

# 可控核聚变：从科幻到商业

## ——电力设备行业深度报告

分析师：杨阳

SAC执业证书编号：S0230523110001

联系人：许紫荆

SAC执业证书编号：S0230124020004

2024年04月30日

# 摘要

- **可控核聚变的优势和原理：**核聚变能即小质量元素的原子核（通常是氘和氚）聚合成为重核所释放的能量。与核裂变相比，可控核聚变释放能量大，原料来源丰富，安全可靠、不产生放射性废物，2023年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唯一方向。“聚变”的实现需要同时满足三个条件：足够高的温度、一定的密度和一定的能量约束时间，聚变的“可控”理论上通过可磁约束、激光约束和箍缩实现，目前世界上主流路线为磁约束装置托卡马克。
- **当前进展与商业化可能：**1968年后苏联科学家发明的托卡马克装置成为主流路线，并经历了托卡马克→超导托卡马克→全超导托卡马克的技术迭代升级。2006年，中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯、美国等正式签署ITER协定并于2007年成立ITER国际组织实施计划，项目总计划投资高达200亿欧元。2023年，美国NIF装置创造能量净输出记录，日本JT-60SA也成功实现点火，我国EAST装置也不断刷新等离子体运行记录。据美国聚变能协会FIA统计，截至2023年初全世界核聚变公司吸引了超过60亿美元的投资，全球43家聚变能公司中有26家认为聚变供电将在2035年之前实现，19家认为届时聚变发电将具备商业可行性。我国目前有2个前期建设阶段项目，总投资计划接近300亿元，将为相关产业链提供重大机遇。
- **可控核聚变产业链：**可控核聚变产业链上游为原材料，包括第一壁材料钨、高温超导带材原料REBCO和氘氚燃料；中游为相关设备，核心设备包括超导磁体、第一壁和偏滤器，其中超导磁体占总投资成本约40-50%。高温超导磁体可大幅提升磁场强度，是装置运行的核心部件，第一壁的作用是控制进入等离子体的杂质、传递辐射到材料表面的热量等，偏滤器的作用是控制等离子体与真空室壁面的相互作用，减少壁面的热负荷和粒子轰击；产业链下游为应用环节，核聚变技术主要用于发电、医疗、科研等领域。
- **投资建议：**近年来，全球领域可控核聚变技术突破和商业投资加速，将为相关产业链带来重大机遇。首次覆盖，给予行业“推荐”评级。个股方面，建议关注超导磁体环节**联创光电**，高温超导带材制造商**精达股份**、**永鼎股份**，低温超导带材**西部超导**，偏滤器制造商**国光电气**、**安泰科技**等。
- **风险提示：**行业政策不及预期，重要技术进展不及预期，相关投资不及预期，建设进展不及预期，运行实验结果不及预期，设备交付不及预期，商业化进展不及预期，重点关注公司业绩不及预期等。

# 目录

1

可控核聚变：“聚变”与“可控”的原理

2

当前进展与商业化可能

3

可控核聚变产业链

4

相关公司及投资建议

5

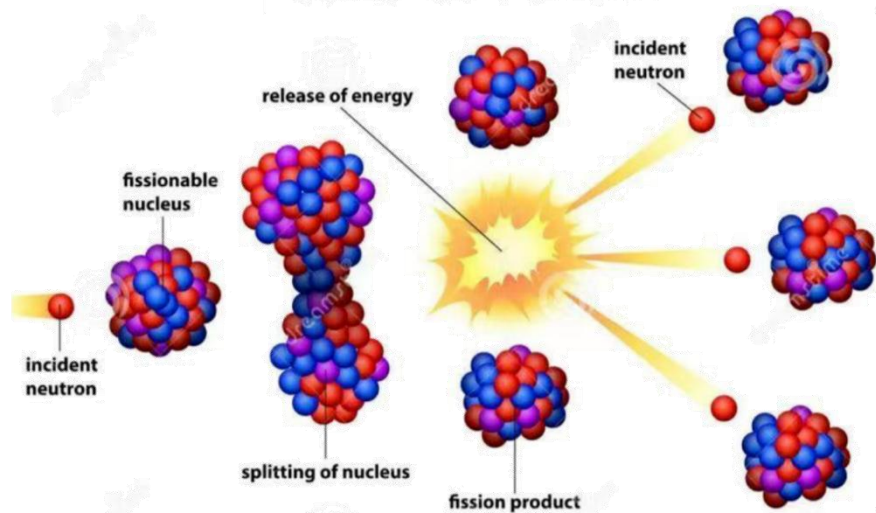
风险提示

核能是一种清洁高效的能源，核变化释放的能量可以分为两种类型：

1) 核裂变 (nuclear fission)，即重元素的原子核分裂为质量较轻元素的原子核时所释放的能量。铀是核裂变的关键原料，铀原子在中子的轰击下会裂变为钡和氪，裂变时会产生大量能量，同时还会产生3个新的中子，激发其他铀原子裂变。目前核能发电用的主要是裂变技术，核裂变技术还用于原子弹中。

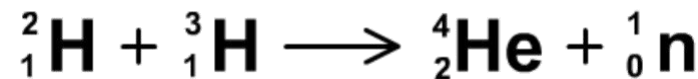
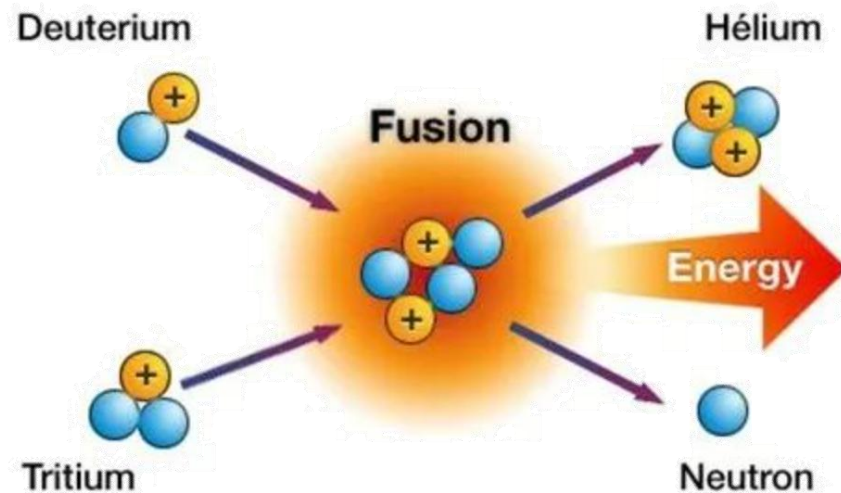
2) 核聚变 (nuclear fusion)，即小质量元素的原子核聚合成为重核所释放的能量。氘和氚聚合在一起会产生氦和1个中子，同时可以释放出能量。

图1：核裂变示意图



数据来源：洞察化学，华龙证券研究所

图2：核聚变示意图

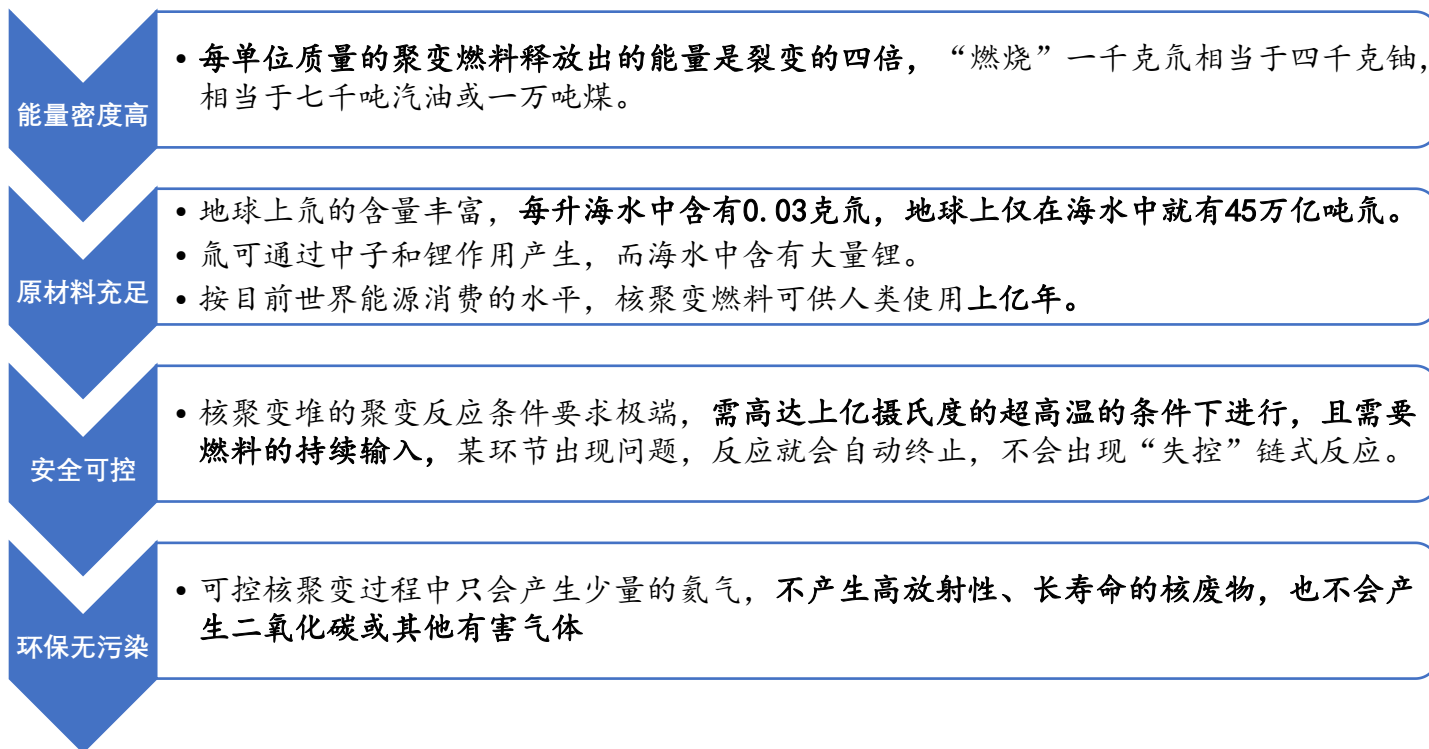


数据来源：洞察化学，华龙证券研究所

# 可控核聚变能量密度高、原料丰富、安全无污染

- 与核裂变相比，可控核聚变释放能量大，原料来源丰富，安全可靠、环境友好、产生的放射性废物少。从能量密度来看，每单位质量的聚变燃料释放出的能量是裂变的4倍；从原材料来看，聚变燃料通常使用氘和氚，地球上氘储量丰富，氚可以通过中子和锂制备，而核裂变采用的铀元素我国储量有限仍需进口，2023年进口量1.7万吨，进口金额达到19亿美元；从安全性来看，聚变实现难度高，且不产生放射性废料，而核裂变是链式反应，难以控制，并产生大量放射性物质，切尔诺贝利（1986年）和福岛（2011年）福岛核事故曾造成巨大危害。
- 2023年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唯一方向。

