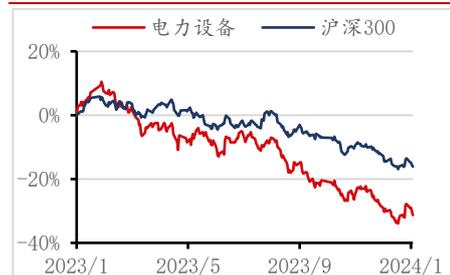


电力设备

投资建议： 强于大市（维持）
上次建议： 强于大市

可控核聚变开启终极能源大门

相对大盘走势



行业变化：

23年12月29日，以“核力启航 聚变未来”为主题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，第一批未来能源关键技术攻关任务正式发布。

核聚变难点在哪？

核聚变发生反应条件非常严苛，如何维持等离子体稳定和提高聚变反应效率是其主要技术挑战；核聚变反应时易发生“湍流”，缩短反应堆运行寿命；不同于氘，氚在地球上含量少，自持问题还需进一步突破；对核聚变反应器材材料和用于产生氚的包层材料物理化学性能要求高。

ITER项目核电站潜力大

国际热核聚变实验反应堆（ITER）计划预计2025年完成建设并进行第一次等离子放电试验。ITER项目的核电站将产生约500MW热能，如果持续运行并接入电网，将转化为约200MW电能，够20万户家庭使用。

中国环流三号取得突破性进展

23年8月，中国环流三号首次实现100万安培等离子体电流下高约束模式运行，突破了等离子体大电流高约束模式运行控制、先进偏滤器位形控制等关键技术难题，是我国核聚变能开发进程中的重要里程碑。23年12月，人造太阳“中国环流三号”面向全球开放。

托卡马克是核聚变技术路线首选

由于仿星器需要三维结构线圈，结构更复杂，制造难度更大，成本更高，托卡马克成为聚变堆技术路线首选。超导体具有零电阻效应，且可承载电流密度更高，20世纪后期开始被用于托卡马克装置。2006年，等离子体物理研究所自主研制并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置EAST。

超导磁体+偏滤器是托卡马克关键组成部分

超导磁体几乎占托卡马克成本的一半。目前，高温超导线材良率已提升至90%，开始工业化应用。高温超导技术发展可缩短可控核聚变装置建设周期，使聚变发电初步具备商业化潜力。偏滤器是中心等离子体与聚变材料相互作用的主要区域，性能优劣直接影响核聚变装置的运行安全性与使用寿命。

投资建议

我们推荐核电龙头**中国核电（601985.SH）**，龙头运营商**中国广核（003816.SZ）**，核级阀门主要供应商**江苏神通（002438.SZ）**，核电设备龙头**东方电气（600875.SH）**。建议关注主氦风机主要供应商**佳电股份（000922.SZ）**，核级阀门领军企业**中核科技（000777.SZ）**，超导材料供应商**西部超导（688122.SH）**、**联创光电（600363.SH）**以及偏滤器供应商**国光电气（688776.SH）**。

风险提示：项目建设不及预期，核电安全事故风险

重点推荐标的

简称	EPS			PE			CAGR-3	评级
	2023E	2024E	2025E	2023E	2024E	2025E		
中国核电	0.56	0.62	0.68	13.1	11.7	10.7	12.7%	买入
中国广核	0.23	0.28	0.32	13.0	10.8	9.4	17.8%	买入
江苏神通	0.79	0.99	1.14	14.2	11.4	9.9	36.5%	买入
东方电气	1.23	1.60	1.91	12.0	9.2	7.7	27.8%	买入

数据来源：公司公告，iFinD，东方电气为Wind一致预期，国联证券研究所预测，股价取2024年01月05日收盘价

作者

分析师：贺朝晖
执业证书编号：S0590521100002
邮箱：hezhaog@glsc.com.cn

相关报告

- 《电力设备：氢能重点基地补贴政策出台，绿氢加速平价》2024.01.03
- 《电力设备：特高压迎来投资高峰，产业链有哪些机会？》2024.01.01

正文目录

1. 什么是核聚变？	3
1.1 核聚变被视为未来终极能源	3
1.2 磁约束核聚变是国际主流	4
2. 核聚变的难点在哪？	5
2.1 提高聚变效率是主要挑战	5
2.2 相关材料物理化学性能要求高	6
3. 核聚变进展情况如何？	7
3.1 世界各国积极开展核聚变试验	8
3.2 ITER 项目核电站潜力大	11
3.3 中国环流三号取得突破性进展	13
4. 核聚变未来展望	14
4.1 核聚变进入举国体制时代	14
4.2 托卡马克是核聚变技术路线首选	16
4.3 超导磁体+偏滤器是托卡马克关键组成部分	17
5. 投资建议：关注托卡马克相关产业链机会	18
6. 风险提示	20

图表目录

图表 1: 核聚变工作原理	3
图表 2: 核聚变反应三要素	5
图表 3: 核聚变三种技术路线	5
图表 4: 托卡马克装置磁约束	5
图表 5: 托卡马克聚变反应堆的三个外部加热源	6
图表 6: 高温等离子体“湍流”现象	6
图表 7: 核聚变氚增殖过程示意图	7
图表 8: 全球核聚变装置数量	8
图表 9: NIF 一年内实现四次成功点火	8
图表 10: JET 托卡马克设施内部	9
图表 11: 德国 W7-X 仿星器装置照片	10
图表 12: JT-60SA 设备结构图	10
图表 13: JT-60SA 的里程碑意义	10
图表 14: EAST 装置	11
图表 15: ITER 的建设目标与主要技术探索任务	12
图表 16: ITER 主要参数	12
图表 17: ITER 成本拆分	13
图表 18: 核聚变发电厂 DEMO 的成本拆分	13
图表 19: 环流器三号装置	13
图表 20: 中国实验快堆	14
图表 21: HL-2M 核聚变装置	14
图表 22: 热堆、快堆和聚变堆区别	15
图表 23: 托卡马克结构示意图	16
图表 24: 托卡马克装置	16
图表 25: EAST 超导磁体系统	16
图表 26: 仿星器示意图	17
图表 27: 核聚变产业链	18
图表 28: 托卡马克中的偏滤器整体图	18
图表 29: 托卡马克中的偏滤器部分图	18

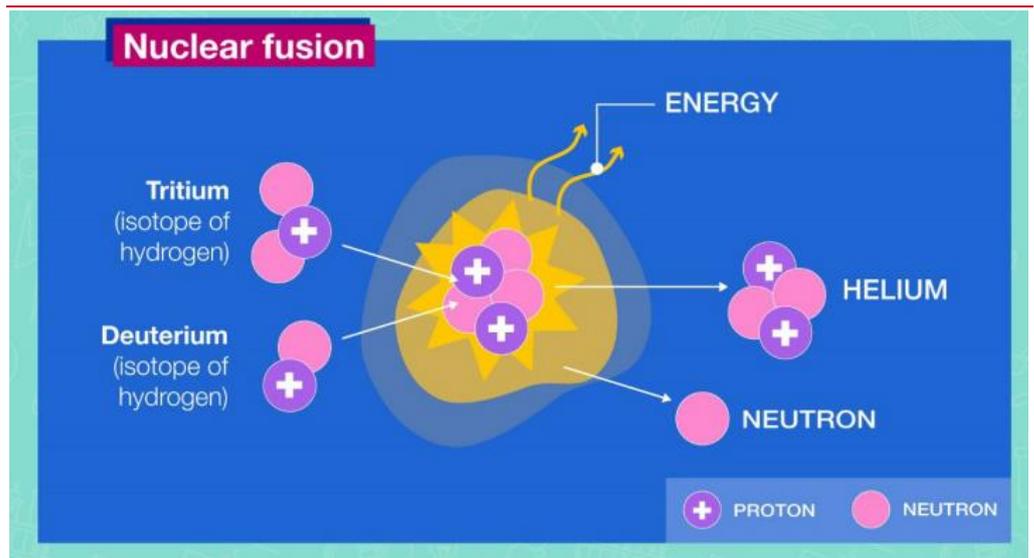
1. 什么是核聚变？

1.1 核聚变被视为未来终极能源

核能发电的基础是核反应。核能发电的基本原理是利用核反应将核能转化为热能，再通过热机将热能转化为机械能，最后利用发电机将机械能转化为电能。核反应是指核燃料在反应堆中发生核裂变或核聚变，释放出大量能量的过程。

