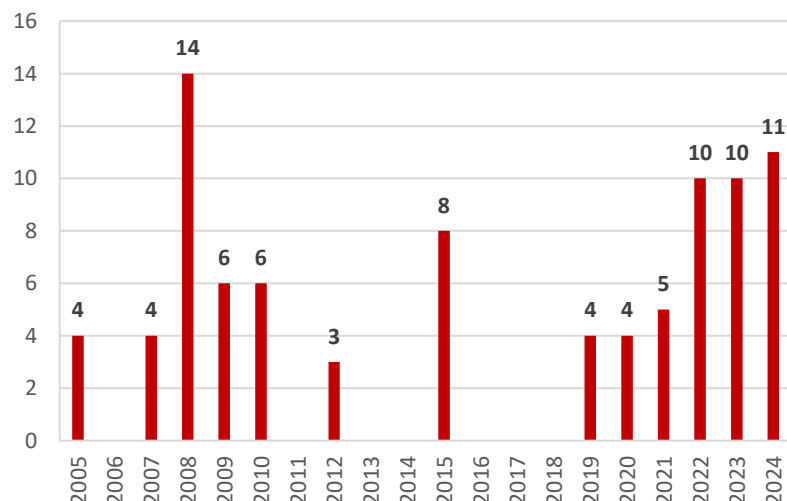
核能发展的最终目标，具有资源丰富，固有安全 and 环境友好等突出优势



1.2 三代核电：24年设备企业如期交付，25年开始逐渐进入交付上行期

- 三代核电投资逻辑主要为批复机组数量的增加对应业绩的逐渐兑现+国产替代+较稳定的高毛利。
- 设备企业进入交付上行周期**：2019-2021年机组批复数量分别在4、4、5台，2022-2023年均批复10台核电机组，24年批复11台机组。考虑到核电项目建设周期较长，批复后，核电设备交付节奏滞后，24年核电设备企业交付订单仍然以22年及以前批复机组为主，2025年及以后核电设备企业有望迎来订单交付的上行周期。
- 国产替代空间大**：以阀门为例，目前我国在部分高价值的关键零部件领域进口自法国、加拿大企业，对设备及零部件企业而言，仍然存在国产替代空间。
- 核电行业由于**资质壁垒较高**，且对安全性要求高等特点，具有良好的竞争格局，企业进入供应商梯队后，出现竞争加剧导致毛利率下滑等情况较少，毛利率基本可以维持在较高水平。
- 建议关注**：中国核电、中国广核、中核科技、江苏神通、佳电股份、兰石重装、科新机电。

2005-2024年核电机组批复数量（台）



中国核电资本开支



中国核电资本计划及用途

时间	投资计划总额（亿元）	增速	用途
2024	1216	52%	核电、核能多用途、新能源、单项固定资产投资项目和参控股资本金注入、收购项目等。
2023	800	58%	核电、核能多用途、新能源、单项固定资产投资项目和参控股资本金注入、收购项目等。
2022	506	49%	核电、核能多用途、新能源、单项固定资产投资项目和参控股资本金注入、收购项目等。
2021	339	10%	核电、核能多用途、新能源、单项固定资产投资项目和参控股资本金注入、收购项目等。
2020	309	-3%	核电、新能源、其他基建项目、控股和参股公司资本金注入、收并购项目等。
2019	319	-19%	核电、新能源、其他基建项目、控股和参股公司资本金注入、收并购项目等。
2018	396	-6%	核电、新能源、其他基建项目、控股和参股公司资本金注入、收并购项目等。
2017	419	33%	核电、新能源、单项固定资产/核电配套项目、能力建设项目、股权投资项目、并购项目、海外投资项目。
2016	314		核电建设项目、核电前期准备及厂址开发、基建改造项目和其他配套项目。

1.3 四代核电：2024年进入元年，25年逐渐进入交付期

2024年3月27日，华能石岛湾高温气冷堆示范工程核能供暖项目正式并网运行，标志着四代核能供热系统首次实现向城镇居民供暖，四代核能综合利用取得突破。华能石岛湾核能供暖项目正式并网运行，标志着四代核能综合利用取得突破。高温气冷堆示范工程核能供暖项目于2022年11月首次实现厂区内核能供热，2024年3月22日完成供暖管道升温，具备正式供暖条件。项目并网后将新增19万平方米的供暖面积，可满足1850户居民清洁取暖需求，每个供暖季可替代燃煤3700吨，减少二氧化碳排放6700吨。

2024年11月，国常会批复了中核集团所属的江苏徐圩一期工程，是全球首个将高温气冷堆与压水堆耦合，以工业供热为主、兼顾电力供应的核动力厂，建成后将为连云港万亿级石化产业基地大规模供应高品质低碳工业蒸汽。

该项目采用我国具有完全自主知识产权的第三代核电技术华龙一号和第四代核电技术高温气冷堆组合的方案建设核能供热系统。一期工程拟建设2台华龙一号压水堆核能发电机组、1台高温气冷堆核能发电机组，配套建设蒸汽换热站，首次采取以热定电的运行模式，通过华龙一号主蒸汽加热除盐水制备饱和蒸汽，再利用高温气冷堆主蒸汽对饱和蒸汽二次升温，建成后设计工况下将同时具备高品质蒸汽供应能力和发电能力。

江苏徐圩一期工程建成投产后，年供应工业蒸汽3250万吨，最大发电量超115亿度，每年可减少燃用标准煤726万吨，减少排放二氧化碳1960万吨，将有效缓解高耗能产业减排脱碳压力。

随着24年机组开工，25年四代核电设备企业也将逐渐进入交付期，**建议关注：佳电股份、海陆重工。**

2. 聚变：订单加速落地，产业进入从0-1阶段

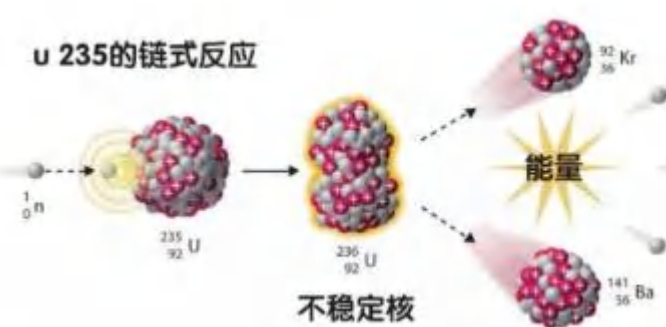
2.1 聚变的反应原理

核裂变：是指一个质量较重的原子核通过核反应过程分裂为两个或两个以上的中等质量的原子核的过程。并不是所有的原子核都能进行核裂变，只有因为质量过大而不稳定的原子核才会发生裂变。为了控制裂变，一般需要的是诱发裂变，而非自发裂变。作为“外力”，中子由于不带电，所以比带电粒子更容易进入原子核，干扰原子核的稳定。例如用中子轰击铀-235原子核，原子核分裂为较轻的原子核，同时产生2~3个中子，这些中子继续轰击其它铀-235原子核，会产生更多的中子。**原子弹**就是利用核裂变原理，再极短时间内发生猛烈爆炸，燃料是U-235或Pu239。

核聚变：是两个轻原子核相互碰撞形成重原子核，并释放出大量能量的过程。例如，在极端的温度和压力下，氢（H）的两种同位素——氘（D，含有1个中子和1个质子）和氚（T，包含2个中子和1个质子）的原子核会聚变形成氦核。**氦核也被称为α粒子**，其质量略小于氘核和氚核的质量之和。聚变反应在一种称为**等离子体**的物质状态下发生，等离子体是一种**由正离子和自由移动的电子组成的带电热气体**，具有不同于固体，液体和气体的独特性质。**聚变反应产生的中子能量被包层吸收，使得包层温度升高，将升温的能量用于加热工质并推动汽轮机发电。**

太阳上的融合：太阳内部时刻发生着氢核聚变。原子核需要在超过1000万摄氏度的非常高的温度下相互碰撞，以使它们能够克服相互的电排斥。一旦原子核克服了这种排斥力，并且彼此之间的距离非常近，它们之间的吸引力核力将超过电排斥力并使它们融合。为此，必须将原子核限制在较小的空间内，以增加发生碰撞的机会。在阳光下，由其巨大引力产生的极端压力为发生聚变创造了条件。但如果**没有这种引力，则需要更高的温度才能发生反应。在地球上，我们需要超过1亿摄氏度的温度和强大的压力才能使氘、氚融合（克服库仑斥力），并且要有足够的约束条件来保持等离子体并保持聚变反应足够长的时间，以获得净功率增益，即产生的聚变功率与用于加热等离子体的功率。**

核裂变反应原理

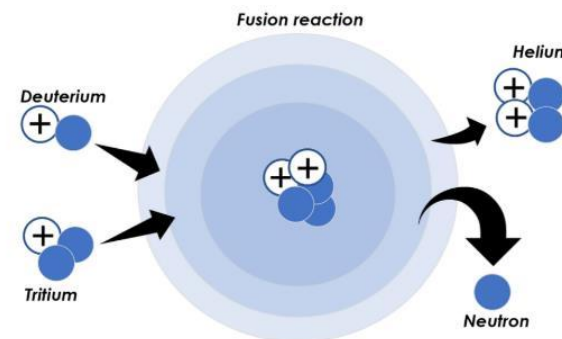


裂变前		裂变后	
$^{235}_{92}\text{U}$	235.043 9 u	$^{141}_{56}\text{Ba}$	140.913 9 u
^1_0n	1.008 7 u	$^{92}_{36}\text{Kr}$	91.897 3 u
		$3\ ^1_0\text{n}$	3.026 1 u
	236.052 6 u		235.837 3 u

$$\Delta E = 0.215\ 3 \times 931.5\ \text{MeV} = 200.55\ \text{MeV}$$

如果按照一个U-235核裂变时释放200MeV 的能量来估算，1kg的U-235全部裂变，释放出的核能相当于2000多吨标准煤完全燃烧释放的能量。

核聚变反应原理



聚变前		聚变后	
^2_1H	2.014 1 u	^4_2He	4.002 6 u
^3_1H	3.016 0 u	^1_0n	1.008 7 u
	5.030 1 u		5.011 3 u

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.018\ 8 \times 931.5\ \text{MeV} = 17.51\ \text{MeV}$$

在反应堆内部，氘和氚核碰撞并融合，释放出氦气和 neutron。

这里共有 5 个核子参与聚变，平均每个核子释放的结合能约为3.5 MeV，要比裂变中平均每个核子释放的能量（约1MeV）大得多。太阳每天释放的能量约为 $2.1 \times 10^{44}\ \text{MeV}$ 。

2.1.1 聚变的反应原理—磁约束核聚变

磁约束核聚变的原理：利用磁场来约束温度极高的等离子体的核燃料。我们在燃烧煤，石油，天然气的时候会有个容器来保温，让燃料在一定的温度下反应，释放出能量。但在聚变反应中，为了能让原子核越过势垒相互之间发生碰撞，就要给原子核相当高的动能。

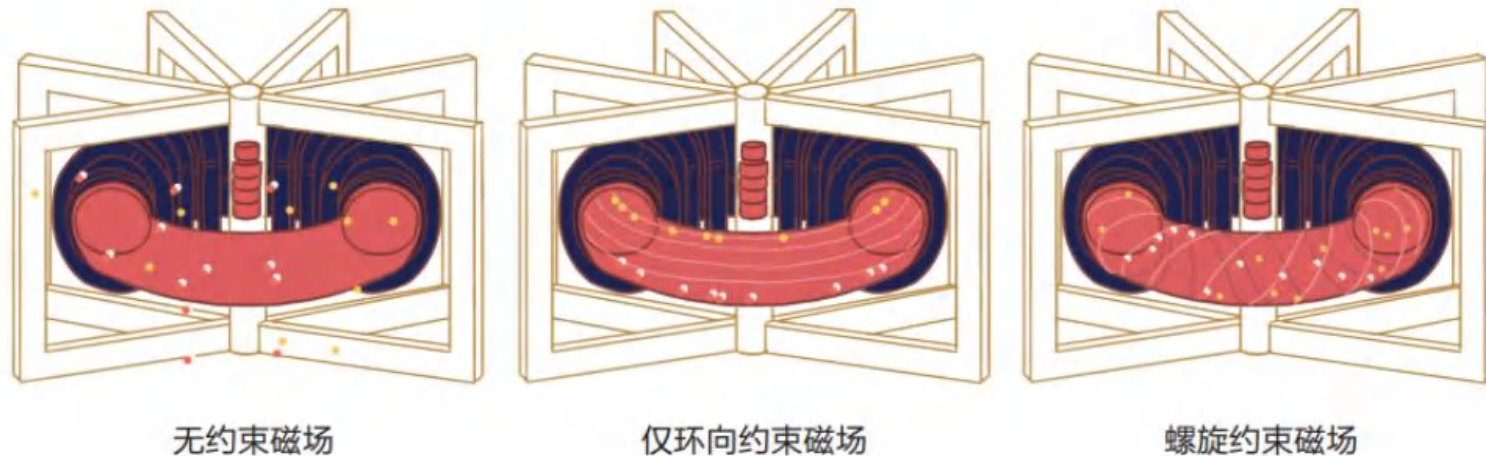
一种方法就是我们可以用**粒子加速器**来提高原子核速度，但是反应释放出的能量远小于加速原子核所消耗的能量。

另一种方法就是**提高核燃料的温度**，物质温度越高，意味着其微观粒子的无规则速度越大。我们需要把燃料加热到1亿度以上，这样原子核才有足够大的动能相互碰撞，才可能发生聚变反应。但在1亿度的条件下，任何固态物质都会在极短的时间内汽化。

1亿度的物质处于**等离子体态**，物质的原子核和核外电子分离，电子是自由的，不再受某一特定的原子核的束缚。也就是等离子体中的粒子都是自由的，带电粒子。科学家就想到了磁场，因为带电粒子在磁场中会绕磁力线做回旋运动，可以利用通过在容器内建立磁场来约束等离子体，使其不与容器壁接触。这样可以使核燃料持续燃烧一段时间。

20 世纪 50 年代，苏联科学家提出一种名为“托卡马克”的环形磁约束聚变装置，其显著特征是环形真空室，这里是高温等离子体发生核聚变反应的场所。在俄文中，托卡马克一词由环形、真空室、磁、线圈的前几个字母组成。

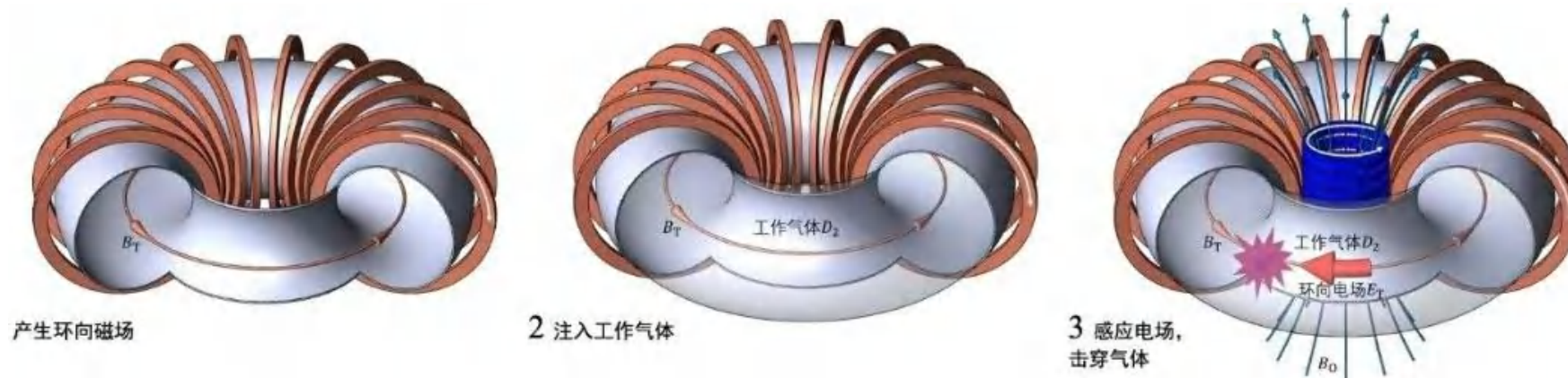
托卡马克装置磁约束原理示意



2.1.1 聚变的反应原理—磁约束核聚变

- 那么，如何构建托卡马克装置？
- 首先，将多个圆形线圈排列起来组成环向磁场线圈，向其中通入电流，便会在环形真空室内产生**环形磁场**。
- 此时将一定量的工作气体注入到真空室中，并向欧姆磁场线圈通入电流，会产生一个新磁场。环向线圈产生环形磁场的同时，欧姆线圈中的电流逐渐增大，其产生的磁场也随之增强，变化的磁场产生了**环向电场**。真空室中的工作气体被电场击穿电离，产生等离子体，并在环向电场的驱动下形成环形等离子体电流。跟电阻中流过电流会发热一样，电磁场的能量是通过电流的热效应传递给等离子体，使其温度逐渐升高（欧姆放电）。
- 值得注意的是，在欧姆放电过程中，等离子体温度升高会引起它的电阻降低，受限于此，无法单凭欧姆线圈就将等离子体加热到实现受控热核聚变所需要的温度，需配合**射频电磁波**和**中性粒子束注入**等各种辅助加热手段，最终使核燃料达到1亿度聚变条件，实现点火目标。

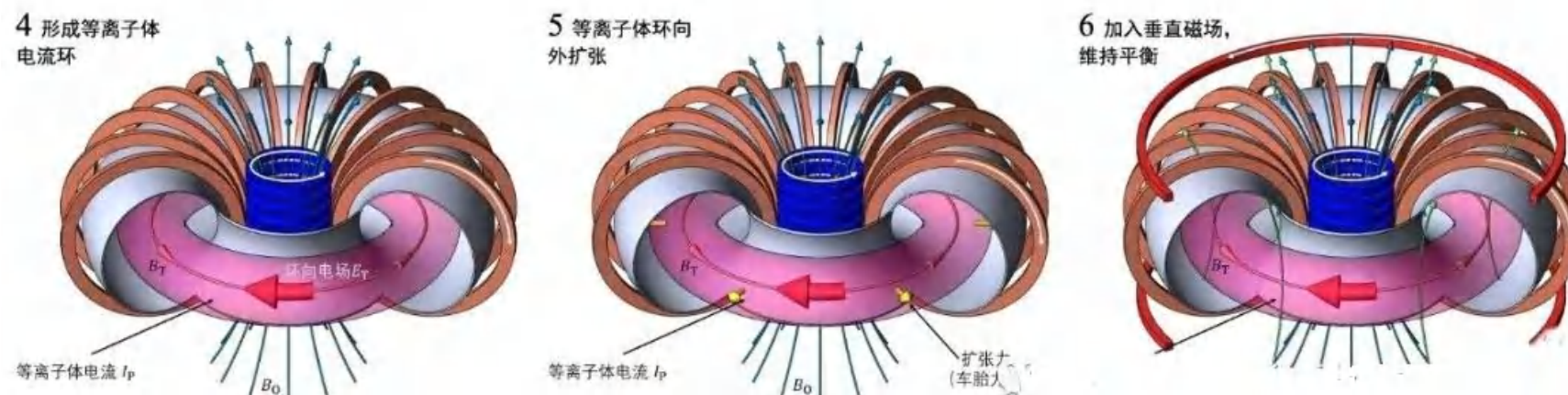
托卡马克装置磁约束原理示意图



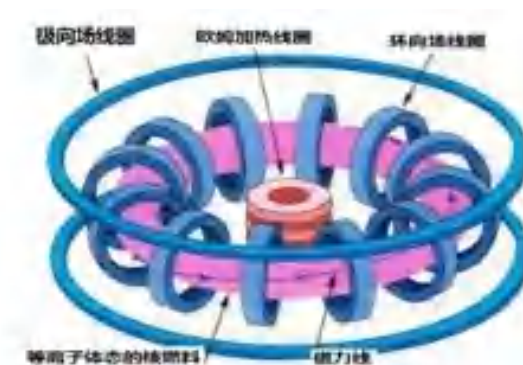
2.1.1 聚变的反应原理—磁约束核聚变

- 不过，环形磁场线密度分布不均，环路内侧半径小，磁感应强度比外侧大，导致等离子体环有向外扩张的趋势，如果不采取措施，不仅会使等离子体急剧冷却，导致反应停止，甚至可能损毁真空室的容器壁。
- 这时就需要在环形磁场外嵌套的**极向磁场线圈**发挥作用。极向磁场线圈和环形等离子体携带的巨大电流会产生极向磁场。该磁场与环形磁场相互作用扭成螺旋状。等离子体在该螺旋状磁场的作用下与向外扩张的力平衡，保持在一个既不靠内也不靠外的位置，从而消除磁场线疏密的影响，防止等离子体漂移，实现真正的“磁约束”。

托卡马克装置磁约束原理示意



演化后的托卡马克基本机构



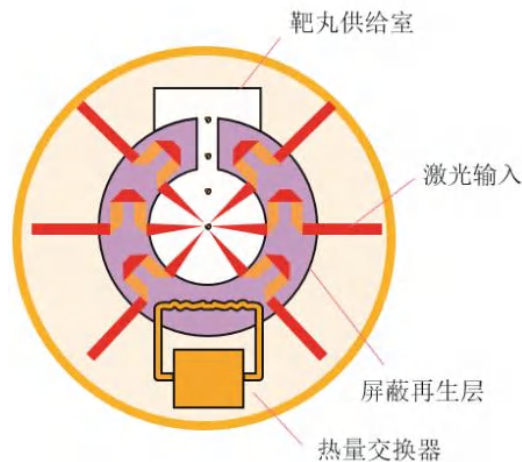
2.1.2 聚变的反应原理—惯性约束聚变

惯性约束聚变：是利用高功率激光束辐照热核燃料组成的微型靶丸，在极短的时间里靶丸表面会发生电离和消融而形成包围靶芯的高温等离子体。等离子体膨胀向外爆炸的反作用力会产生极大的向心聚爆的压力，从而将靶芯压缩成极高密度和极高温度的等离子体，称为热斑。由于惯性，等离子体在还未膨胀扩散以前就达到聚变反应条件，并能逐步加热热斑周围的其余燃料，使热核反应能够延续下去。

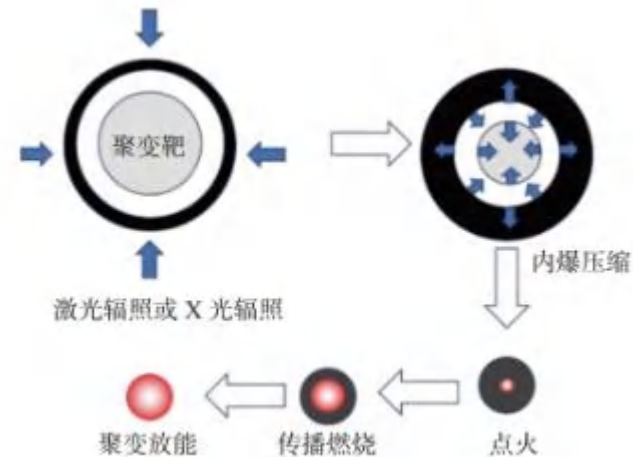
简单地说，在惯性约束下，可以用高能量密度的激光或X射线从各个方向照射参加反应物质，使它们“挤”在一起发生反应。由于核聚变反应的时间非常短，被“挤”在一起的核聚变物质因自身的惯性还来不及扩散就完成了核反应。惯性约束核聚变的特点是驱动器和反应器是分离的，故应用于火箭推进较为有利。而且相对磁约束核聚变来说结构较为简单，不需要庞大的磁路系统，系统的工作条件也相对宽松。

在我国，中国工程物理研究院等单位建造了“神光III”激光约束核聚变研究装置。

惯性约束示意图



惯性约束核聚变原理



2.1.3 聚变三乘积与能量增益因子

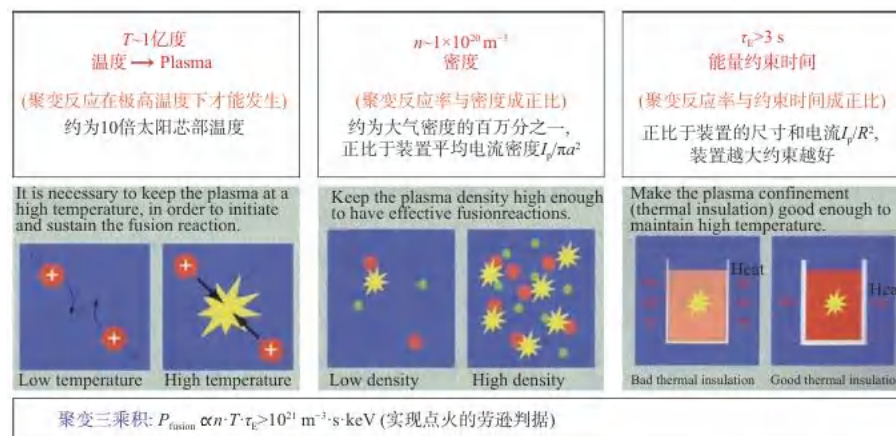
聚变三乘积：实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：**温度 (T)**、**密度 (n)**、**能量约束时间 (τ_E)**，三者的乘积称为**聚变三乘积**。根据劳森判据，只有聚变三乘积 $5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ ($21 \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$)，才能产生有效的聚变功率输出。当产生速率高于损失速率时，系统将产生净能量。如果足够的能量被燃料捕获，系统将自我维持，就被称之为**聚变点火**。

1) **高温**：实现核聚变反应需要将氘氚原子核压缩到很小尺度的核力范围内，但由于原子核带正电，必须在极高温下才能获得足够的能量克服库伦势垒，原子核靠近时通过量子隧穿效应产生巨变的几率更大。虽然太阳核心温度高达 1500°C ，但远未达到聚变反应要求，日核去单位提及发热功率其实不到人体 $1/3$ ，只是以来太阳的巨大体积取胜。要在地球实现聚变温度要维持在 $1 \text{ 亿}^\circ\text{C}$ 以上才可获得较高反应几率。2) **密度**：用以衡量等离子体约束区单位体积内粒子的个数。保持足够的密度意味着单位体积内拥有更多的氘氚原子核，能够有效提高原子核间的碰撞效率，以获得足够的核聚变反应率。3) **能量约束时间**：高温等离子体的能量以辐射和热传导的形式逸出，为唯象描述热传导损失功率，将等离子体总能量热传导损失所需时间定义为**能量约束时间**，是聚变装置重要指标。**高能量约束时间意味着装置具有良好的隔热性能，能量流失得缓慢，以进一步提高核聚变反应率。**

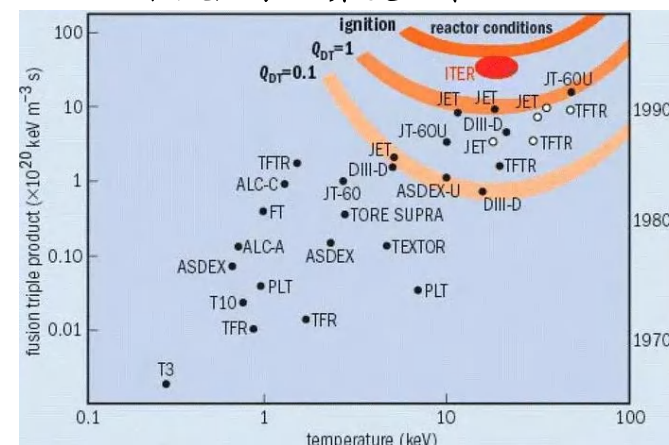
能量增益因子 (Q值)：是衡量核聚变反应能量效率的一个关键参数。它定义为聚变反应产生的能量与维持聚变反应所必需的输入能量之比。当 $Q=1$ 时，表示聚变反应产生的能量等于输入的能量，这是一个基本的盈亏平衡点。

并非所有能量都能被捕获利用，许多核聚变反应会释放出等离子体无法捕获的能量形式。当核聚变反应的能量增益因子 Q 达到 1 时，如果没有外部加热，系统将开始冷却。为了实现与外部加热源相匹配的自我加热能力，核聚变反应堆**通常需要 Q 值达到 5 左右**。在核聚变过程中未能直接捕获的能量，可以通过外部系统被捕获并转化为电能。这种电能随后可用于将等离子体加热至工作温度。当系统能够通过这种方式实现自给自足时，我们称它达到了**工程上的盈亏平衡**。如果系统运行效率足够高，不仅能自给自足，还能产生并出售额外的电能，这被称为达到了**经济上的盈亏平衡**。