图3：核聚变的优势



数据来源：创新中心CXZX，华龙证券研究所

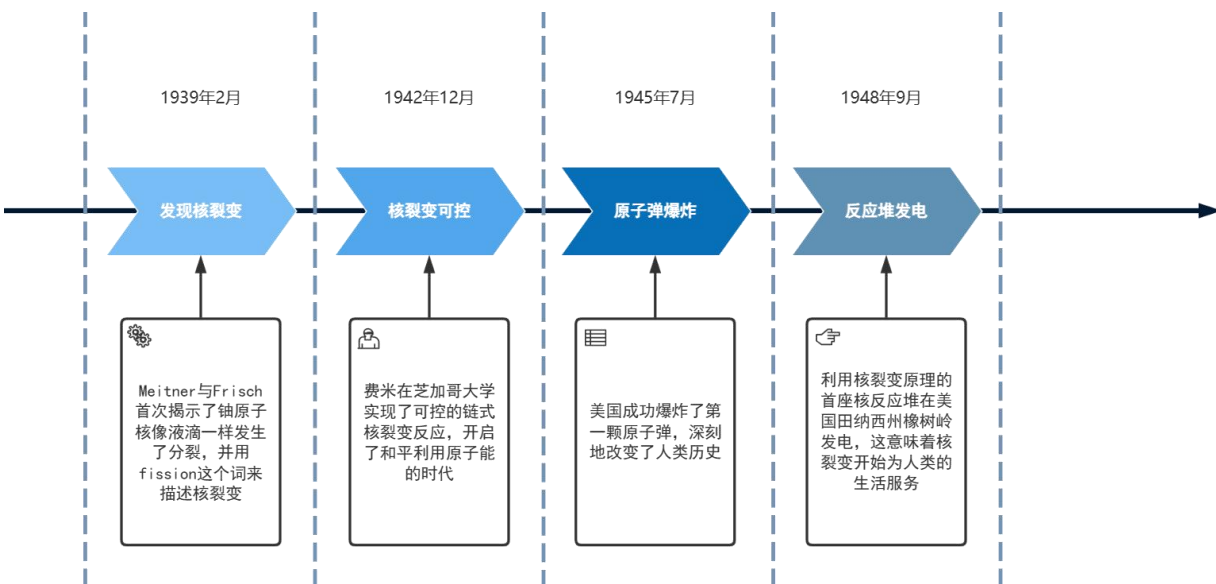
图4：我国铀资源进口量



数据来源：Wind，华龙证券研究所

- 核裂变从实验室走向裂变电站仅用了约10年。1939年，科学家首次揭示了铀原子核的分裂现象；1945年，利用核裂变原理制造出的第一颗原子弹在美国阿拉莫戈多沙漠爆炸；3年后，第一座核裂变电站便在美国田纳西州橡树岭实现发电。1951年，利用核聚变原理制造的氢弹在太平洋上的恩尼威托克岛实现爆炸，然而至今70年人类依然未能实现可控核聚变发电。
- 核聚变无法复制核裂变发电的模式。从核裂变的反应方程式可以看出，核裂变的触发需要中子（n）。当铀核由1个中子引发裂变时，会同时放出2-3个中子，这些中子可以再引起其他铀核裂变，裂变反应可不断持续下去，这一过程也被称为链式反应。通过加入控制棒吸收核裂变产生的中子，可以控制核裂变的反应速率，从而实现核裂变发电。而核聚变的反应过程则不需要中子，因此无法复制核裂变控制反应速率的方式。

图5：核裂变发展路线示意图



数据来源：《核裂变——无尽的探索》裴俊琛等，华龙证券研究所

图6：核聚变无法复制裂变发电的模式

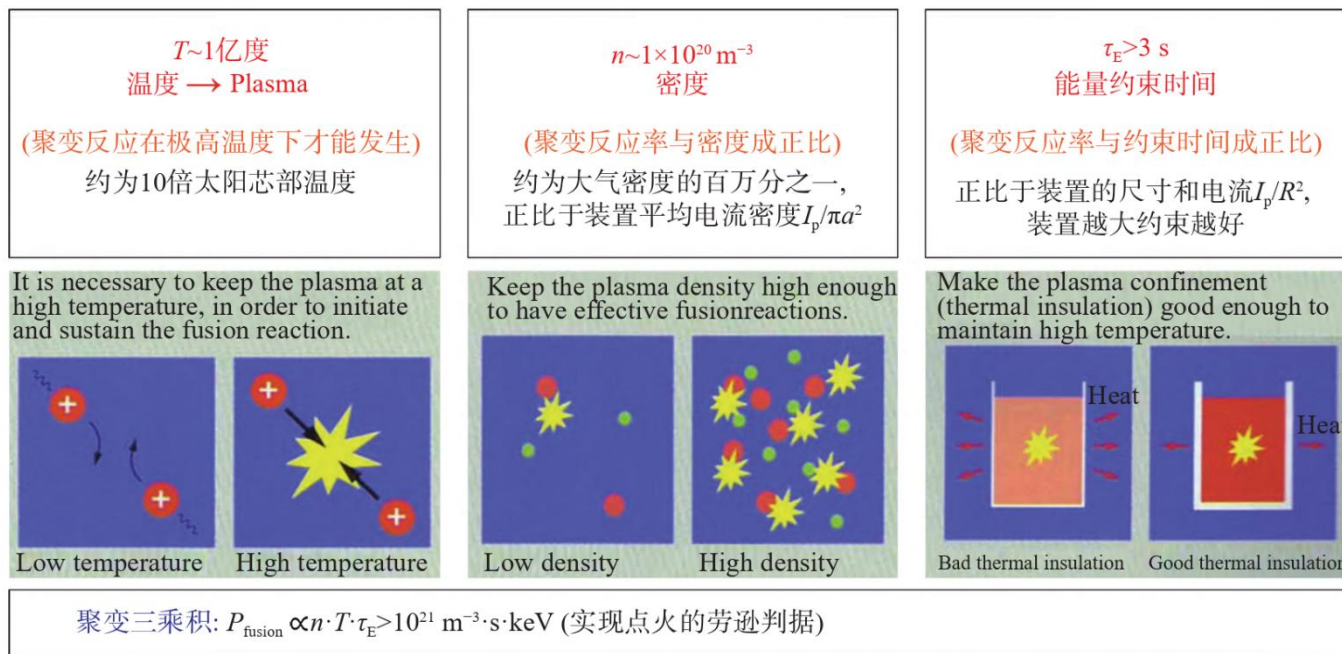
反应	反应方程式
核裂变	$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{139}\text{Xe} + ^{95}\text{Sr} + 2\text{n}$
核聚变	$^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{141}\text{Ba} + ^{92}\text{Kr} + 3\text{n}$
	$\text{D} + \text{D} \rightarrow ^3\text{He} + \text{n}$

数据来源：深度产业研究院，华龙证券研究所

# 01 如何实现“聚变”：温度、密度、时间

- 实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：足够高的温度、一定的密度和一定的能量约束时间，三者的乘积称为聚变三乘积。根据劳逊判据，只有聚变三乘积大于一定值，才能产生有效的聚变功率输出。
- 1) 足够高的温度：要在地球实现高效核聚变反应，温度大约需要维持在1亿°C以上可获得较高反应几率，这个温度是太阳核心温度的近10倍；2) 一定的密度：等离子体约束区单位体积内氘氚原子核的数量越多，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，能量损失的时间被定义为能量约束时间，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。

图7：实现聚变反应的三要素



数据来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾，华龙证券研究所

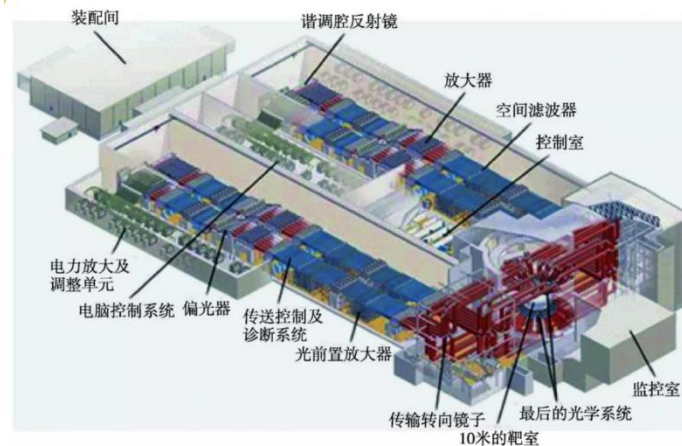
- 解决核聚变温度、密度、约束时间三个方面的“可控”主要有三种路径：磁约束、激光约束和箍缩。
- 1) **激光约束**：采用多台超大功率激光器，对准封装核燃料的氘气小球，同时发射激光，加热和压缩氘燃料，激光在进入环空器后，会击中内壁并使其发出X射线，然后这些X射线可以将其加热到1亿摄氏度，高能激光会使小球表面等离子体化，其余中心材料受到牛顿第三定律驱使，最终会向中央坍塌发生内爆。在内爆时，只要对燃料球给予正确的高温高压就能发生反应，放出大量能量。
- 2) **箍缩**：跟激光聚变类似，把激光换成电流。
- 3) **磁约束**：利用磁场约束带电粒子沿磁力线运动，发生核聚变反应需要把核聚变燃料氘氚加热到上亿度，形成等离子体，使得质子不被电子包裹，做高速热运动，两个质子发生碰撞，产生热量；由于等离子体温度极高，通过磁场约束质子运动，从而避免等离子体接触到容器。磁约束核聚变被看做较为可行的路径，我国采用的是磁约束路线。