核聚变是两个轻原子核结合形成一个较重原子核，同时释放大量能量的过程。核聚变反应发生在等离子体的物质状态中，核聚变有氘-氘聚变、氘-氚聚变、氘-硼聚变及氚-氚聚变。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，也是实现可控核聚变的最为可行的发展路线。氘-氚聚变反应（D-T 反应）是指在极高的温度与压强下，氘和氚发生原子核相互聚合反应，生成较重的原子核，并释放出一个中子导致质量亏损。

图表1：核聚变工作原理



资料来源：IAEA，国联证券研究所

现有能源均存在局限性。在现有的能源形式当中，化石能源储量是有限的，且燃烧会大量排放温室气体；可再生能源如太阳能、风能、水能等能源密度较低，受地理因素限制较大，只能作为辅助能源；基于核裂变的核能虽然能满足人类能源需求，但产生的核废料处理和放射性污染问题难以处理且主要核燃料铀的储量也是有限的。

可控核聚变被视为未来终极能源。从一种原子核变为另外一种原子核往往伴随着大量能量的释放。可控核聚变由于原料资源丰富、释放能量大、安全清洁、环保等优势，能基本满足人类对于未来理想终极能源的各种要求。核聚变的能量来源目前主要有三种：宇宙能源，即太阳发光发热；氢弹爆炸（不受控核聚变）；人造太阳（受控核聚变能源装置）。

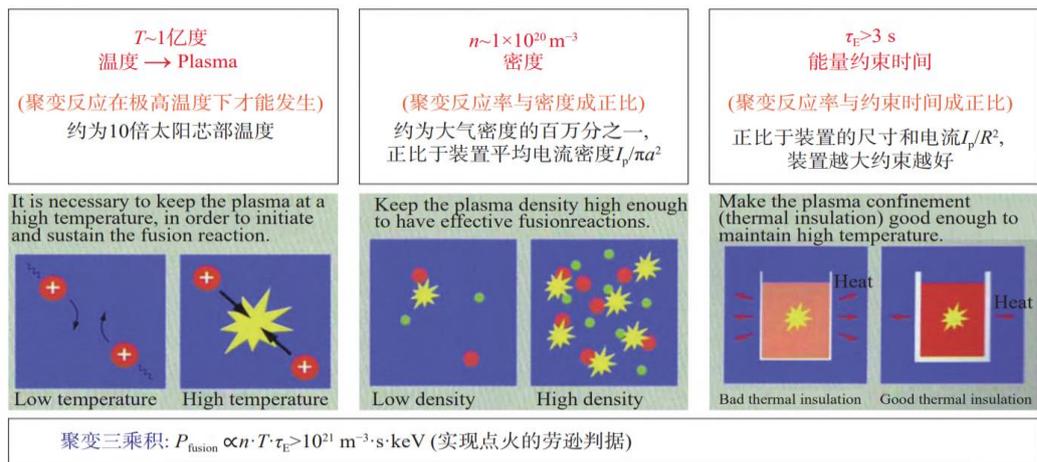
- 原料充足：常见核聚变由氢的同位素“氘”和“氚”聚合成氦原子核而释放出能量。主要燃料氘跟氧结合成重水存在于海水之中，地球上氘含量丰富，其中每公斤海水含氘 0.03 克，地球海水共含氘 45 万亿吨。同时海水中富含大量锂，氘可通过海水所含有的锂与中子反应产生。
- 高效产出：核聚变产生的能量非常大，每单位质量的核聚变燃料释放的能量是核裂变的四倍。消耗一千克氘产生的能量与四千克铀、七千吨汽油或一万吨煤所获得的能量相当，且核聚变的效率逐步提高，聚变反应可以成为未来聚变动力堆的基础。
- 安全可控：核聚变反应发生条件严苛，需要满足高温、高密度和长时间保持聚变反应环境。一旦发生事故，造成反应的等离子体约束破裂，聚变反应便会终止，不会发生基于链式反应的裂变型事故或核熔毁。
- 能源清洁：聚变反应的产物氦气没有放射性，相较于化石燃料燃烧产生的大量二氧化碳及其他有害气体及核裂变反应产生的核废料处理和放射性污染问题，核聚变反应无环境污染问题。

1.2 磁约束核聚变是国际主流

核聚变反应有两个重要技术指标，一是聚变三乘积，二是能量增益因子 Q 。足够高的温度 (T)、一定的密度 (n) 和一定的能量约束时间 (τ_E)，三者的乘积称为聚变三乘积，能量增益因子是指聚变反应中输出能量和输入能量之比。实现核聚变反应，根据劳逊判据，需满足聚变三乘积大于 $5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$ ，才能产生有效的聚变功率输出。当满足聚变三条件时，同时才能使能量增益因子 Q 大于 1。

$Q > 5$ 时实现聚变点火。考虑到工程上各种能量损失，当 $Q < 5$ 时，聚变反应堆中的自热大概率不会达到反应堆输入功率，当增加至 $Q > 5$ 时，自热的增加令反应堆不再需要外部加热输入能量以维持反应。在此之后，聚变反应开始自我维持，这种情形被称为聚变点火。

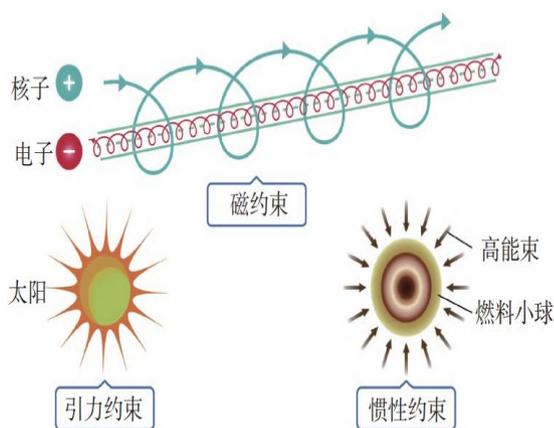
图表2：核聚变反应三要素



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国联证券研究所

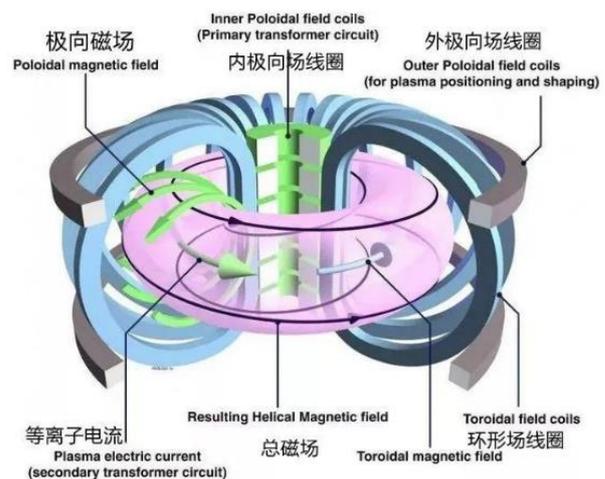
可控核聚变有三种技术路线，磁约束核聚变是国际主流。引力约束是靠强大的万有引力来提供对聚变燃料的约束力，目前无法在地球上实现；惯性约束是以多束极高精度激光从四面八方向一个非常微小的聚变燃料丸倾注能量，产生瞬间的高温 and 高压，使聚变燃料的密度在短时间达到极限值，从而引发核聚变反应；磁约束是指用磁场来约束等离子体中带电粒子的运动，通过将聚变燃料完全电离形成的等离子体置身于强磁场的空间，带电的原子核与电子在垂直于磁场方向只能沿着磁场方向做回旋运动。其中托卡马克磁约束聚变是国际主流技术路线，可行性得到了验证。