聚变反应的三要素



各反应装置聚变三乘积



2.2 核聚变的主要项目及投资主体：全球及我国关键节点梳理

时间	全球	我国
初步探索 (20世纪50-70年代)	苏联物理学家塔姆萨哈罗夫提出了在环形等离子体中通过大电流感应产生的极向磁场跟很强的环向磁场结合起来，便可能实现等离子体平衡位形。莫斯科的库尔恰托夫研究所进行了实验，并将该装置乘坐托卡马克。 受控核聚变研究第三届国际会议上，阿齐莫维奇发表的托卡马克装置引起轰动，全球很快掀起研究托卡马克的热潮。	1955年，钱三强和李正武等科学家便提议开展中国的“可控热核反应”研究。 60年代开始，中国自主探索核聚变技术，并进行了一些基础研究。这一时期的探索为后续的研究奠定了基础。
基础实验 (20世纪70-90年代)	欧共体的JET托卡马克成功实现了史上第一次氘-氦运行实验，在氘氦6比1的混合燃料中，等离子体温度达到3亿℃，反应持续2秒钟，获得聚变输出功率为0.17万kW，能量增益因子Q值0.11-0.12。 1993年12月9日和10日，美国在TFTR装置上使用氘、氦各50%的混合燃料，使温度达到3-4亿℃，两次实验释放的聚变能分别为0.3、0.56万kW，Q值达0.28。 1997年9月22日，联合欧洲环JET又创造输出功率为1.29万kW的世界纪录，Q值达0.60，持续时间2秒。后实验Q值达到0.67。 1997年12月，日本JT-60成功进行了氘-氦反应实验，换算到氘-氦反应，Q值可以达到1.00。后来，Q值又超过了1.25，首次实现输出能量大于输入能量。	1978年，中国制定了“引导-控制”计划，标志着中国核聚变研究的起步。此后开始建设首个小型托卡马克（Tokamak）装置。 1984年，中国第一个托卡马克装置——北京大学的“北京环流器 I 号”（HL-1）的建成并投入研究工作，中国核聚变研究取得了显著进步。 90年代，随着“HL-1M”和“HT-7”（1995年中国第一个超导托卡马克装置HT-7在合肥建成）等先进的核聚变实验装置的建设 and 启动
加快布局与 国际间合作 (20世纪90年代至今)	1985年，时任美国总统里根和苏联领导人戈尔巴乔夫，在一次首脑会议上倡议开展一个核聚变研究的国际合作计划。 1998年，美国退出ITER计划。我国从2003年正式加入ITER计划谈判。同期，美国重返ITER计划。直到2007年，由中、欧、日、韩、俄、美6方组成的ITER国际组织正式成立（印度后来加入）。 2006年，我国与其他六国一起，在比利时布鲁塞尔签订ITER实施协定，标志着ITER计划进入正式执行阶段，即将开始工程建设。 2008年，Horne Technologies、Acceleron Fusion(formerly NK Labs)成立，2009年，Magneto-Inertial Fusion Technology Inc.(MIFTI)·Tokamak Energy成立 2011年，英国First Light Fusion成立，2013年Helion Energy成立，2015年CT Fusion Inc.成立，2017年，HB11 Energy·Zap Energy成立，2018年Avalanche Energy、Commonwealth Fusion Systems、Compact Fusion Systems、Helicity Space Corporation、ENN成立，2019年，Crossfields Fusion、Fuse、Novatron Fusion、Marvel Fusion、N.T. Tao、Type One Energy Group成立，2020年Electric Fusion Systems，Renaissance Fusion成立， 2018年，美国联邦聚变系统公司(CFS)成立，技术源于MIT，于2021年9月率先宣布成功研制出全球首个基于高温超导材料的聚变装置磁体，是该条技术路线最为前沿的企业。 2020年，ITER开始安装，计划在2025年底首次等离子体放电 2021年9月5日凌晨，在MIT等离子体科学与核聚变中心（PSFC）的实验室，工程师们实现了一个重大里程碑——一种由「高温超导材料」制成的新型磁体，达到了20T的大规模磁场强度的世界纪录。 2022年12月，美国国家点火装置（NIF）首次实现了聚变产出的能量大于激光输出的能量（输入能量为2.05兆焦耳，输出能量达到3.15兆焦耳），这是人类历史上首次激光核聚变点火成功，验证了惯性约束聚变（ICF）的可行性，还为未来的聚变能源研究提供了重要的实验数据和技术支持。	2002年中国建成第一个具有偏滤器位形的托卡马克装置中国环流器二号 A（HL - 2A）（西南物理研究院），中国的核聚变研究步入了新阶段。 加入国际热核聚变反应堆实验项目（ITER）成为中国核聚变领域的一个重要决策。 2006年，由中科院合肥物质科学研究院研发的超导托卡马克核聚变实验装置“东方超环（EAST）成功实现首次放电，这是世界上第一个全超导非圆截面的托卡马克装置，使中国成为世界上少数拥有核聚变实验装置的国家之一。2010年，EAST运行1兆安等离子体电流，进一步验证了中国在该领域的技术实力。 2015年，神光-Ⅲ激光装置主机建成，中国工程物理研究院建成亚洲最大的高功率激光装置。 2016年2月3日，中国“人造太阳”EAST物理实验获重大突破，成功实现电子温度超过5000万度、持续时间达102秒的超高温长脉冲等离子体放电，标志着中国在稳态磁约束聚变研究方面继续走在国际前列。 2018年11月12日，EAST实现1亿摄氏度等离子体运行等多项重大突破，获得的实验参数接近未来聚变堆稳态运行模式所需要的物理条件，朝着未来聚变堆实验运行迈出了关键一步。 2020年12月4日，中国环流器二号M装置(HL-2M)在成都建成并实现首次放电，标志着中国自主掌握了大型先进托卡马克装置的设计、建造、运行技术，为我国核聚变堆的自主设计与建造打下坚实基础。 2021年5月28日，EAST实现可重复1.2亿摄氏度101秒和1.6亿摄氏度20秒等离子体运行。同年12月30日，EAST实现1056秒长脉冲高参数等离子体运行，其间电子温度近7000万摄氏度，创下当时托卡马克装置高温等离子体运行的最长时间纪录。 2022年10月19日，HL-2M等离子体电流突破100万安培，创造了中国可控核聚变装置运行新纪录。

2.2 核聚变的主要项目及投资主体：全球及我国关键节点梳理

时间	全球	我国
加快布局与国际 间合作（20世纪 90年代至今）	2023年：欧洲JET创造69兆焦耳能量纪录， JRT在约5秒内持续产生69兆焦耳的能量 ，打破世界纪录。	2023年4月12日， EAST 成功实现了 403秒 稳态长脉冲高约束模式等离子体运行，刷新了2017年托卡马克装置高约束模式运行101秒的纪录。
	2023年10月，美国国家点火装置（NIF）成功“点火”两次，即实现可控核聚变净能量增益，至此，NIF点火次数增加至4次。 输入能量首次达到2.2兆焦，3.4兆焦耳的输出能量也位列历次点火实验第二。 NIF向实现数十兆焦耳甚至更高产能的目标，又迈进了一步。	2023年7月12日，中国联合 球形托卡马克2号 新概念磁约束核聚变探索装置- (SUNIST-2) （清华大学、星环聚能）建成并首次放电。
	2023年：日本JT-60SA实现首次放电。	2023年8月15日，全球首个 全高温超导托卡马克装置 洪荒70 高温超导托卡马克装置总体安装正式启动，核聚变商业化进程将加速。
	2024年：MIT技术突破使核聚变装置成本降低40倍， MIT利用稀土氧化铜钇超导体大幅缩减核聚变装置体积与成本 ，推动能源商业化。	2023年8月25日，新一代人造太阳“ 中国环流三号 ”（西南物理研究院）首次在100万安培（1兆安）等离子体电流下实现了高约束模式运行，再次刷新我国磁约束聚变装置运行纪录。
	2024年，英国 第一光聚变公司（First Light Fusioin, FLF） 突破压力极限至1.85TPa。它打破了美国桑迪亚国家实验室的压力世界纪录，是地核压力的五倍。	2023年12月29日，以“核力启航 聚变未来”为主题的可控核聚变未来产业推进会在蓉召开。由25家央企、科研院所、高校等组成的 可控核聚变创新联合体正式宣布成立 。国务院国资委启动实施未来产业启航行动， 明确可控核聚变领域为未来能源的重要方向。
	2024年10月，日本JT-60SA实现点火成功。	2024年3月20日，中国核工业集团公司（CNNC）宣布即将包括中国最新一代的“人造太阳”——环流三号（HL-3）托卡马克在内的十个核技术研究和测试平台对外开放，这一措施不仅有助于增强中国在全球核科技领域的影响力，同时也推动了国际间在应对能源危机方面的合作。
		24年3月， 合肥星能玄光科技有限责任公司 成立，注册资本420万元，技术依托中国科学技术大学核学院。同月， 星环聚能 宣布，已完成数亿元Pre-A轮融资。
		24年6月，米哈游、蔚来投资的 上海核聚变商业公司 能量奇点 研制的全球首台全高温超导托卡马克装置建成运行。
		24年6月，聚变新能（安徽）有限公司发生工商变更，新增中国石油集团昆仑资本有限公司，合肥科学岛控股有限公司为股东，同时注册资本由50亿人民币增至145亿人民币。
		24年9月， 星环聚能 宣布在球形托卡马克运行与控制、等离子体性能提升、高温超导磁体研发核聚变衍生技术产业化等方面都取得了重要进展。
		24年10月高温超导公司上海翌曦科技发展有限公司宣布完成亿元天使轮融资
		24年11月， 上海未来聚变能源科技有限公司 正式成立，注册资本10.26亿元，股东包括上海国投科创投资有限公司、上海电气控股集团有限公司、上海中能诚毅股权投资有限公司。同月， 星环聚能 宣布，在初步工程验证装置SUNIST-2顺利建成运行并达到主要设计指标后，即将开始建设 负三角球形托卡马克NTST 。同月，星能玄光宣布完成亿元天使轮融资。
		2025年1月， EAST 取得 上亿度1066秒 稳态长脉冲高约束模等离子体运行。

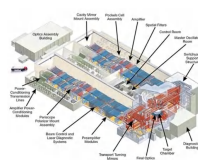
2.2 核聚变的主要项目及投资主体：全球及我国发展进程

美国



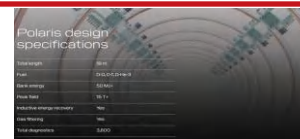
TFTR

1982年建成投运，1997年关停
(首次进行氘氚50:50实验)



NIF (国家点火装置)

22年12月实现Q>1



Helion

承诺在2028年之前开始通过核聚变发电，并在一年之后为微软提供目标为至少50兆瓦的发电量，否则将支付罚金。



ARC

建造世界上第一座电网规模的商业聚变发电厂ARC，2030年代初投入运营，为大型工业场所或15万户家庭供电。

欧洲



JET (欧洲联合环)

1983年投运，2023年退役。(第一座成功运行氘氚D-T聚变的反应堆。使用0.2毫克氘氚燃料就产生5秒的高聚变功率，创造了69MJ的突破性记录)



ITER (国际热核聚变实验堆)

预计2035年启动D-D实验，2039年利用聚变产生能量

日韩

JT-60

1997年Q>1

JT-60U



JT-60SA

2020组装完成，23年等离子体放电，24年10月23日点火成功。



FAST (日本)

预计2025年完成初步设计，目标2030年代末完成发电示范。

CPD (韩国)

计划于2030年代投入运行，目标是在2040年代实现商业化应用。

我国



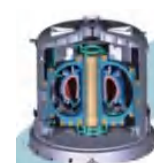
EAST

2006年建成以来，等离子体运行次数超过15万次，2025年实现1066秒高约束模。



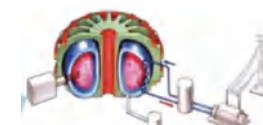
BEST

计划在第一代EAST装置的基础上首次实现聚变能发电的演示，并有望率先建成世界首个紧凑型聚变能实验装置。拟2027年建成。



CFETR (中国聚变工程试验堆)

计划2030年代建成，并开始大规模科学实验



PFPP (原型电站)

1GWe并网，安全可靠高效，计划时间2050年代

2.2 核聚变的主要项目及投资主体

根据FIA发布的年度报告，2024年核聚变行业已吸引超过71亿美元的投资，其中新资金超过9亿美元。尽管新投资增长率低于前两年的28亿美元和14亿美元，但这一数据仍反映出投资者对核聚变技术的信心与期待。

聚变堆商业化进展：报告显示，89%的受访公司预计核聚变发电将在2030年代末接入电网，70%的公司认为将在2035年完成关键里程碑。行业在持续推进里程碑计划，如美国的“基于里程碑的聚变发展计划”、德国的“聚变2040”、日本的“聚变登月”目标，以及英国的“聚变未来”计划。这些项目为核聚变商业化注入了新的动力。

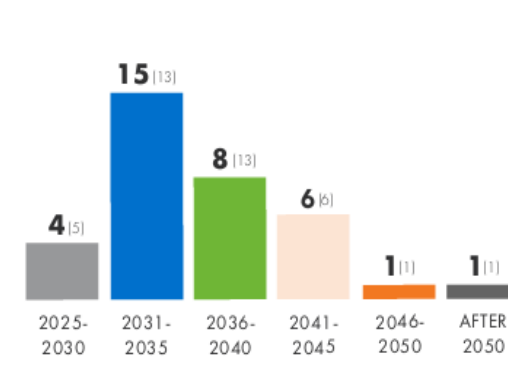
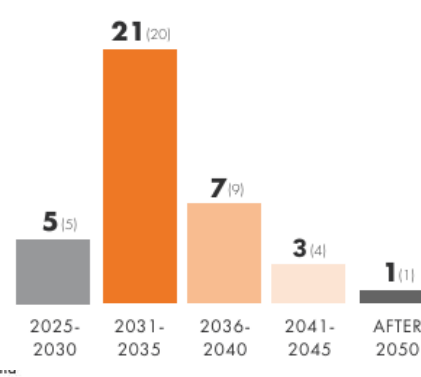
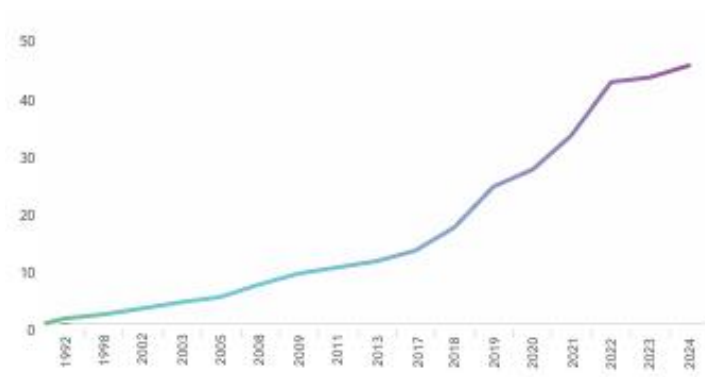
合作模式：在过去一年中，公共资金增长了57%，达到4.26亿美元，凸显出政府对公私合作模式的重视。美国依旧是核聚变商业化的全球领导者，25家核聚变公司参与了调查，占总数的半数以上。英国、德国、日本、中国分别有3家公司上榜，而瑞士则首次有2家企业进入报告。此外，澳大利亚、加拿大、法国等国也在核聚变领域有所布局。公私合作模式正成为推动核聚变技术的重要机制。过去一年，公共资金与私人资本的协同投入取得了显著成果。报告特别强调，商业原型和概念验证设备的成功将显著降低投资风险，从而吸引更多低风险资本涌入。未来几年对于核聚变技术的商业化至关重要。

核聚变民营企业数量变化（个）

FIA统计核聚变投资企业全球分布

预计核聚变并网时间

预计核聚变商业化时间



2.2.1 国际投资项目：ITER项目由七方30多个国家共同合作，我国在2006年正式加入

ITER项目的诞生和发展：国际热核聚变实验堆ITER计划是当今世界规模最大、影响最深远的国际大科学工程之一，其目的是通过建造反应堆级核聚变装置，验证和平利用核聚变发电的科学和工程技术可行性。该计划由中国、欧盟、俄罗斯、美国、日本、韩国和印度等**七方30多个国家共同合作**，中国于2006年正式加入ITER计划。

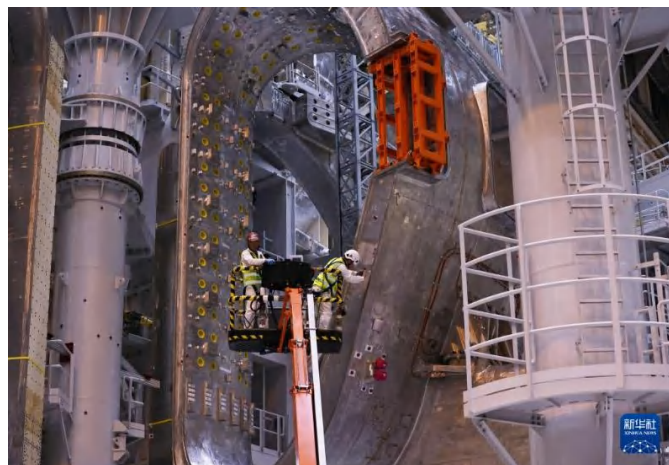
实际上，早在1985年，美国和苏联就提出了“人造太阳”——国际热核聚变实验堆计划，简称ITER计划。计划从2007年开始，历时35年，总投资约180亿欧元，计划2050年前后完成聚变能原型电站的建设和运行，开始商业化应用。我国正式签约加入ITER计划后，**作为平等成员方之一承担了ITER计划建设阶段9.09%和运行、退役阶段10%的经费**，享有ITER计划100%的技术成果使用权。目前，ITER项目历时38载尚未完成。从**1985年倡议提出、2006年条约签署，到2007年装置建造开始、2010年场地建设开工、2020年重大工程安装启动**，该计划仍在奋力前行。ITER最初设定的初步运行时间为2025年，后将**实现氘-氚聚变实验的目标调整至2035年，并在之后逐步过渡到完整的磁场和等离子体电流的运行。而“利用可控核聚变产生能量”的目标，可能到2039年才能实现。**

ITER总干事Barabaschi表示，ITER的建设成本已经超过200亿欧元，根据最新时间表，这一数字还需要增加50亿欧元。

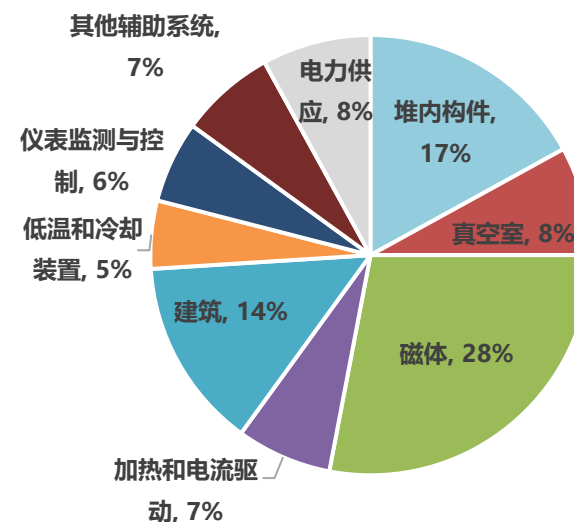
ITER建设现场安装中的托卡马克装置



技术人员堆金属设备进行检查



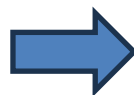
ITER成本构成



2.2.2 国内投资主体:中科院合肥物质科学研究院

HT-6B

19世纪80年代中科院等离子体物理研究所建设的托卡马克装置，工作特点是偏压电极。（常规磁体托卡马克）



HT-6M

设计工作开始于1980年，建成于1984年底，中国首个空心变压器托卡马克装置。



HT-7

在引进俄罗斯T-7装置的基础上，经重新设计、研制，1994年建成。是一个可产生长脉冲高温等离子的中型聚变研究装置，也是我国建成并投入运行的首个超导托卡马克装置。我国第一个圆截面超导托卡马克核聚变实验装置“合肥超环”。



EAST
(东方超环)

世界首个全超导非圆截面托卡马克装置，EAST是国家“九五”重大科技基础设施，EAST辅助加热系统是国家“十一五”重大科技基础设施。

1998年立项，2000年正式获批开工建设，2006年建成并开启实验运行。2006年运行以来，等离体运行次数超过15万次。

进展：就长脉冲高约束模运行来说，“东方超环”先后跨越60秒、100秒、400秒等重大里程碑，始终不断突破自我，挑战极限，冲击更高参数的长脉冲高约束模等离体运行。2012年实现30秒高约束模，2016年实现60秒高约束模，2017年实现101秒高约束模，2023年实现403秒高约束模，2025年实现1066秒高约束模。



CRAFT
(聚变堆主机关键系统综合研究设施)

国家“十三五”重大科技基础设施，2018年12月获批开工建设。项目法人单位是中国科学院合肥物质科学研究院，参建单位为核工业西南物理研究院。设施主要建设内容为超导磁体研究系统和偏滤器研究系统。

定位：为未来中国聚变实验堆、工程堆的设计和搭建参数高、性能全、功能完备的综合性研究及测试平台。也将成为国际聚变领域参数最高、功能最完备的综合性研究平台。

进展：截至24年5月“夸父”主体工程已完成116项关键里程碑当中的76项，项目从子系统的实验室研发测试阶段进入关键部件的研制和现场集成及调试阶段，总体进度已达70%，设施主体预计2025年底建成。



BEST
(紧凑型聚变能实验装置园区)

定位：将在第一代EAST装置的基础上，计划首次实现聚变发电的演示，并有望率先建成世界首个紧凑型聚变能实验装置。

进展：3月10日，BEST项目5#楼首块顶板顺利浇筑，标志着建设进入全面加速阶段。拟2027年建成。



聚变产业联盟

聚变产业联盟（Fusion Industry Alliance），简称为FIA，成立于2023年11月16日，由中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所、合锻智能、中国一重、二重（德阳）、上海电气核电集团有限公司、西部超导、浙江久立等15家国内外热心于聚变产业的相关企业、科研院校、服务机构等自愿发起组成的非盈利社会组织，联盟首批成员单位达60家。

2.2.2 国内投资主体:中科院合肥物质科学研究院

聚变新能（安徽）有限公司（简称“聚变新能” Neo Fusion）是我国核聚变能商业化的重要实施主体平台之一。公司成立于2023年5月，注册资本50亿元，2024年6月通过增资扩股增至145亿元，股东涵盖安徽省与合肥市国有平台、中央企业、中国科学院及社会资本。作为聚变新能商业行动计划实施主体，建设BEST等重大科技基础设施，目标20年内将可控核聚变用于全球商业用途。

公司按照“紧凑型聚变实验装置（BEST）-聚变工程示范堆（CFEDR）-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。近期，BEST项目招标节奏明显加速。

BEST中标情况列举

融资历史：

2024年6月
中国石油集团昆仑资本有限公司和合肥科学岛控股有限公司新晋成为其股东，分别出资29亿元，持股比例均为20%，此外，几位老股东也纷纷增资。公司注册资本由50亿元大幅增至145亿元。

2024年5月16日 A轮
中科院合肥物质科学研究院、中国石油集团昆仑资本有限公司、安徽皖能丰禾聚变科技合伙企业

2023年5月22日 天使轮 15亿人民币
蔚来汽车、蔚来资本、合肥产投新能科技合伙企业、安徽皖能丰禾聚变科技合伙企业

发布日期	产品名称	中标单位	数量	单位	单价 (万元)	总价 (万元)
2025年3月25日	NbTi超导导线01包采购	西安聚能超导线材科技有限公司				
2025年3月25日	NbTi超导导线02包采购	合肥夸夫超导科技有限公司				
2025年3月25日	高电流密度Nb3Sn超导导线	西安聚能超导线材科技有限公司				
2024年12月11日	磁体支撑系统	贵州航天新力科技有限公司				4400
2024年11月11日	冷屏	上海电气核电集团有限公司				5500
2024年11月8日	低压配电网络设计	同济大学建筑设计研究院				960
2024年8月6日	首套三类微波加热高压电源	安徽省金屹电气技术有限公司				943.6
2024年4月28日	真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目包3	武汉重型机床集团有限公司				
2024年4月28日	真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目包2	上海电气核电集团有限公司				
2024年4月28日	真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目包1	合肥合锻智能制造股份有限公司				
2024年4月1日	BEST真空室过压保护系统泄压罐	张化机（苏州）重装有限公司	4	套	100	400
2024年2月20人	BEST线圈绕组原型件制造项目	合肥聚能电物理高技术开发有限公司				
2024年1月22日	BEST托卡马克冷却水系统氟化水储罐采购	张化机（苏州）重装有限公司				986
2024年1月19日	BEST底部冷屏	上海电气核电集团有限公司	1			850
2023年1月14日	TF线圈生产测试用真空容器及机组	四川九天真空科技有限公司				616
2023年11月14日	TF绕组绝缘制造设备	合肥聚能电物理高技术开发有限公司				4418
2023年10月16日	杜瓦系统	航天晨光股份有限公司（牵头人）和大明重工有限公司和合肥聚能电物理高技术开发有限公司的联合体				10890

2.2.2 国内投资主体:中科院合肥物质科学研究院

BEST招标情况

发布日期	产品名称	数量	单位	单价 (万元)	总价/预算 (万元)	备注
2025年3月25日	中压氮气储罐	17				
2025年3月21日	振动热丝氩弧焊机 (二次)	1	套	30	30	
2025年3月21日	CS LTS线圈匝间绝缘自动包绕设备				500	合同签订后2个月内完成交货并验收
2025年3月20日	水冷系统变频离心式冷水机组					90个日历天完成供货
2025年3月19日	BEST1#2#楼暖通空调及3#楼去离子水系统采购及施工				2584	
2025年3月14日	水冷系统6000T冷却塔					合同签订后3个月内完成全部货物交货
2025年3月14日	水冷系统离心泵	7	套			合同签订后3个月内
2025年3月6日	振动热丝氩弧焊机	1	套	30	30	
2025年2月23日	NbTi超导线	01包25吨, 02包15吨				分阶段交付
2025年2月23日	Nb3Sn超导线	15	吨			分阶段交付
2025年2月19日	BEST项目-自力式调节阀服务询价公告					
2025年2月19日	BEST项目-磁翻板液位计服务询价公告					
2025年1月15日	BEST安装工装设计项目—核心部件安装工装分析计算技术服务					
2025年1月15日	BEST安装工装设计项目—模型设计技术服务					
2025年1月6日	BEST项目-暖通设计技术服务					
2024年12月26日	BEST馈线系统电流引线用接头盒	68			300	
2024年10月16日	BEST园区实验研究中心大楼等单体工程施工总承包				94000	计划工期800日历天
2024年9月16日	冷屏 (真空室冷屏、下中上窗口冷屏、中部杜瓦冷屏、中部主冷却管、子冷却管、双球头支撑、紧固件)				6500	
2024年9月13日	氟兼容增压系统 (分子泵、增压泵、波纹管阀门、压力传感器、管路接头)				150	

2024年7月22日	BEST线圈盒N50钢板采购					
2024年6月16日	BEST TF线圈盒316LN不锈钢锻件外协性能试验					
2024年5月24日	首套磁体电源项目				7105	
2024年4月1日	BEST线圈盒管材采购					
2024年3月15日	包1 best真空室1-4扇区 4套 下窗口延长段8套 重力支撑8套 1-4扇区接缝区				21336	
	包1 best真空室5-8扇区 4套 下窗口延长段8套 重力支撑8套 5-8扇区接缝区				21336	
	包3 上窗口延长段15套 下窗口延长段16套				8568	
	重机公司金结厂 1823701BESTTF线圈盒项目工程外包					
2024年3月6日	BEST真空室过压保护系统泄压罐				465	
2024年3月4日	BEST微波反射仪传输询价					
2024年2月1日	BEST真空室1/8扇区	8			53000	
	BEST窗口延长段	47				
	BEST重力支撑采购	16				
2024年2月7日	BEST线圈绕组原型件制造项目 (环向长、极向厂5号和7号)				1640	
2024年1月2日	BEST托卡马克冷却水系统氟化水储罐采购					
2023年12月26日	BEST底部冷屏				1080	
2023年10月19日	超导电缆	19682	米		3000	签订合同后12个月内履约
2023年10月19日	超导线材	98.5	吨		51150	签订合同后14个月内履约
2023年10月19日	无氧铜线	35	吨		1365	签订合同后5个月内履约
2023年10月19日	TF线圈盒首批二套采购	2	套		7000	签订合同后13个月内履约
2023年10月19日	CS预紧板预研件				900	
2023年10月19日	TF Dummy绕组绕制及端子制造				1660	
2023年10月19日	TF线圈生产测试用真空容器及机组				700	
2023年10月19日	TF绕组绝缘制造设备				4500	
2023年10月19日	316LN不锈钢异形铠甲				2000	合同签订后8个月内履约
2023年10月19日	N50不锈钢异形铠甲				2175	合同签订后8个月内履约
2023年9月15日	杜瓦系统	1	套		13000	合同签订后36个月内
2023年9月4日	杜瓦波纹管					

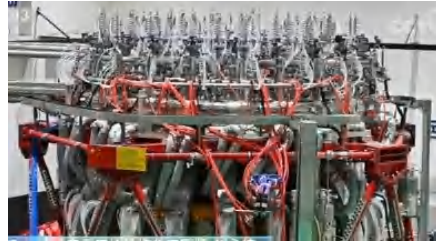
2.2.2 国内投资主体:中核集团西南物理研究院

核工业西南物理研究院创建于1965年,隶属中国核工业集团公司,是我国最大的从事受控核聚变和等离子体物理研究以及等离子体应用开发的实验基地,也是中核集团核能开发“三步走”(裂变堆—快堆—聚变堆)战略第三步任务的主要承担单位。



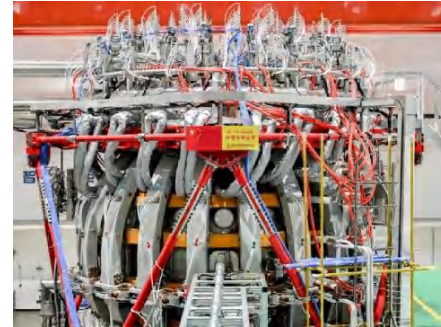
HL-2A
“环流二号” A装置

“九五”期间开始建造,2002年底完成。主要目标是开展高参数等离子体条件下的改善约束实验,并利用其独特的大体积封闭偏滤器结构,开展核聚变领域许多前沿物理课题以及相关工程技术的研



HL-2M
“环流二号” M装置

2020年12月在成都建成并实现首次放电。是当时规模最大、参数最高的新一代先进磁约束核聚变实验研究装置



新一代人造太阳“中国环流三号”(HL-3)