表1：三个“可控”的实现方式

	磁约束	激光聚变	箍缩
典型装置	托卡马克和仿星器	激光聚变装置(NIF, 神光)	Z-pinch, $\theta$ -pinch
控制密度	使用磁场防止等离子体外泄	外力压缩(激光)	外力压缩(电流)
控制温度	外界能量注入	外力压缩时直接加热	
控制约束时间	调整等离子体的运行模式, 延长约束时间	能量耗散难以控制, 因此希望聚变功率足够高, 使聚变功率大于能量耗散	

数据来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变》王腾等，华龙证券研究所

图8：世界上最大的激光聚变装置NIF（美国）



数据来源：中国物理学会期刊网，华龙证券研究所



- 磁约束核聚变实现装置主要是托卡马克和仿星器。
- 托卡马克在1958年由苏联科学家发明，主要由环形真空室、产生磁场的线圈和其他辅助设施组成。中央是一个环形真空室，里面注满气体，外面缠绕着线圈。线圈通电后，会在托卡马克内部产生巨大的螺旋型磁场，里面的气体将被电离成等离子体并形成等离子体电流。当等离子体被加热到极高温后，便可实现核聚变。
- 相比仿星器，托卡马克的优点在于：1) 结构简单、造价低，只需要真空室和线圈，线圈的结构是规则的，比仿星器扭曲的线圈造价低太多。生产周期更短，规则的线圈可以很快造出来，装置迭代也更快。2) 加热成本低，可以直接依靠线圈进行加热，而仿星器不能依靠线圈直接加热，只能依靠比较昂贵的微波和中性束的手段去加热。
- 托卡马克是目前全球各国投入最大、最接近核聚变条件、技术发展最成熟的途径。

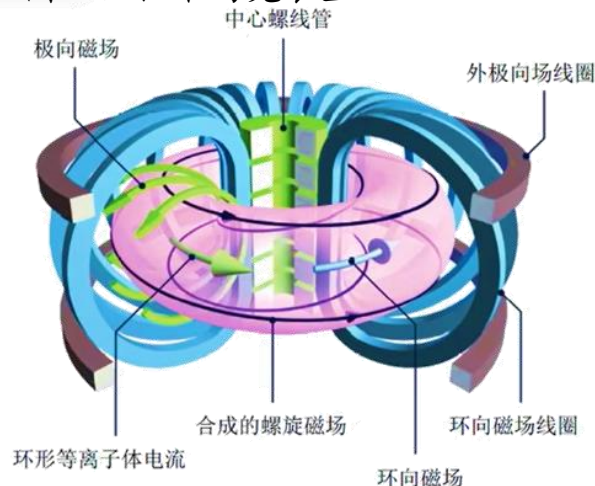
图9：“托卡马克”释义

Tokamak=环形的、有磁场线圈的真空室

- to → toroidal/тороидальная, 环形的
- ka → chamber/камера, 室, 腔体
- ma → magnetic/магнитными, 磁场的
- k → coil/катушками, 线圈

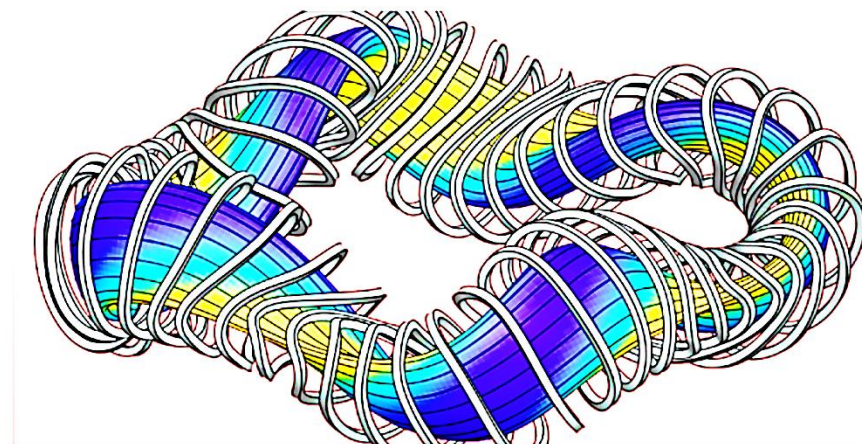
数据来源：华龙证券研究所

图10：托卡马克装置



数据来源：万象经验，华龙证券研究所

图11：仿星器装置



# 目录

1

可控核聚变：“聚变”与“可控”的原理

2

当前进展与商业化可能

3

可控核聚变产业链

4

相关公司及投资建议

5

风险提示

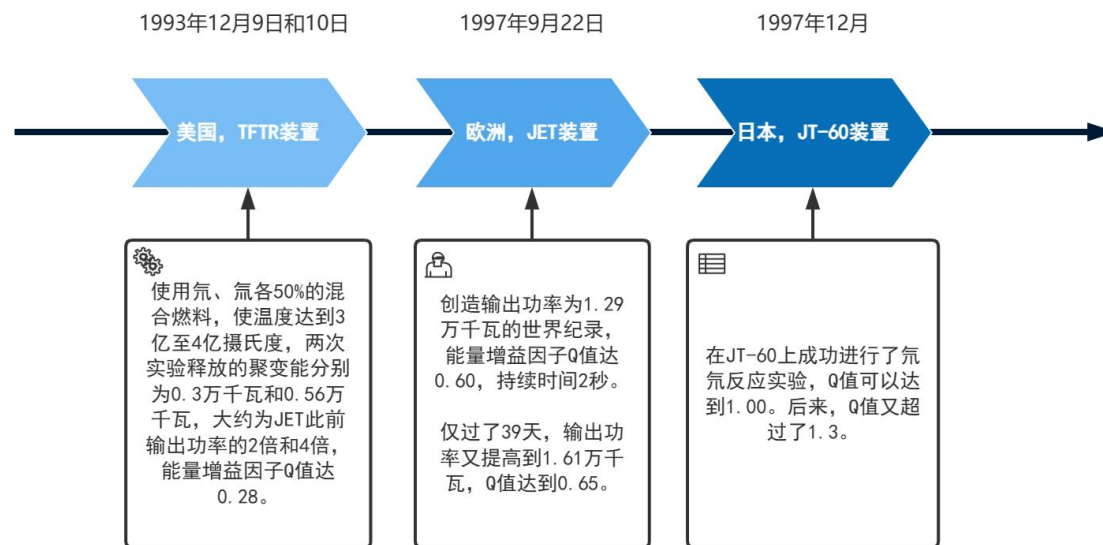
- 托卡马克装置成为主流后，相关研究发展迅速。氢弹研究出来之后，前苏联和美、英等各国就投入到可控核聚变的开发当中。世界上首台托卡马克T-1装置由阿奇莫维奇等人设计、建造，1958年建成并开始运行。两次升级改造之后，1968年8月，在苏联新西伯利亚召开的第三届等离子体物理和受控核聚变研究国际会议上，科学家阿齐莫维奇宣布在苏联的T-3托卡马克上产生了1000万度等离子体。这远远超过其他各种装置上的参数，此后托卡马克的研究进入了高速发展的时代。
- 各国相继建造或改建了一批大型托卡马克装置，比较著名的有美国的TFTR，欧盟的JET，日本的JT60和苏联的T-15。随着托卡马克的装置越建越大，产生的等离子体温度也越来越高。20世纪80年代比较著名的托卡马克有：美国的TFTR，欧盟的JET，日本的JT60和苏联的T-15，以上四个装置被称为“四大托卡马克”。其中除了T-15由于苏联解体的特殊原因没有成功运行之外，其他装置陆续取得了许多重要成果。

表2：托卡马克路线上的高速发展

时间	装置	事件
1968	T-3 (苏联)	观察到显著更好的约束效果，托卡马克装置成为主流
1970	T-4 (苏联)	实验中观察到中子，标志着首次在磁约束环境下实现聚变
1973	T-3 (苏联)	通过微波辅助加热，电子温度首次上升至一亿度
1978	PLT (美国)	通过中性束辅助加热，离子温度首次上升至一亿度