图表3：核聚变三种技术路线



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国联证券研究所

图表4：托卡马克装置磁约束



资料来源：IAEA，等离子体，国联证券研究所

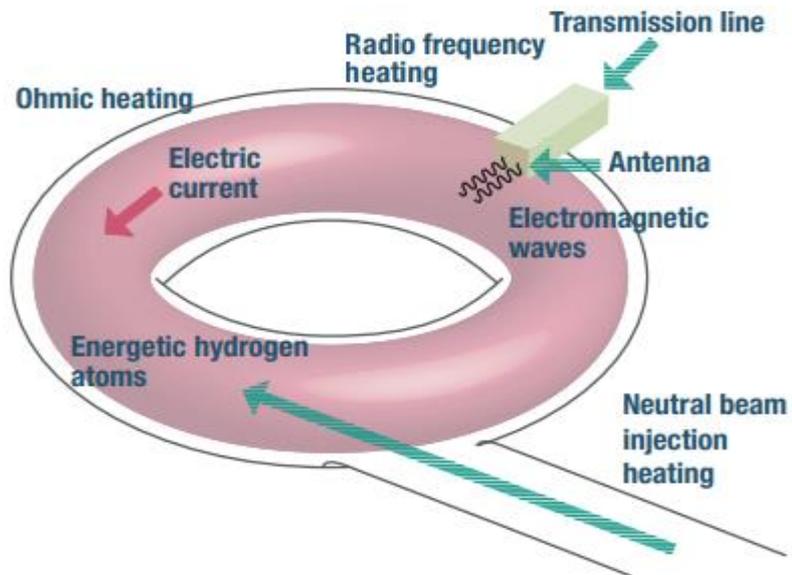
2. 核聚变的难点在哪？

2.1 提高聚变效率是主要挑战

如何维持等离子体稳定和提高聚变反应效率是主要技术挑战。实现核聚变反应需要将氘氘原子核压缩到很小尺度的核力范围 (10^{-16} 米) 内，但由于原子核带正电，

必须获得足够的能量或在特殊环境下才能克服彼此间的库仑势垒。在等离子体聚变技术中，磁场将等离子体束缚在一定范围内，当等离子体被加热到足够高的温度（1亿度以上）和密度时，才能发生聚变反应。

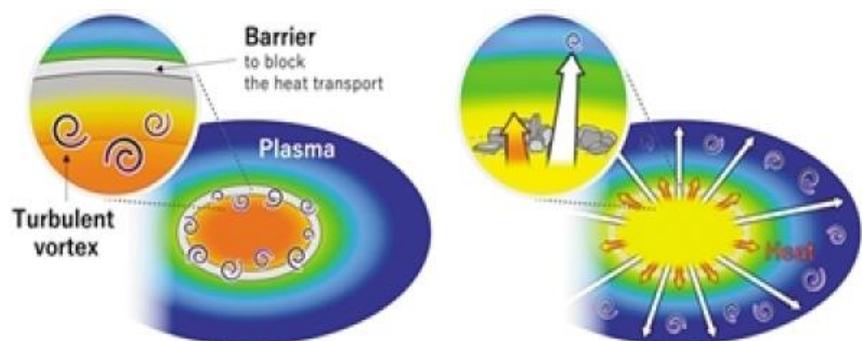
图表5：托卡马克聚变反应堆的三个外部加热源



资料来源：IAEA，国联证券研究所

对等离子体进行磁约束需控制“湍流”现象发生。达到聚变条件后，还需对高温聚变物进行约束，以获得持续的核聚变能。当氘核与氚核间发生聚变反应时，在此高温条件下，任何固态容器都会在极短时间内气化。大多数聚变反应堆都是基于使用磁场的等离子体约束，但在受磁场约束的高温等离子体中会产生“湍流”，热量和粒子被传输至边缘，最终损坏反应堆并缩短其运行寿命。

图表6：高温等离子体“湍流”现象



资料来源：中国科学院官网，国联证券研究所

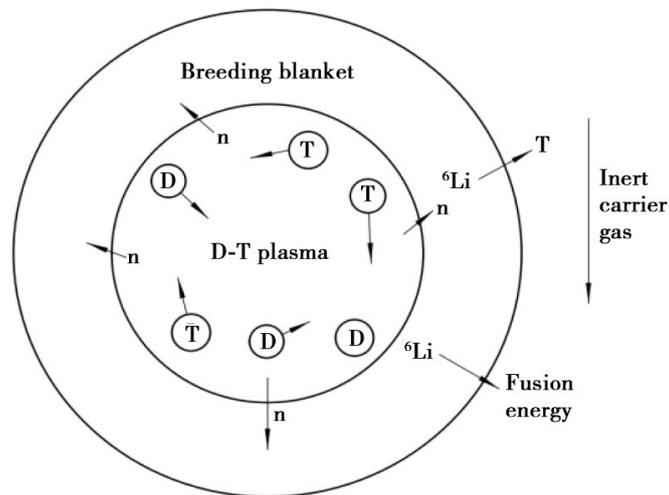
2.2 相关材料物理化学性能要求高

核聚变反应器材料技术要求高。由于核聚变反应严苛，聚变反应器材料应满足以

下几点要求：(1)聚变反应器材料需耐受高温高压；(2)由于聚变反应中释放的大量中子会对反应器造成损害，材料需有优越的耐损性能；(3)反应器材料应具备不易吸收中子的特性，以减少燃料损失，并减少产生放射性废物。目前暂无法完全模拟聚变动力反应堆的条件进行核聚变反应器材料测试。

氚的自持问题仍需突破。氚的半衰期只有 12.43 年，在地球上氚含量很少。全球氚储量到 2027 年可能达峰，也仅为 27kg，而 1GW 聚变电厂每年就需消耗约 56kg 氚，难以维系聚变堆的运行需求。因此聚变堆在投入首炉氚后，氚需实现自持。目前聚变堆选用含 Li 材料氚增殖剂，通过 D-T 反应后的中子与 Li 发生核反应得到氚。但增殖剂材料现仍存在应力集中、易破碎、装载率较低等问题。

图表7：核聚变氚增殖过程示意图



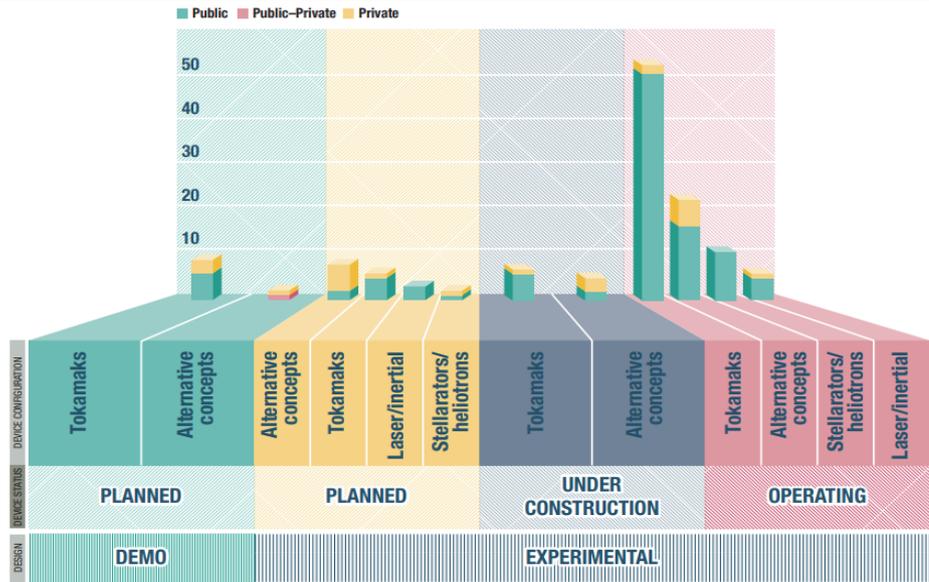
资料来源：《聚变堆内氚增殖过程示意图》王昊，国联证券研究所

包层材料制作要求高。在托卡马克装置中，包层不仅用于产生氚，而且还将由高能中子携带的核聚变反应能量转换成热量，并进一步提取用于发电。由于包层所在的环境较为恶劣，对相关材料的力学、抗腐蚀等性能要求较高。

3. 核聚变进展情况如何？

当前世界共有 50 多个国家正在进行 140 余项核聚变装置的研发和建设，并取得一系列技术突破，IAEA 预计到 2050 年世界第一座核聚变发电厂有望建成并投入运行。其中主要的技术路线是使用磁约束的托卡马克和仿星器，有少数国家进行激光惯性约束的研究。