2020年建成。

2023年8月,新一代人造太阳“中国环流三号”(HL-3) **首次实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行。**



中核集团与江西省政府签署全面战略合作框架协议

- 2023年11月12日,中核集团与江西省政府签署全面战略合作框架协议。当日江西联创光电超导应用有限公司(下称联创光电超导)和中核聚变(成都)设计研究院有限公司签订了协议,双方计划联合建设**聚变-裂变混合实验堆项目“星火一号”**。技术目标Q值大于30,实现连续发电功率100 MW。该项目拟落户江西省,工程总投资预计**超过200亿元**。



可控核聚变创新联合体成立

- 2023年12月31日,可控核聚变未来产业推进会在蓉召开。由25家央企、科研院所、高校等组成的**可控核聚变创新联合体**正式宣布成立。会上,**中国聚变公司(筹)**举行揭牌仪式,第一批未来能源关键技术攻关任务正式发布,对于创新协同推进聚变能源产业迈出实质性步伐具有重要的里程碑意义。
- 2025年2月28日晚,中国核电、浙能电力分别公告,分别拟斥资10亿元、7.5亿元,参股中国聚变能源有限公司。

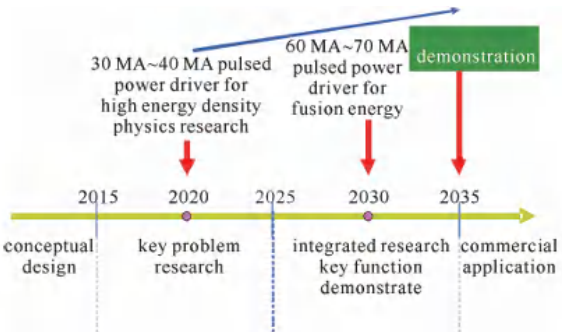
2.2.2 国内投资主体：中国工程物理研究院流体物理研究所

中国工程物理研究院流体物理研究所：中国工程物理研究院下属第一研究所，位于四川绵阳，压缩科学、聚变能源等战略科技方向的核心依托单位。

中国工程物理研究院提出的**Z箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆(Z-FFR)**概念,采用**Z箍缩热核聚变产生的大量中子驱动次临界裂变堆而释放能量**,集成了局部整体点火聚变靶、先进次临界能源堆等创新概念,在安全、经济、持久和环境友好等方面具有优良的品质,有望成为有效应对未来能源危机和环境气候问题的千年能源。热核聚变提供强中子源,功率一般大于100MW,次临界裂变堆承担主要的放能任务,裂变和聚变放能的比值(M值)一般大于10。Z-FFR具有固有安全性、经济高效、千年持久、环境友好等优势。



Z-FFR 示意图



Z-FFR 发展路线图设想

企业名称	先觉聚能科技(四川)有限公司 复制			
法定代表人	刘永康	登记状态	存续	天眼评分 67分
统一社会信用代码	91510100MAEBTFT9X1	成立日期	2025-03-06	
工商注册号	510110002816276	注册资本	500万人民币	实缴资本 -
营业期限	2025-03-06 至 无固定期限	纳税人识别号	91510100MAEBTFT9X1	组织机构代码 MAEBTFT9-X
企业类型	其他有限责任公司	纳税人资质	-	核准日期 2025-03-06
参保人数	-	行业	研究和试验发展	人员规模 -
登记机关	四川天府新区市场监督管理局	注册地址	四川天府新区兴隆街道集萃路619号天府海创园1号楼14层(自编号0004号) 附近公司	

先觉聚能成立

2007年，研究团队正式提出“局部体点火靶”概念，解决了惯性约束聚变点火难、大规模放能难的问题。2008年，研究团队提出了深度次临界能源包层设计理念，正式形成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。

概念研究阶段（2015年以前）
关键技术攻关阶段（2024-2030年）：建成30-40MA级驱动器，中概念开展点火研究
技术集成和工程演示（DEMO堆）阶段（2031-2040年）：建成可用作能源应用的60MA级驱动器，完善工程技术
商业发电推广阶段（2040年以后）

2025年3月，国光电气表示，与天府创新能源研究院等股东共同出资成立先觉聚能科技(四川)有限公司（注册资本500万元），其中**国光电气持股比例为7.5%**，并有两位董事在合资公司董事会任职，国光电气董事长张亚先生任合资公司董事长。**天府创新能源研究院是2021年2月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，中国工程院院士、中国工程物理研究院研究员、原子核物理学专家**彭先觉**任该研究院院长。**

2.2 国内投资项目:CFETR

在我国聚变能发展路线图中，中国聚变工程试验堆（CFETR）是聚变实用化研究的关键一步。面向未来发展，等离子体物理研究所携手国内相关单位积极推进CFETR设计和研究工作，以此来填补ITER和未来商用聚变示范堆（DEMO）之间的技术空白。

中国聚变工程试验堆（CFETR）：

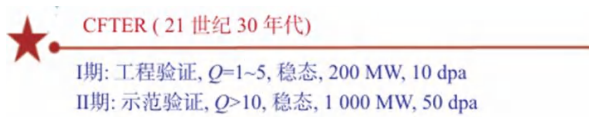
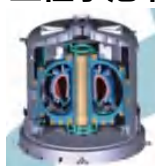
第一阶段主要开展长脉冲稳态等离子体运行和燃烧等离子体研究，以此实现200 MW的聚变功率；

第二阶段主要围绕商用聚变示范堆（DEMO）开展相关验证性试验，同时实现1GW的聚变功率。为实现高参数等离子体运行，CFETR大半径为7.2 m，小半径为2.2 m，等离子体中心场强为6.5 T。

原型电站



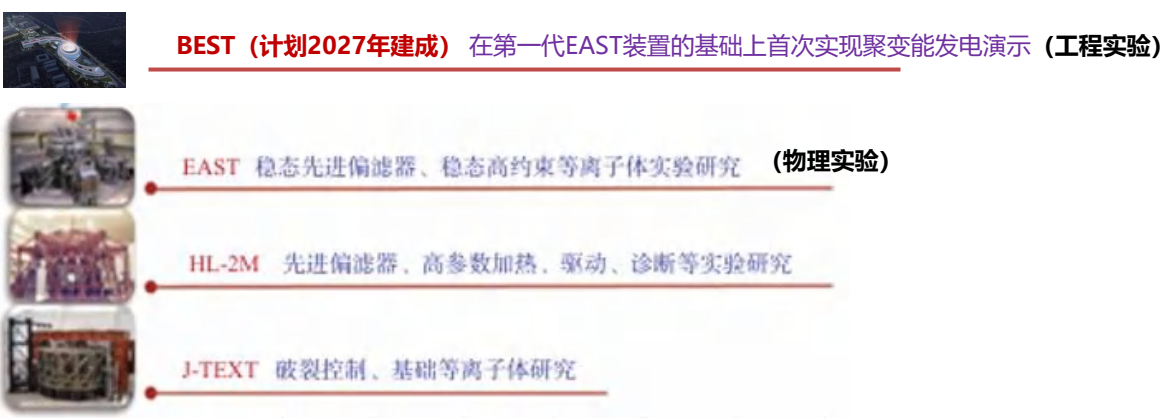
工程示范堆



实验堆



实验装置



2.2.2 国内投资主体：上海未来聚变能源科技有限公司

2024年11月20日，上海未来聚变能源科技有限公司正式成立，注册资本10.26亿元。股东包括上海国投科创投资有限公司、上海电气控股集团有限公司、上海申能诚毅股权投资有限公司，持股比例分别为49.3177%、31.1891%、19.4932%。这三家公司均由上海市国资委直接或间接100%控股。

2022年3月，上海市出台《上海打造未来产业创新高地发展壮大未来产业集群行动方案》，目标到2030年，在未来健康、未来智能、未来能源、未来空间、未来材料等领域涌现一批具有世界影响力的硬核成果、创新企业和领军人才，未来产业产值达到5000亿元左右。到2035年，形成若干领跑全球的未来产业集群。行动措施部分提出要在浦东、闵行、嘉定等区域，打造未来能源产业集群。具体内容包括：

建设先进核能。加快商业化先进核能技术攻关，开展新型小堆、超高温气冷堆装备研制以及新型核工程材料研发应用。攻关小型模块化钍基熔盐堆核能系统及模块化智能装备，研发高温超导可控核聚变实验装置，开展新型核聚变能源系统技术预研，推进核能小型化技术验证，开展多能融合示范应用。

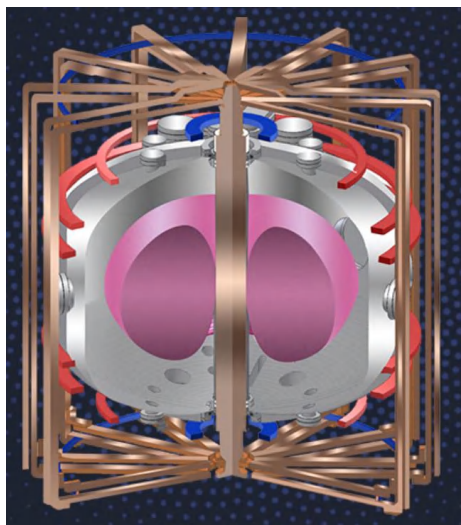
除上海电气系企业外，上海市在核聚变领域还涌现出上海超导、上创超导、翌曦科技、太洋科技、能量奇点等一众上下游企业，为可控核聚变产业的发展奠定了良好的基础。

上海未来聚变能源科技有限公司工商信息

企业名称	上海未来聚变能源科技有限公司				
法定代表人	王 王联凤	登记状态 ①	存续	天眼评分 ③	97分 
		成立日期	2024-11-20		
统一社会信用代码 ②	91310000MAE47PK850	注册资本 ②	102600万人民币	实缴资本	-
工商注册号	-	纳税人识别号 ⑤	91310000MAE47PK850	组织机构代码 ④	MAE47PK8-5
营业期限	2024-11-20 至 无固定期限	纳税人资质	-	核准日期	2024-11-25
企业类型	其他有限责任公司	行业	科技推广和应用服务业	人员规模	-
参保人数	-	英文名称	-		
登记机关	上海市市场监督管理局	注册地址 ⑦	上海市松江区新桥镇莘砖公路668号312室 附近公司		
经营范围 ⑧	一般项目：新兴能源技术研发；企业管理咨询；企业管理。（除依法须经批准的项目外，凭营业执照依法自主开展经营活动）				

2.2.2 国内投资主体：星环聚能（西安）

陕西星环聚能科技有限公司（STARTORUS FUSION）成立于**2021年10月**。公司创始团队依托二十多年的研究成果和经验积累，在**高温超导强磁场球形托卡马克**的基础上，采用了以多冲程重复运行、等离子体电流自有磁场重联加热等为特点的紧凑型重复重联可控聚变技术方案，预期可在相对紧凑的尺寸内实现高效、稳定、经济的聚变能输出。



球形托卡马克探索装置

中国联合球形托卡马克（**SUNIST**）是我国第一台球形托卡马克，由清华大学工程物理系和中国科学院物理研究所联合发起，2002 年建成。其目标是了解低环径比等离子体的基本特性，探索球形托卡马克等离子体启动和非感应电流驱动的方法。至今已运行超过 20 年，放电超过 10 万次。2019年等离子体电流120kA，磁场0.27T，2020年至今持续升级改造，先进的加料方式等。



SUNIST-2 球形托卡马克

SUNIST-2 球形托卡马克是为验证重复重联原理和1T磁场球形托卡马克的约束性能而特别设计的。2023年7月，SUNIST-2 由**星环聚能和清华大学合作建设完成**，并获得第一等离子体。2024 年上半年，SUNIST-2 将通过重复重联将等离子体加热到 1700 万度（离子温度），达到星环聚能第一阶段里程碑，并与世界同类装置先进水平看齐。SUNIST-2主要参数，大半径0.53m，小半径0.33m，环向磁场1T，等离子体电流500kA，离子温度1.5keV

企业名称	陕西星环聚能科技有限公司 复制				
法定代表人	陈锐 关联企业 6	登记状态	开业	天眼评分	59分
统一社会信用代码	91611104MA7BR74P6B	成立日期	2021-10-13	实缴资本	142万人民币
工商注册号	611104100087449	注册资本	149.7206万人民币	组织机构代码	MA7BR74P-6
营业期限	2021-10-13 至 无固定期限	纳税人识别号	91611104MA7BR74P6B	核准日期	2024-07-09
企业类型	其他有限责任公司	纳税人资质	增值税一般纳税人	人员规模	50-99人
参保人数	61 2023年报	行业	科技推广和应用服务业	英文名称	Shaanxi Xinghuan Juneng Technology Co., Ltd. (自动翻译)
登记机关	陕西省西咸新区市场监督管理局沣西新城分局	注册地址	陕西省西咸新区沣西新城西部云谷二期7A栋110室 附近公司		

星环聚能研究进展及计划

- 2023.12-2024.02 D形高温超导磁体原理样机研制，重复重联技术方案的稳定运行
- 2024.02-2024.08 实现球形托卡马克等离子体优化位形高温超导磁体研发达到实用化要求
- 2024.09-2024.11 星环聚能即将开建，负三角球形托卡马克NTST

研发计划：

- 2024Q2高参数内部重联加热实验、高温超导磁体线圈设计与制作
- 2025Q1高温超导磁体电源设计
- 2025Q4整体装置安装**
- 2026Q2第一等离子体
- 2027Q2连续稳定地通过重复重联方案将等离子体加热至1亿度**

2.2.2 国内投资项目：能量奇点（上海）

能量奇点，成立于2021年，是国内第一家聚变能源商业公司。公司聚焦于研制有商业发电潜力的高磁场、高参数的高温超导先进托卡马克装置及其运行控制软件系统，为未来商业聚变发电堆提供高性价比、高可靠性的核心组件和服务。公司研发建设的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。2025年2月，公司自主研发的经天磁体成功励磁至21.7T，创下大尺寸高温超导D形磁体最高磁场纪录。曾于2022年和2023年分别进行过天使轮和Per-A轮融资，参投股东包括了米哈游、蔚来等明星公司。

公司目标：5-7年实现等效Q>1的先进高温超导托卡马克，10-15年实现经济聚变发电商业示范堆。



洪荒70

洪荒70的设计工作开始于2022年3月，自2022年9月起各部件、组件陆续进入加工阶段，2023年8月启动总体安装，**2024年3月1日，洪荒70托卡马克总体安装完工**，这标志着装置建设工作全部结束。**2024年6月18日，能量奇点成功实现等离子体放电。**

对于公司未来，据中新经纬报道，能量奇点CEO杨钊表示，“以洪荒70建成运行为起点，并以洪荒70作为关键实验平台，我们将投入研发下一代强磁场高温超导托卡马克装置——**洪荒170**，该装置以实现氦氦等效**能量增益(Q)大于10**为目标。目标是在**2027年完成洪荒170装置的建设**，届时洪荒170将会是全世界尺寸最小、成本最低的能够实现10倍能量增益的托卡马克装置。

为了支持洪荒170的研发，能量奇点目前也在研发高温超导D形磁体，它的内部代号叫经天磁体，目标是**达到25T的磁场强度**。

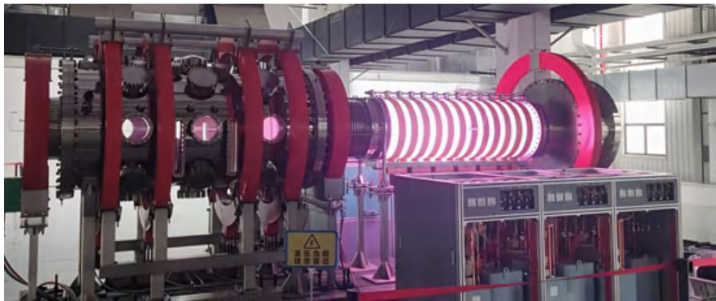
此外，公司还将持续探索高温超导强场磁体、大功率发射机、大功率电源等中间产品或中间技术商业化的可能性。**2030年后，能量奇点计划建成可用于示范性聚变发电站的托卡马克装置。**

2.2.2 国内投资项目：星能玄光（合肥）

星能玄光：自2013年起，先进场反磁镜技术就开始在中国科学技术大学的KMAX-FRC课题组进行实践和开发。基于中科大KMAX-FRC十余年的理论和实践积累，星能玄光于2024年3月在安徽合肥正式成立。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**。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。

创始人孙玄教授，是先进场反磁镜可控核聚变专家，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）、Tri Alpha Energy核聚变公司均有丰富工作经验。

2025年2月，自主研发和建造的**场反位形装置—Xeonova-1**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，刷新了项目团队原先保持的世界聚变装置建造时间纪录。同时，初步测试结果表明场反等离子体成功在形成区产生，并被成功喷射到捕获区。



星能玄光场反位形装置Xeonova-1

Xeonova-1的目标是**场反位形（Field Reversed Configuration, FRC）**在压缩过程中的能量损失问题，同时探索新的压缩方案和参数，克服未来比如Helion Energy等脉冲场反面临的如何提高聚变堆效率等问题。

和目前国际上主要的FRC装置以及中科大KMAX-FRC设计不同，Xeonova-1场反位形采取了**传统的单边形成和磁镜捕获**的设计，利用强磁场减速和压缩高速喷射的场反，在捕获区形成高温高密的等离子体团，捕获后等离子体团由于压强升高将膨胀接近导体壁，有利于研究和优化导体壁在场反压缩过程中的作用。

未来，团队将依托独创的三重约束（场反位形自组织约束、强磁镜、电势垒强化轴向约束）磁场环境，有望实现高温高密长约束时间的运行状态。

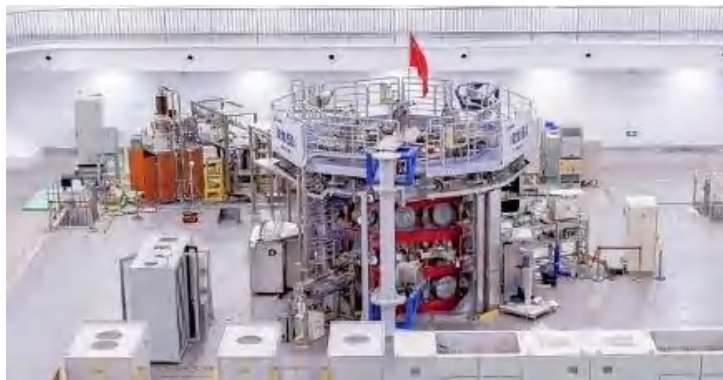
2.2.2 国内投资项目：新奥科技（河北）

新奥科技发展有限公司（新奥能源研究院）：创立于2006年，致力于清洁能源前瞻技术创新，已在低碳能源技术领域实现了一系列引领突破；先后承担国家973/863计划、国家科技支撑项目等。

2017年新奥科技发展有限公司（新奥能源研究院）启动了无中子、低成本、商用化聚变能技术探索，选择了**球形环氢硼聚变**技术路线，目标是在**2035年进入聚变堆阶段**。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**”，跻身国际大型磁约束实验平台先进行列；**2024年国内新奥“玄龙-50U”正式启用，8月“玄龙-50U”装置500kA等离子体大电流实验成功。**

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。2024年12月，“和龙-2”聚变装置完成物理设计。

玄龙-50 (EXL-50)



新奥科技核聚变发展路线



2.2.3 国外投资项目：Commonwealth Fusion（美国）

联邦核聚变系统公司（Commonwealth Fusion Systems, CFS）：是全球最大的私营聚变公司，由美国麻省理工学院提供技术支持创建，拥有1000多名员工，并表示已经筹集了超过20亿美元。目前CFS正在马萨诸塞州德文斯的总部完成其原型聚变机SPARC的开发，SPARC的开发旨在为ARC电厂建设铺平道路。



REBCO (稀土钇钡铜氧)

2021年9月5日凌晨，麻省理工学院等离子体科学与核聚变中心（PSFC）的实验室，工程师们实现了一个重大里程碑——一种由“**高温超导材料**”制成的**新型磁体，达到了20T的大规模磁场强度世界纪录**，这正是建造核聚变发电厂所需的磁场强度。



SPARK安装现场

• **SPARC预计将于2026年生产其第一批等离子体，并在不久之后生产净聚变能**，届时产生的电力将超过消耗的电力。



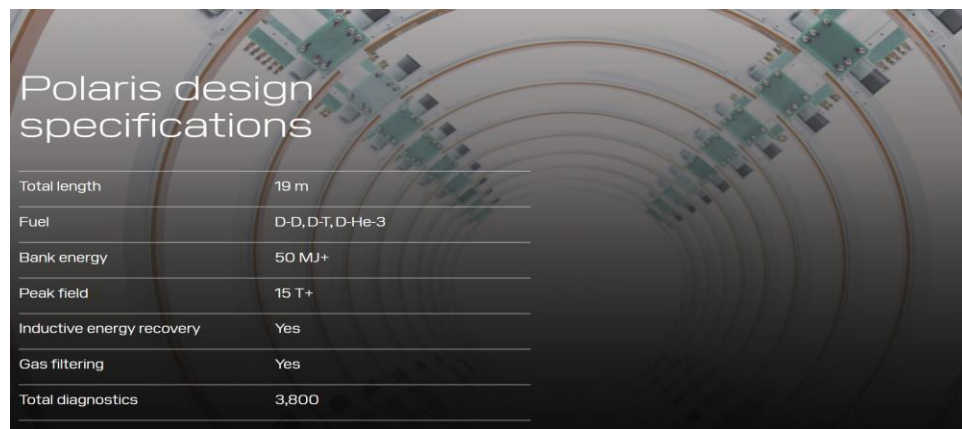
ARC示意图

• 2024年12月，CFS宣布，将投资数十亿美元，在弗吉尼亚州切斯特菲尔德县的詹姆斯河工业中心建造**世界上第一座电网规模的商业聚变发电厂**。拟议中的发电厂被称为**ARC，预计将于2030年代初投入运营**。ARC聚变电厂将产生约400兆瓦的电力，为大型工业场所或15万户家庭供电。

2.2.3 国外投资项目：Helion（美国）、Tae technologies（美国）

Helion Energy, Inc.: 创立于2013年，总部位于美国华盛顿州Everett，公司的Fusion Engine 技术基于 2005 年至 2012 年进行的感应等离子体加速器 Inductive Plasmoid Accelerator, (IPA) 实验。2015-2019年公司先后完成A轮到D轮融资，2021年Sam Altman（个人）领投5亿美金E轮融资，2025年1月，完成4.25亿元F轮融资，Lightspeed Venture Partners、Softbank Vision Fund等参投。

2023年5月，由OpenAI 创始人Sam Altman支持的**Helion承诺在2028年之前开始通过核聚变发电，并在一年之后为微软提供目标为至少50兆瓦的发电量**，否则将支付罚金。

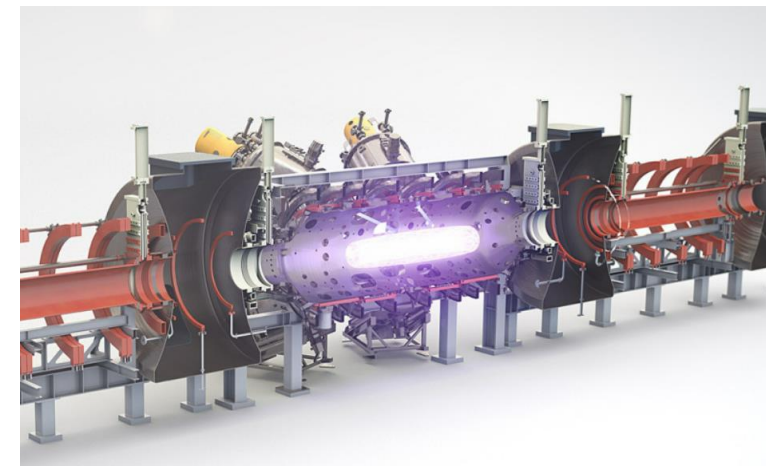


Polaris design specifications	
Total length	19 m
Fuel	D-D, D-T, D-He-3
Blank energy	50 MJ+
Peak field	15 T+
Inductive energy recovery	Yes
Gas filtering	Yes
Total diagnostics	3,800

Polaris关键目标

Helion团队在 2011 年发表了经同行评审的研究，证明了 D-D 中子的产生。2021 年公司宣布其**第六个原型 Trenta** 在经过 16 个月的超过 10000 个脉冲的测试周期后达到了1亿摄氏度。压缩磁场超过 10T，离子温度超过8keV，电子温度超过 1 keV。Helion 的**第七代原型项目Polaris**正在开发中，Polaris 将拥有更强大的磁铁，脉冲速度将比 Trenta 快 100 倍。第八次迭代 **Antares** 正处于设计阶段。

TAE Technologies，是一家致力于开发商业聚变能源的私营企业。公司位于美国加利福尼亚州，自1998年成立以来，一直在聚变能源领域进行创新和研究，根据公开信息，谷歌早在2014年就参投了TAE。TAE Technologies以其独特的FRC (Field-Reversed Configuration) 技术而闻名。TAE Technologies一直是开发氢-硼聚变（也称为p-B11聚变）可能性的中流砥柱，**氢-硼聚变**是一种燃料混合物，其反应难以维持，但其副产品缺乏中子的腐蚀性和高放射性存在。

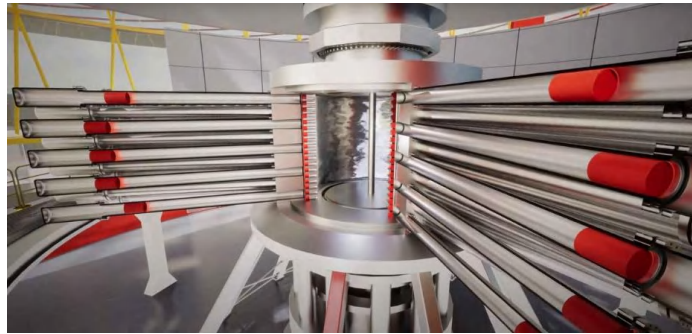


TAE Technologies 的第 5 代“诺曼”反应堆

TAE 前后共建立了五代核聚变反应堆平台，并成功地产生和约束了超过 140,000 次聚变等离子体。目前，有两代平台仍在持续研发中，包括此次融资用于建设的 **Copernicus (哥白尼)** 平台和以已故公司创始人、物理学家诺曼·罗斯托克命名的 **Norman (诺曼)** 平台。**“达芬奇”将在 2030 年代初开始向电网供电。**

2.2.3 国外投资项目：General Fusion（加拿大）、JET（欧洲）

加拿大商业聚变公司General Fusion: 2006年，公司创始人物理学家米歇尔·拉贝博士完成了原理验证实验，吸引到了包括亚马逊的杰夫-贝索斯（Jeff Bezos）、微软和其他许多公司以及加拿大官方作为自己的投资方和合作伙伴。去年6月，英国原子能局（UKAEA）和 General Fusion 宣布了一项协议，根据该协议，General Fusion 将在 UKAEA 的 Culham 校区建造和**运营其聚变示范工厂（FDP）**。2024年11月，公司宣布其使用独特实用的磁化靶聚变（Magnetized Target Fusion, MTF）技术成功证明了金属内衬形成和压缩等离子体技术的有效性，从而为**LM26**的大规模聚变演示奠定了基础。



MTF磁靶聚变装置

LM26，全称**Lawson Machine 26**，是General Fusion于2023年提出的MTF演示机器，将在2025年初开始集成运作，目标是**在未来两年内实现1keV、10keV（超过1亿摄氏度的聚变条件）的关键里程碑**，并最终达到科学收支平衡，从而帮助降低General Fusion的商业规模机器的风险，并加快其在**2030年代初至中期向电网提供商业聚变能源**的步伐。

MTF技术原理是：将氘氚等离子体团注入到一个液态金属的自旋涡流中，然后用大功率活塞向内挤压；如果这种挤压在几微秒内完成，等离子体就会向心聚爆，达到发生聚变反应的条件；同时聚变反应会产生中子，中子能够与液态金属中的锂发生反应，从而生成更多的氚。这项技术旨在为具有成本效益的发电厂规模化设计，既不需要大型超导磁体，也不需要昂贵的激光阵列。

JET（又称欧洲联合环）位于英国牛津附近的卡勒姆聚变能源研究中心（CCFE），由英国原子能管理局（UKAEA）运营。**JET在1983年正式投入运行，2023年退役**。退役前曾是全球规模最大、功率最强的在运托卡马克研究装置。2024年2月，JET装置在其最后一次实验中，仅使用**0.2毫克氘氚燃料就产生5秒的高聚变功率，创造了69MJ的突破性记录**。据悉，JET的退役和重新利用计划（JDR）预计将持续到2040年左右。



JET（欧洲联合环）

目的：获得和研究接近聚变堆状态和尺寸的等离子体，从而为未来详细评估托卡马克反应堆的参数、尺寸和工作状况。原始设计参数：大半径2.96m，小半径1.25m，等离子体电流为4.8MA，等离子体中心环向磁场达到3.45T，加热功率达到38MW。

1971年，欧洲原子能共同体提出核聚变装置计划。1975年JET设计工作完成，1978年正式开工建设，1982年建成。1983年得到第一个等离子体脉冲，电流为19KA，持续了0.1秒，1983年底，等离子体电流达到3MA，脉冲持续10秒。1983年底可以达到持续10秒。

1991年，JET进行了世界上首次氘氚实验，产生1.7MW聚变功率，证实了可控核聚变作为先进能源的科学可行性，是人类聚变史上第一个里程碑。1997年氘氚反应产生16.1MJ聚变功率，2021年产生59MJ，2024年产生69MJ再次打破历史记录。