数据来源：中科院之声，华龙证券研究所

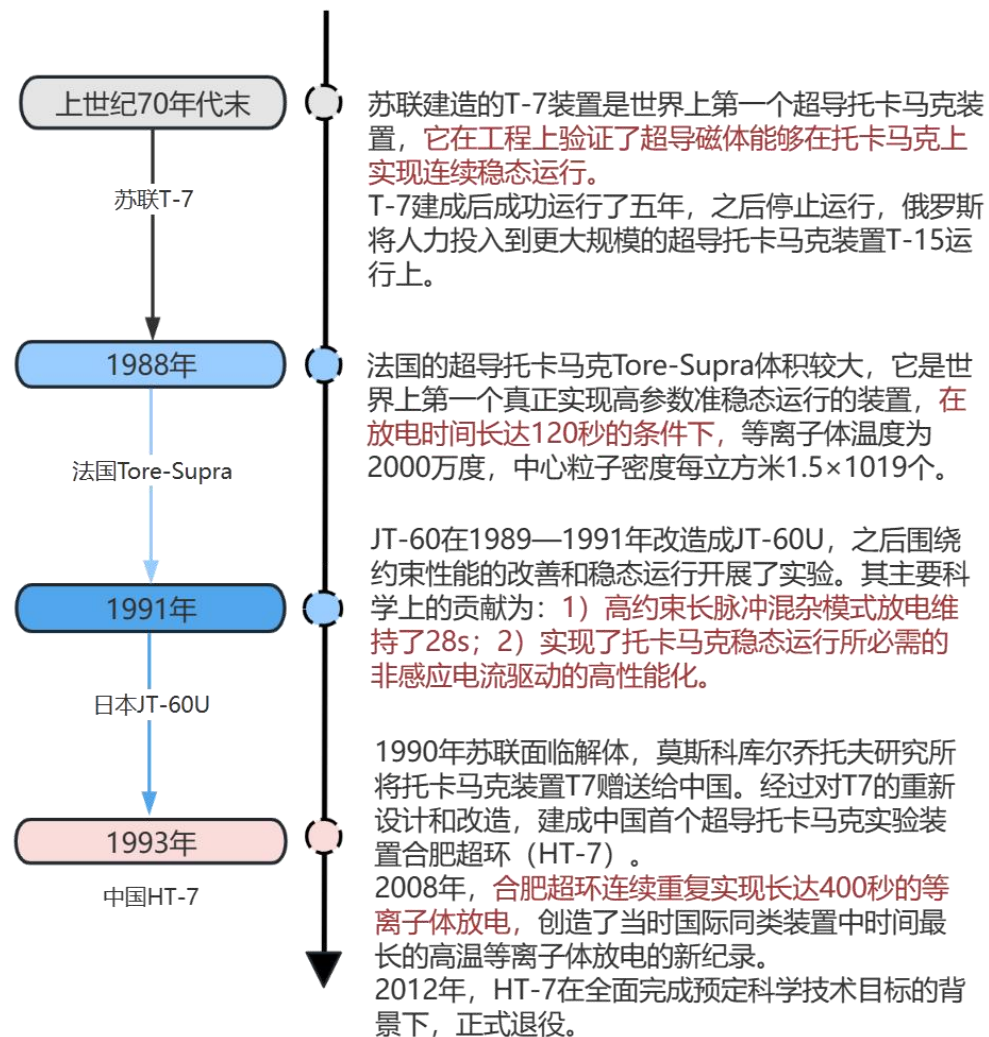
图12：TFTR、JET和JT-60的运行成果



数据来源：中科院之声，华龙证券研究所

- 世界上第一个超导托卡马克是1978年苏联的T-7，它在工程上验证了超导磁体能够在托卡马克上实现连续稳态运行。聚变电站要求数亿度的等离子体必须实现稳态运行，然而之前装置的运行结果仅仅持续数秒钟，这是因为用来产生磁场的电流非常大，常规托卡马的磁场线圈不能长时间负荷，无法实现连续运行，于是超导技术被引入到托卡马克的线圈上，以解决大电流和损耗的问题。
- 1993年HT-7建成，中国成为世界上继俄、法、日之后第四个拥有超导托卡马克的国家。HT-7的建成和成功运行使中国在托卡马克相关的超导、低温制冷、强磁场等研究都登上新的台阶。2008年，HT-7实现了长达400s的等离子体放电，这是当时国际同类装置中时间最长的等离子体放电。2012年，HT-7在全面完成预定科学技术目标的背景下正式退役。

图13：超导托卡马克发展历程及运行成果



数据来源：中科院之声，华龙证券研究所

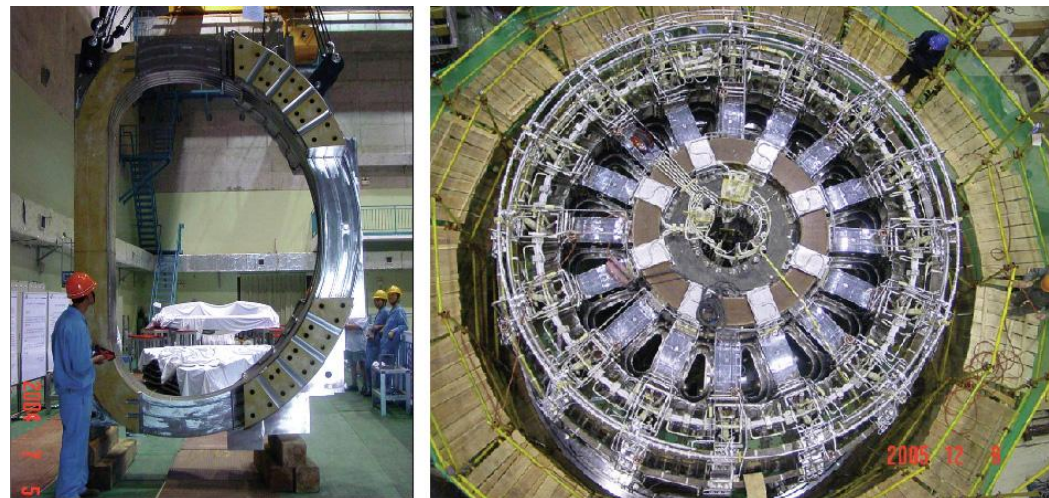
- **超导材料的全面应用推动托卡马克装置性能提升。**上述的超导托卡马克准确来说是“半超导托卡马克”，因为基本都只在纵场线圈部分实行了超导，而其他线圈还是用的普通导体材料。东方超环EAST由等离子体所于1996年提出，2006年建成，项目总经费1.65亿元，是世界上第一个在所有磁体上都使用超导材料的全超导托卡马克。
- EAST高11米、直径8米、重达400吨，超导磁体系统由16个纵场TF线圈、6个等离子体控制PF线圈和6个中央螺线管CS线圈组成。EAST所有磁体都选用了铌钛合金NbTi作为超导材料，所有线圈均采用了导管内电缆CICC技术，以提供非常高的工作电流和足够的抗交流损耗能力。

表3：世界在运全超导托卡马克

主体	建成时间	基本情况
中国EAST	2006年	<b>HT-7升级，经费1.65亿元。</b> 2016年，实现超5000万摄氏度102秒等离子体运行；2017年，实现101秒高约束模等离子体运行；2021年，实现1.2亿摄氏度101秒等离子体运行；2023年4月12日，创造403秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行的世界纪录
韩国KSTAR	2008年	KSTAR是世界上首一个采用新型超导磁体（Nb3Sn）材料产生磁场的全超导聚变装置，磁场强度是使用铌钛系统核聚变装置的3倍多。KSTAR项目于1995年开始建设，2008年开始运行。 <b>设备耗资约4亿美金。</b>
法国WEST	-	<b>Tore-Supra升级。</b> 2015年法国原子能委员会启动升级计划，2018年合肥等离子体所获得承担WEST装置456件钨铜部件的研制任务，2020年9月完成全部交付。
日本JT-60SA	2023年	<b>JT-60U升级。</b> 欧洲聚变能组织（F4E）和日本量子科学技术研究所（QST）合作开发，2023年11月点火证明该装置实现了基本功能，可将等离子体加热到2亿摄氏度并维持约100秒。

数据来源：中国工程科学，中国科学报，星环聚能，中科院合肥研究院等离子体所，中科院之声，华龙证券研究所

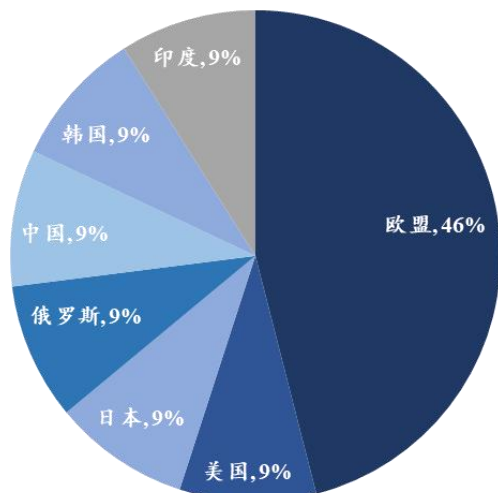
图14：ESAT的单个TF线圈和超导纵场TF磁体系统



数据来源：深圳大学学报理工版，华龙证券研究所

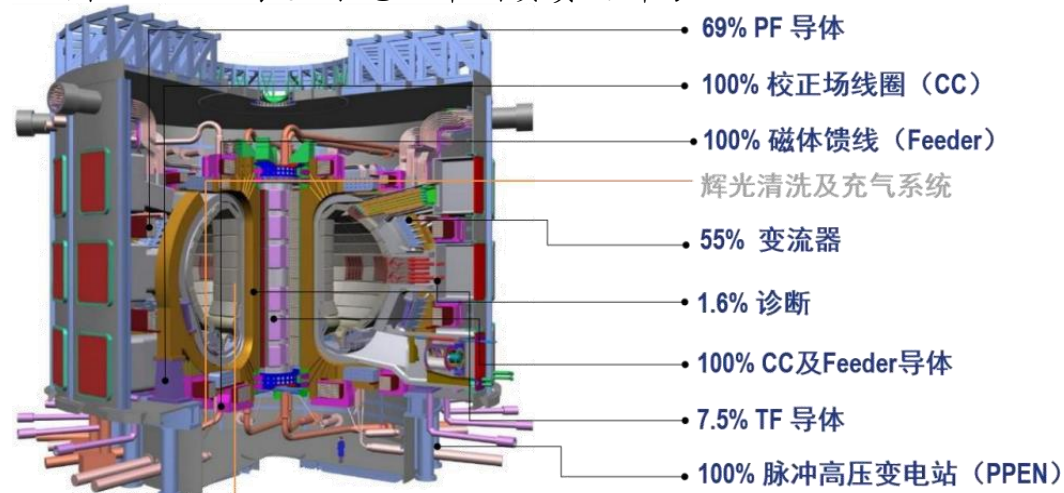
- ITER由中国、美国、欧盟等7国共同建设，总投资达200亿欧元。数代托卡马克的研究证实装置越大，磁场越强，越容易实现聚变反应和获得聚变能源，然而建造一个小型的托卡马克装置需要花费数亿-数十亿人民币，建造一个实验堆的投入需要数百亿-千亿元人民币。1985年，苏联、美国、欧盟、日本最先发起倡议建立国际热核聚变堆ITER，并于2001年完成最终设计报告。2006年，中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯、美国等正式签署ITER协定并于2007年成立ITER国际组织实施计划，项目总计划投资高达200亿欧元。
- ITER可分为主体部分、配套系统。主体部分研制难度大，主要包括磁体系统、真空室、真空杜瓦、包层模块、偏滤器五个部分。配套系统需支撑庞大的装置运转，复杂性高，主要包括电源系统、加热与电流驱动系统、冷却水系统、诊断系统、低温系统等。中国承担了ITER装置9%的采购包任务，中科院等离子体物理研究所是中方任务的主要承担单位，自2009年以来主持了超导导体、校正场线圈、磁体馈线系统等制造任务。