图表8：全球核聚变装置数量



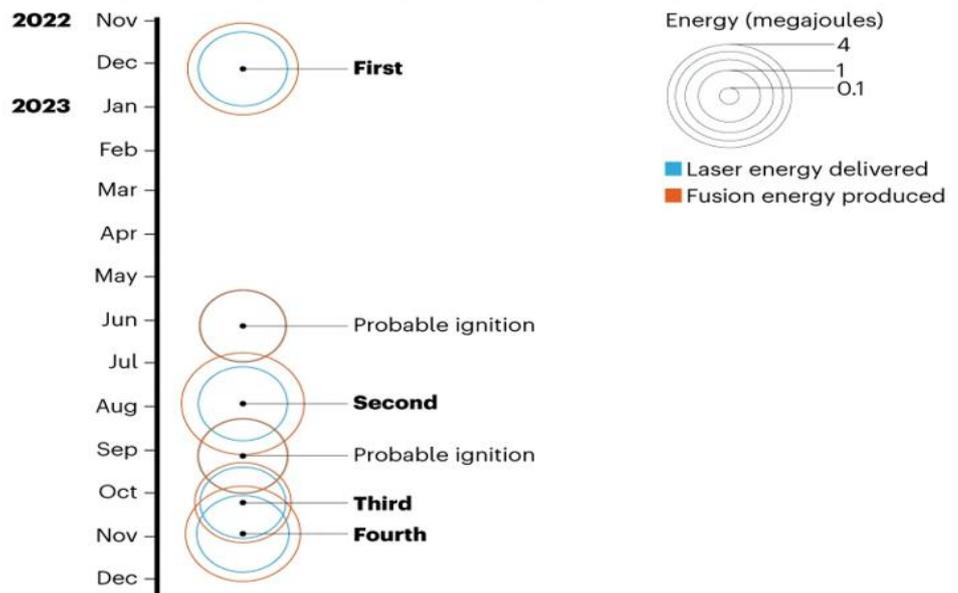
资料来源：IAEA，国联证券研究所

3.1 世界各国积极开展核聚变试验

(1) 美国：已实现 Q 比大于 1

NIF：2022 年 12 月 13 日，美国国家点火设施（NIF）首次实现聚变点火，创造了聚变能试验纪录，有力推动了激光驱动聚变能量的发展前景。2023 年，NIF 又接连进行了三次点火实验，分别在 7 月 30 日、8 月 8 日和 10 月 30 日，都成功地实现了核聚变能量超过激光能量，其中最高一次达到了 3.88MJ，比输入能量增加了 89%，相当于燃烧 300 公斤的汽油。

图表9：NIF 一年内实现四次成功点火



资料来源：环球零碳，国联证券研究所

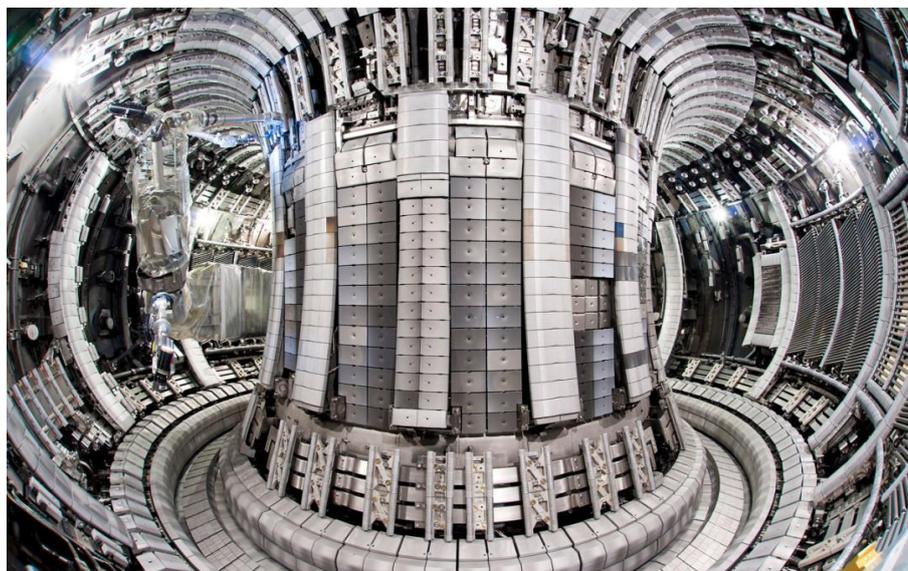
SPARC: 麻省理工学院等离子体科学与融合中心 (PSFC) 主持研究开发了新一代的托卡马克核聚变堆 SPARC, 于 2021 年开始建造, 为期四年完成。SPARC 使用由新型高温钇钡铜氧化物 (YBCO) 制成的强力磁体来产生等离子体, 产生的能量是在高温下维持等离子体所需能量的两倍, 从而使融合增益 $Q > 2$, 并能在 10 秒内实现高达 140 MW 的聚变功率。相关研究表明, SPARC 理论上可实现大于 10 的 Q 比。

(2) 欧洲: 拥有世界上最大在运托卡马克装置

JET: 于 1978 年开始建造, 位于英国牛津郡库勒姆聚变能源中心的欧洲联合环面 (JET) 是现有的唯一可以使用氘-氚燃料混合物运行的托卡马克设施, 该燃料混合物也将用于未来的聚变发电厂。在 JT-60SA 开始运行之前, JET 一直是世界上最大的在运托卡马克装置, 并在 1983 年实现了第一个等离子体试验。JET 数十年的实验优化了氘-氚的聚变反应, 并帮助开发了管理燃料滞留、热排放和材料演变的技术。

JET 的核心是一个真空容器, 目前该容器容纳了 90m^3 的聚变等离子体。多年来, 该设施创下了多项纪录, 包括 1997 年创纪录的 0.64 的 Q-等离子体 (产生的聚变功率与加热等离子体的外部功率之比), 以及 2021 年 12 月创纪录的 5 秒脉冲内 59MJ 的聚变能量输出。高性能氘-氚实验始于 1997 年, 自 2011 年以来, 真空容器的第一个壁由铍和钨制成, 取自 ITER 的建设经验。JET 目前正在完成其最后一系列实验, 并将于 2023 年年底停止运营, 先于计划的 2024 年开始退役。

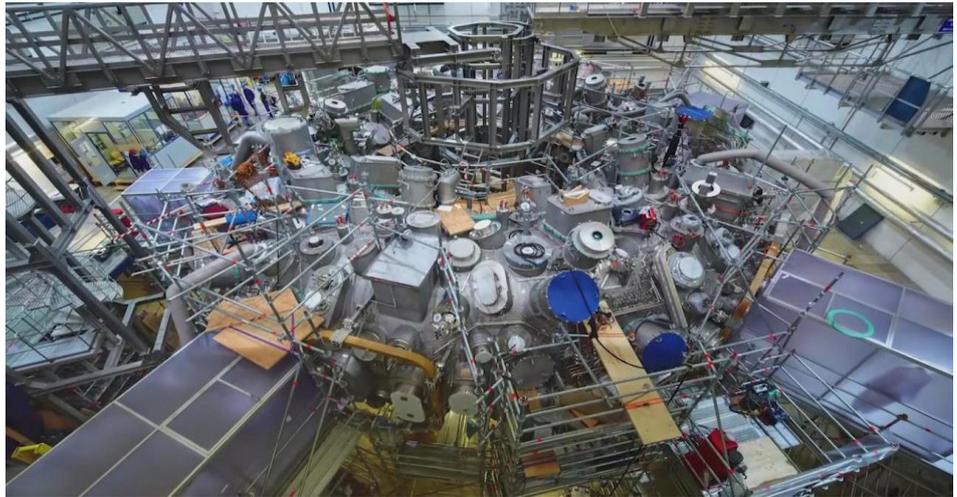
图表10: JET 托卡马克设施内部



资料来源: EUROfusion, 国联证券研究所

W7-X: W7-X 于 2014 年 4 月建成, 位于德国格赖夫斯瓦尔德的马克斯·普朗克研究所, 是世界上最大的仿星器设备。W7-X 的水冷系统可支持该装置在 10MW 的加热下放电长达 30 分钟。2023 年, W7-X 实现了等离子体放电长达 8 分钟, 产生 1.3GJ 的能量周转, 表明它能够连续耦合等离子体中的大量能量。