2.2.3 国外投资项目：日本

日本核能研究所（现日本原子能研究开发机构）的托卡马克等离子体约束装置“JT-60U”于1996年实现5.2亿K的离子温度，超过了核聚变发电需要的1亿K。而且，输出（热）能量和输入能量的比值（能量倍增系数，Q值）为1.25，**在全世界率先超过了1。**

JT-60SA计划是ITER的先行项目，实验结果将为ITER的设计和运行提供经验，ITER的规模是JT-60SA的两倍。该项目也是JT-60U的升级版本，利用了JT-60U的基础设施。2024年12月1日，欧洲聚变能组织（F4E）（ITER计划欧洲执行机构）发布消息称，欧洲和日本共同建造和运营的核聚变反应堆**JT-60SA正式投入运行**。该反应堆为托卡马克装置，始于2007年，**于2020年完成组装，并于2024年10月23日点火成功。**

日本核聚变能源协会（J-Fusion）于2024年3月29日正式成立。紧随其后，该协会于4月1日推出了官方网站，邀请业界支持和参与。

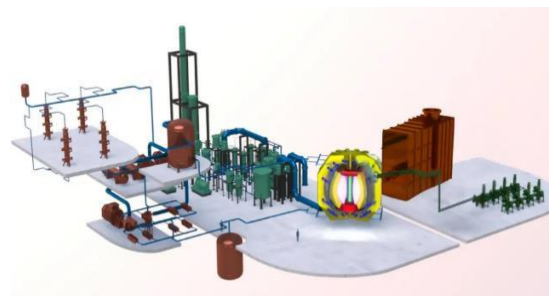
虽然日本此前或近期计划的核聚变实验已经实现或即将实现中脉冲等离子体放电，但在利用能量传输进行持续外部使用、建立氦燃料循环(包括氦增殖)以及将这些进展整合到代表商业上可行的核聚变发电厂的配置方面，仍存在关键障碍。**FAST项目**旨在填补这些空白，提供一个全面而独特的平台来开发适用于全球实际聚变电站的技术。

LHD：世界第二大超导仿星器。仿星器是一种先进的磁约束聚变实验设备，以其独特的三维磁场构型而著称。这种设备的设计核心在于使用外部线圈系统产生复杂的磁场，以约束和稳定高温等离子体。与托卡马克不同，仿星器不依赖于等离子体内部的纵向电流，而是通过外部线圈产生的旋转变换磁场来维持等离子体的稳定性。这些线圈包括精心设计的螺旋线圈，它们可以是两对或三对，配置以产生椭圆形或三角形的磁场面，从而有效防止等离子体粒子沿磁场线漂移到反应器壁上。



JT-60SA

世界第二大等离子体研究设施，仅次于ITER。该项目是JT-60U的升级版本，利用了JT-60U的基础设施。**2023年首次实现等离子体放电，2024年10月23日点火成功。**但项目负责人Hiroshi Shirai表示，JT-60SA还需要两年的时间才能更持久的运行，以满足有意义的物理实验所需。因此JT-60SA一直在进行一系列技术升级，为2026年下半年的实验做好准备。JT-60SA开展的工作将为ITER提供支持。



FAST

日本正式启动FAST(先进超导托卡马克聚变装置)项目，**预计于2025年完成初步设计，目标是在本世纪30年代末完成发电示范。**该项目采用低纵横比托卡马克设计和**高温超导(HTS)**线圈，实现了紧凑的设计，降低了成本并缩短了建造时间。系统计划**实现50-100MW的发电量，DT聚变燃烧的放电持续时间为1000秒**，并计划累计满功率运行1000小时。



LHD

大型螺旋装置(LHD)，日本NIFS目前唯一正在运行的核聚变装置，也是目前仅次于德国Wendelstein 7-X的**世界第二大超导仿星器**。1997年，LHD项目正式竣工，1998年实验启动，**2017年3月LHD氦实验开始，2022年LHD氦实验完成。**

2.2.3 国外投资项目：NIF（美国）、First Light Fusion（英国）

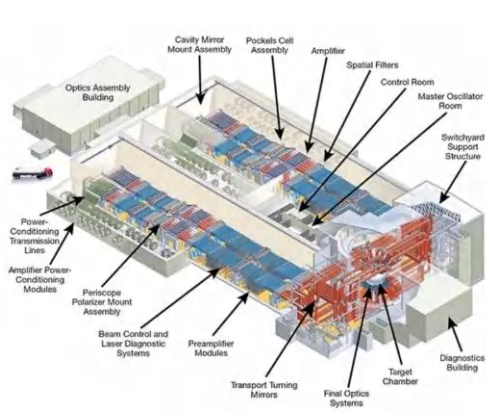
美国的国家点火装置（National Ignition Facility, NIF），是世界最大的激光器，NIF从1994年开工建设，由美国加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）研制。由国家核安全局（National Nuclear Security Administration, NNSA）维护。**2009年5月，NIF顺利完工**。装置整体占地21368平方米，**共耗资34亿美元**。

2022年12月，NIF利用2.05MJ激光能量输入，获得了3.15MJ的聚变能输出，**首次实现“净能量增益”**。

2023年7月，NIF利用192路激光束向悬浮在腔体内的**冷冻氘靶丸发射了2.05MJ的能量，最终实现了3.88MJ的聚变能量输出**，创造了新的能量输出记录。

2023年10月，NIF利用1.9MJ激光能量输入，获得了2.4MJ的聚变能输出。

同月，又利用2.2MJ激光能量输入，获得了3.4MJ的聚变能输出。2023年12月，美国能源部（Department of Energy, DOE）宣布成立了三个新的惯性聚变能源（Inertial Fusion Energy, IFE）中心，并将在四年内提供总计4,200万美元的资金，用于加速惯性聚变能源科学和技术的发展。



美国国家点火装置NIF

激光束数量：192束
激光系统总设计能量：1.8MJ
每束激光传递能量：10KJ
激光介质：Nd钕玻璃
激光初始波长：1053nm
激光工作波长：351nm
激光脉冲时间：1-20纳秒
靶丸类型：氘氚冷冻燃料
靶丸尺寸：1-2毫米
靶丸结构：包含外壳与内层冷冻燃料的复合结构，外壳材质通常为塑料或其他能够产生均匀压缩的材料
反应室尺寸：球形真空容器，直径约为10米

First Light Fusion是一家总部位于英国牛津的核聚变技术研发公司，2011年从牛津大学分离出来，致力于通过**惯性约束聚变**技术实现核聚变能源的商业化。该公司采用独特的“弹丸聚变”技术。放大器技术**通过增强和集中用于撞击燃料的弹丸的压力，来提高聚变反应的效率**。这种方法避免了使用复杂而昂贵的激光或磁铁来产生或维持聚变条件，而是采用了以极快的速度行进的弹丸来压缩燃料“靶”，从而实现了更为高效和经济的聚变反应。First Light Fusion拥有两种主要的驱动技术：两级轻气枪（BFG）和电磁发射器（M3）。2025年3月，公司宣布重大战略调整，**为快速发展的全球惯性聚变能产业提供其独特的放大器技术**，放弃了之前基于弹丸聚变方法建造自己发电厂的计划，转而寻求与其他企业和机构合作，共同推动惯性聚变能技术的发展和运用。公司表示，这一转变将使其能够更快地进入市场，并获得更多的资源和支持。



M3：欧洲最大的脉冲发电设施

规格：位于16 x 16 x 5米的外壳内，重40吨，使用15公里电缆、300个诊断探头和21000平方米薄膜绝缘层。每隔一天可发射一次。
功能：**用于测试聚变目标**，验证弹丸聚变技术。



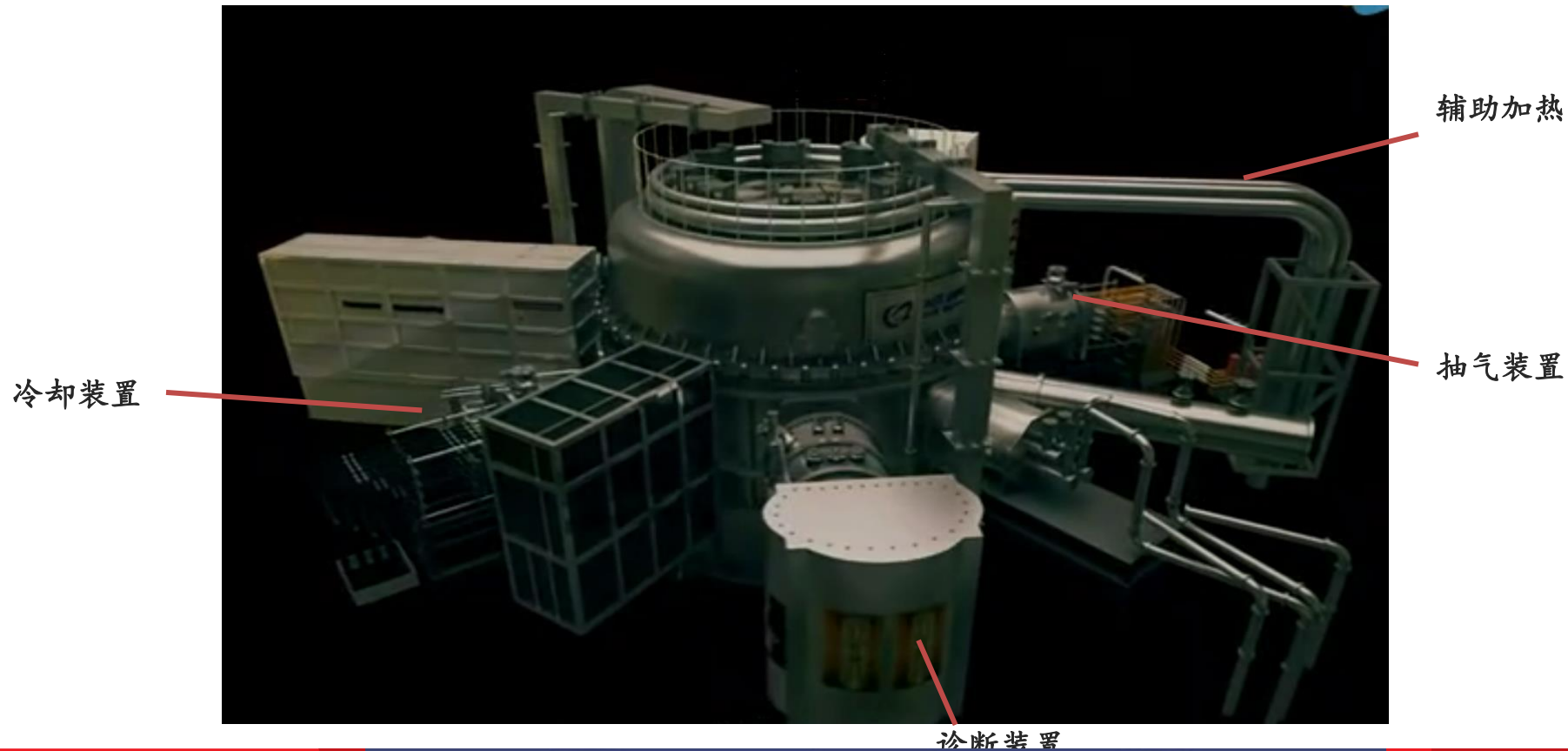
BFG：英国最大的两级轻气枪

规格：自2021年4月服役，**利用火药推动活塞，将氢气压缩至大气压的10000倍，为抛射物发射提供动力**。
功能：与M3互补，探索不同参数空间，支持聚变研究。

2.3 托卡马克装置的构成——以ITER为例

托卡马克装置主机的辅助部件：

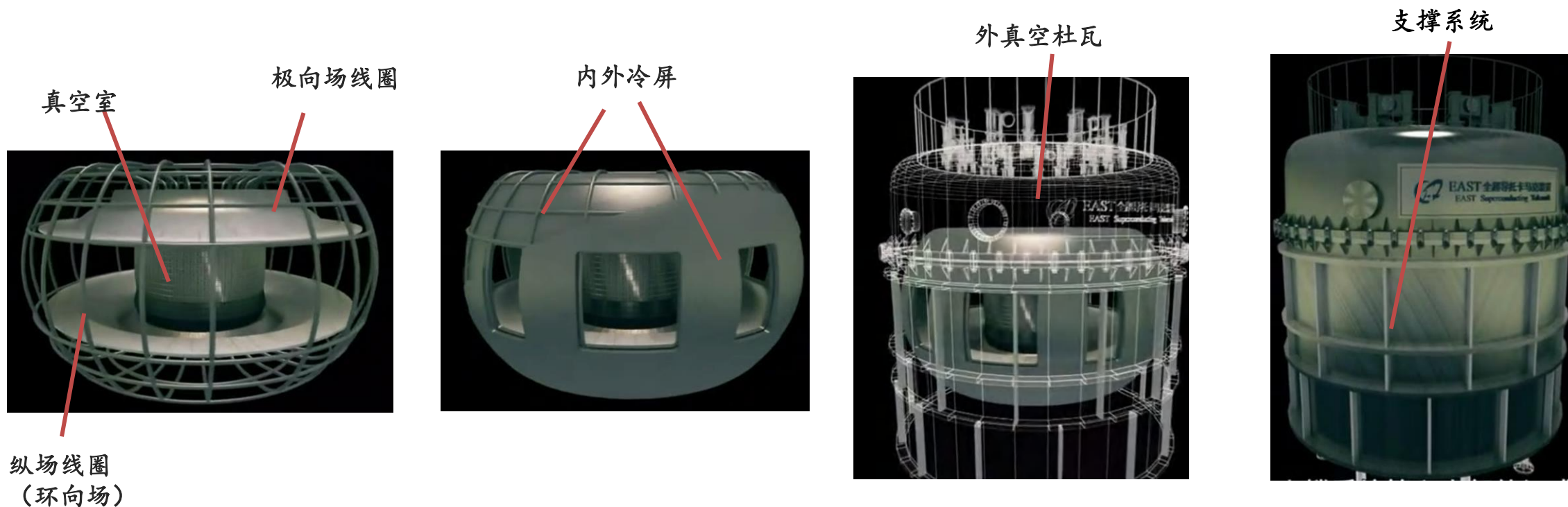
托卡马克EAST，高11米，直径8米，重400吨，锅炉状容器就是主机。主要是由真空室、纵场线圈（环向场）、极向场线圈（横向的）、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑系统等6大部件组成。四周主要是辅助加热、诊断、抽气、冷却装置。



2.3 托卡马克装置的构成

托卡马克装置主机部件：

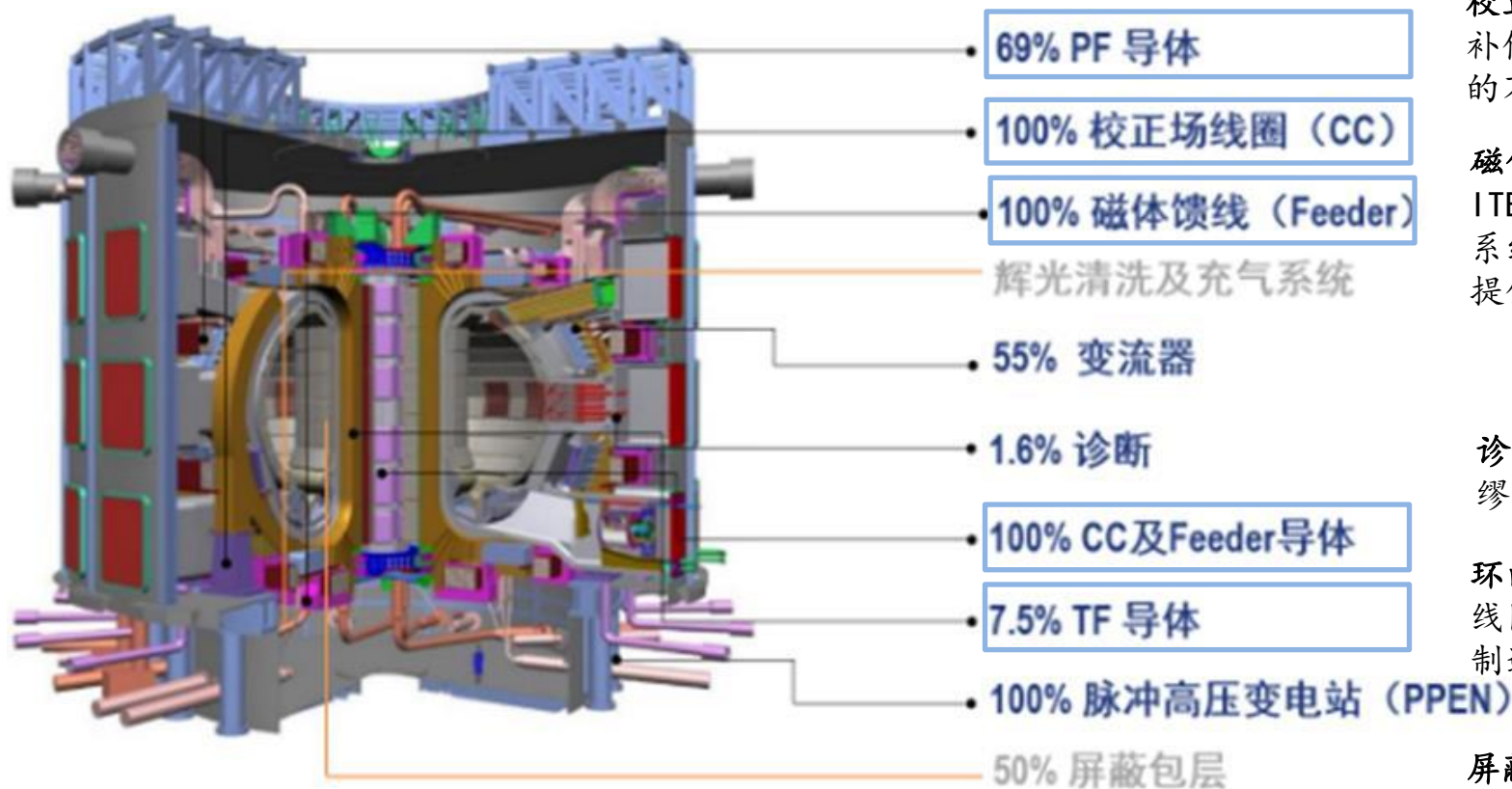
托卡马克EAST，高11米，直径8米，重400吨，像一个大锅炉的东西，就是主机。主要是由真空室、纵场线圈（环向场）、极向场线圈（横向的）、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑系统等6大部件组成。



2.3 托卡马克装置的构成

托卡马克装置主机部件：

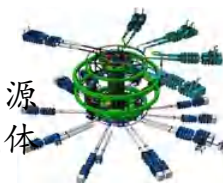
ITER项目中国采购包部分



极向场线圈 (Poloidal Field, PF)：在等离子的产生、上升、成型和评定各个极端提供欧姆加热和控制等离子位形，共需要6个。

校正场线圈 (Correction Coil, CC)：用来补偿环向场和极向场系统制造与安装过程带来的不可消除的磁场误差。共有18个校正场线圈。

磁体馈线 (Feeder)：共31个，连接杜瓦内的ITER超导磁体与杜瓦外的低温制冷系统、电源系统、以及控制系统的接口部件，向超导磁体提供电力、冷却供应、信号测量。



诊断：中子通量监测器、径向X射线相机、朗缪尔探针、赤道面12号窗口集成等

环向场线圈 (Toroidal Field, TF)：18个TF线圈需要126根单元导体，我国承担11根导体制造任务，占全部制造任务的7.5%。



屏蔽包层：为整个ITER装置提供中子和高热负荷的屏蔽，包括真空室内壁的两个子系统，包层系统又包括模块化设计，每个模块又包括第一壁、屏蔽块、柔性支撑等。

2.3.1 氘氚燃料：氘氚的来源？

聚变反应原理：氘氚（D-T）反应（ $^2\text{D}+^3\text{T}\rightarrow^4\text{He}+\text{n}$ ）生成14.1 MeV的中子和3.5 MeV的 α 粒子。还有少量D-D反应（次级反应或副反应）产生的2.45 MeV的中子。

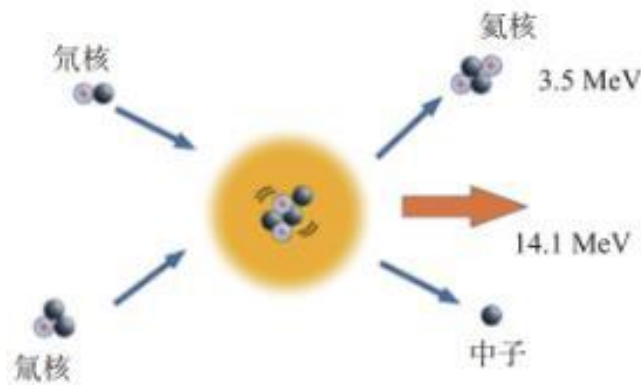
氘：氘在海水中储量极大，一升海水中提取的氘经过聚变反应释放的能量相当于300升石油。海洋中，大约每5000个H原子中就有一个是D，它的售价约为每克13美元，约合13000美元/kg（9.4万元/kg）

氚：但氚的半衰期为12.3年，天然氚是宇宙射线轰击的产物，只在地球高层大气中微量存在。制得的方法主要有两种：

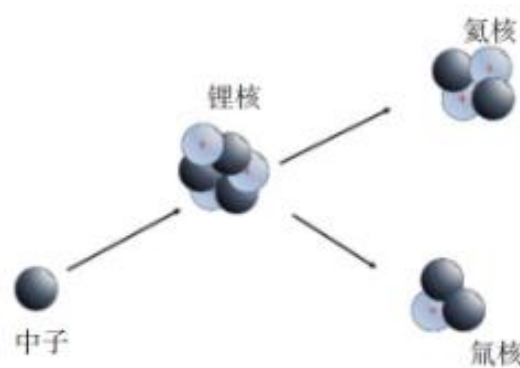
1) **链式核反应堆也能产生少量的氚**，但很少被收集。目前，全球范围内氚的唯一商业来源是19座加拿大氘铀核反应堆（CANDU，又称坎杜反应堆，是一种加压重水反应堆设计），每个反应堆每年产生约0.5kg氚，但这些核反应堆中的一半将在十年内退役。根据ITER 2018年的推测，可用氚的库存将在十年内达到峰值，之后会随着氚的出售和衰变而稳步下降。目前全球氚的存量约为25kg。

2) **用中子轰击锂可产生氚**。在工业上，利用反应堆的中子，采用锂-6化合物做靶材，生产氚，然后利用热扩散法，使氚富集至99%以上。

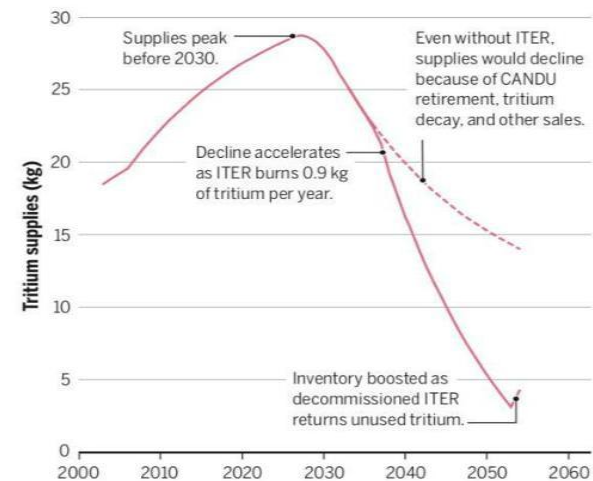
氘氚反应示意图



中子与锂（ ^6Li ）反应形成氚循环



全球氚供给趋势预测



2.3.1 氦氦燃料：氦循环过程

此外，中子与锂（ ${}^6\text{Li}$ ）反应，可以生成氦和氦（ $n+{}^6\text{Li}\rightarrow{}^4\text{He}+{}^3\text{T}$ ）。在聚变反应堆运行过程中，可以利用中子与锂的反应产生氦氦聚变所需的燃料氦，进而完成核燃料循环中的**氦循环过程**。

D-T反应生成的氦作为“氦灰”排出，反应产生的高能中子在聚变反应堆的包层中慢化，中子的动能转化为热能。可以采用 ${}^6\text{Li}$ 作为吸收反应产物的包层，包层中还包括**中子增殖剂、冷却剂**，称为**增殖包层**。在聚变中子作用下，包层中的 ${}^6\text{Li}$ 可以生成氦再进入反应室作为燃料，形成氦的循环利用。总体来看，该过程需要补充的燃料为**氦**，同时需要补充因为与中子发生反应而损失掉的 ${}^6\text{Li}$ 。**氦**作为一种较难获得的燃料在该过程中循环使用，只是在反应堆“点火”时需要参与初始反应的氦。对外排出的物质是反应生成的氦，以及更换下来的增殖包层废料。**聚变反应产生的中子能量被包层吸收，使得包层温度升高，将升温的能量用于加热工质并推动汽轮机发电。**

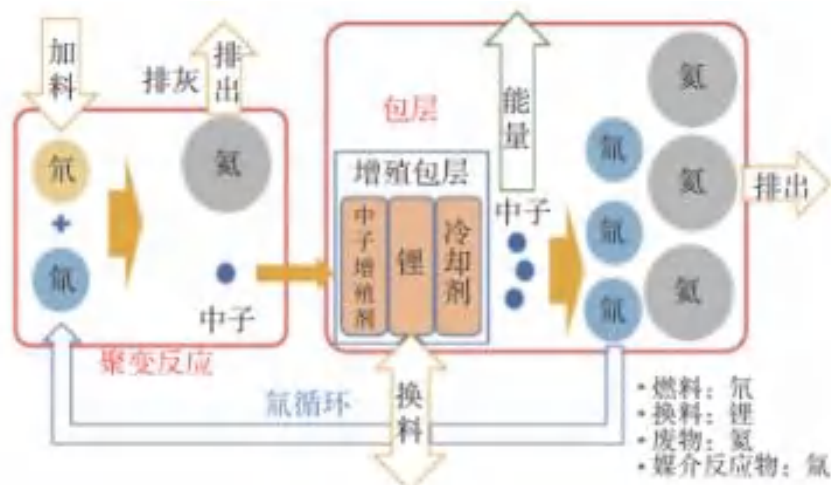
从该过程可以看出，当前对于受控核聚变能源研究的挑战除了燃烧等离子体自身的加热和稳定性等问题外，抗高通量中子辐照的包层材料及氦循环过程的挑战也是制约聚变发展的重要因素。

氦增殖区是聚变堆的核心功能部件，位于**真空室内第一壁与屏蔽层之间**。其核心功能主要包括三个方面：

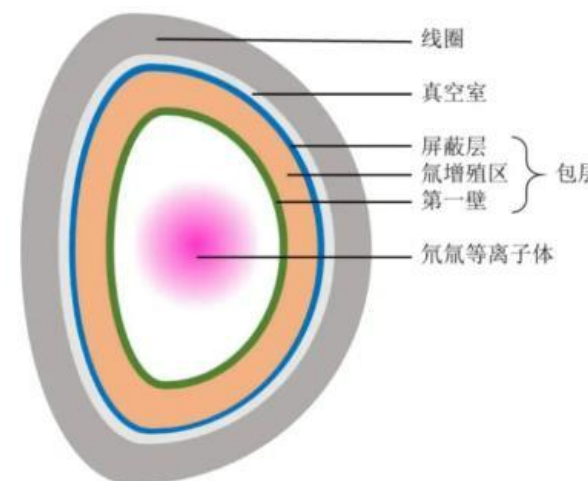
- 1) 利用中子与包层内的氦增殖材料反应生产氦，并将提取的氦补充到反应堆内，弥补氦的消耗，实现氦的自给自足。
- 2) 增殖区通过将聚变粒子的能量转化为可利用的能量，有效冷却自身并输出高品质热量以进行发电。
- 3) 提供超导线圈和生物体所需的**辐射防护**，减小外围设备材料的活化，并包容了放射性物质，起到了辐射屏蔽的作用。

增殖材料主要是**铍或铅**。原理在于：当一个中子与铍或铅相互作用时，会产生两个中子，这两个中子又可以继续与铍或铅相互作用，从而产生更多的中子。

聚变堆主循环原理示意图



聚变堆基本结构剖面示意图



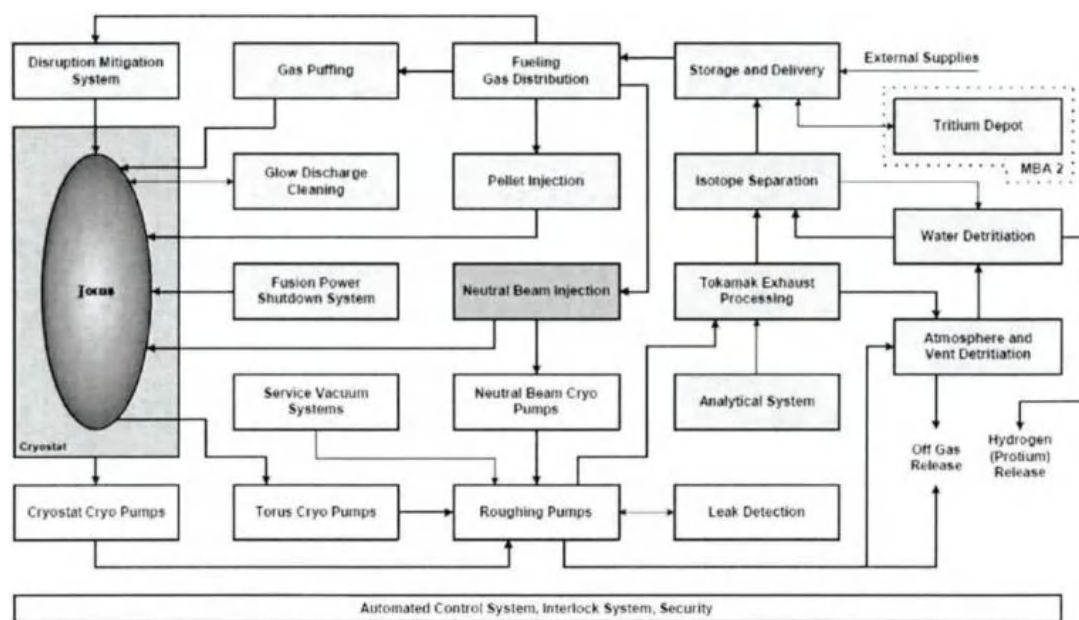
2.3.1 氦气燃料：氦增殖过程

氦工厂：聚变反应中，氦的燃烧效率非常低（ITER约为3%，CFETR为1%-5%），聚变燃烧会产生大量的杂质，当杂质浓度达到一定程度时会使得等离子体温度降低，可能导致聚变反应淬灭中止，所以大量未经燃烧的、含杂质的氦气燃料混合气体需要通过氦工厂来进行提纯处理。因此，氦工厂承担着实现“氦自持”循环中精细、高效、安全处理氦的功能，如同聚变反应堆的“燃料供应+废弃物处理”车间。目前我国已开展了首个包含内外燃料循环的完整氦工厂系统和氦安全包容系统的详细概念设计，建立了包含内外燃料循环的全流程缩比氦工厂工艺演示系统，完成了国内首次克量级氦循环工艺验证试验，氦回收效率达到99.7%。利用聚变堆本身D-T反应产生的14MeV中子轰击增殖包层进行闭式产氦，并且通过氦工厂进行循环回收成为了实现氦自持的首选方案。