图15：ITER各国贡献投资占比



数据来源：中科院物理所，华龙证券研究所

图16：ITER装置示意及中国负责的部分



数据来源：中科院物理所，华龙证券研究所

世界各国核聚变技术实现快速突破。2023年11月，美国NIF装置创造能量净输出记录，日本JT-60SA也成功实现点火。

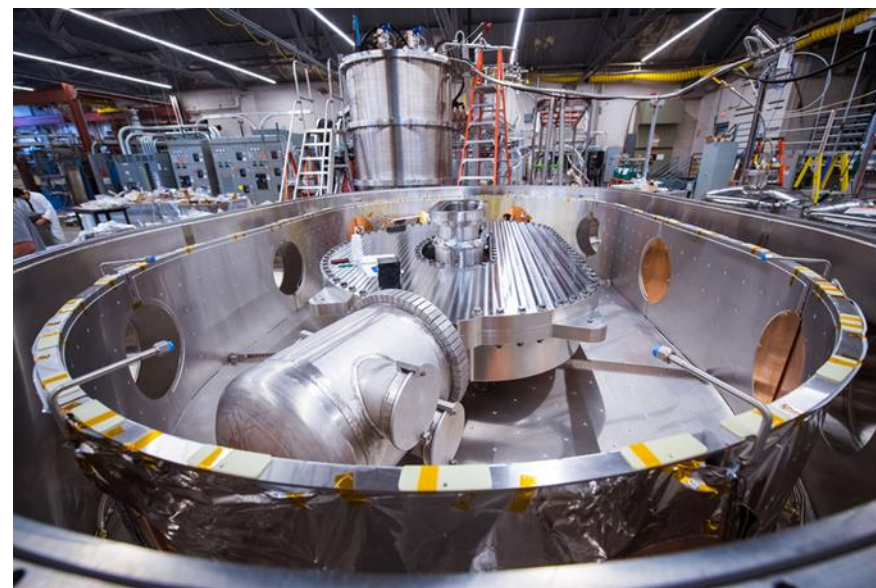
MIT研究证明高温超导应用于聚变堆有可行性。2018年以来，MIT及其衍生公司CFS公司募资约30亿美元，采用REBCO进行高温超导紧凑型聚变装置SPARC研究，投资人包括比尔盖茨、谷歌等。2021年其研制的单个10吨纵场磁体模型线圈磁场强度达到了20 tesla，即建造核聚变发电厂所需的磁场强度；2024年3月CFS发表报告进一步证明其2021年的实验设计可行。后续SPARC装置18个20吨体量的纵场磁体联合运行，还需要考虑等离子体破裂（MDE）、垂直位移（VDE）等极端工况。

表4：国际核聚变装置近期进展

主体	时间	装置类型	进展
美国国家点火设施NIF	2023年11月	激光聚变	2022年12月首次实现可控核聚变点火成功，2023年陆续进行3次点火实验成功，其中2023年12月14日实现3.88兆焦耳的输出能量、2.2兆焦耳的输入能量，创下历史最高。
日本JT-60SA	2023年11月	磁约束-托卡马克	JT-60SA成功点火，成为实用核聚变能源漫长发展进程中的一个里程碑
俄罗斯T-15MD	2023年4月	磁约束-托卡马克	2023年4月，T-15MD托卡马克装置首次实现稳定等离子体。该装置2021年5月物理启动，现正在稳定运行。
欧洲W7-X装置	2023年	磁约束-仿星器	在平均加热功率为2.7MW的情况下实现了1.3吉焦耳的能量周转，放电持续了480秒。这也是Wendelstein7-X的新纪录，也是全球最佳价值之一。
欧洲JET装置	2021年12月	磁约束-托卡马克	在欧洲联合环（JET）中，将氢的同位素氘和氚加热到了1.5亿摄氏度并稳定保持了5秒钟，同时核聚变反应发生，原子核融合在了一起，释放出59兆焦耳的能量。

数据来源：激光制造网，财联社，中核智库，中国核技术网，DeepTech，华龙证券研究所

图17：MIT研制的纵场磁体模型线圈TFMC实图



数据来源：风云之声，华龙证券研究所

- 我国核聚变关键技术已达到全球领先水平。我国核聚变能研究开始于20世纪60年代初，从20世纪70年代开始，我国选择了托卡马克为主要研究路线。1993年，中国科学院等离子体物理研究所建成了第一台超导托卡马克装置HT-7。2002年，核工业西南物理研究院建成了具有偏滤器位形的中国环流器二号A装置（HL-2A），2006年，世界上第一台全超导托卡马克装置东方超环（EAST）首次成功放电。
- 2023年12月29日，由中核集团牵头，25家央企、科研院所和高校组成了可控核聚变创新联合体，正式揭牌中国聚变能源有限公司，核聚变研究和建设正在加速推进。

表5：我国已建成的核聚变装置近年来的突破性运行成果

时间	装置	所属单位	运行成果
2020年12月	中国环流器二号M装置	核工业西南物理研究院	建成并实现首次放电，标志着我国自主掌握大型先进磁约束核聚变实验装置的设计、建造、运行技术，并为深度参与ITER计划及未来自主设计建造聚变堆提供重要技术支撑。
2021年12月	东方超环EAST	中国科学院等离子体物理研究所	实现1056秒的长脉冲等离子体运行，在长脉冲高参数运行方面取得新突破。
2022年10月	中国环流三号	核工业西南物理研究院	等离子体电流突破115万安培，标志着我国核聚变研发向聚变“点火”迈进重要一步。
2023年4月	东方超环EAST	中国科学院等离子体物理研究所	EAST在第122254次实验获得403秒稳态高约束等离子体，创造该参数下运行时间新的纪录。
2023年8月	中国环流三号	核工业西南物理研究院	首次实现100万安培等离子体电流高约束模运行，再次刷新中国磁约束聚变装置运行纪录，标志我国掌握可控核聚变高约束先进控制技术。

数据来源：中国物理学会期刊网，央视财经，华龙证券研究所



我国目前有2个前期建设阶段项目，总投资计划接近300亿元，将为相关产业链提供重大机遇。一是聚变新能计划建设紧凑型聚变能装置BEST，已于2023年8月获批，总投资约85亿；二是中核聚变计划建设聚变-裂变混合堆，已于2023年11签约，总投资超200亿元。

表6：我国主要建设中可控核聚变项目

装置	所属单位	类型	总投资	技术目标	计划进展/最新进展
中国聚变工程实验堆CFETR	国家科技部（联合中科院、核工业西南物理研究院等多个单位）	工程堆	-	I期：工程验证， $Q=1\sim 5$ ，稳态，200 MW，10 dpa II期：示范验证， $Q>10$ ，稳态，1000 MW，50 dpa	将于2030s建造完成，2050s建设原型电站。 <b>CRAFT全面建成后将是最高参数和最完备功能的磁约束核聚变研究平台</b> ，保证未来聚变工程堆建设和关键部件研发的顺利进行
洪荒70	能量奇点（团队主要来自清华大学工程物理系核能所可控聚变实验室）	基于全高温超导磁体的紧凑型托卡马克实验装置	-	将验证将全高温超导磁体应用于托卡马克装置的科学和工程可行性， <b>为研制下一代先进装置打下坚实基础</b>	2024年3月建成，将开始磁体降温和调试运行，以尽快实现等离子体放电， <b>是全球首台全高温超导托卡马克装置</b> 。 预计在2024年第二季度，星环聚能将实现等离子体加热至1700万摄氏度，完成公司可控聚变方案初步工程验证的所有环节。
紧凑型聚变能实验装置（BEST）	聚变新能（蔚来投资、中科院合肥研究院等离子体所技术支持）	紧凑型托卡马克实验装置	约85亿		2023年8月24日获合肥市庐阳区发改委批复， <b>计划于2023年开工，2026年建成运行</b>
聚变-裂变混合堆	中核聚变（核工业物理西南研究院子公司）/联创超导	混合堆	超200亿	技术目标Q值大于30，实现连续发电功率100MW	2023年11月12日签约，预计2024年开工。

数据来源：科技导报，安徽省发改委，能量奇点，亚布力企业家论坛，中复前沿，核能号，工业能源圈，华龙证券研究所

- 全球可控核聚变商业化投资加速。根据美国的聚变能产业协会（FIA）于2023年7月发布的《2023年聚变能产业报告》，截至2023年初，全世界核聚变公司吸引了超过60亿美元的投资，较2022年初的总投资额增加14亿美元，较2021年初的18.72亿美元增加40多亿美元。
- 行业预期首座聚变电厂未来10年并网发电。2023年参与FIA调查的聚变能公司数量增加13家，总数量达到43家。其中，26家公司认为聚变供电将在2035年之前实现，19家公司认为随着成本下降、效率提升，可控核聚变将在2035年前显示出商业可行性，反映出行业对于聚变发展的信心。