图表11：德国 W7-X 仿星器装置照片



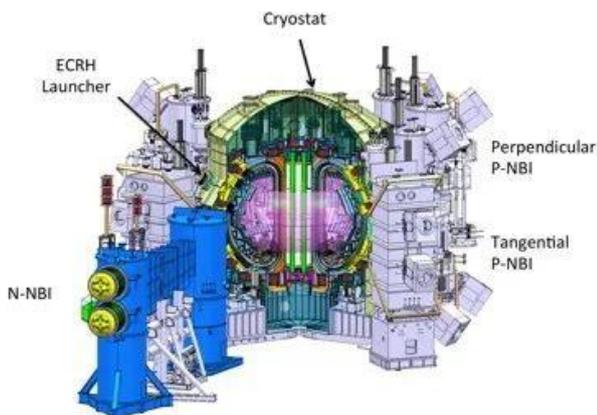
资料来源：马克斯-普朗克等离子物理研究所，国联证券研究所

MAST-U: MAST-U 装置是在兆安培球形托卡马克装置 (MAST 装置) 基础升级而来，于 2020 年在英国建成。MAST-U 是一种低深弦比托卡马克，能够与各种不同的偏滤器一起使用，并且是第一个使用 Super-X 偏滤器工作的系统。该系统目的是在足够低的温度下将等离子体从设施中导出，降低热功率负载以达到材料可承受的温度，进而延长组件的使用时间。利用该系统可使到达聚变堆设施内表面的热量降至原来的 1/10，有效改变未来核聚变发电站的长期运行能力。

(3) 日本：已实现将等离子体加热至 2 亿度

JT-60SA: JT-60SA 是一个由日本和欧盟共同合作建造运行的超导托卡马克装置，位于茨城县日本原子能研究开发机构 (JAEA) 内，目前是世界上最大的热核聚变实验装置是世界上最大的热核聚变实验装置。JT-60SA 于 2023 年 11 月 2 日成功点火，达到满功率后可将等离子体加热到 2 亿摄氏度并维持约 100 秒。JT-60SA 的工作为 ITER 的建造以及日本示范发电厂—DEMO 的实现奠定了基础。

图表12：JT-60SA 设备结构图



资料来源：高端装备产业研究中心公众号，国联证券研究所

图表13：JT-60SA 的里程碑意义



资料来源：Fusion for Energy，国联证券研究所

(4) 俄罗斯：已实现首次稳定的等离子体操作

T-15MD: T-15MD 托卡马克位于俄罗斯联邦库尔恰托夫研究所，于 2021 年完成机器升级。2023 年 4 月，实现了首次稳定的等离子体操作。T-15MD 托卡马克使用水冷系统，能够在 2T 的等离子体轴上产生环形磁场；它还具有强大的准固定式附加加热系统，等离子体的总功率输入高达 20MW，等离子体中的电流可达到 2.0MA，持续时间为 10 秒。

(5) 中国：已实现等离子体电流首次突破 100 万安培

HL-2M: 环流三号 (HL-2M) 托卡马克装置是 HL-2A 的改造升级装置。2022 年 11 月，等离子体电流首次突破 100 万安培。2023 年 8 月 25 日，首次实现 100 万安培等离子体电流下的高约束模式运行。

EAST: EAST 是我国自行设计研制的世界上第一个“全超导非圆截面托卡马克”核聚变实验装置。2021 年 12 月，EAST 实现了最长的稳态高温等离子体运行(1056 秒)，即具有类似 ITER 的配置和加热方案的长脉冲高性能运行。

图表14: EAST 装置



资料来源：中国科学院等离子体物理研究所，国联证券研究所

3.2 ITER 项目核电站潜力大

1985 年，在美、苏首脑的倡议和国际原子能机构 (IAEA) 的赞同下，一项重大国际科技合作计划——“国际热核聚变实验反应堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)”得以确立，其目标是要建造一个可持续燃烧的托卡马克聚变实验堆以验证聚变反应堆的工程可行性。

图表15: ITER 的建设目标与主要技术探索任务

建设目标	主要技术探索任务
产生聚变增益因子 Q 为 10 的等离子体；产生 Q 值超过 5 的稳态等离子体；维持 480 秒的稳态聚变脉冲；聚变等离子体可自持；验证氙增殖概念；完善中子屏蔽/热转换技术	探索新的加热方式与能量损失机制；用环向超导磁体产生 5.3 特斯拉的强磁场，实现长脉冲的维持，改善等离子体的约束性能；研究等离子体边界行为及控制策略，防御大尺度等离子体破裂，探索等离子体密度极限；研制防高能中子辐照材料，研制在恶劣工况下长寿命的第一壁材料；解决反应室加料排废、主动冷却、连续供电功能，探索聚变堆的最佳化设计

资料来源：澎湃新闻，国联证券研究所

ITER 计划是目前世界上仅次于国际空间站的又一个国际大科学工程计划，场址位于法国的卡达拉舍。1998 年，美国退出 ITER 后，欧、日、俄三方重新对原设计进行改进和优化，并于 2002 年完成。目前合作承担 ITER 计划的七个成员是欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国，这七方包括了全世界主要的核国家和主要的亚洲国家，覆盖的人口接近全球一半。ITER 项目的核电站将产生大约 500MW 热能，如果持续运行并接入电网，将转化为约 200MW 的电能，够 20 万户家庭使用。

图表16: ITER 主要参数

	1998 年主要参数	2002 年主要参数
聚变功率 P_t /MW	1500	500 (700)
燃烧时间/s	1000	≥ 400 ($Q \geq 10$)
中子壁负载/(MW/m ²)	1	0.57 (0.8)
大半径 R_0 /m	8.1	6.2
小半径 a /m	2.8	2
拉长比	1.6	1.70/1.85
三角形变	0.24	0.33/0.49
等离子体电流 I_p /MA	21	15 (17)
轴上磁场 B_T /T	5.7	5.3
偏滤器位形	单零	单零
辅助功率/MW	100 (加热)	73 (加热+驱动)

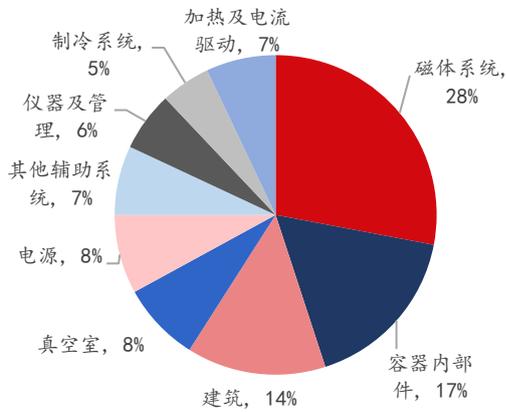
资料来源：《核聚变能源的开发现状与新进展》张国书，国联证券研究所

2020 年 7 月，ITER 托卡马克装置安装工程启动，预计 2025 年完成建设并进行第一次等离子放电试验。装置重达 23000 吨，高近 30 米，项目占地约 180 公顷，托卡马克装置的等离子体体积为 830m³。磁体系统由 18 个环形磁场磁铁、6 个极化磁场线圈、1 个 13 米高的中央螺线管、18 个超导校正线圈、31 个超导磁体馈线和 29 个非超导容器内线圈组成，其中部分超导线材由西部超导完成供应。偏滤器将由 54 个不锈钢部件组成，每个部件重 10 吨，由国光电气参与供应。

ITER 项目预估成本为 220 亿美元，其中磁体系统、容器内部件、建筑占比最高，分别达到 28%、17%、14%。在实际建造中，工厂总体成本（包括建筑成本和主机装置

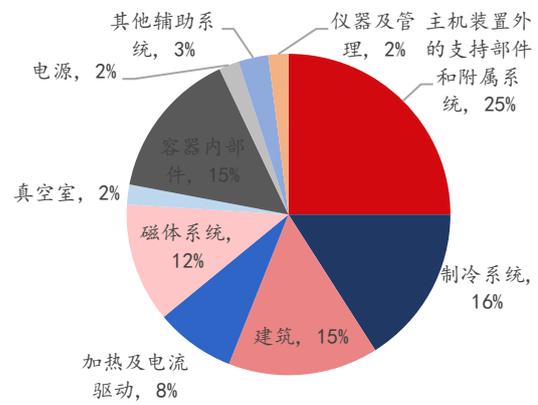
外的支持部件和附属系统) 被大大低估, ITER 的预算也在逐年上升。根据核聚变发电厂 DEMO 的成本估算, 工厂总体成本将上升至 40%, 制冷系统、容器内部件、磁体系统将分别占比 16%、15%、12%。