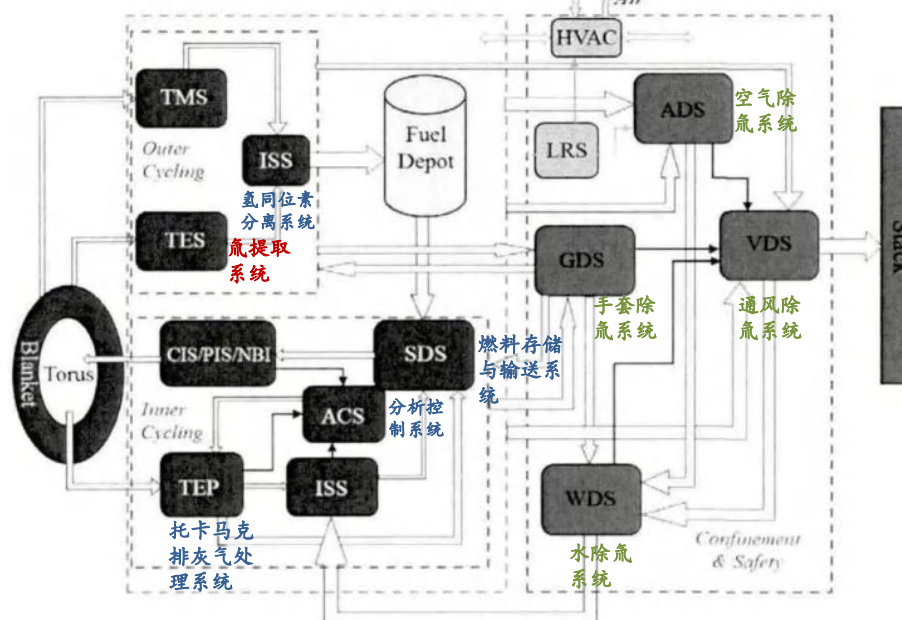
ITER的燃料循环系统采用包括燃料循环主回路和排出物处理回路的二回路设计。

CFETR（氦燃料循环系统）采用了包括氦提取、氦排灰处理系统、氦贮存等子系统的三环路设计。处理真空室氦气燃烧气体的内燃料循环回路包括托卡马克排灰气处理系统（TEP）、氢同位素分离系统（ISS-I）、燃料存储与输送系统（SDS）和分析控制系统（ACS）；处理增殖包层产生的氦以实现氦自持的外燃料循环回路包括增殖包层、氦提取系统（TES）、冷却剂纯化系统（CPS）、氢同位素分离系统（ISS-O）和分析系统（ANS）。为了保证氦操作的工作人员安全需要的氦安全包容系统包括手套箱除氦系统（GDS）、空气除氦系统（ADS）、通排风除氦系统（VDS）和水除氦系统（WDS）等。

ITER燃料循环示意图



CFETR氦工厂设计



2.3.2 磁体系统

超导材料：超导现象是指材料在低于某一温度（这一温度称为超导转变温度 T_c ）时电阻变为零的现象，这种状态下，材料进入超导态，材料电阻突降为零，同时所有外磁场磁力线被排出材料外，材料同时出现零电阻态和完全抗磁性。由于核聚变需要超高的磁场对等离子体进行约束，因此需要大电流的产生，这就需要用到超导材料。按照超导体的临界温度，可以将超导体分为低温、高温超导体。临界温度低于 -248°C 至 -243°C 超导体为低温超导体，该温度的为高温超导体。据华经产业研究院数据。

性能：低温超导体的稳定和最高磁场强度在15T左右，高温超导磁体能达到45.5T。

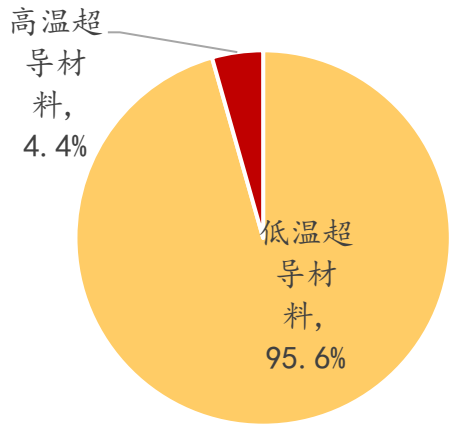
成本：目前低温超导体产业链成熟度较高，量化加工技术已经较为成熟，初始投资成本较低，但考虑到后续需要在液氮环境中使用，后续维护成本较高，且磁体体积及重量较大；高温超导材料初始投资成本远高于低温超导体，但后续可以在液氮环境中使用，位处成本较低，且磁体体积及重量较小。

目前，全球低温超导材料占比超导材料超9成，高温超导当前受限于技术，整体市场应用占比较小，但随着超导线缆、可控核聚变等持续发展应用，预计高温超导材料的市场份额将会逐步扩大。

低温超导与高温超导对比

指标	常规导体磁体	低温超导磁体	高温超导磁体
电能消耗（产生1T稳态强磁场）	3.5MW	极少电能	极少电能
运行温度	室温300K左右	25K以下	25Ky以上
制冷方式	大量冷却水	液氮浸泡或制冷剂传导冷却	液氮浸泡或制冷剂传导冷却
材料	铜等常规导体	NbTi、Nb3Sn等	MgB2、BiSrCaCuO、YBCO等
磁场强度	最高不超过2T	稳定运行且最高磁场强度在15T左右	稳定运行最高磁场强度可达到45.5T
产业链成熟度	产业链成熟度高	产业链成熟度较高，量化加工技术较为成熟	产业链成熟度较低，带材成本较高，但处于快速成长阶段
价格	价格便宜	价格已经降低到较便宜区间	高温超导带材价格是低温的10倍左右，但目前正在加速下降
磁体体积及重量	体积庞大	需要大量的制冷系统维持低温，磁体体积及重量较大	需要制冷系统相对较小，磁体体积及重量较小
应用领域		加速器磁体、核聚变工程、核磁共振（MRI、NMR）、磁体、通用超导磁体	超导电缆、超导变压、超导感应加热、核聚变、超导磁悬浮、电磁探测设备等

全球超导行业细分市场结构



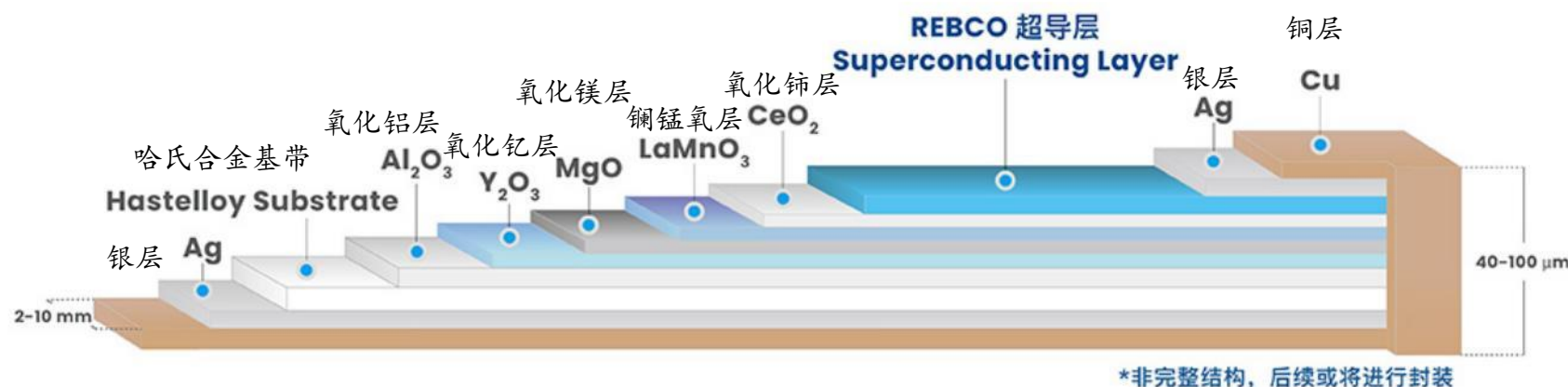
2.3.2 磁体系统：高温超导与紧凑型托卡马克装置

核聚变超导磁体主要挑战在于磁体要承受磁场本身对载流线圈产生的巨大机械应力，也可以想象成给气球加压。普通超导体可以做成坚固的电线，然后绕成一个线圈，但高温超导体采用的是相对脆弱的磁带（tape）。据澎湃新闻2021年9月10日报道，为了开发新磁体，美国新能源初创公司 Commonwealth Fusion Systems（简称 CFS）的研究人员提出了一种设计，将薄层磁带夹在更坚固的金属层之间。新磁体可以大大缩小托卡马克的尺寸，因此更便宜、更容易建造。材料方面，其采用的是由高温超导体稀土氧化钡铜组成的线圈，而不是铌锡。

到目前为止，要想获得强大的磁场，创造一个能够容纳加热到数亿度的等离子体的磁瓶的方法就是把磁体的体积变大。而新型高温超导材料以扁平、带状的形式制成，使得在较小的设备中获得更强大的磁场成为可能，与使用传统低温超导磁体的体积大 40 倍的设备的性能相当。这种功率与尺寸之间的飞跃是设计的关键因素。随着高温超导技术的进步和成本下降，建造可商用的小型托卡马克和其它核聚变装置变得可行。

另据中国核技术网2021年4月报道，美国通用原子公司(GA)管理的DIII-D国家聚变设施就开发出一种紧凑型反应堆设计。我国紧凑型聚变能实验装置园区（BEST）等项目正加速推进，能量奇点也计划研发和建设全球首台基于全高温超导磁体的紧凑型托卡马克实验装置。

第二代高温超导带材

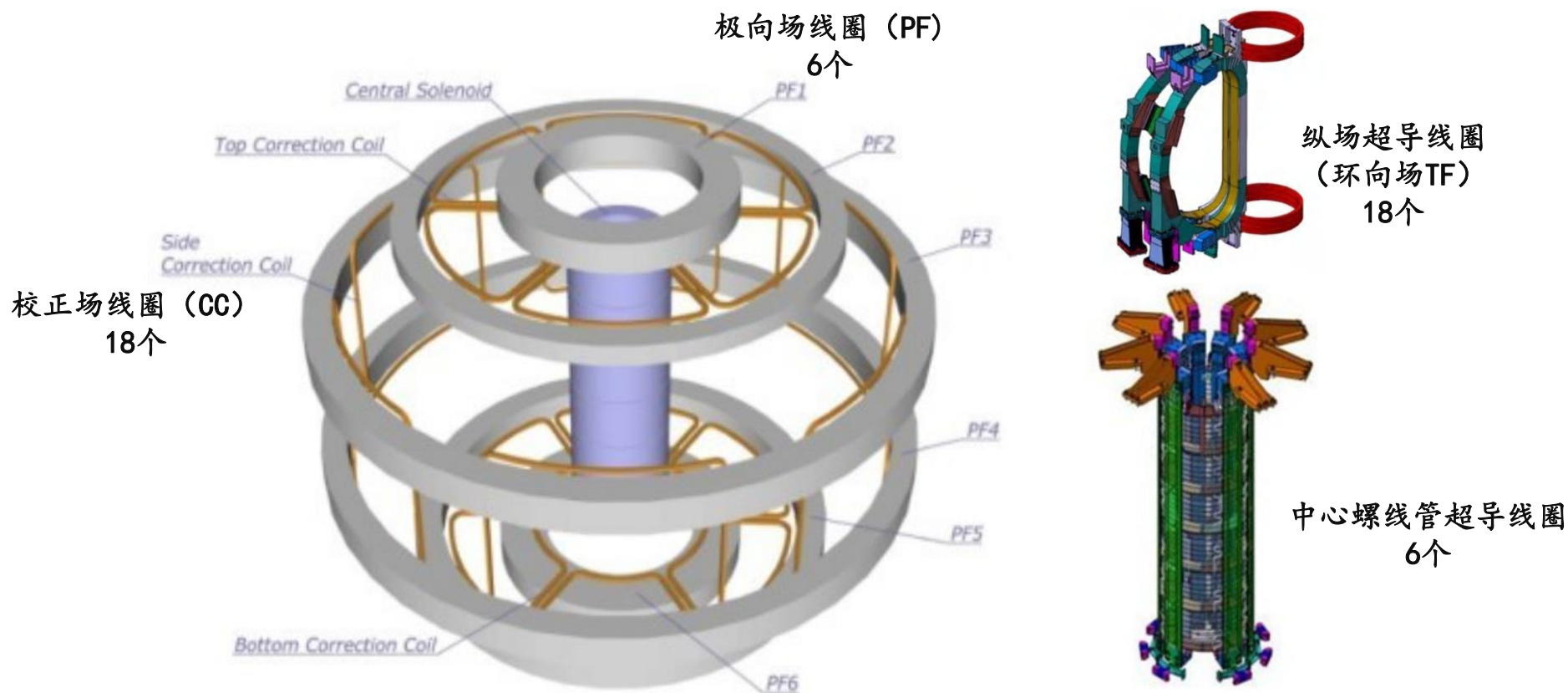


高温超导磁体



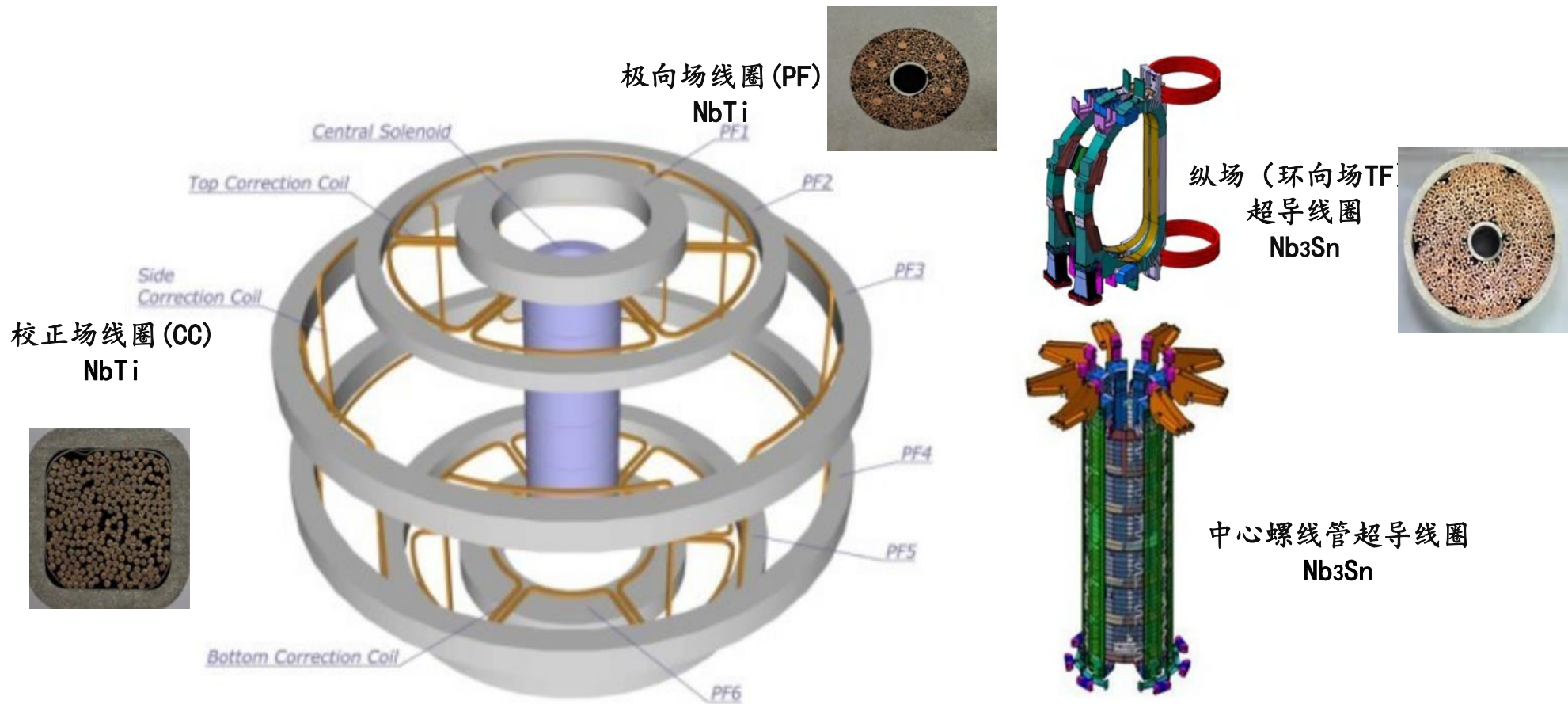
2.3.2 磁体系统：ITER装置磁体系统由多个线圈组成

根据中科院等离子体物理研究所，ITER磁体系统包括4个子系统：18个环向场线圈（Toroidal Field Coil，简称TFC）；6个极向场线圈（Poloidal Field coil，简称PFC）；18个校正线圈（Correction coil，简称CC）以及中心螺线管（Central Solenoid，简称CS）。



2.3.2 磁体系统：ITER超导线圈材料主要包括 Nb_3Sn 、 NbTi 等

超导材料：超导体是用于绕制ITER超导线圈的重要材料，根据不同线圈的作用和要求，ITER总共有不同规格的超导体。中心螺管、纵场线圈采用（铌三锡） Nb_3Sn 超导材料，极向场（PF）、校正场线圈（CC）采用铌钛（ NbTi ）低温超导材料。



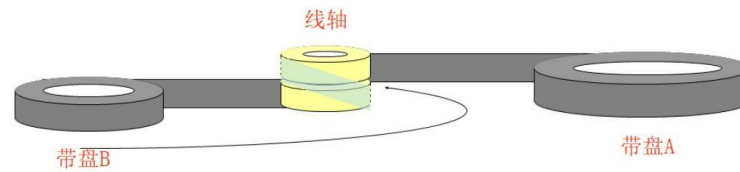
2.3.2 磁体系统：线圈的绕制——双饼结构

这里我们以高温超导材料为例，由于其是扁平结构，大部分高温超导磁体装备都是利用**饼式线圈结构堆叠**而成的。根据原力超导官网介绍：

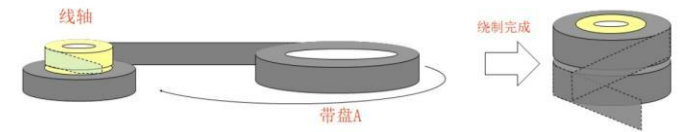
- 首先，从带盘A中取出绕制单线双饼线圈所需要的全部带材的一半到带盘B上。
- 然后，将线轴放在带盘A和带盘B中间，让带盘B绕着线轴转动，使带盘B上的全部带材绕到线轴的第一层中，并用kapton胶带固定。
- 最后，让带盘A绕着线轴转动，使带盘A上的剩下的带材绕到线轴的第二层，并用kapton胶带固定。



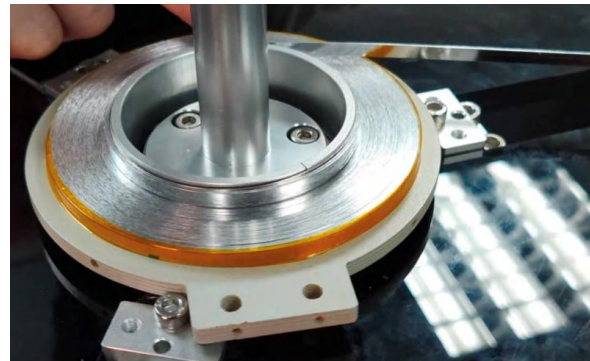
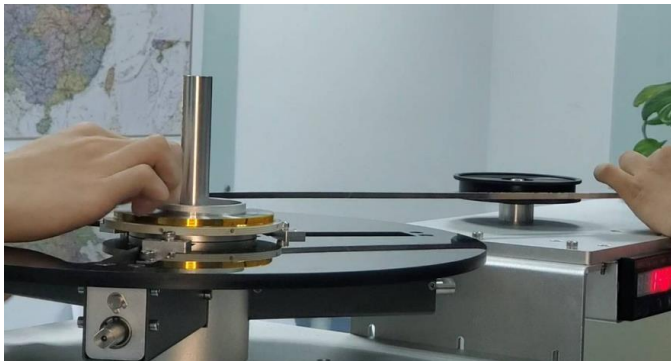
第一步：从带盘A中取出绕制单线双饼线圈所需要的全部带材的一半到带盘B上



第二步：将线轴放在带盘A和带盘B中间，让带盘B绕着线轴转动，使带盘B上的全部带材绕到线轴的第一层中，并用kapton胶带固定。



第三步：让带盘A绕着线轴转动，使带盘A上的剩下的带材绕到线轴的第二层，并用kapton胶带固定。



2.3.2 磁体系统：6个极向线圈双饼数不同，我国承制ITER全部PF导体的65%

极向场（Poloidal Field, PF）线圈：PF系统由从上至下，6个不同尺寸的独立线圈组成，双路绕制，每个双饼（DP）由2个NbTi基的管内电缆导体单元（CICC）绕制而成。PF导体内通有4.2K（-269℃）的液氮，磁场强度最大可达5T。与环向场线圈导体类似，PF线圈导体为NbTi基超导铠装导体。运行时，PF导体内通有4.2K（-269℃）的液氮，电流45kA，磁场强度最高可达5T（低温超导体下）。

每个PF线圈的双饼数不同，分别为：第1、3、4、5线圈为8个；第2线圈为6个；第6线圈为9个。

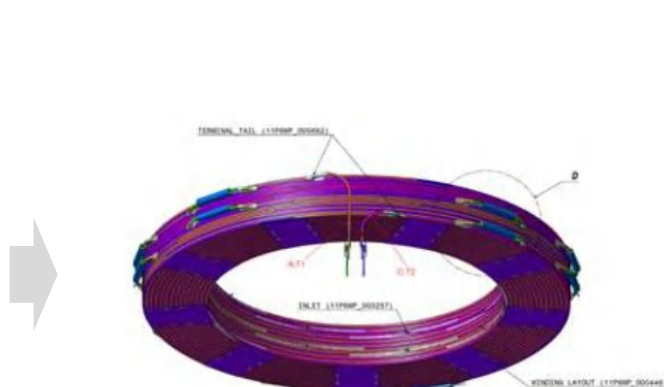
以**PF6线圈为例**，它由9个双饼线圈叠装而成，其中A-T1和C-T2分布在底面和顶面，另外7个双饼（A为3个，C为4个）在A-T1和C-T2之间。PF6线圈位于ITER实验堆超导磁体的底部，由多个绕制成双饼结构的线圈本体（铌钛超导体）以及一系列支撑附件组成，总重高达400吨，线圈绕制所采用的NbTi超导体长约13.5公里，绕制完成的线圈主体外径约11.2米。

PF导体总长约65公里，相当于绕北京四环一周。根据2008年10月10日签署的采购安排协议，中国将为ITER生产制造2-5号线圈所用的全部60根导体，占全部PF导体的65%。

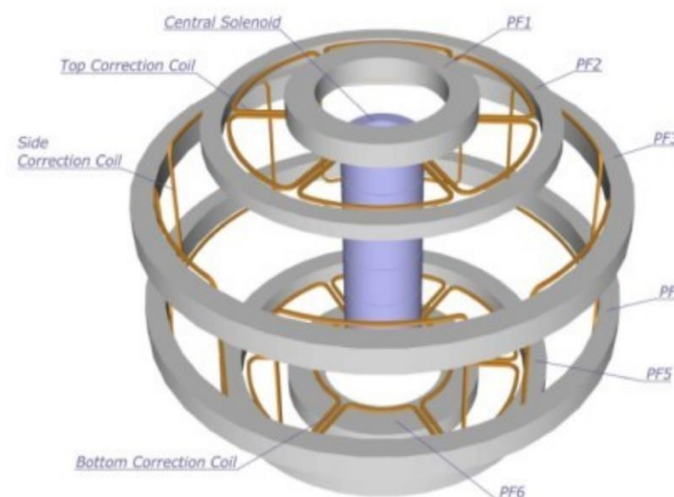
极向场导体截面



PF6线圈双饼分布



极向场线圈双饼数



线圈	双饼数
PF1	8
PF2	6
PF3	8
PF4	8
PF5	8
PF6	9

2.3.2 磁体系统：18个环向场线圈总共需要126根单元导体，我国承制11根，占7.51%

环向场（Toroidal Field，简称TF）线圈：每个TF线圈由5个主双饼（rDP）和2个侧双饼（sDP）组成，而每个双饼均由单根Nb₃Sn基股线的管内电缆导体（CICC）绕成。一个rDP单元长度最少需要760m无损电缆，一个sDP单元长度最少需要415m无损电缆。总的来说，制造18个TF线圈总共需要90个rDP导体单元长度和36个sDP导体单元长度。

TF导体内流动着4.2K（-269℃）的液氮，额定电流68kA，最大磁场强度达12T，约为地球磁场的20万倍（低温超导下）

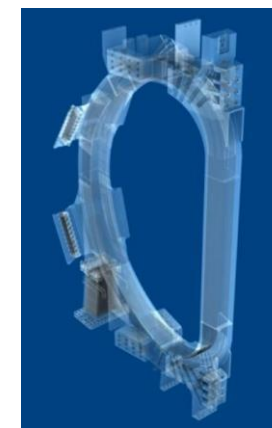
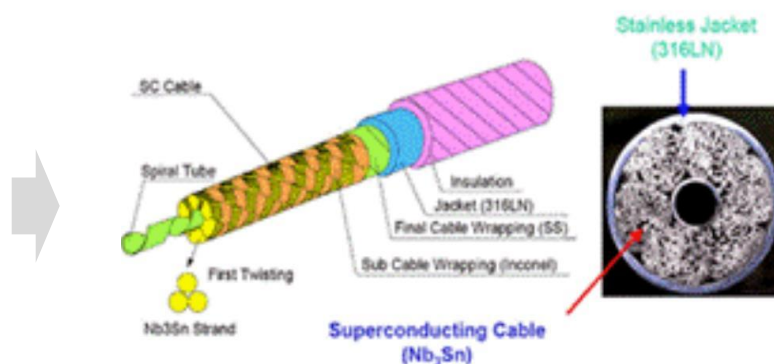
环向场线圈由18个TF线圈构成，每个TF线圈由7根完整连续的基于Nb₃Sn超导线的铠装导体（CICC）绕制而成。总的来说，制造18个TF线圈总共需要126根单元导体。ITER装置运行时，TF导体内流动着4.2K（-269℃）的超流态液氮，每根导体额定电流68kA，承受的磁场强度最高达12T，约为地球磁场的20万倍。

2008年6月16日，中国与ITER组织签署《环向场导体采购安排协议》，根据协议规定，我国承担11根TF导体制造任务（6根主导体和5根侧导体），约占全部TF导体制造任务的7.51%。

Nb₃Sn超导线

电缆结构图及电缆实物

环向场线圈



每个双饼均由单根Nb₃Sn基股线的管内电缆导体（CICC）绕成。一个rDP单元长度最少需要760m无损电缆，一个sDP单元长度最少需要415m无损电缆。

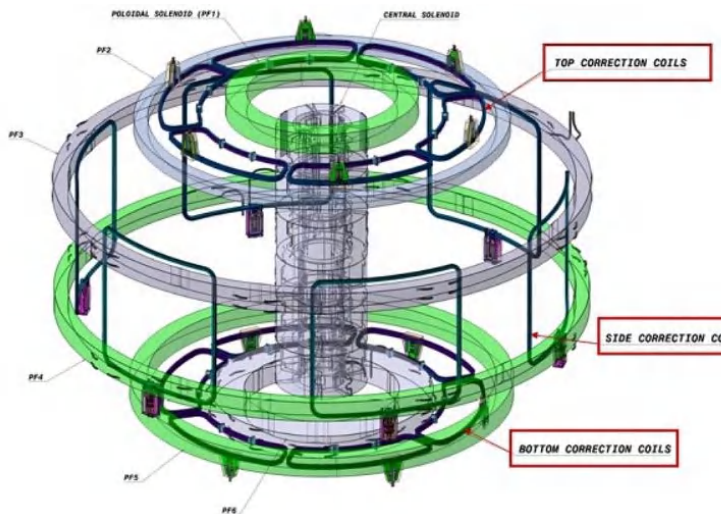
2.3.2 磁体系统：我国承担ITER装置所有18个校正场线圈的制造

校正场超导磁体系统 (Correction coil, 简称CC)：主要用来补偿环向场和极向场系统由于制造与安装过程带来的不可消除的磁场误差。ITER装置共有18个校正场线圈，其中6个底部线圈 (BCC)、6个顶部线圈 (TCC) 和6个侧线圈 (SCC)。ITER校正场线圈是由NbTi超导体绕制而成，匝工作电流10kA，最高磁场约5T。中方承担ITER装置所有18个校正场线圈的制造。