图18：全球可控核聚变领域公司数量及分布（家）

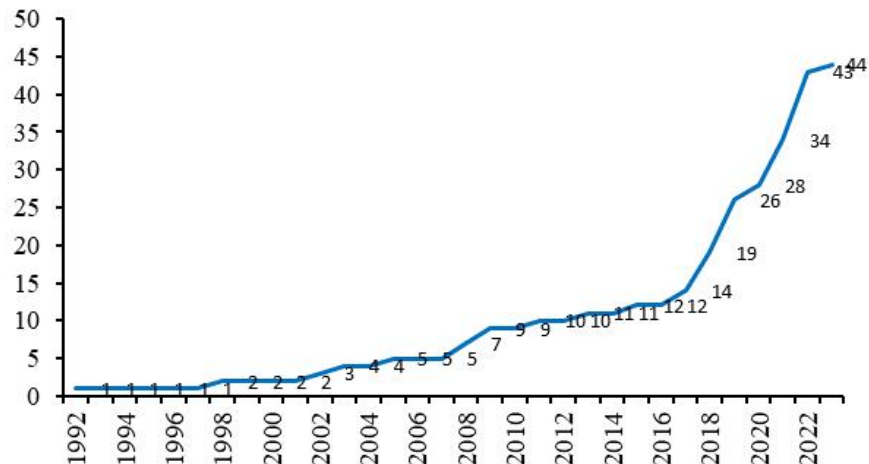
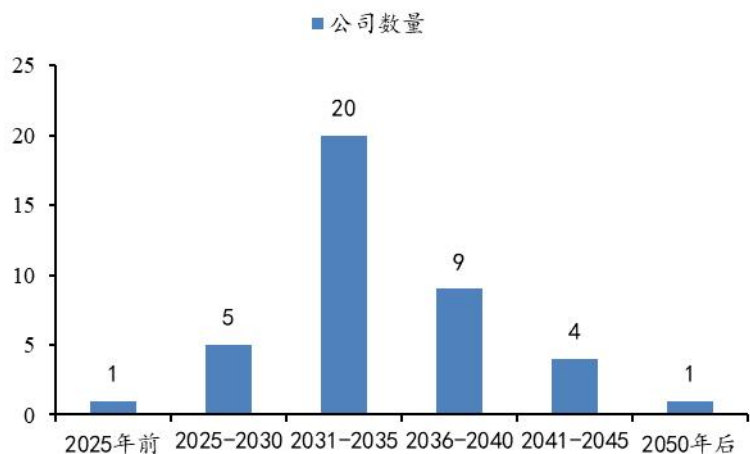
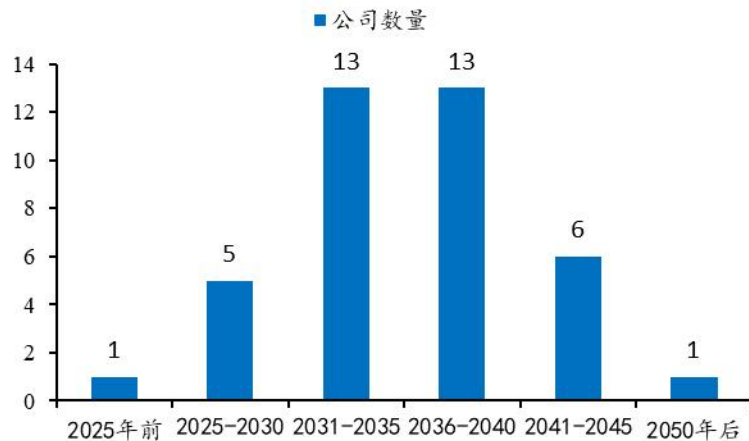


图19：40家核聚变公司对于发电时间的预测（家）图20：40家核聚变公司对于商业化时间的预测（家）



数据来源：FIA，华龙证券研究所



数据来源：FIA，华龙证券研究所



数据来源：FIA，华龙证券研究所

# 目录

1

可控核聚变：“聚变”与“可控”的原理

2

当前进展与商业化可能

3

可控核聚变产业链

4

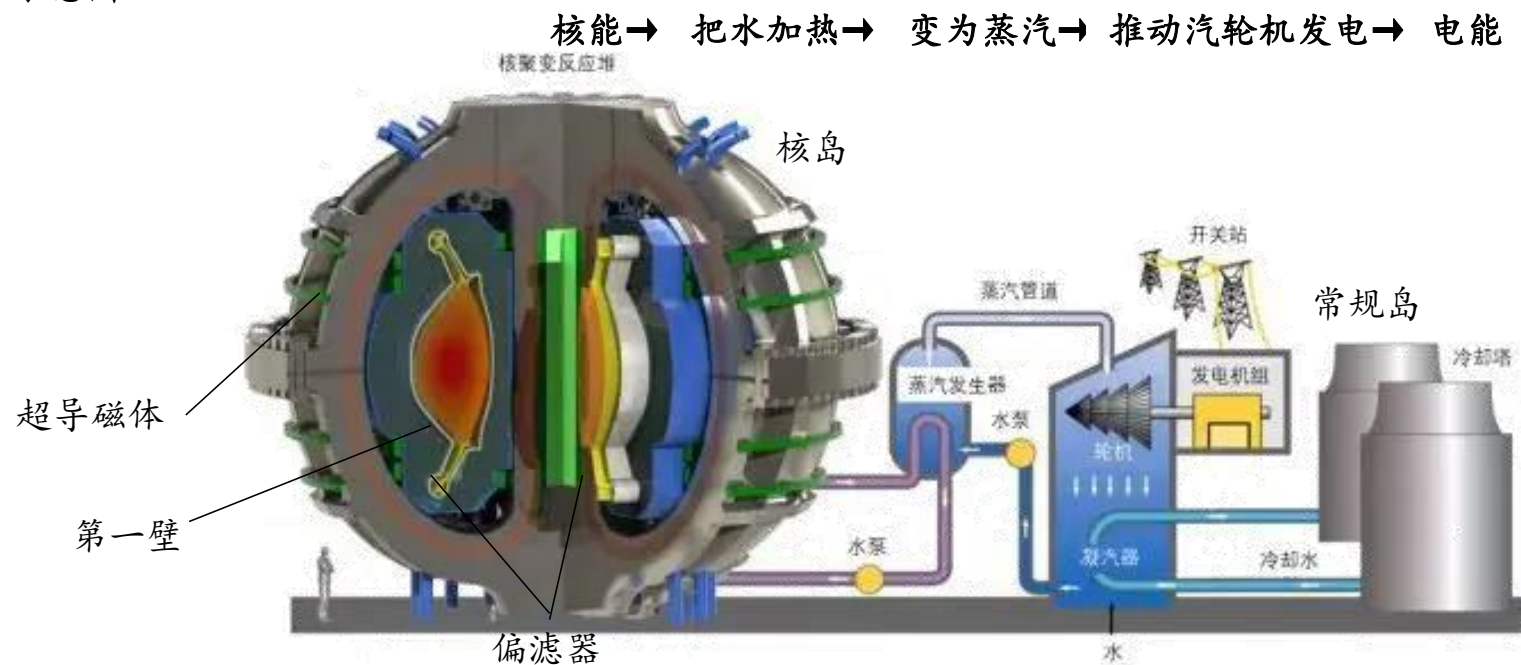
相关公司及投资建议

5

风险提示

- 可控核聚变释放出的大量核能，需要通过核电站转化为电能。核燃料在反应堆中通过核聚变产生的热量加热一回路高压水，一回路水通过蒸汽发生器加热二回路水使之变为蒸汽。蒸汽通过管路进入汽轮机，推动汽轮发电机发电。整个过程的能量转换是由核能转换为热能，热能转换为机械能，机械能再转换为电能。
- 核电站一般分为两部分：核岛和常规岛。
- 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，主要包含的器件有第一壁、偏滤器。
- 常规岛：利用核聚变产生的能量，转化成蒸汽，进行发电，主要包含蒸汽发生器、汽轮机、水泵、低温系统等，与火电站类似。