图表17: ITER 成本拆分



资料来源:《Superconductors for fusion: a roadmap》Neil Mitchell, 国联证券研究所

图表18: 核聚变发电厂 DEMO 的成本拆分

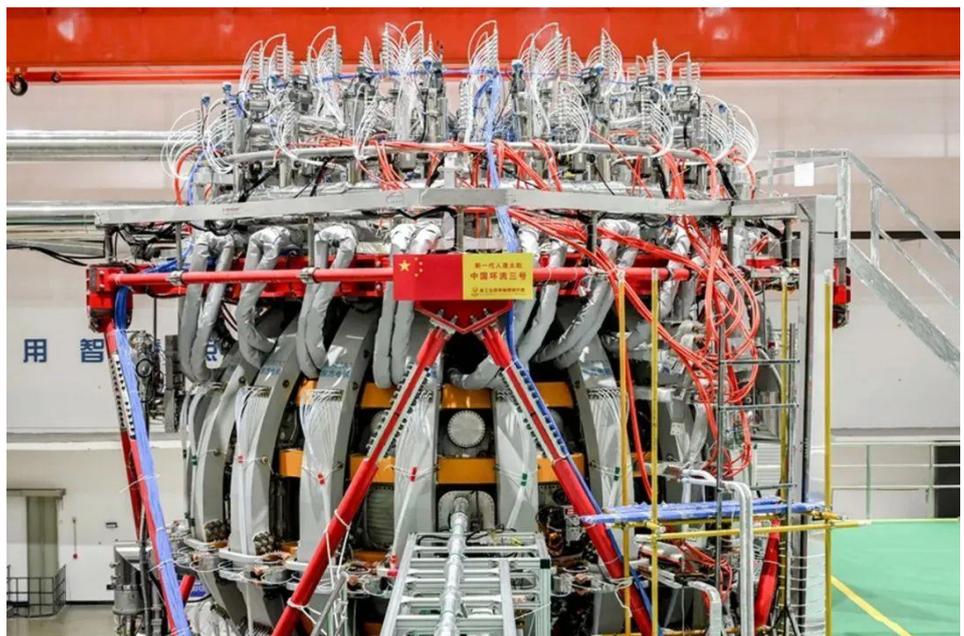


资料来源:《Superconductors for fusion: a roadmap》Neil Mitchell, 国联证券研究所

3.3 中国环流三号取得突破性进展

中国环流三号 (HL-2M) 是由中核集团西南物理研究院自主设计建造的托卡马克装置, 于 2020 年 12 月建成, 也是我国设计参数最高、规模最大的核聚变大科学装置, 被称为中国的新一代“人造太阳”。在高约束运行模式下, HL-2M 等离子体电流强度可达 250 万安培以上, 等离子体温度可达 1.5 亿度。

图表19: 环流器三号装置



资料来源: 中核集团, 央视新闻, 国联证券研究所

2023年8月，中国环流三号首次实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行，再次刷新我国磁约束聚变装置运行纪录，突破了等离子体大电流高约束模式运行控制、高功率加热系统注入耦合、先进偏滤器位形控制等关键技术难题，是我国核聚变能开发进程中的重要里程碑，标志着我国磁约束核聚变研究向高性能聚变等离子体运行迈出重要一步。2023年12月14日，核工业西南物理研究院与国际热核聚变实验堆ITER总部签署协议，宣布新一代人造太阳“中国环流三号”面向全球开放。

4. 核聚变未来展望

4.1 核聚变进入举国体制时代

1983年，国家“核能发展技术政策论证会”首次提出我国核能“热堆-快堆-聚变堆”的三步走发展战略。

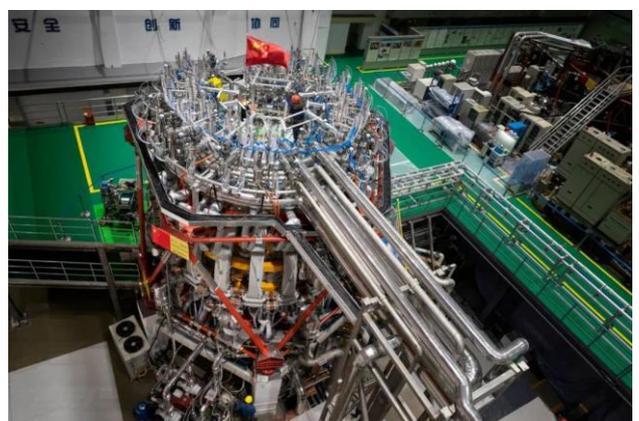
- **热堆：**我国热堆技术成熟，经济性和安全性好，装机规模、建造能力、运行业绩都已达到世界领先水平，是当前乃至未来一段时间实现核电大规模发展的主要选择。
- **快堆：**研发和部署快堆核能系统不仅可以大幅提高铀资源利用率，将人类利用核能的时间从上百年延长至数千年，还可以实现放射性废物最小化，解决核废料处理等问题，是推进核能可持续发展的不二选择。
- **聚变堆：**核聚变能源技术创新正在酝酿突破，是抢占世界能源科技创新的战略选择。我国作为最早参与设计ITER的国家之一，为ITER计划实施作出了重要贡献，目前我国已建成中国环流二号、三号，东方超环等核聚变科研装置，为我国掌握聚变核心技术提供坚实的创新基础。

图表20：中国实验快堆



资料来源：中国核工业，国联证券研究所

图表21：HL-2M核聚变装置



资料来源：中国核工业，国联证券研究所

现阶段，我国热堆已经实现了规模化、批量化、国产化发展。截至2023年9月底，我国在运核电机组55台，总装机容量为5700万千瓦；在建核电机组24

台，总装机容量为 2780 万千瓦，在运在建核电机组位居世界第二。热堆机组已经为我国能源转型作出了重要贡献，面向“双碳”目标，仍将作为在运核电机组的主力堆型，为我国实现碳达峰、碳中和发挥重要作用。

我国快堆技术研究始于 1960 年代，目前快堆正由实验堆（原型堆）转向示范堆、商业堆，其潜在的商业价值被核能界寄予厚望。6.5 万千瓦热功率的中国实验快堆的建立，标志着快堆技术实现了从 0 到 1 的突破。此外，我国 600 兆瓦电功率的快堆示范工程分别于 2017 年、2019 年开工建设，预计“十四五”期间将建成投入运行。

23 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。会上发布了第一批未来能源关键技术攻关任务，对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。目前，我国先后建成 EAST、HL-2M 等核聚变装置，工程技术正不断提升，聚变理论与物理实验、工程技术等方面达到了世界领先水平，核聚变能商业化正加快进程。

图表 22：热堆、快堆和聚变堆区别

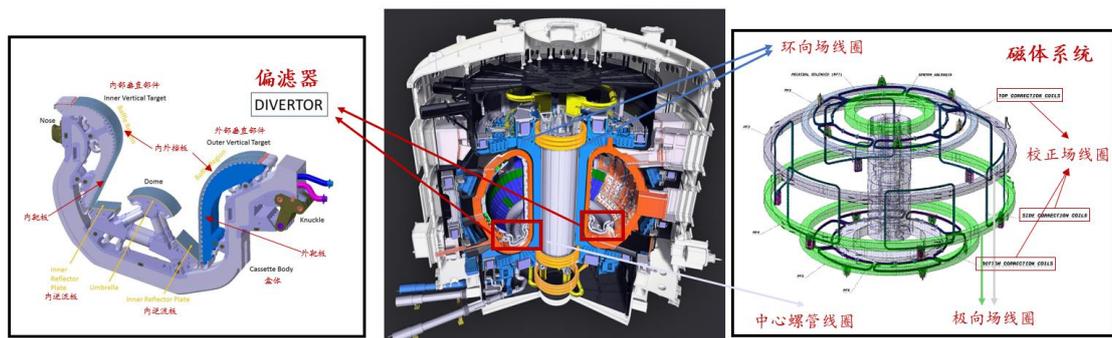
	热堆	快堆	聚变堆
所用能源类型	核裂变能	核裂变能	核聚变能
所用中子类型	中子能量小于 0.1eV 的热中子	中子能量大于 0.1MeV 的快中子	—
工作原理	将裂变时释放出的中子减速后，再引起新的核裂变，形成链式裂变反应。由于中子的运动速度与分子的热运动达到平衡状态，这种中子被称为热中子	用钚-239 为燃料，并在其外包裹一层铀-238。钚-239 裂变时释放多个中子，外围的铀-238 就会捕捉这些快中子，并转变为可裂变的钚-239。这样，核燃料越烧越多，快速增殖	用氢的同位素氘或氚作为燃料，通过高温、高压使其发生聚变反应，释放能量
当前我国发展水平	实现了规模化、批量化、国产化发展，形成的研发体系、人才队伍等为第二步快堆、第三步聚变的研发与设计建设奠定了良好的基础	目前，我国快堆已经形成了完备的科研技术体系，示范工程有序推进，后处理示范工程按计划建设	实施了一系列聚变技术攻关，先后建成 EAST、HL-2M 等核聚变装置，工程技术不断提升，研究和技术水平取得了长足进步，聚变理论与物理实验、工程技术等方面达到了世界领先水平
展望	核能多用途利用在更广泛领域支持清洁低碳转型，核能供热规模不断增大，核能海水淡化技术不断突破，规模化应用初现成效，核能制氢实现多场景应用，经济性不断提升	到 2060 年，预计我国快堆在运在建装机规模约 1.8 亿千瓦，其中在运装机规模 1.53 亿千瓦，在建装机规模 2800 万千瓦	2030 年，实现可控核聚变；2040 年，建成聚变先导工程实验堆，实现聚变能量输出；2045 年，我国聚变示范堆建成，演示氘自持；2050 年及以后，建成聚变商用堆，实现聚变能源应用，逐步提升经济性，积极推广商业化。