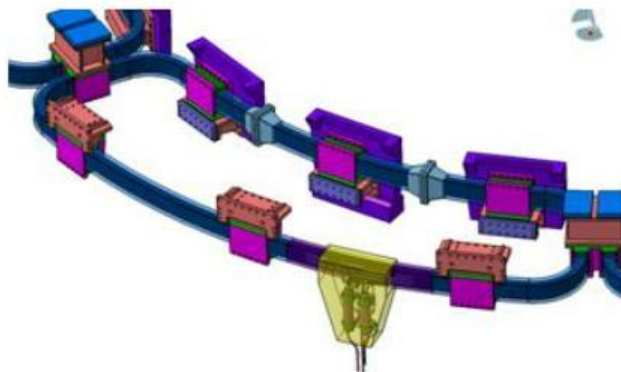
校正场线圈由Nb-Ti股线和铜线绞制成的CICC型（铠装电缆导体）低温超导体绕制而成，每个TCC/BCC成60度扇形，横跨3个TF线圈。TCC/BCC线圈匝数为32，绕组外形尺寸约25m*7m，绕组重约1.15吨，整个线圈（包括线圈盒）重约3吨。 SCC布置在环向占位36.195°；横跨2个纵场线圈，线圈匝数为20，绕组外形尺寸约8m*8m，绕组重约1.22吨，整个线圈（包括线圈盒）重约3.65吨。

自2010年中方与ITER国际组织签署采购安排协议以来，经国内多年联合攻关，先后完成了线圈绕制、氦冷却管焊接、真空压力浸渍、线圈盒封焊等多项关键技术认证。系列生产制造已于2017年正式开展。

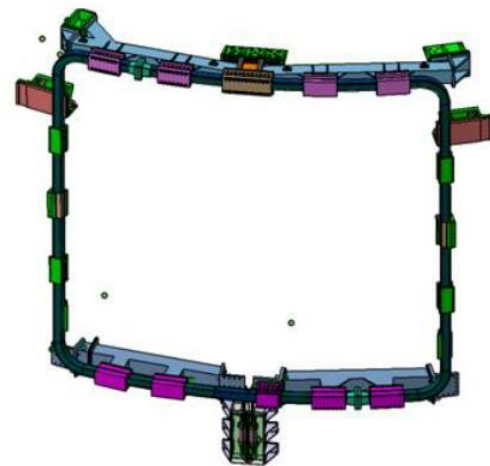
校正场线圈布置图



TCC/BCC线圈CATIA三维模型



SCC线圈CATIA三维模型

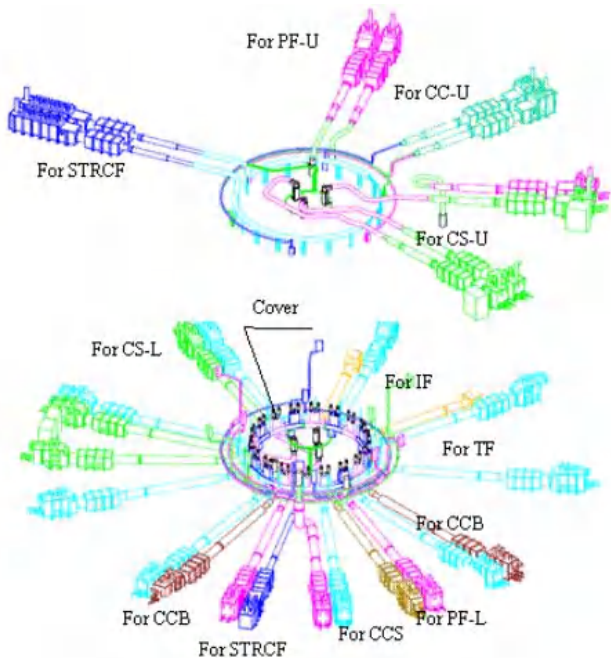


2.3.2 磁体系统：我国承担所有31套磁体馈线的制造

ITER 磁体馈线（简称“Feeder”）是连接杜瓦内的ITER超导磁体与杜瓦外的低温制冷、电源、控制系统的接口部件，自低温（4K）向室温过渡。其主要功能是向超导磁体提供电力、冷却供应及信号测量。

ITER装置共有31套Feeder，分别位于ITER装置主机的上部、底部，总重量约1500吨，单套长度为30-50米。我国承担ITER装置所有31套Feeder制造。自2011年中方与ITER国际组织签署Feeder采购安排协议以来，中方先后完成了高温超导电流引线、超导接头及真空预浸渍绝缘、线圈终端盒及内馈线等10多项关键技术及产品的认证。系列生产工作也已陆续启动。

磁体馈线系统布置图



磁体馈线系统布置图

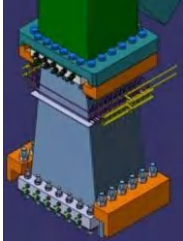
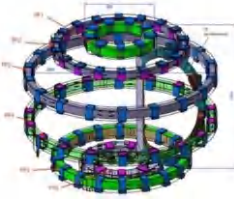
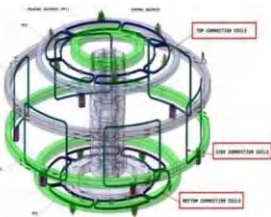
分类	功能	数量	内部结构
磁体线圈馈线 (Coil Feeder, CF)	为ITER磁体线圈分别传输电流、冷却液和数据信号	有9个TF馈线，6个PF馈线，6个CS馈线和5个CC馈线。	此类馈线内部有低温超导母线（LTS Busbar）、高温超导电流引线（HTSCLs）、低温冷却管线、热屏蔽、真空隔断、轴向与径向绝缘分断、支撑和数据传输管线。
结构冷却馈线 (Structure Cooling Feeder, STRCF)	为环向场磁体线圈（TF）和中心螺管磁体线圈（CS）的预紧结构提供冷却剂和数据信号	共3套，其中输入馈线1套，在磁体下部；输出馈线2套，在磁体上部。	冷却馈线内部有低温冷却管线、热屏蔽、真空隔断、轴向与径向绝缘分断、支持、阀门和数据传输管线。
数据馈线 (Instrumentation Feeder, IF)	只传输数据信号，用以测量、诊断和控制装置的运行	由2个诊断IF馈线组成，均安装在磁体终端的下部	馈线内部只有数据传输管线

2.3.2 磁体系统：支撑系统

磁体支撑采购包的物项包括为18个纵场线圈提供支持的重力支撑（Gravity Support, GS）、为6个极向场线圈提供支持的极向场线圈支撑（PFCS）和为3组校正场线圈提供支持的校正场线圈支撑（CCS）。

其周边连接关系为：放置在18个重力支撑（Gravity Support, 简称GS）上的TFC通过6组极向场线圈支撑（PFCS）支持6个PFC；同时通过3组校正场线圈支撑（CCS）支持CC。TFC通过其自身的结构和支撑对CS提供支持。

磁体支撑系统的组成

分类	图片	功能	参数	材料
重力支撑系统（GS）		满足为纵场线圈提供支持 和限位的功能	上负净重（DW）2万吨，承受温度变化300K—4K、磁体收缩距离31 mm。另外还承受多种电磁负载，包括磁体本身通电后的电磁力、等离子体燃烧过程中所产生的力。	构件和螺栓制作材料为316LN不锈钢，热锚制作材料为316L不锈钢，销子和紧固螺栓的制作材料为718合金。低压绝缘材料包括环氧玻璃纤维板、陶瓷涂层和聚酰亚胺粘合材料。
极向场线圈支撑系统（PFCS）		主要满足为极向场线圈提供支持和限位的功能	由PFCS1-PFCS6共6组支撑构成，全部工作在4 K低温环境。其中PFCS3/4的支撑重量为1412吨。	所有PFCS构件的制作材料除高强度栓接件外均是316LN不锈钢，高强度栓接件的材料为718合金。
校正场线圈支撑系统（CCS）		主要满足为校正场线圈提供支持和限位的功能。将三种类型的CC（顶部、底部、侧面）固定在18个TFC上，为上、下及侧面3组共18个CC线圈提供支撑	整个TCC和BCC支撑子系统需要承担CC线圈施加的25-40kN重力，抵抗纵场线圈由于磁场变化向支撑系统施加的1600kN作用力，同时需要适应纵场线圈在通电过程中的差动位移带来的形变。	

2.3.3 真空室：等离子体直接运行的场所

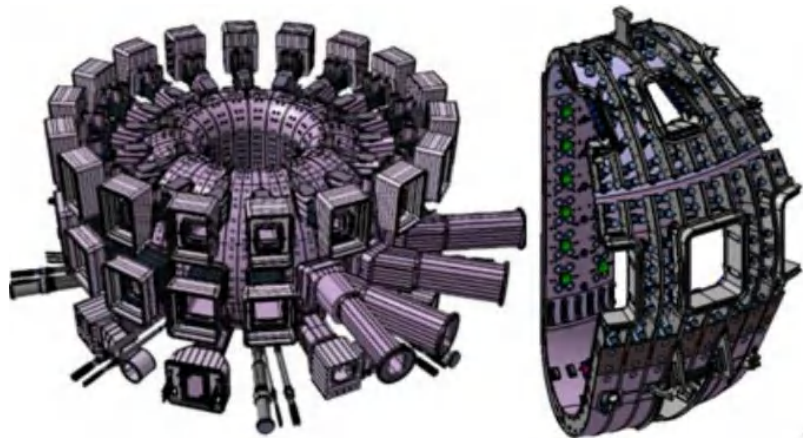
在聚变时，燃烧等离子体是要被约束在真空室内的。也就是说，**真空室是等离子体直接运行的场所**，它不仅要为真空室内构件提供必要的支撑，在正常运行及非正常运行期间，还要承受自身和内部构件的重力、压力以及各种电磁力。

真空室由**欧韩俄联合制造**，设有44个外部接口，可供控制系统对舱内情况进行监控，内部为**不锈钢壁面**，且贴有一层用于将仓内聚变反应辐射隔离的防辐射“布”。其中4个部件来自韩国、5个部件来自欧洲，突出的端口则来自俄罗斯。

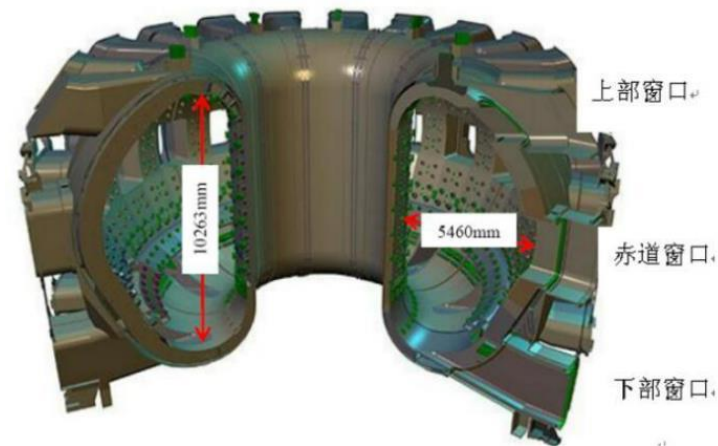
内部结构：ITER真空室为**双层不锈钢结构**，基本形状为中空环形，其大环外径为19.4m，大环高度为11.3m，内部空间高度为10.263m，宽度为5.460m。真空室由**9个尺寸一样的扇形单元组成**，每个扇形的跨度为40°。其界面呈“D”形。内外壳体厚度均为60mm，双层壳体之间的间隙为300~800mm。

真空室内部有基本的室内部件和可置换的部件，包括孔栏、加热天线、包层模块、试验包层模块、偏滤器模块以及诊断模块等。这些部件需要通过容器上的窗口进入容器内部再进行安装。真空室上开有三层窗口，分别为**上部窗口、赤道窗口、下部窗口**。为了使国内的工程设计人员掌握相关的设计与分析技术，为国内的托卡马克装置设计建造积累经验，国内也启动了相关的配套项目，而首先开展的就是真空室的结构分析工作。

ITER真空室结构与40°扇形区



真空室内部结构示意图

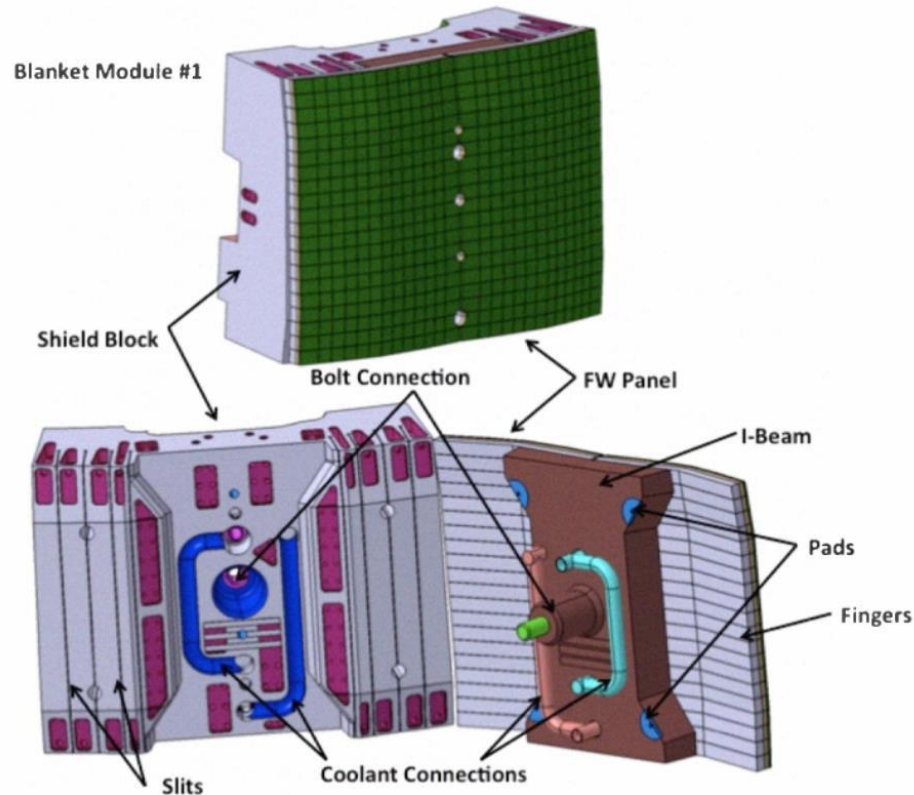


2.3.4 包层系统：由第一壁、屏蔽块、柔性支撑等组成

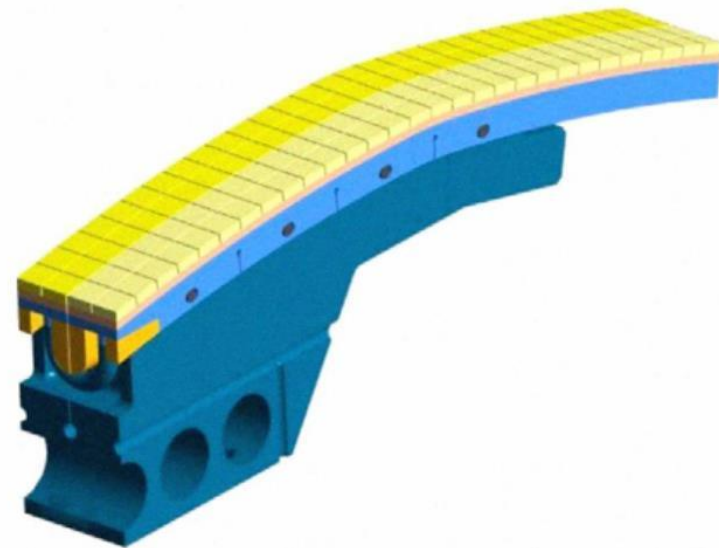
包层系统为整个ITER装置提供中子和高热负荷的屏蔽，是ITER的关键系统，包括覆盖于ITER真空室内壁的2个不同的子系统，分别是：覆盖面积为620m²的**壁挂包层模块**、覆盖40m²的**端口挂载包层模块**，以下描述中包层系统特指壁挂包层系统。

根据中国国际核聚变能源计划执行中心，整个包层系统采用模块化设计，共计440块，总重量约1500吨。每个模块由**第一壁** (First Wall, 简称FW)、**屏蔽块** (Shield Module)、**柔性支撑**等组成。

包层第一壁及屏蔽块



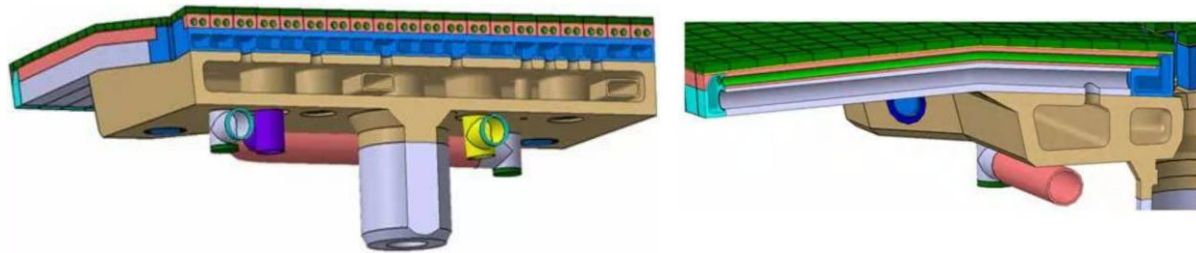
第一壁的“手指”



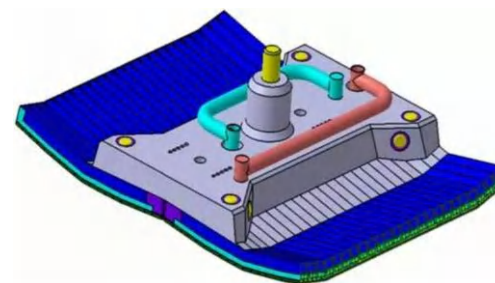
2.3.4 包层系统：第一壁由金属铍、CuZrCr合金、316L（N）不锈钢组成

- 1) **第一壁结构**：第一壁提供了包层系统与等离子体的界面，并屏蔽等离子体运行时产生的高热负荷。由面向等离子体材料（目前所选材料是铍）、中间热沉材料（CuZrCr合金）以及支撑背板材料（316L（N）不锈钢）三部分组成，主要连接工艺为热等静压（HIP）。
- 由于**铍**具有特殊的物理特性，包层的第一壁整个表面由其覆盖。其余部分则主要由高强度的**铜合金和不锈钢**构成。由于包层将直面高温等离子体，因此需要采用先进的技术来将几种金属材料完美连接起来，从而使包层整体具有很好的物理和力学性能。
 - 根据核能研究展望数据，整个真空室的第一壁由440块面板组成。每个面板在周向长约1.5m，在极向长约1m，其内表面覆盖有一层8-10mm厚的金属铍，整个第一壁厚约16-42mm。
 - 在周向，面对等离子体的防护单元称为“手指”，通过悬挂方式与极向的结构梁连接。这些梁不仅作为整个面板的机械支撑，也能容纳用于与屏蔽单元、冷却水供水与分配系统、接地电极和远程操作模连接的附属结构。梁的两侧各有一套“手指”结构，各自构成一组由铍覆盖表面的飞翼。这两块飞翼由中间一道狭槽分开，并与“手指”结构连接。
 - “手指”结构的长度约为0.75m，由钢、铜合金以及铍构成。其中，不锈钢材料作为基础，提供必要的支撑，铜合金（CuCrZr）作为热井，铍则作为表面的防护层。冷却水从钢结构流入，对热井进行冷却后，再从钢结构流入到整个“手指”的端部。根据核能研究展望，ITER中“手指”结构被设计为可以应对热流密度为2-4.7MW/m²的运行工况（不同位置第一壁对应不同的热流密度）。ITER第一壁的设计寿命约为15000个循环。第一壁的制造工作中，欧盟、俄罗斯和**我国**分别承担50%、40%和**10%**的任务。

包层第一壁及其基本结构



第一壁壁面面板剖面



将要制造完成的半原型第一壁



2.3.4 包层系统：第一壁由金属铍、CuZrCr合金、316L（N）不锈钢组成

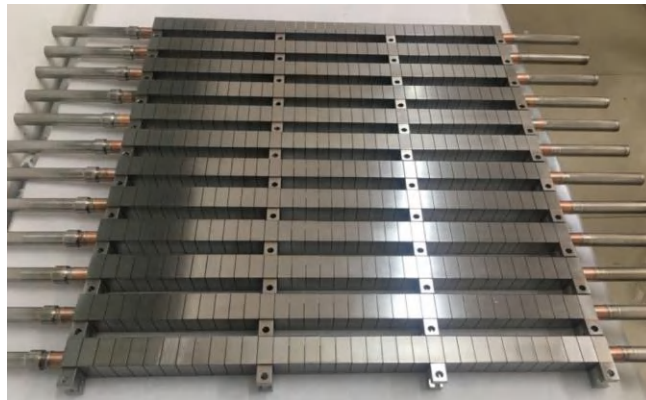
2) **偏滤器**：主要功能是有效地屏蔽来自器壁的杂质，减少对中心等离子体的污染，排出来自中心等离子体的粒子流和热流以及核聚变反应过程中所产生的氦灰，其主要作用可以概括为排出氦灰、杂质控制、排出热量。类似于烧煤的火炉，要不时的用火钳把煤渣从炉底夹到撮箕里。炉膛里燃烧的煤变成煤渣透过炉算子掉到炉底，太多的煤渣会堵塞炉子。

材料方面，由于聚变反应堆中的偏滤器是第一壁的部件，也是**高能逃逸离子沉淀能量的主要区域**，因此其表面热负荷比第一壁表面平均值高一个量级以上。此外，当等离子体破裂时，其能量将在毫米级的时间里倾注在第一壁的某些区域，也包括孔栏和偏滤器。因此，偏滤器必须采用高热流密度材料。**水冷W/Cu结构**是ITER和未来核聚变堆的偏滤器的首选技术，W/Cu偏滤器结合了W的高熔点、低溅射、低滞留，以及Cu的高热传导等优点，但是由于W和Cu热物理性能相差较大，两者的连接十分困难。2012年我国等离子体所部署启动EAST上偏滤器升级改造计划——将热排出能力2MW/m²的**石墨**偏滤器升级为热排出能力为10MW/m²的水冷**W/Cu**偏滤器。目前钨铜偏滤器部件已经实现大批量生产和应用，并实现制造技术出口法国WEST。

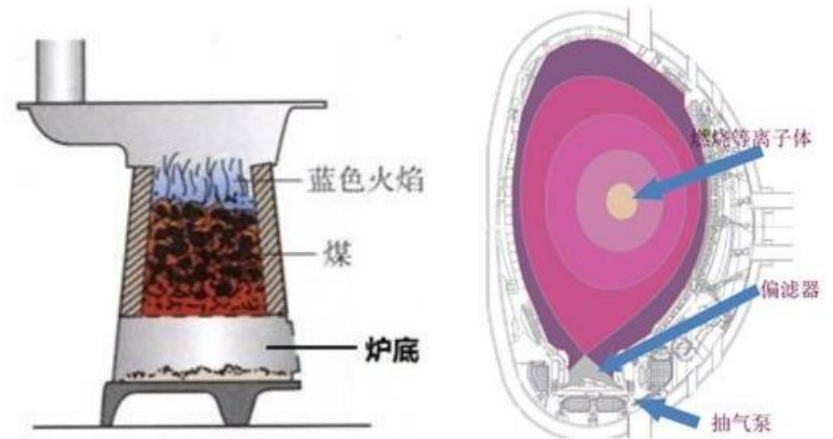
钨铜偏滤器批量服役



出口WEST的偏滤器部件产品



偏滤器的原理可以类比火炉，但要求极高

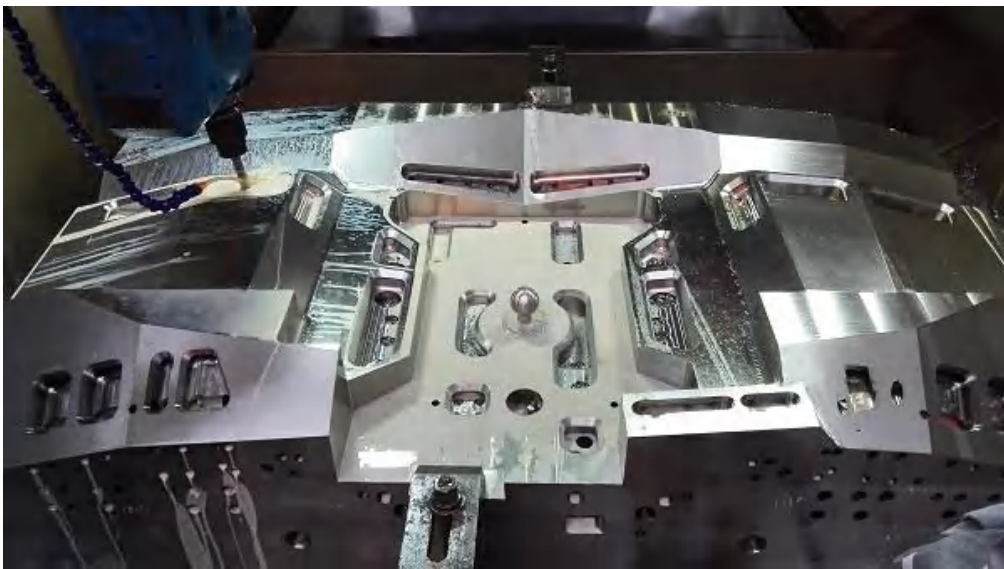


2.3.4 包层系统：屏蔽块

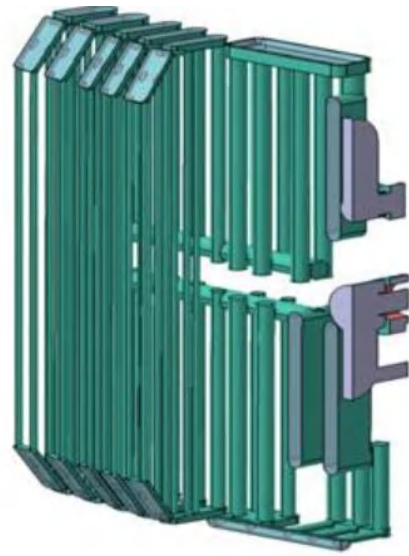
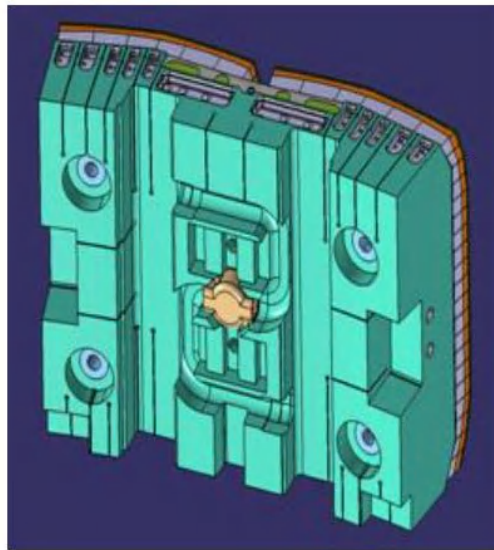
3) **屏蔽块**：主要由316LN不锈钢材料经锻造、焊接、钻孔（直径12-30mm）等工艺处理后成型所得，其关键技术是316LN不锈钢材料及深加工工艺。屏蔽块主要起屏蔽中子的作用。

2018年，我国率先完成制造ITER包层屏蔽模块全尺寸原型件，完成全球首台用于ITER包层部件的大型真空高温氦检漏设备的制造和调试，该ITER包层屏蔽模块全尺寸原型件在所承担的220件屏蔽模块中结构最复杂、制造难度最大。自2016年7月开始了该全尺寸原型件的制造，经过基准机加、钻深孔、粗机加、焊接、深窄缝加工、精机加等多道工序，于2017年12月在广州完成加工制造。加工量极大，由初始的9吨不锈钢锻件加工至成品的2.8吨；创新开发加工刀具，完成多个复杂异形界面特征的加工制造，为将来屏蔽模块系列生产积累了丰富的经验并打下坚实基础。

包层屏蔽块全尺寸原型件



SB的结构图以及水冷结构



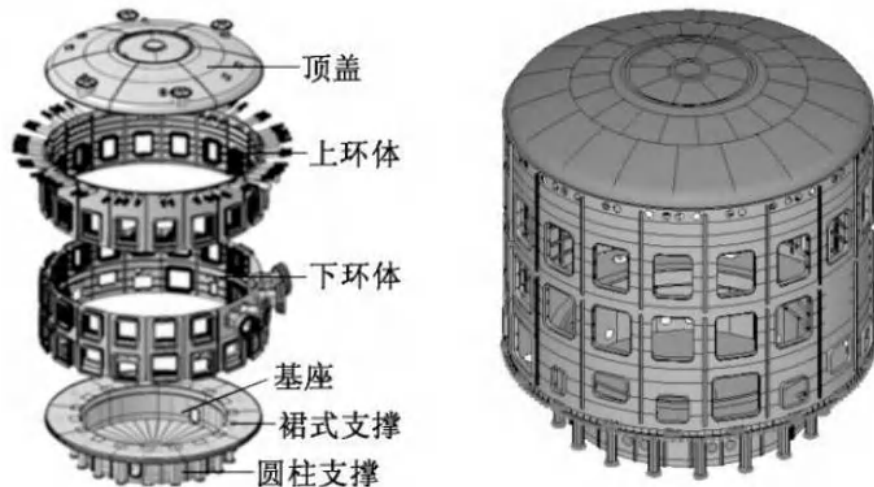
2.3.5 真空杜瓦：托卡马克真空室和超导磁体周围的“保温瓶”