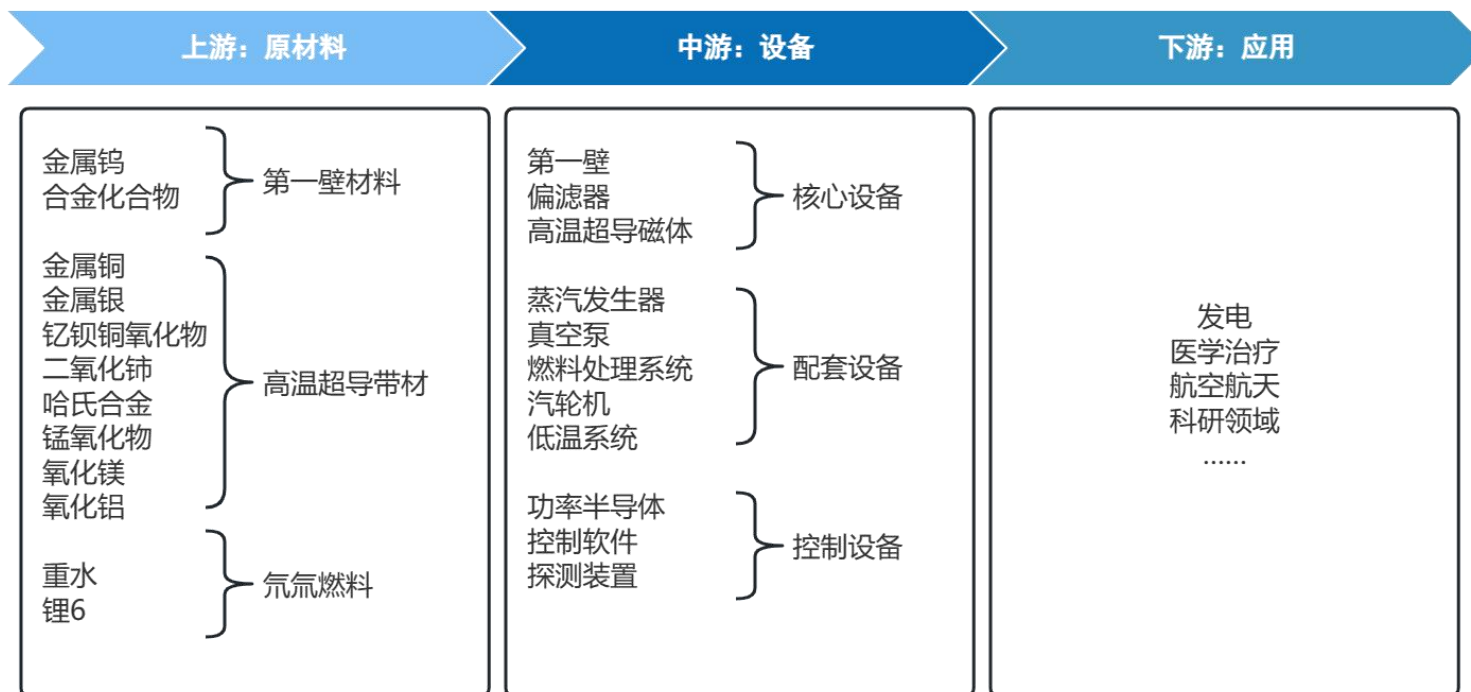
图21：核聚变电站示意图



数据来源：频谱科学，华龙证券研究所

- 可控核聚变产业链上游为原材料，包括第一壁材料钨、高温超导带材原料REBCO和氦氖燃料。
- 中游为相关设备，核心设备包括超导磁体、第一壁和偏滤器，其中超导磁体占总投资成本约40-50%。高温超导磁体可大幅提升磁场强度，是装置运行的核心部件，第一壁的作用是控制进入等离子体的杂质、传递辐射到材料表面的热量等，偏滤器的作用是控制等离子体与真空室壁面的相互作用，减少壁面的热负荷和粒子轰击。
- 产业链下游为应用环节，核聚变技术主要用于发电、医疗、科研等领域。

图22：核聚变电站上中下游设备拆分



数据来源：《国际热核试验堆第一壁材料的研究进展》丁孝禹，上海超导官网，微观同位素，频谱科学，核能研究展望，Deeptech，华龙证券研究所

图23：核聚变重点环节及公司



数据来源：Wind，华龙证券研究所

- 第一壁是聚变装置的关键部件，主要功能是有效控制进入等离子体的杂质，有效传递辐射到材料表面的热量，保护非正常停堆时其它部件因受等离子体轰击而损坏。我国为ITER研制的第一壁为三层结构，分别是最内侧的面向等离子体材料（铍）、中间的热沉材料（铜铬合金，利用铜良好的导热性把内部的热量传导出来，再通过冷却剂（如氦气）输送到反应堆外用于发电）和背后的结构支撑材料（不锈钢）。但是，铍和铜之间的相互扩散会形成一些脆性的金属间化合物（如CuBe），导致材料力学性能的劣化。
- 钨基合金可能是未来聚变堆理想的第一壁材料。钨及钨基材料具有高熔点、高热导率、低溅射产额和高自溅射阈值、低蒸气压和低氦滞留性能，成为最具应用前途的一类第一壁材料。据此，ITER已确定了一条从铍/碳/钨到铍/钨，最后变成全钨的路线。EAST(中国核聚变实验装置东方超环)也确定了约3年逐步从现在的全碳到碳/钨的过渡，最后全部变成全钨的发展方向。
- 我国钨资源储产量为世界第一，据USGS，2023年我国钨资源储量为 230 万吨、占比约 52.3%，产量 6.3 万吨、占比约 80.8%。

图24：ITER第一壁的三层结构



数据来源：核能研究展望，华龙证券研究所

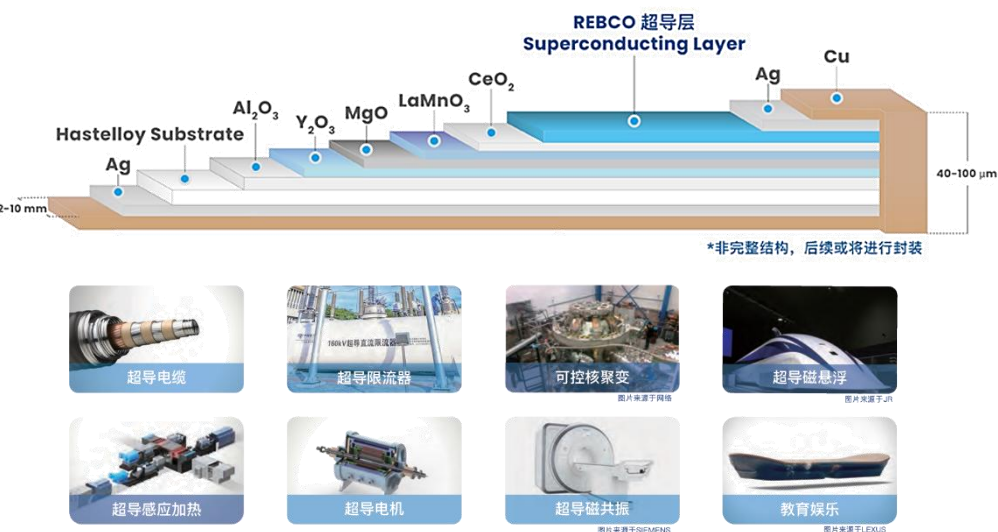
表7：钨基合金可能是未来聚变堆理想的第一壁材料

材料	原子序数	熔点 /℃	密度 /( $g \cdot cm^{-3}$ )	热导率 /( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	热胀系数 / $10^{-5}K$	弹性模量 /GPa	使用温度 /℃	自溅射率 (1000℃)	氦滞留率 /%
石墨	6		1.8~2.1	90~300	4.5	8.2~28.0	室温~2 000	>1	>1(钨照屏)
碳纤维复合材料	6		1.8	100~400	1.5	11.3	室温~2 000	>1	>1(钨照屏)
铍	4	1 284	1.85	96	18.4	200	室温~1 000	<1	<1
钨	74	3 400	19.25	176	4.5	370	室温~1 000	<1(100 eV)	<1

数据来源：《国际热核试验堆第一壁材料的研究进展》丁孝禹等，华龙证券研究所

- **高温超导带材：规模化应用时代正在开启。**超导材料具有常规材料所不具备的零电阻、完全抗磁性和宏观量子效应，能够为核聚变反应提供更强磁场。一个聚变托卡马克的超导材料用量超过1万公里，2020年全球超导带材的产能只有3000公里，随着以可控核聚变为代表的下游进展加速，将带动高温超导带材需求快速提升、产能快速增长和价格快速下降。
- **高温超导磁体：聚变装置核心，投资成本占比约四成。**高温超导磁体较之目前使用的低温超导磁体大幅提升了磁场强度，2021年9月，美国麻省理工CFS团队成功研制了全球首个可用于核聚变的20特斯拉高温超导磁体，标志着高温超导核聚变装置进入功能样机研制阶段。根据ITER初始支出投资计划，超导磁体预计占到总成本37%。而CFS公司的商业化可控核聚变SPARC项目中，百亿研发预算中高温超导磁体的支出预计占比50%。

图25：第二代高温超导带材示意图及应用领域



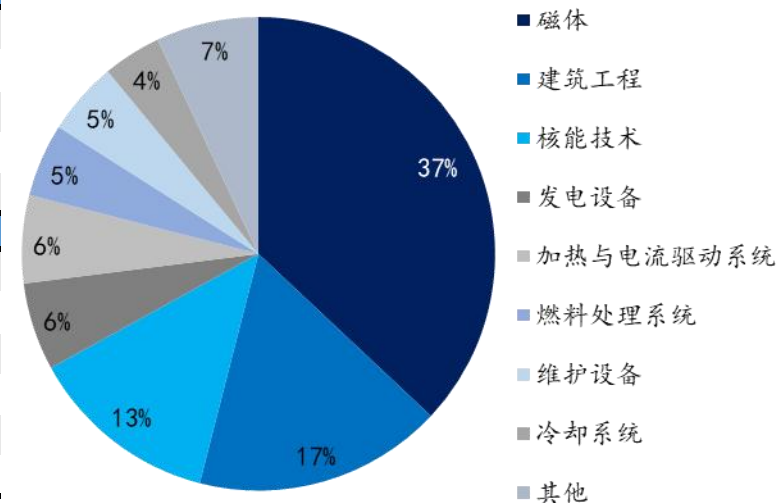
数据来源：上海超导，华龙证券研究所

表8：2023年低温超导/高温超导带材价格

Nb3Sn	数值	单位	条件	工艺
超导材料临界电流	2000	A/mm <sup>2</sup>	4.2K, 12T	青铜法
Nb3Sn铜超比	1			
带材临界电流密度	800	A/mm <sup>2</sup>		
带材过流能力	1711	A	4.2K, 12T	
单位价格	75	元/(KA*m)		
YBCO	数值	单位	条件	工艺
超导材料临界电流	50000	A/mm <sup>2</sup>	4.2K, 12T	
带材宽度	12	mm		
超导薄膜厚度	2	微米		
带材临界电流	1282	A/mm <sup>2</sup>		
带材过流能力	1200	A	4.2K, 12T	
单位价格	167	元/(KA*m)		