资料来源：中国能源报，中核集团，电联新媒、中国核工业，国联证券研究所整理

4.2 托卡马克是核聚变技术路线首选

托卡马克，一种利用磁约束来实现受控核聚变的环形容器，最初在 20 世纪 50 年代由苏联科学家提出。托卡马克通过在环形真空室中构造闭合的螺旋磁场，完成对高温等离子体的约束，聚变燃料在周而复始运动中完成核聚变反应。在托卡马克环形真空室周围，分布着若干个环向场（纵场）线圈、中心螺管（欧姆加热）线圈、极向场线圈等几类磁体，等离子体运行中磁体通入电流产生磁场，以激发和控制等离子体。

图表23：托卡马克结构示意图



资料来源：Tokamak, ITER 官网，中国国际核聚变能源计划执行中心，国联证券研究所

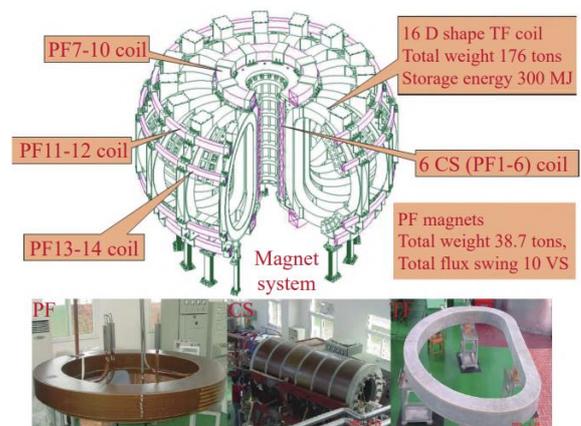
聚变能发展已步入全超导托卡马克时代。铜作为导体绕制线圈不可避免存在发热问题，从而限制了磁约束核聚变的长时间稳态运行。超导体具有零电阻效应，且可承载电流密度更高，因此有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，有效改善长脉冲稳态运行。20 世纪后期，超导技术开始被用于托卡马克装置，2006 年，等离子体物理研究所自主研发并建成世界上第一个全超导托卡马克实验装置 EAST。

图表24：托卡马克装置



资料来源：Jamison Daniel, Oak Ridge Leadership Computing Facility, 国联证券研究所

图表25：EAST 超导磁体系统



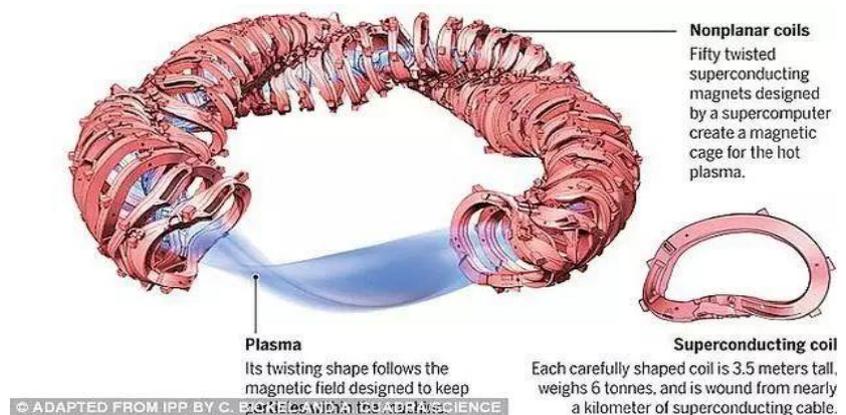
资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，国联证券研究所

仿星器是指一种外加有螺旋绕组的磁约束聚变实验装置，由闭合管和外部线圈组成，闭合管呈直线形、“跑道”形或空间曲线形。常见的仿星器具有两对或三对螺

旋绕组,前者磁面形状类似于椭圆,后者则近似于三角形。相邻螺旋绕组中通以大小相等方向相反的电流,螺旋绕组产生的磁场和纵向磁场合成后,磁力线产生旋转变换,因而能约束无纵向电流的等离子体。

仿星器结构复杂,制造难度更大。仿星器最早由美国科学家莱曼于1951年提出,与托卡马克相比,具有稳态运行的优势。然而传统仿星器磁场的波纹度比托卡马克大,导致其新经典输运水平和高能粒子损失水平高于托卡马克,且由于仿星器需要三维结构线圈,结构更复杂,制造难度更大,成本更高,目前未被作为聚变堆技术路线的首选。

图表26: 仿星器示意图



资料来源: 中科院物理所, 国联证券研究所

4.3 超导磁体+偏滤器是托卡马克关键组成部分

核聚变产业链包括上游原材料供应到中游技术研发、设备生产制造,及下游核电应用等。

- **产业链上游:** 上游覆盖有色金属 (钨、铜等)、特种钢材、特种气体 (氘、氚) 等原料供应。
- **产业链中游:** 中游覆盖聚变技术研发、装备制造 (第一壁、偏滤器、蒸汽发生器、超导磁线圈等组件) 及仿真、控制软件的开发。核电设备主要由核岛、常规岛及辅助设备三大系统构成,其中核岛是整个核电站的核心,负责将核能转化为热能,是核电站所有设备中工艺最复杂、投入成本最高的部分,投资成本占比达到 58%, 并且市场参与者较少。
- **产业链下游:** 下游涵盖核电站运营及设备应用, 主要目标市场为发电。

图表27：核聚变产业链



资料来源：各公司官网，国联证券研究所整理

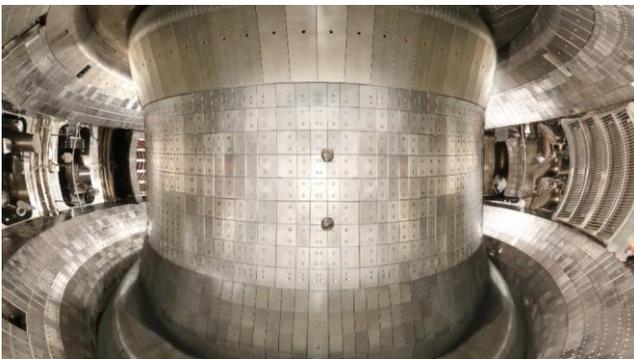
(1) 高温超导技术发展缩短可控核聚变装置建设周期

超导磁体是磁约束可控核聚变中托卡马克装置的关键组成部分，几乎占托卡马克成本的一半。目前，高温超导线材良率已提升至90%，开始工业化应用，基于高温超导材料的强磁场小型化托卡马克技术路线有望大幅降低聚变装置成本，建设期或将缩短到3至4年，大幅缩短技术迭代周期，也使聚变发电初步具备了商业化潜力。