真空杜瓦：ITER的真空杜瓦（低温恒温器）是托卡马克真空室和限制超热等离子体的超导磁体周围的“保温瓶”。真空杜瓦由不锈钢制成，重达3850吨，其基座部分（1250吨）是ITER最重的部件。整体来看，真空杜瓦高30米、直径30米，体积达16000m³，可以说是有史以来最大的不锈钢高真空压力室。真空杜瓦是ITER必不可少的重要组成部分，从上到下主要由顶盖、上环体、下环体、基座这4大部分组成，各部分通过焊接或螺栓连接成一个整体。

作用：杜瓦除了为系统运行提供稳定的真空环境之外，还要在氦气泄漏、等离子体破裂等极端情况下，必须保证整个装置的安全。

2020年5月28日，ITER的真空杜瓦基座平稳地落位到该装置基坑内的临时支撑上，杜瓦基座吊装工作圆满完成，正是由此开始，拉开了ITER主设备安装的序幕。值得一提的是，这是中核集团牵头的中法联合体在疫情严峻时期“逆行”法国，“核”力取得的重要阶段性成果，其起吊重量和安装精度都打破了中国核能行业大件设备吊装的记录。

杜瓦装配图（左）和杜瓦上环体约束模型（右）



真空杜瓦实物图

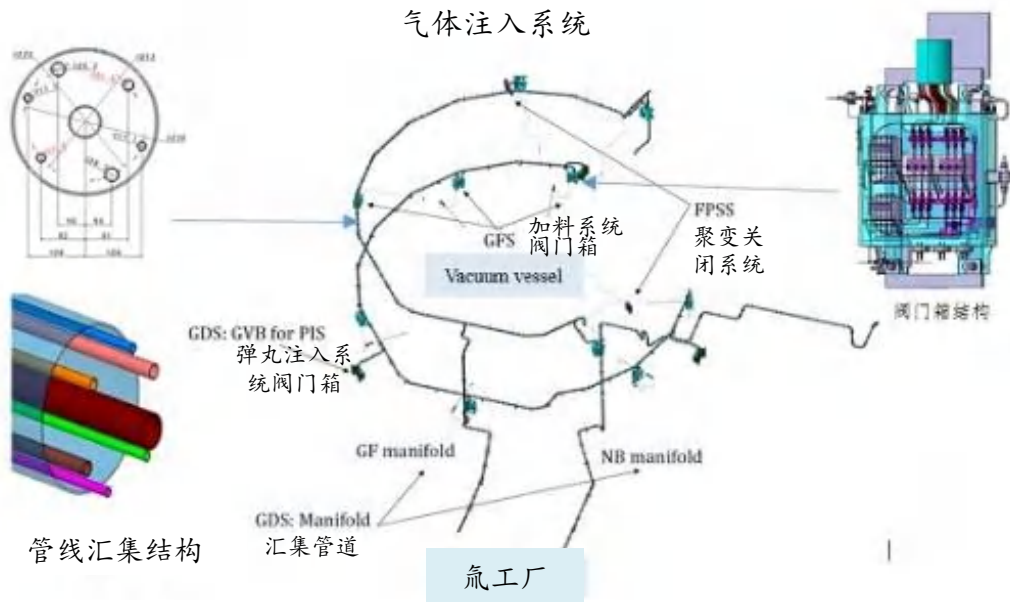


2.3.6 气体注入系统：

气体注入系统（Gas Injection System, GIS）采购包为功能性采购包，主要负责为ITER装置提供等离子体运行、维护、控制和壁处理所需气体；同时，为加热和诊断中性束提供氢气和氦气，为弹丸注入系统（PIS）提供弹丸推进所需要的气体，并为聚变装置提供聚变功率紧急关闭功能。

构成：主要包括气体分配系统（Gas Distribution System, GDS）、气体加料系统（Gas Fueling System, GFS）和聚变功率关闭系统（Fusion Power Shutdown System, FPSS）三部分构成。氦工厂中的燃料气体通过气体分配系统汇集管道输送至PIS, GIS和NB的阀门箱中，再由气体加料系统的注入管线从阀门箱注入真空室。

- 气体注入系统（GIS）中，我国提供 12个阀门箱（包括磁屏蔽），1套供气汇集管道、送气管道、检漏管道以及相关支撑，1套程序控制系统。阀门箱有3类，其中7个向真空室注入气体（不含2个备件），2个通过赤道面窗口供给弹丸注入用气体，1个用于供给加热中性束和诊断中性束用气体。目前提出了一项关于阀门箱数量的设计更改申请PCR 180，如果该设计更改被接受，阀门箱数量将做相应调整。
- 阀门箱：分布在装置生物屏蔽包层外，存在着较强的杂散磁场，并且系统还涉及到氢的同位素氦的传输、隔离和控制。因此需要设计大尺寸的磁屏蔽结构使得阀门箱内的测量和控制单元能够正常工作在0.3T的强磁场环境，满足GIS远距离、大流量、快响应送气要求，同时满足器件氦兼容条件、实现氦的安全传输和维护。
- 系统控制：将采用基于工业以太网的PLC控制系统，要求具有运行稳定、控制方式灵活、控制参数设置方便的特点，同时必须实现与装置安全运行有关的连锁保护。PLC控制系统在运行过程中还必须监视送气系统阀门的运行状态和监测工作气体流量大小、气体温度、压力等参数。



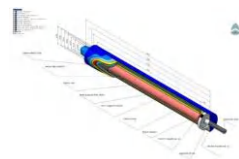
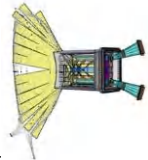
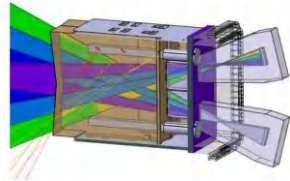
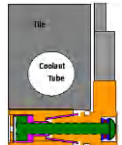
- 气体分配系统（GDS）：主要指用于分配气体的汇集管道（Manifold），该管道起于氦工厂，止于阀门箱（Gas Valve Box, GVB），以及两个弹丸注入系统（PIS）GVB；
- 气体加料系统（GFS）：主要包括10个GFS阀门箱以及阀门箱与真空室之间的注入管线；
- 聚变关闭系统（FPSS）：主要包含2个FPSS箱体。

2.3.7 诊断系统：我国承担NFM、PI、RXC、朗缪尔探针等4项诊断

诊断系统属于功能性包（Functional Specification, FS），采购方只提出概念设计和参数要求，详细设计由承担方负责，因此，除了具体物项外，承担方还要提供各项诊断的详细设计方案。我国承担了四项诊断：

- 中子通量监测器：7号中子通量监测器及其余中子通量监测器（1、8、17号），主要功能是测量等离子体的中子发射率，提供ITER聚变功率信息；
- 径向X射线相机：用于研究和观测50兆瓦下磁流体动力现象及X射线发射率，功能是测量整个极向横截面的X射线发射；探测磁流体不稳定现象等
- 朗缪尔探针：功能是测量偏滤器靶板附近等离子体的温度、密度、离子循环、悬浮电位，监测边缘局域模、等离子体打击点等；
- 赤道面12号窗口集成：用于观察和测量等离子体的参数。赤道面窗口插件在考虑多种应力（电磁力、热应力、辐射及重力和地震）、水冷、真空的同时，还要集成包括径向x射线相机在内的4项诊断（另几项诊断由其他方研制），并且要便于遥控安装操作。

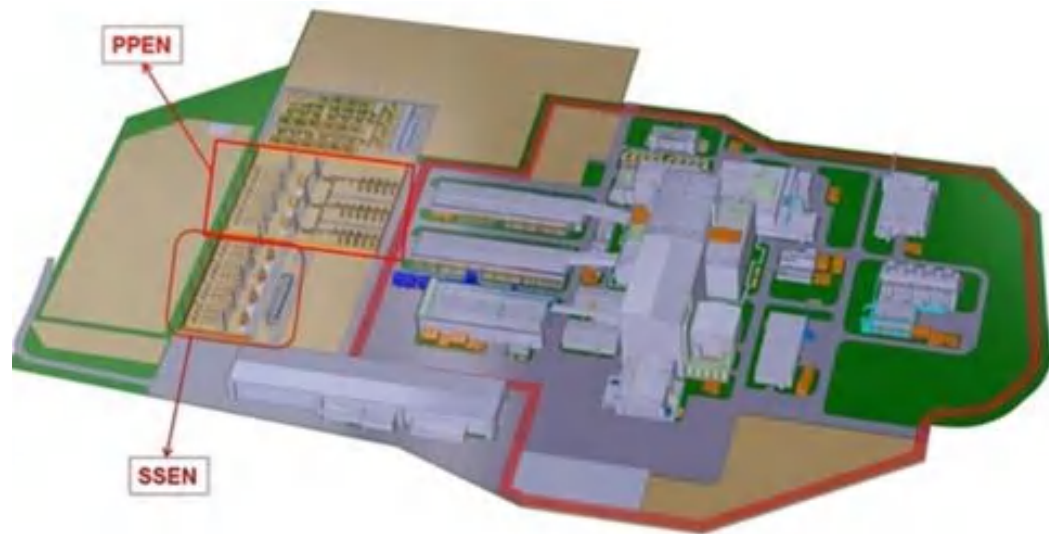
我国承担的4项诊断系统分系统

分系统	图片	功能	参数及构成
中子通量监测器（NFM）		测量等离子体的中子发射率，提供ITER聚变功率信息	总中子通量范围：~ 5 *10 ¹⁶ up to ~ 7.5*10 ²⁰ n/s； 时间间隔：1 ms； 热中子吸收剂：PDR阶段确认材料； 箱体：不锈钢材料；
赤道面12号窗口插件（PI）		用于观察和测量等离子体的参数	窗口集成包括3个部分的装配：Port Plug, Interspace, Port cell. 它负责从诊断第一壁到Port Cell通道的集成，这也是PI需要完成的窗口集成任务。
径向X射线相机（RXC）		用于研究和观测50MW下磁流体动力现象及X射线发射率，是第二个测量中子发射的动力平衡装置，其基本功能是测量整个极向横截面的X射线发射。	由2个独立的子系统组成：外部相机和内部相机。负责提供覆盖至最外闭合磁面（LCFS）的整个极向横截面的等离子体辐射。这种安排可以为外部相机提供最高水平的辐射屏蔽。外部相机用于观测等离子体的核心。
朗缪尔探针		作为偏滤器上重要的诊断部件，朗缪尔探针在最高热流密度的反应条件下工作，用于测量偏滤器靶板附近等离子体的温度、密度、离子循环。	

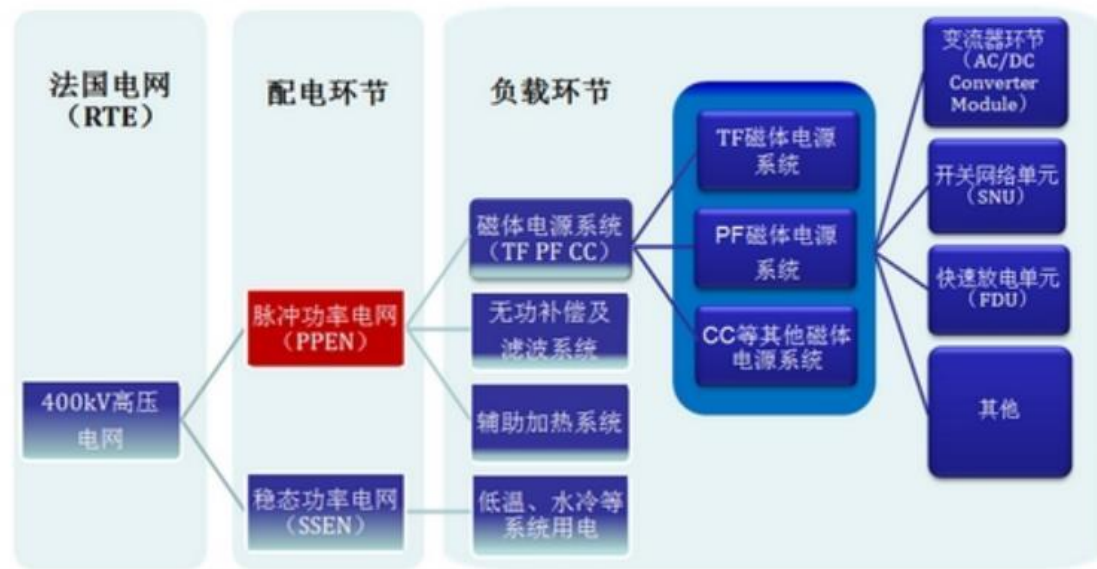
2.3.8 供电系统：分为PPEN、SSEN，我国承担PPEN所有设备及材料的制造、试验和供给

- 供电系统的构成：ITER的供电采用法国电网400kV双进线配电66kV和22kV方式高压变电站的方式，分为脉冲功率电网（PPEN）和稳态功率电网（SSEN）两部分。PPEN供给各类脉冲整流电源运行所需的脉冲功率，SSEN为稳态运行子系统及各类常规配电提供稳态功率。
- 分工：PPEN（及SSEN）的设计及未来安装由欧盟方（EUDA）承担；中国国际核聚变能源计划执行中心（CNDA）则承担PPEN所有设备及材料的制造、试验和供给，并负责证明各设备的制造参数、性能能够符合EUDA设计和ITER的要求，且需在未来欧盟安装、现场试验和调试中提供相应的技术支持和配合。美国普林斯顿等离子体物理实验室（PPPL）则承担SSEN所有设备及材料的制造、试验和供给，并负责证明各设备的制造参数、性能能够符合EUDA设计和ITER的要求，且需在未来欧盟安装、现场试验和调试中提供相应的技术支持和配合。
- 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所受CNDA授权对PPEN项目的所有技术活动负责，协助CNDA协调和管理各设备供应商的技术活动，并协助CNDA处理与IO及EUDA等国际组织的项目协调。

ITER布局图



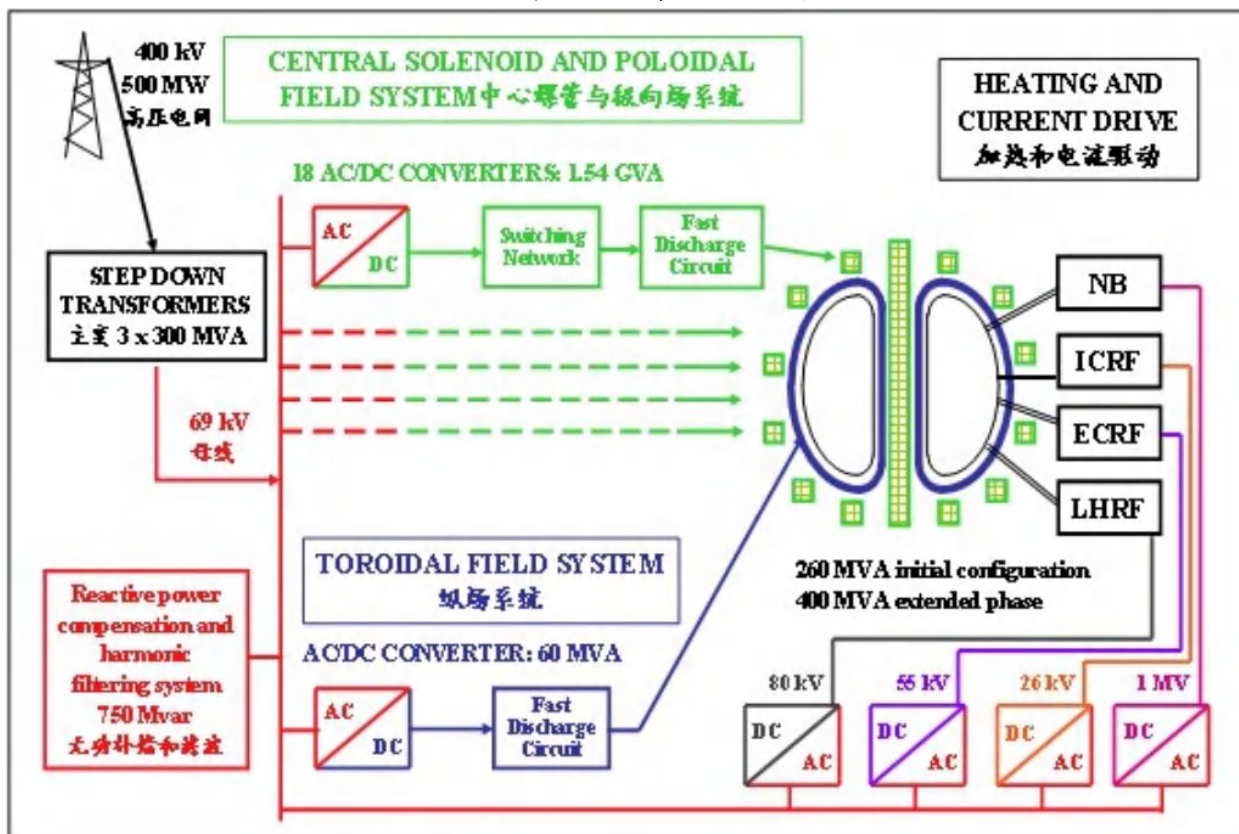
ITER供电系统拓扑图



2.3.8 供电系统：我国提供400kV 高压变电站中的所有设备

电源系统构成：脉冲式电源主要包括环向场线圈供电电源、极向场线圈供电电源等。它们主要的任务是在环向场和极向场线圈中激励起可控的巨大电流，产生约束等离子体需要的螺旋磁场。此外，托卡马克装置的其他电源系统还包括快控电源、成型场线圈电源、偏滤器线圈电源以及中性束注入、离子回旋共振加热、低杂波电流驱动中的高压电源，电源结构形式多样。以环向和极向场线圈电源为例，与一般工业供电相比，托卡马克装置电源有4个特点：脉冲电源工作方式、大功率供电、储能设备容量巨大、对电网冲击巨大。

脉冲电源系统构图



托卡马克装置电源的特点：

1) 脉冲电源：由于托卡马克装置是脉冲工作方式，所以电源也是脉冲工作方式。这是由于等离子体电流是靠消耗欧姆线圈提供的有限摆动的伏秒数而产生、建立和维持的。其放电时间从几百毫秒、几秒到数分钟不等；ITER装置的托卡马克设备及其所有基础设施的运行，全部依靠400kV供电网络提供给脉冲电源系统和稳态电源系统能量来实现。2012年6月20日，中方与ITER组织签署脉冲高压变电站采购安排协议，**中国将提供400kV高压变电站中的所有设备**。ITER 高压交流系统由双回路400kV电网组成，系统最大短路容量为12000兆伏安，最小短路容量为6000MVA。

2) 大功率供电：对中小型托卡马克装置脉冲供电总功率，在我国相当于一个小型发电站的输出功率，对于大型托卡马克装置，相当于一个大型发电站的输出功率。

3) 储能设备容量巨大：在一些托卡马克装置中，电源不可能连续满足负载供电要求，负载不可能连续或过高地从电网吸收功率，这就需要储能设备来提供。大的超导线圈为电力系统稳定和补偿负载波动开辟用了一条新路。如果采取适当的能量输送线路可以得到很高的效率（90%）。例如ITER中18个环向场线圈储能达到40GJ。线圈储能带来的副产品是线圈超导失超的时候，巨大的能量需要泄放。

4) 对电网冲击大：对大中型非超导装置都使用交流飞轮发电机组提供交流电源，而为了提高托卡马克装置的磁场幅值，超导线圈大量使用，对于超导装置，都直接使电网供电，使用**闸管变流器**将电网大的交流功率转换为直流输送给负载。它产生谐波对电网供电质量有一定的影响，甚至直接拉低电网电压，使上级开关跳闸。通常的补救方法是建设大容量的无功补偿设备。等离子体所ITER建立的80Mvar无功补偿设备。2011年4月27日中方与ITER组织签署的ITER无功补偿及滤波系统采购安排协议。中方承担3套相同的额定容量250Mvar、额定电压66kV、额定频率50Hz的无功补偿及滤波系统的设计、制造、测试以及现场验收测试任务。

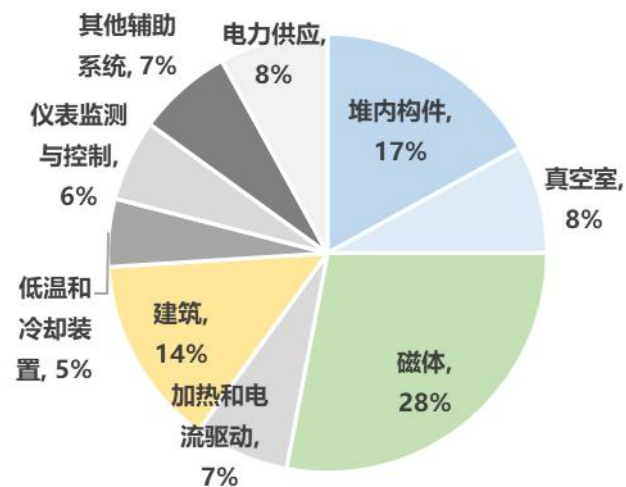
3. 相关标的

3.1.1 聚变价值量拆分

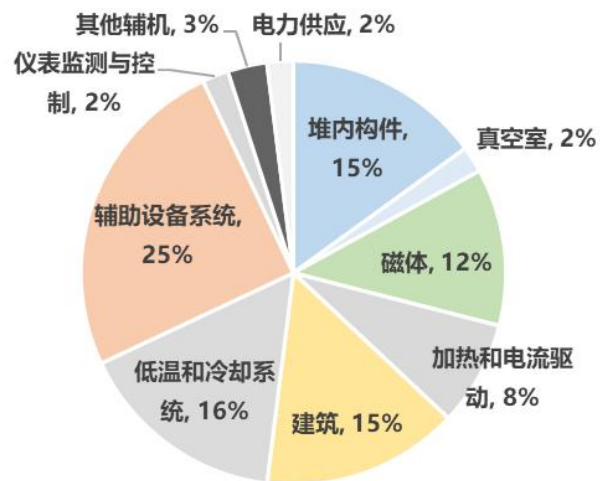
在试验堆ITER中，磁体占比28%、堆内构件、真空室等主要结构件占比25%，其他辅机占比33%，建筑占比14%。

在DEMO堆中，由于加入了燃料以及更多辅助设备系统，磁体在总成本占比约12%，堆内构件、真空室占比17%，加热和电流驱动、低温和冷却系统、仪表监测与控制、电力供应、其他辅机合计占比31%，辅助设备系统占比25%。

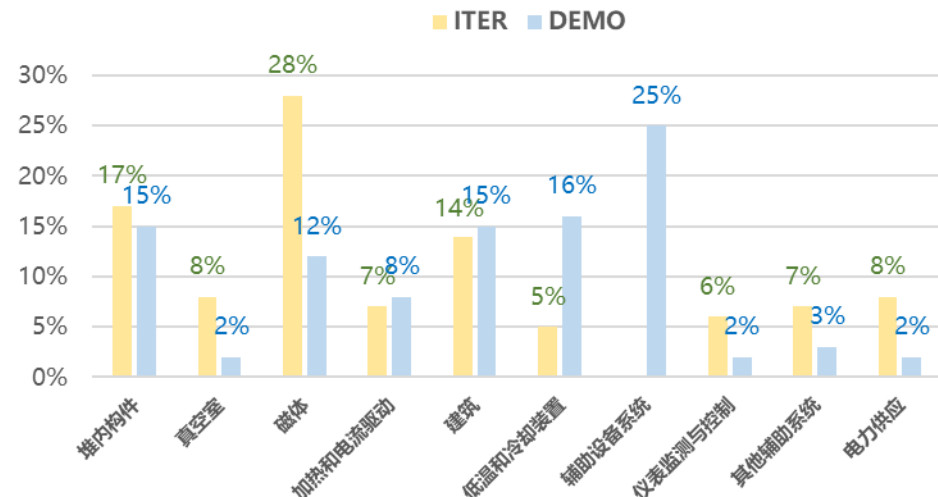
ITER成本构成



DEMO成本构成



ITER和DEMO中成本构成对比



3.1.2 聚变相关标的：国光电气

公司业务：公司是我国“一五”时期前苏联援建的国家156项重点建设项目之一，自成立以来，公司一直从事微波器件的研制生产，至今拥有超过60年的研制生产经验。2023年，公司主营业务收入7.45亿中，核工业3.73亿元，占比约为49.97%，电真空器件营收2.93亿元，占比38.3%，民用领域其他产品占比9.23%。2024年公司实现营业收入5.43亿元，归母净利润0.48亿元。

公司的核工业设备及部件产品主要包括ITER配套设备、核工业领域专用泵以及阀门等。

在ITER项目中，公司供应偏滤器、屏蔽模块热氦检漏设备、包层第一壁（FW）、工艺设备（例如多功能快速钎焊炉产品）等。公司长期致力于托克马克装置相关系统与部件研制。2024年公司成功中标了包括聚变新能（安徽）有限公司氦兼容增压系统在内等项目。

此外，先觉聚能科技（四川）有限公司为国光电气与天府创新能源研究院等股东共同出资成立的合资公司，上市公司在其股权占比为7.5%，上市公司共有两位董事在其董事会任职，其中张亚先生任职董事长。



公司偏滤器产品

公司研制的偏滤器已应用于HL-3等托卡马克装置，HL-3整个先进偏滤器系统共有60个偏滤器模块，由38套标准偏滤器模块、22套非标准偏滤器模块构成。生产工艺主要包括CFC/Cu热沉靶板的加工、支撑架结构生产、偏滤器模块的装配与检测三部分。



公司ITER 屏蔽模块热氦检漏设备产品

模拟ITER运行状态下的密封性检测，主要的功能是对包层屏蔽模块氦气循环的检测，对检测设备的要求非常高。公司完成制造调试的真空高温氦检漏设备是全球首台满足ITER要求的包层部件的大型真空高温氦检漏设备，同时具有“真空烘烤”、“去应力热处理”和“热氦气检漏”三大功能。



ITER包层第一壁板（FW）

是ITER屏蔽包层的重要组成部分，是ITER的核心部件。ITER第一壁板由三种材料构成，分别为面对等离子体铍更换为钨材料、中间热沉CuCrZr合金材料、支撑背板316L（N）不锈钢材料。为实现良好的热传导以消耗热负荷，三种材料之间需冶金结合，连接技术成为ITER第一壁板制造的核心技术。目前，公司参与新的钨第一壁研制并进入样件生产阶段。



ITER工艺设备（多功能快速钎焊炉产品）

公司研制出了各种制造及验证装置，包括球床材料测量系统、带高温环境箱的电子万能试验机、多功能快速钎焊炉等工艺设备，用于ITER相关的试验、测量及生产工艺之中。

3.1.2 聚变相关标的：西部超导

公司业务：公司主要从事超导产品、高端钛合金材料和高性能高温合金材料及应用的研发、生产和销售。2023年公司营收41.6亿元中，约34.9亿元来自钛合金及超导，占营收比重83.5%，（其中**超导线材9.8亿元**），4.7亿来自高性能高温合金材料，约占营收比重11.4%。

2024年公司实现营收46.4亿元，同比+11.6%，归母净利润8.1亿元，同比+7.6%。

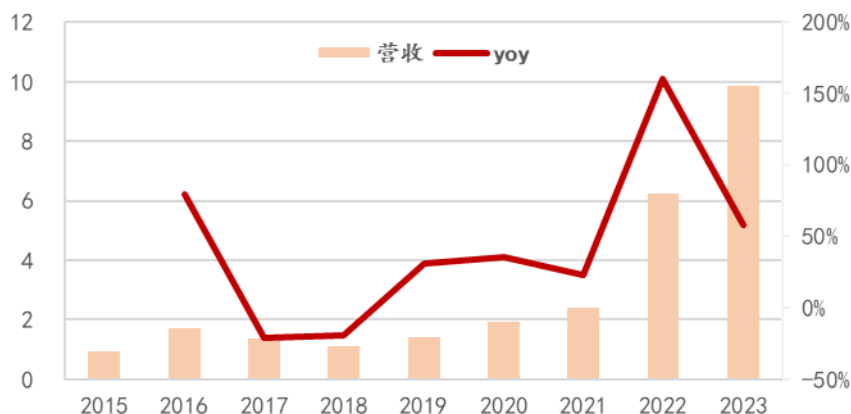
在聚变领域，公司，成为世界上能够批量生产超导用NbTi合金的两家公司之一。

NbTi超导线材工程化生产技术：公司开发出核聚变用NbTi超导线材工程化生产技术，发明了单重达450公斤的大型复合包套一次组装技术、高临界电流密度线材塑形加工和时效热处理技术，生产出最大长度达到9万米的多芯**NbTi超导线材**，各项性能指标全部满足ITER项目技术要求。