数据来源：东部超导，华龙证券研究所

图26：ITER初始直接支出投资成本

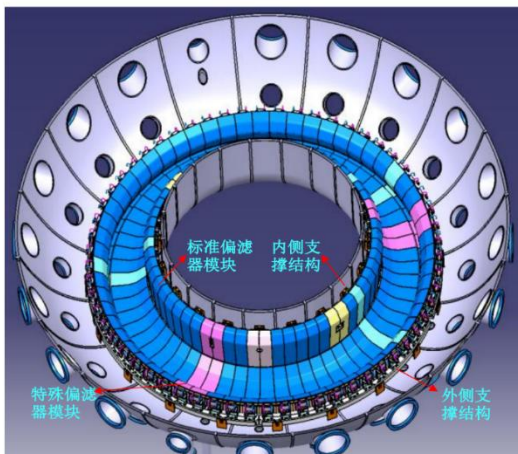


数据来源：《Approximation of the economy of fusion energy》，华龙证券研究所



- 偏滤器通常位于真空室的上下方，主要用于控制等离子体与真空室壁面的相互作用，减少壁面的热负荷和粒子轰击。偏滤器是磁约束核聚变装置最为关键的系统之一，直接承受强粒子流和高热流的冲击，服役环境十分苛刻，而满足偏滤器运行环境的热沉材料是聚变堆正常运行的关键，铜合金以高热导率、较高的强度、较好的热稳定性和抗中子辐照性能被认为是聚变堆偏滤器用热沉材料的首要候选材料。
- 我国偏滤器研发步伐不断加快。为配套EAST项目，2012年，中科院等离子体所启动偏滤器升级改造计划。2018年，法国原子能和替代能源委员会开展的全钨偏滤器托卡马克核聚变实验装置（WEST）对我国自主研发的偏滤器W/Cu部件达成采购意向。除中科院等离子体所外，国光电气承制了中国环流器二号M装置（HL-2M）所需的偏滤器模块，并且生产的偏滤器还应用于ITER计划中。

图27：偏滤器示意图



数据来源：Wind，华龙证券研究所

表9：偏滤器作用

偏滤器主要作用	
1	排出来自聚变等离子体的能流和粒子流
2	有效地屏蔽来自器壁的杂质，减少对芯部等离子体的污染
3	排出核聚变反应过程中所产生的氦灰等产物，并提取有用的热量用于发电

数据来源：《核聚变堆偏滤器热沉材料研究现状及展望》彭吴擎亮等，华龙证券研究所

# 目录

1

可控核聚变：“聚变”与“可控”的原理

2

当前进展与商业化可能

3

可控核聚变产业链

4

相关公司及投资建议

5

风险提示

表10：核聚变相关公司

公司名称	联创光电	精达股份	永鼎股份	国光电气	安泰科技	西部超导
特点	高温超导磁体在多领域进入1到N加速发展阶段	优质的高温超导带材供应商	第二代高温超导带材产业化加速落地	第一壁、偏滤器及泵阀产品优势显著，核工业设备打开第二增长曲线	钢研院优质资产，全钨偏滤器复合部件在世界前列	国内唯一低温超导线材商业化生产企业
可控核聚变业务开展主体	参股联创超导，持股40%	参股上海超导，持股18.29%	参股上海超导，持股64%	-	控股子公司北京安泰中科金属材料有限公司	-
可控核聚变相关合作方	中核聚变（成都）设计研究院有限公司	英国TE公司/美国CFS公司	国家重点研发计划	核工业西南物理研究院 ITER项目	ITER项目和EAST项目	ITER项目
可控核聚变相关订单情况	1) 江西联创光电超导应用有限公司和中核聚变（成都）设计研究院有限公司签订协议，双方计划各自发挥技术优势，采用全新技术路线，联合建设聚变-裂变混合实验堆项目，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。	1) 上海超导与英国TE公司进行深度合作，于2017-2020年间分批陆续供应宽幅高性能高温超导带材，用于强场磁体研制及超导可控核聚变。 2) 美国CFS的紧凑型超导可控核聚变使用上海超导的4mm镀铜高温超导带材。	公司于2022年成功获得国家重点研发计划“国家磁约束核聚变能发展研究专项”中“聚变CICC高温超导磁体关键技术发展及磁体研制”项目的子课题“高性能 REBCO 长带材工程化制备技术”的研发任务，作为合作单位主要承担千米级 REBCO 长带的批量化制备	公司与中国工程物理研究院、核工业西南物理研究院均签订了《战略合作协议》，其中核工业西南物理研究院是我国参与 ITER 计划的主要承担单位。公司依托产学研合作，生产的偏滤器和包层系统是 ITER 项目的关键部件，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，同时公司偏滤器也已应用于我国 HL-2M 托卡马克装置。	公司控股子公司安泰中科聚焦深耕可控核聚变领域，研发生产的偏滤器全钨复合部件、钨铜复合部件等产品成功应用于我国“人造太阳” EAST 科学工程装置和 ITER 项目，其中钨偏滤器被认为是在核聚变领域最难生产和制造的部件之一，为中国可控核聚变实现全球领跑做出了重要贡献。	公司于2012年正式成为 ITER 超导线材供货商，我国承担69%的 NbTi 超导线和 7%的 Nb3Sn 超导线生产任务，全部由西部超导提供，产品性能获得业界高度肯定，已圆满完成 ITER 项目低温超导线材的供应任务。

数据来源：Wind，上海超导官网，华龙证券研究所

- **投资建议：**近年来，全球领域可控核聚变技术突破和商业投资加速，将为相关产业链带来重大机遇。首次覆盖，给予行业“推荐”评级。
- **个股方面，**建议关注超导磁体环节**联创光电**，高温超导带材制造商**精达股份**、**永鼎股份**，低温超导带材**西部超导**，偏滤器制造商**国光电气**、**安泰科技**等。

表11：重点公司及盈利预测

重点公司	股票	2024/4/29	EPS (元)				PE				投资
代码	名称	股价 (元)	2023A	2024E	2025E	2026E	2023A	2024E	2025E	2026E	评级
600363.SH	联创光电	31.05	0.75	1.21	1.58	1.93	41.4	25.6	19.6	16.0	未评级
600577.SH	精达股份	4.71	0.21	0.24	0.31	0.40	22.4	19.4	15.0	11.7	未评级
600105.SH	永鼎股份	4.55	0.03	0.13	0.19	0.44	147.7	36.3	23.7	10.4	未评级
688776.SH	国光电气	66.38	0.83	2.15	3.05	3.22	80.0	30.9	21.8	20.6	未评级
000969.SZ	安泰科技	9.00	0.24	0.29	0.36	0.44	37.0	31.4	25.3	20.3	未评级
688122.SH	西部超导	38.90	1.16	1.60	2.07	2.39	33.6	24.3	18.8	16.3	未评级

数据来源：Wind；未评级企业盈利预测来自Wind一致预期。

# 目录

1

可控核聚变：“聚变”与“可控”的原理

2

当前进展与商业化可能

3

可控核聚变产业链

4

相关公司及投资建议

5

风险提示

## 风险提示

- 1. 行业政策不及预期。**核聚变行业基于前沿科研技术，政策不及预期可能导致相关科研经费不足、研究及建设进度放缓，影响行业发展。
- 2. 重要技术进展不及预期。**核聚变行业研究及实现难度较高，仍处于实验探索及更新迭代阶段，关键技术的应用仍需进一步研究，技术研究进展不及预期将影响示范工程及商业化进度。
- 3. 相关投资不及预期。**核聚变行业需要大额投资支持，若相关科研经费投资或商业化投资不足，将影响研究及建设进度。
- 4. 建设进展不及预期。**聚变堆建设过程耗时多年，在建设中可能遇到等离子体位移、垂直破裂等众多测试问题，可能导致建设进度不及预期，建成时间延后。
- 5. 运行实验结果不及预期。**聚变装置建成后需要进行多次运行实验以获取实验结果数据，运行时间等结果数据不及预期可能导致研究时间进一步拉长。
- 6. 设备交付不及预期。**聚变装置为大型化装置，包含多种设备和零部件，由科研院所、相关企业或国际合作完成，相关设备交付不及预期可能影响建设进度。
- 7. 商业化进展不及预期。**可控核聚变研究当前主要处于科研阶段，尚未实现稳定放电运行，商业化可能还需面临降本提效的进一步考虑，商业化进展可能不及预期。
- 8. 重点关注公司业绩不及预期等。**

## 免责及评级说明部分

### 分析师声明:

本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉尽责的职业态度，独立、客观、公正地出具本报告。不受本公司相关业务部门、证券发行人士、上市公司、基金管理公司、资产管理公司等利益相关者的干涉和影响。本报告清晰准确地反映了本人的研究观点。本人不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。据此入市，风险自担。

### 投资评级说明:

投资建议的评级标准	类别	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的6-12个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅。其中：A股市场以沪深300指数为基准。	股票评级	买入	股票价格变动相对沪深300指数涨幅在10%以上
		增持	股票价格变动相对沪深300指数涨幅在5%至10%之间
		中性	股票价格变动相对沪深300指数涨跌幅在-5%至5%之间
		减持	股票价格变动相对沪深300指数跌幅在-10%至-5%之间
		卖出	股票价格变动相对沪深300指数跌幅在-10%以上
	行业评级	推荐	基本面向好，行业指数领先沪深300指数
		中性	基本面稳定，行业指数跟随沪深300指数
		回避	基本面向淡，行业指数落后沪深300指数

### 免责声明:

本报告仅供华龙证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因为任何机构或个人接收到报告而视其为当然客户。本报告信息均来源于公开资料，本公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。编制及撰写本报告的所有分析师或研究人员在此保证，本研究报告中任何关于宏观经济、产业行业、上市公司投资价值等研究对象的观点均如实反映研究分析人员的个人观点。报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券买卖的价格的建议或询价。本公司及分析研究人员对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失及其他影响概不负责。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提及的公司所发行的证券并进行证券交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务，投资者应充分考虑本公司及所属关联机构就报告内容可能存在的利益冲突。

### 版权声明:

本报告版权归华龙证券股份有限公司所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、刊登。任何人使用本报告，视为同意以上声明。引用本报告必须注明出处“华龙证券”，且不能对本报告作出有悖本意的删除或修改。

### 华龙证券研究所

#### 北京

地址：北京市东城区安定门外大街189号天鸿宝景大厦F1层华龙证券  
邮编：100033

#### 兰州

地址：兰州市城关区东岗西路638号甘肃文化大厦21楼  
邮编：730030  
电话：0931-4635761

#### 上海

地址：上海市浦东新区浦东大道720号11楼  
邮编：200000