(2) 偏滤器发展提高核聚变装置安全性和使用寿命

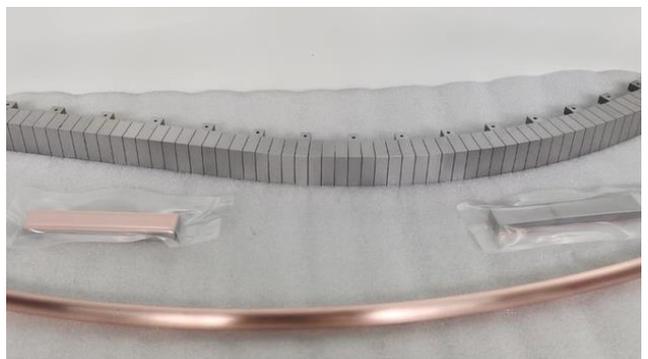
偏滤器，是核聚变反应堆的重要组成部分，负责连接中心等离子体与聚变燃料，是两者相互作用的主要区域，性能优劣直接影响核聚变装置的运行安全性与使用寿命，因此其材料选择、结构设计、制造工艺、检验测试等环节均有极高要求。

图表28：托卡马克中的偏滤器整体图



资料来源：科技日报，国联证券研究所

图表29：托卡马克中的偏滤器部分图



资料来源：科技日报，国联证券研究所

5. 投资建议：关注托卡马克相关产业链机会

我们推荐核电龙头中国核电（601985.SH），龙头运营商中国广核（003816.SZ），

核级阀门主要供应商**江苏神通 (002438.SZ)**，核电设备龙头**东方电气 (600875.SH)**。建议关注主氦风机主要供应商**佳电股份 (000922.SZ)**，核级阀门领军企业中核科技**(000777.SZ)**，超导材料供应商**西部超导 (688122.SH)**、**联创光电 (600363.SH)**以及偏滤器供应商**国光电气 (688776.SH)**。

➤ 各公司简要情况概览

中国核电：公司是中国核工业集团旗下唯一核电运营平台，已储备多个高温气冷堆项目。截至2023年12月，公司控股在运机组25台，在建机组9台，总装机/在建装机容量分别达到2375万千瓦/1012.9万千瓦。

中国广核：公司是中国广核集团的核电运营上市主体，主营业务为建设、运营及管理核电站，销售核电站所发电量，组织开发核电站的设计及科研工作。截至2023年12月，公司控股27台在运机组，装机容量3056万千瓦，在建机组7台，核准待建机组2台。截至2023年9月底，公司管理的在运、在建及核准待建机组核电总装机容量占全国核电行业总运行装机容量的43.18%。

江苏神通：公司主要从事工业特种专用阀门的研发生产，其中核级蝶阀、核级球阀等产品被广泛运用，在线运行的核电阀门超过十五万台，2022年批复的十台机组所需的核电蝶阀、球阀等也已全部招标完成。2021年募投建设“乏燃料关键设备研发及产业化项目（二期）项目”，现已建设完成，目前处于采购设备以及安装调试阶段。

东方电气：公司是国内核电领域首家拥有设计核1级设备资质的装备制造企业，具备批量化制造核电站核岛主设备和常规岛汽轮发电机组的能力，产品覆盖引进三代（EPR、AP1000）、自主三代（华龙一号、国和一号、CAP1400），四代核电（高温气冷堆、钠冷快堆）等国内所有技术路线，核电设备市占率达到35%以上。公司自主研发的“华龙一号”达到了国际三代核电技术的领先水平，具有完整的自主知识产权。2019年6月5日，公司为HL-2M装置制造的主机磁体线圈中心成功交付。2023年12月29日，公司与25家央企、科研院所、高校等组成可控核聚变创新联合体。

佳电股份：公司保持在核电特种电机领域的领先地位。在四代堆领域，2020年主氦风机项目1、2号机组反应堆试验成功。2021年11月，公司宣布投资2.73亿元自建主氦风机成套产业化项目，建成后可实现年产6套主氦风机。2021年12月，公司交付2台主氦风机的石岛湾高温气冷堆核电站示范工程并网发电。2022年公司持续中标高温气冷堆项目的主氦风机标段，显示了公司极强竞争力。

中核科技：公司为阀门国企龙头、中核集团首家上市公司，具备从锻造到成品的阀门全工序制造能力，拥有核1级阀门生产资质，能够实现三代（华龙一号、AP1000）核电机组阀门成套供货，可以满足四代核电机组关键阀门供货。

西部超导：公司成立之初主要向国际热核聚变实验堆项目（ITER）提供符合综合

性能要求的超导线材产品，是国内唯一实现超导线材商业化生产的企业，也是国际上唯一实现铌钛铸锭、棒材、超导线材生产及超导磁体制造全流程企业。2019年，ITER项目超导产品交付完结。目前已开始向国家重大科技基础设施项目-聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）批量供货低温超导线材。公司开发的新一代高性能电流密度 Nb3Sn 线材将为核聚变新项目“紧凑型聚变能实验装置”（BEST）供货。

联创光电：公司是国内领先可以设计制造中心磁场 15-20T 超大口径高温超导磁体的企业。23 年 9 月，子公司联创超导突破了基于核聚变应用场景的百米级集束线缆的研发与制造。23 年 11 月，联创超导和中核聚变（成都）设计研究院有限公司签订协议，联合建设可控核聚变项目，主要供应该项目主机装置建设中的高温超导磁体系统和低温制冷系统，两者约占主机装置建设成本的一半。

国光电气：公司从事核工业领域产品，包括核工业领域专用泵、阀门以及 ITER 配套设备。公司研制的偏滤器已应用于 HL-2M 等托卡马克装置；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；ITER 所需包层第一壁板（FW）已经完成样件制造，进入工艺的验证阶段；ITER 所需工艺设备已用于 ITER 相关的试验、测量及生产工艺之中。

6. 风险提示

项目建设不及预期，核电安全事故风险

分析师声明

本报告署名分析师在此声明：我们具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，本报告所表述的所有观点均准确地反映了我们对标的证券和发行人的个人看法。我们所得报酬的任何部分不曾与，不与，也将不会与本报告中的具体投资建议或观点有直接或间接联系。

评级说明

投资建议的评级标准		评级	说明
报告中投资建议所涉及的评级分为股票评级和行业评级（另有说明的除外）。评级标准为报告发布日后6到12个月内的相对市场表现，也即：以报告发布日后的6到12个月内的公司股价（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。其中：A股市场以沪深300指数为基准，新三板市场以三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）为基准；香港市场以摩根士丹利中国指数为基准；美国市场以纳斯达克综合指数或标普500指数为基准；韩国市场以柯斯达克指数或韩国综合股价指数为基准。	股票评级	买入	相对同期相关证券市场代表指数涨幅20%以上
		增持	相对同期相关证券市场代表指数涨幅介于5%~20%之间
		持有	相对同期相关证券市场代表指数涨幅介于-10%~5%之间
	行业评级	卖出	相对同期相关证券市场代表指数跌幅10%以上
		强于大市	相对同期相关证券市场代表指数涨幅10%以上
		中性	相对同期相关证券市场代表指数涨幅介于-10%~10%之间
		弱于大市	相对同期相关证券市场代表指数跌幅10%以上

一般声明

除非另有规定，本报告中的所有材料版权均属国联证券股份有限公司（已获中国证监会许可的证券投资咨询业务资格）及其附属机构（以下统称“国联证券”）。未经国联证券事先书面授权，不得以任何方式修改、发送或者复制本报告及其所包含的材料、内容。所有本报告中使用的商标、服务标识及标记均为国联证券的商标、服务标识及标记。

本报告是机密的，仅供我们的客户使用，国联证券不因收件人收到本报告而视其为国联证券的客户。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但国联证券对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告中的信息、意见等均仅供客户参考，不构成所述证券买卖的出价或征价邀请或要约。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。客户应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专家的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，国联证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。

本报告所载的意见、评估及预测仅为本报告出具日的观点和判断。该等意见、评估及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，国联证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

国联证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。国联证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。国联证券的资产管理部门、自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

特别声明

在法律许可的情况下，国联证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。因此，投资者应当考虑到国联证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突，投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一参考依据。

版权声明

未经国联证券事先书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、转载、刊登和引用。否则由此造成的一切不良后果及法律责任有私自翻版、复制、转载、刊登和引用者承担。

联系我们

北京：北京市东城区安定门外大街208号中粮置地广场A塔4楼

无锡：江苏省无锡市金融一街8号国联金融大厦12楼

电话：0510-85187583

上海：上海市浦东新区世纪大道1198号世纪汇二座25楼

深圳：广东省深圳市福田区益田路6009号新世界中心大厦45楼