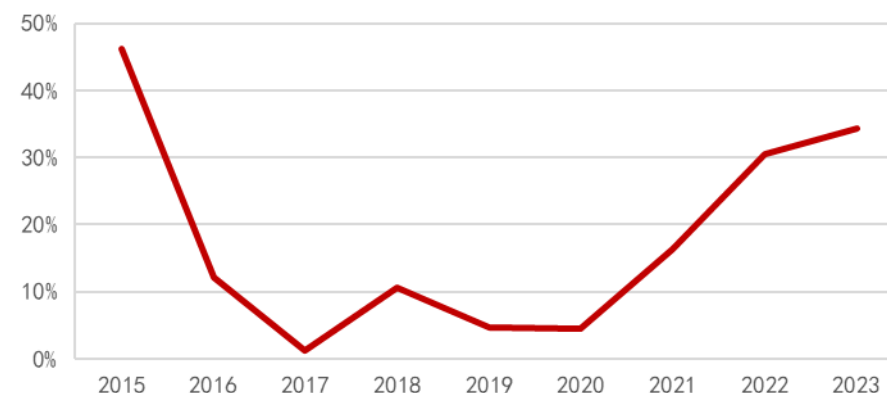
Nb3Sn 超导线材工程化生产技术：1) 公司解决了高性能内锡法**Nb3Sn超导线材**的导体设计、Cu/Nb/Sn/Ta多组元金属复合体塑性变形和大坯料制备等工程化生产技术难题，最大长度达到 10,000 米，各项性能指标全部满足ITER 项目和10T以上高场磁体技术要求。

2) 公司解决了青铜法Nb3 Sn超导线材加工硬化难题，实现了ITER用青铜法Nb3Sn超导线材长线连续加工，各项性能指标满足核聚变和高场核磁共振谱仪技术要求，（12T，2736A/mm²@4.2K）成功应用于中国首台600MHZNMR制造。

公司超导线材营收及增速（亿元，%）



公司超导线材毛利率



3.1.2 聚变相关标的：永鼎股份、精达股份

永鼎股份：公司是研制、生产和销售通信光缆、光器件、通信电缆、电力电缆、电力柜等系列产品，提供配套工程服务的专业公司。2023年公司实现营收43.5亿元，归母净利润0.43亿元，其中电力工程、汽车线束、光通信、铜导体分别为14.9、14.3、8.8、4.5亿元。24年前三季度实现总营收29.7亿元，归母净利润0.57亿元。

公司全资子公司**东部超导**是国内高温超导带材领域的头部企业，公司在第二代高温超导带材上采用了国内独有的**IBAD+MOCVD的技术路线**，研发出多种稀土替代和掺杂技术，所制备的超导材料**磁通钉扎性能**优异，在长度以及低温磁场下性能方面达到了国内外领先水平。目前产品主要应用在超导感应加热、超导磁拉单晶、可控核聚变磁体、超导电力装备等领域，保持与**江西联创光电、能量奇点、核工业西南物理研究院、国家电网**等客户的密切合作关系。

25年3月24日晚，东部超导公告，拟增资扩股并引入外部投资者，增资完成后永鼎股份直接持有东部超导股权比例从64%调整为60.95%。

东部超导产业园



二代高温超导带材



精达股份：铜陵精达特种电磁线股份有限公司位于长江南岸中国重要的铜生产基地——安徽省铜陵市，是全球领先的电磁线制造商之一。2024年公司实现营收223.2亿元，同比+24.7%，归母净利润5.6亿元，同比+31.7%，其中漆包线161.2亿元，汽车、电子线32.1亿元，特种导体10.8亿元，裸铜线7亿元，铜杆4.7亿元。公司持股**上海超导18.3%股份**。2025年3月25日，浦东新区与上海超导签约二代高温超导带材生产及总部基地项目，总投资25亿元。总计形成不低于15000公里年产能，占据全球细分领域绝对领先地位。公司董事长马韬表示，目前，全球单个公司年最高产能为2000公里，公司扩产的步伐很大，力争在18个月以内新建项目的第一根带材出货，并加速**在3年内达到1.5万公里年产能，实现50亿元的产值。**

高场应用超导带材参数

高场应用 	超导带宽度	等级	lc(4.2K,10T)
	3mm	常规	260 - 340 A
		高性能	340 - 490 A
		超高性能	490 - 600 A
	4mm	常规	350 - 450 A
		高性能	450 - 650 A
		超高性能	650 - 800 A
	12mm	常规	1050 - 1350 A
		高性能	1350 - 1950 A
		超高性能	1950 - 2400 A

3.1.2 聚变相关标的：联创光电

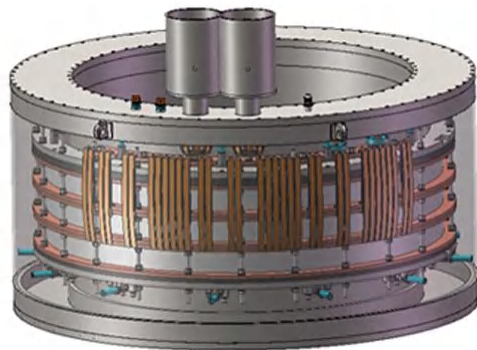
公司业务：公司主营业务为激光系列及传统LED芯片产品、智能控制系列产品、背光源及应用产品、光电通信与智能装备线缆及金属材料产品的研发、生产和销售。公司23年实现营收32.4亿元，其中，智能控制产品19.8亿元，背光源及应用产品8.7亿元，光电通信缆等1.6亿元，半导体激光系列及航天微电子元器件1.8亿元。公司2024年前三季度实现营收24.3亿元，归母净利润3.4亿元。

在超导材料领域，公司持股江西联创超导应用有限公司40%股权，2024H1该公司实现营收2346万元。目前，联创超导主要业务范围涵盖**高温超导感应加热、高温超导磁控单晶硅生长设备、可控核聚变**三大领域。

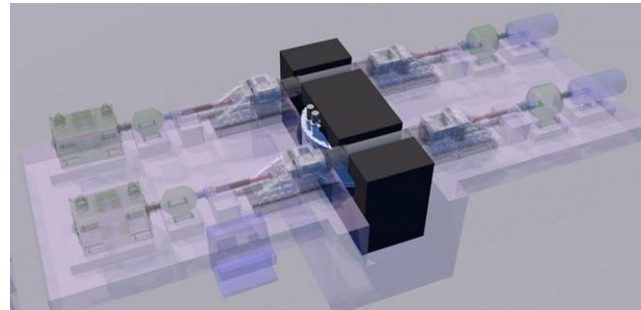
1) 高温超导感应加热领域：随着2023年联创超导研制的世界首台兆瓦级高温超导感应加热设备投产，高温超导感应加热商用设备进入规模化放量阶段，全国有色金属热加工设备替换空间预计将达千亿级规模。**2) 高温超导磁控单晶硅生长设备领域：**伴随着光伏N型电池时代的来临，先进硅片产能开始释放大量需求，新型单晶炉进入放量阶段。**3) 可控核聚变领域：**提供面向未来终极能源—超导可控核聚变装置应用的高温超导磁体系统和关键部件。

2023年11月12日，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。双方计划各自发挥技术优势，采用全新技术路线，**联合建设可控核聚变项目，技术目标Q值大于30**，实现连续发电功率100MW，该项目拟落户江西省，工程总投资预计超过**200亿元人民币**。

高温超导磁体感应加热



制冷机冷却磁体



3.1.2 聚变相关标的：合锻智能

公司业务：公司主要从事各类专用、通用液压机和机械压力机的研发、生产和销售，是国内液压机行业的领先企业公司。2023年实现营收17.7亿元，其中色选机9.1亿元，定制液压机6.2亿元，机压机1.7亿元。2024年前三季度实现营收14.7亿元，归母净利润0.08亿元。

公司核聚变业务主要致力于解决聚变堆复杂部件的研发制造，已经参与了聚变堆、**真空室、偏滤器**等核心部件的制造预研工作。2024年，公司中标聚变新能（安徽）有限公司BEST项目核心关键部件——**真空室扇区、窗口延长段、重力支撑**等制造任务。

此外，公司参与发起成立了**聚变产业联盟**并担任副理事长单位，安徽夸父尖端能源装备制造有限公司为理事单位。公司董事长严建文任副理事长，受聘为聚变产业联盟总工艺师。安徽省人民政府中国科学院合作建设领导小组任命董事长严建文担任合肥综合性国家科学中心能源研究院执行院长。

聚变新能招标公告

聚变新能(安徽)有限公司 FUSION ENERGY TECHNOLOGY CO.,LTD 匠心聚合 勇于挑战 开拓创新 使命担当			
公司概况	项目建设	产业联盟	新闻中心
1、招标编号：Z4AT0002301572			
2、项目名称：聚变新能（安徽）有限公司采购真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目			
3、招标内容			
包号	货物名称	数量	单位
包1	BEST 真空室1-4#扇区	4	套
	下窗口延长段	8	套
	重力支撑	8	套
	1-4#扇区接驳区	4	套
包2	BEST 真空室5-8#扇区	4	套
	下窗口延长段	8	套
	重力支撑	8	套
	5-8#扇区接驳区	4	套
包3	上窗口延长段	15	套
	中窗口延长段	16	套
4、最高限价：51240万元（包1：最高限价21336万元；包2：最高限价21336万元；包3：最高限价8568万元）			

聚变新能真空室、窗口延长段、重力支撑中标公告

聚变新能(安徽)有限公司 FUSION ENERGY TECHNOLOGY CO.,LTD 匠心聚合 勇于挑战 开拓创新 使命担当				
项目建设	产业联盟	新闻中心	人力资源	党群文化
真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目包1中标结果公告				
作者：招投标管理岗 日期：2024-04-28 点击：156				
聚变新能（安徽）有限公司采购真空室扇区、窗口延长段、重力支撑项目包1（项目编号：24AT08025301572-001）中标候选人公示期已经结束。现将中标结果公告如下：				
中标单位名称:合肥合锻智能制造股份有限公司;				
代理机构名称: 安徽安天利信工程管理股份有限公司				
代理机构联系人: 黄瑞				
代理机构联系电话: 15655536020				
公示日期: 2024年04月28日				

3.1.2 聚变相关标的：航天晨光

公司业务：2023年公司实现营收38.2亿元，归母净利润0.72亿元。其中，波纹管营收10.5亿元，压力容器类产品6.7亿元，后勤保障装备3.1亿元，环保装备与服务2.3亿元，军工与核非标设备和服务13.3亿元，占营收比重35%。

核工装备产业主要包含核级工业基础件、核废料处理装备和核非标成套装备等三个发展领域，拥有核电金属软管、核电膨胀节、核废料处置全流程设备以及核工热室、手套箱等系列化产品。经过多年大力开发，公司建立起了较为完善的核质保体系，以核电膨胀节、核电软管等为代表的核级工业基础件产品位列国内龙头，核废料处理装备和核非标成套装备产品也具备较强先发优势。

在聚变领域，公司签约**聚变新能杜瓦系统**，并以发起单位身份加入**国内核聚变产业联盟**。公司“高性能热核聚变**膨胀节成套装备**”项目获得创新组二等奖。2023年公司举行ITER外杜瓦矩形波纹管交付仪式。

聚变新能杜瓦系统中标公告

ITER外杜瓦矩形波纹管



聚变新能（安徽）有限公司紧凑型聚变能实验装置（BEST）项目杜瓦系统中标候选人公示

2023-10-16 原始链接

关联公司 [聚变新能（安徽）有限公司](#) [中国科学院合肥物质科学研究院](#) [航天晨光股份有限公司](#) [大明重工有限公司](#)
[合肥聚能电物理高技术开发有限公司](#) [安徽省招标集团股份有限公司](#)

聚变新能（安徽）有限公司紧凑型聚变能实验装置（BEST）项目杜瓦系统中标候选人公示

一、聚变新能（安徽）有限公司紧凑型聚变能实验装置（BEST）项目杜瓦系统（招标编号：GN2023-36-5956）项目，于2023年10月13日9点00分，在中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所组织开标，经评标委员会评审，现将评标结果公示如下：

中标候选人名称：[航天晨光股份有限公司](#)（牵头人）和[大明重工有限公司](#)和[合肥聚能电物理高技术开发有限公司](#)的联合体，投标报价108900000.00元；

公示期：自2023年10月16日至2023年10月19日

招标投标相关各方对上述结果有异议，可在公示期内以书面形式向[安徽省招标集团股份有限公司](#)提出，异议接收联系电话：0551-62220155。

二、书面异议材料应当包括以下内容：

（一）异议人名称、地址和有效联系方式；

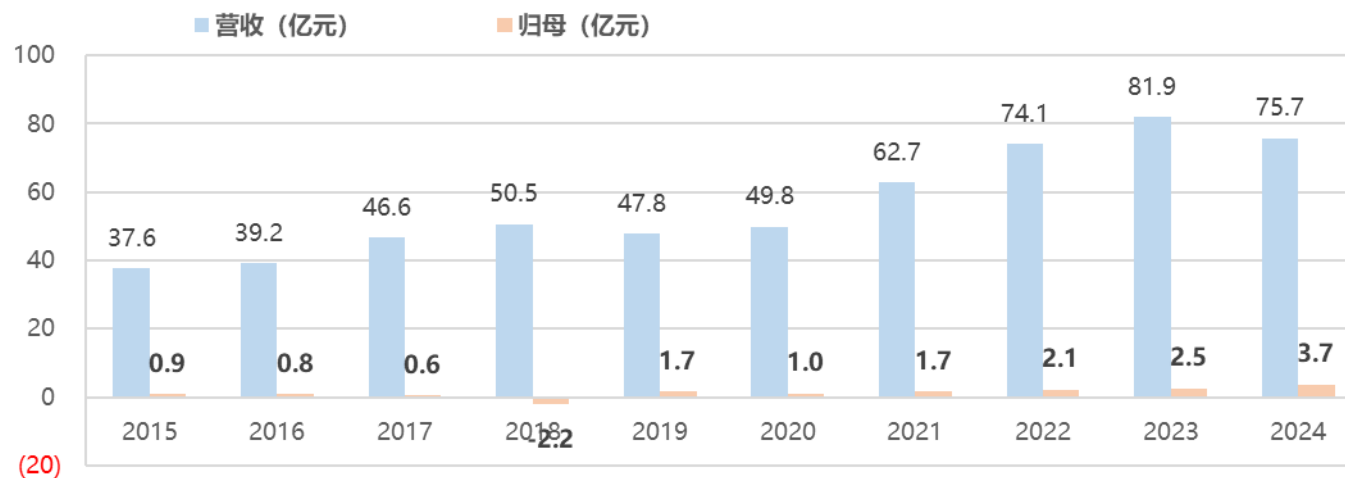
3.1.2 聚变相关标的：安泰科技

公司业务：公司是中国钢研科技集团有限公司发起成立的高科技上市公司，公司于1998年成立，经过二十年的发展，已形成了“**先进功能材料及制品、特种粉末冶金材料及制品、高品质特钢及焊接材料、环保与高端科技服务业**”等四大业务板块，服务于国家战略新兴产业，产品广泛应用于新一代信息技术、节能与新能源汽车、海洋工程与高技术船舶、先进轨道交通装备、电力装备、高性能医疗器械及设备、高档数控机床及机器人、环保工程等领域，为全球高端客户提供先进材料、制品及解决方案。

2024年实现营收75.7亿元，同比-7.5%，归母净利润3.7亿元，同比+49.3%。其中，特种粉末冶金材料及制品29.6亿元，先进功能材料及器件28亿元，高品质特钢及焊接材料16.5亿元。

在核电领域，公司拥有领先的技术优势，开发的**难熔钨钼、镍基高温合金带材、金属精密过滤装置**等产品为“华龙一号”、AP1000、CAP1400等多项核电技术提供配套产品；在聚变领域，公司子公司**安泰中科**为核聚变装置提供包括**钨铜偏滤器、钨铜限制器、包层第一壁、钨硼中子屏蔽材料**等涉钨全系列专用钨铜部件，累计提供数万件钨铜零部件，助力中国可控核聚变不断创造新的世界纪录。同时，公司也是**ITER钨铜复合部件**的重要供应商。

安泰科技营收和利润变化（亿元）



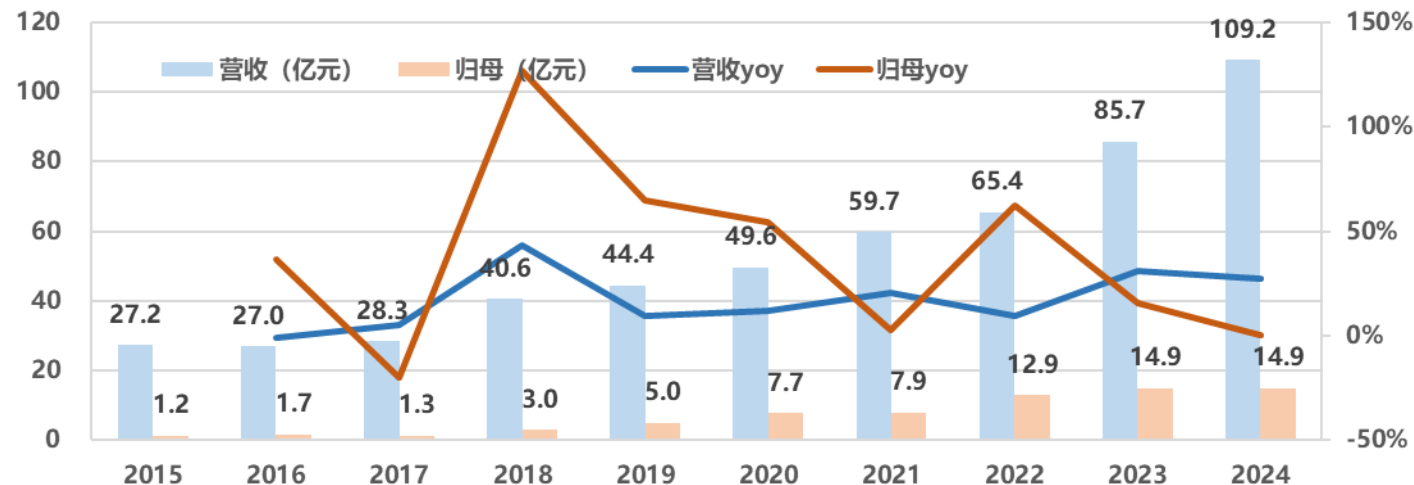
3.1.2 聚变相关标的：久立特材

公司业务：公司是国内工业用不锈钢管制造领域的领军企业，拥有显著的生产规模与专业优势。公司专注于打造“长、特、优、高、精、尖”系列工业用不锈钢管材，涵盖超长规格、特殊钢种、优质、高端、精品及尖端进口替代等多元化、高附加值产品，并同步拓展高品质不锈钢管件及特种合金新材料领域，逐步构建起完整的产业链条。下游应用领域方面，公司产品广泛覆盖油气（含LNG）、化工、电力等关键能源装备行业，提供高性能、耐腐蚀、耐压、耐高温的优质材料，成功实现多项产品国产化替代，填补国内技术空白。

2024年公司实现归母营收109.2亿元，同比+27%，归母净利润14.9亿元，同比基本持平。其中，石油、化工、天然气收入69.2亿元，占比63.4%，电力设备制造收入14.2亿元，占比13%。

在聚变领域，公司负责研发并生产的**TF/PF导管**是ITER计划的关键部件，该产品已连续多年稳定供货。其中，公司开发的**PF导体316L不锈钢方圆管**为目前国内唯一满足ITER项目要求的PF导体铠甲供应商；研发的ITER装置用**TF导体铠甲**（称为“磁笼”的“人造太阳”核心部件），纳入ITER采购包。在核电领域，公司研制的核电站**蒸汽发生器用800/690合金U形传热管**实现核电出口关键部件的国产化。

久立特材营收和利润变化（亿元，%）

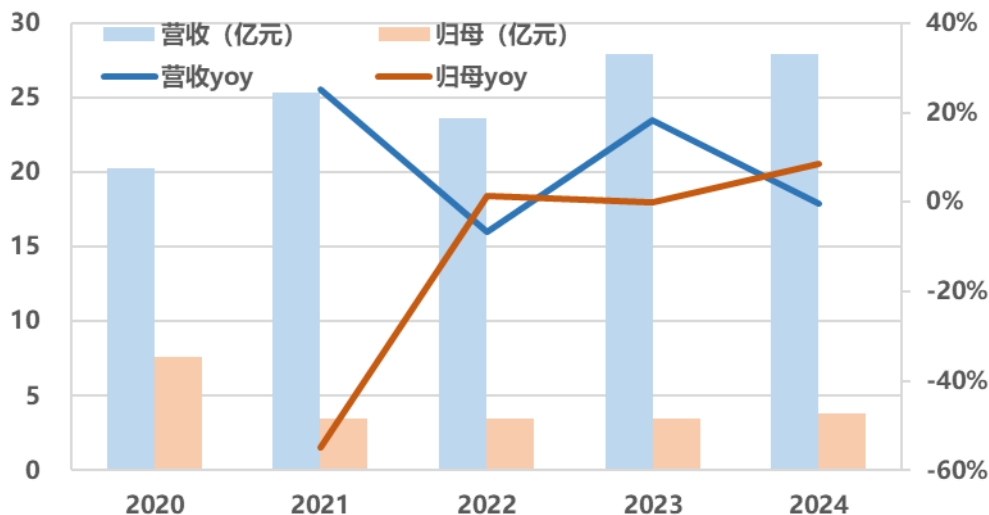


3.1.2 聚变相关标的：海陆重工

公司业务：公司主要从事工业余热锅炉、大型及特种材质压力容器和核安全设备的制造销售业务，以及固废、废水等污染物处理和回收利用的环境综合治理服务及光伏电站运营业务。公司是国内余热锅炉设计、制造的重要基地之一。在国内工业余热锅炉领域，公司产品一直保持市场占有率第一。同时公司产品出口日本、苏丹、越南、阿尔日利亚、印尼、美国、加拿大、伊朗等多个国家和地区。

公司自1998年起涉足核电领域，而后取得民用核承压设备制造资格许可证。公司为上海第一机床厂加工的堆内构件吊篮筒体，是制造核反应堆的心脏设备，该产品的成功研发与生产，替代了一直依赖国外进口的状态，填补了国内空白，达到了国际先进水平，国内生产的吊篮筒体均为公司制造。公司在具有自主知识产权的“华龙一号”、CAP1400三代核电技术、具有四代安全特征的高温气冷堆核电技术应用上均获**吊篮筒体、安注箱、堆内构件吊具等重要订单**。目前，公司已成为中国核动力研究院、中核核工业集团有限公司、中国广核集团、国核工程有限公司、中核能源科技有限公司、清华大学核能与新能源技术研究院、中国原子能科学研究院、中国科学院上海应用物理研究所、上海电气集团股份有限公司、中核四〇四有限公司、**ITER（国际热核聚变实验堆）**项目、中核集团中国中原对外工程有限公司等单位的合格供方。

海陆重工营收和利润变化（亿元，%）



AP1000堆内构件吊具



高温气冷堆堆芯壳底座



3.1.2 聚变相关标的：弘讯科技、旭光电子

弘讯科技：

公司始于1984年设立的台湾弘讯，2001年9月在宁波注册，2011年完成股份制改造，2015年3月在A股上市。公司的产品已广泛应用于塑料加工机械、金属加工机械、物联网等多个领域，积累了深厚的技术底蕴和行业经验。2023年公司实现营收7.2亿元，归母净利润0.64亿元。

公司控股子公司**意大利EEI**有着45年历史的专业电源转换技术与欧洲核子研究中心（CERN）保持多年技术合作。近年，EEI参与了ITER计划，此外，**EEI还为JT-60SA提供具有高动态特性的HDPS系列电源完整解决方案(HDPS)**，该方案基于高精度和高速度的电源控制，有效地加热和约束等离子体，使其达到和维持聚变所需的高温和高密度条件，这种控制的准确性直接影响等离子体的稳定和聚变实验的连续性，进而影响聚变反应的效率和能力。

旭光电子：

公司是一家专业从事金属陶瓷电真空器件、高低压配电成套装置、光电器件等产品研发、生产、销售的重点高新技术企业，主要产品包括：电子管，开关管（真空灭弧室）和固封极柱，高低压配电成套装置及电器元件（开关柜和断路器），光电器件。2024年，公司实现营收15.9亿元，同比+20.5%，归母净利润1.02亿元，同比+10.5%。

公司是承接核聚变工程配套设备研发并通过专家测评的厂商之一。公司自主研发用于可控核聚变领域的**大功率电子管**已实现批量供货。近期，中标国内某重点项目取得新订单，预计后续订单将随项目推进持续落地。公司基于在核心器件领域的技术领先优势，正积极推进从关键器件向设备端的产业链延伸。

3.2 核电相关标的：中核科技、江苏神通

中核科技：公司前身为1952年成立的苏州阀门厂，为石油、天然气、炼油、核电、电力、冶金、化工、造船、造纸、医药等行业提供阀门系统解决方案，并于1997年在深交所挂牌上市，为中国阀门行业和中国核工业集团有限公司所属的首家上市企业。2023年公司营收18.1亿中，核电核化工6.2亿元，占比34.2%，核电核化工毛利率30.4%。

核电领域，公司核电站用关键阀门具备二代、三代核电机组阀门成套供货能力，四代核电机组关键阀门供货能力；核燃料真空阀及浓缩铀生产四大类国产化关键阀门总体性能达到或超过进口产品水平，具备成套供货能力；公司也是全球唯一一家能够同时制造和生产主蒸汽隔离阀、爆破阀、稳压器先导式安全阀的公司。**截至2024年11月，公司核工程项目在手订单29亿元。**

稳压器先导式安全阀



爆破阀



主蒸汽隔离阀



江苏神通：专业从事新型特种阀门的研发、生产与销售，主要产品包括蝶阀、球阀、止回阀、调节阀、过滤器、仪表阀等九个大类100多个系列2000多个规格，广泛应用于核电、冶金、火电、煤化工、石油和天然气集输及石油炼化等领域。23年公司实现营收21.3亿元，其中，核电收入6.9亿元，占比32.6%，核电产品毛利率达40.3%。

2023年神通核能实现新增订单8.03亿元，24H1神通核能新增订单5.04亿元。

高温高压球阀



核级止回阀



核级对夹式蝶阀



3.2 核电相关标的：佳电股份

佳电股份：公司是中央管理的国有重要骨干企业之一——哈尔滨电气集团有限公司的控股子公司，有着80余年电动机生产历史，是中国共产党第一座电机厂，是我国特种电机的创始厂和主导厂。公司主要产品和业务范围有防爆电机、起重冶金电机、普通电机、智能电机、高效节能电机、永磁电机、轧机用变频同步电机、直流电机、湿绕组电机、屏蔽电机电泵、**核电屏蔽式反应堆主冷却剂泵电机、核电轴封式反应堆主冷却剂泵、核电小堆主冷却剂泵、核电厂用各类电动机、核三级屏蔽泵、核电厂海水循环泵、高温气冷堆主氮风机、高温气冷堆氮气压缩机**、电气控制及系统成套设备等，同时承接各类电机的节能改造、再制造以及维修维保业务。

2024年，公司实现营收49亿元，其中，核电收入8.7亿元，毛利率37.9%，同比提升17.51pct，主要系子公司哈尔滨动力装备有限公司高毛利产品交付。2024年，哈动装实现营收15.6亿元，同比23年的13.1亿收入增长19.3%，归母净利润1.6亿元，同比大幅增长77.5%。**哈动装为三代核电核主泵供应商**，随着核电机组进入交付高峰期，公司产品如期交付和确认收入。2024年我国批复了徐圩核能供热厂一期工程拟建设的1台HTR-PM600S高温气冷堆机组及配套设，是全球首台核准的四代气冷堆机组。**公司是高温气冷堆主氮风机供应商**，随着四代堆进入交付期，叠加子公司哈动装在三代核电公司进入交付高峰期，2025年核电业务收入也有望得到一定保障。

核级电动机



“玲珑一号”主泵成功发运



高温气冷堆主氮风机



4. 风险提示

4. 风险提示

核聚变技术研发不及预期风险。核聚变不同于成熟的核电，目前在反应原理、材料等各方面仍有挑战尚未克服，若研究团队研发进展不顺利，可能会导致后续项目建设进展以及订单的释放，进而影响相应设备企业收入、利润。

投资不及预期风险。核电、核聚变项目投资额普遍较大，在数百亿元级别，尤其是聚变项目，目前处于技术还未完全成熟阶段，若未来科研院所及民营企业项目融资不顺利，可能会导致相应设备厂商的订单、收入不具有持续性。

核电机组批复不及预期风险。核电机组通常由国常会批复，受政策影响较大，若核电机组批复数量明显下降，可能会对未来几年核电设备企业营收造成较大影响。

交付节奏不及预期风险。核电及核聚变项目建设周期普遍较长，且前期需要长期的技术论证，若项目交付进展不及预期，可能会导致设备企业营收、利润受到影响。

原材料价格波动风险。核设备涉及很多钢材、铜、不锈钢等，且用量较大，若原材料价格波动较大会影响设备企业毛利率，进而影响企业盈利水平。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为C3及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

类别	评级	说明
公司评级	强烈推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有20%以上的涨幅。
	推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的涨幅。
	中性	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数在-10%和10%之间波动。
	减持	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的跌幅。
行业评级	推荐	分析师预测未来12个月内行业表现强于同期基准指数。
	中性	分析师预测未来12个月内行业表现与同期基准指数持平。
	减持	分析师预测未来12个月内行业表现弱于同期基准指数。
基准指数说明		A 股市场以沪深300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普500指数为基。



方正证券研究所

专注 · 专心 · 专业

北京市朝阳区朝阳门南大街10号兆泰国际中心A座17层

长沙市天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

上海市静安区延平路71号延平大厦2楼

深圳市福田区竹子林紫竹七道光大银行大厦31层

广州市天河区兴盛路12号楼隼峰院2期3层方正证券