

证券研究报告 | 国防军工 | 2024年3月28日

可控核聚变深度研究报告：

可控核聚变技术快速发展，本世纪商业化目标已见曙光

分析师

李鲁靖

登记编号：S1220523090002

刘明洋

登记编号：S1220524010002

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

- 中国发电量逐年平稳增长且结构多元，用电量增长动力主要来源于第二产业，发电装机不断扩容。
- 实现可控核聚变有磁约束和惯性约束两种途径，惯性约束以美国国家实验室NIF为代表，2022年12月成功点火。
- 国际磁约束主要进展：1)欧洲联合环JET 2021年在5秒内产生了能量输出为59兆焦耳的稳定等离子体,目前已退役；2)2023年10月24日，世界上最新、规模最大的核聚变反应堆——JT-60SA(超导托卡马克装置)成功点火；3)“人造太阳”ITER项目目前正处于装配第一阶段，2024年3月，中国承接ITER主机安装合同。
- 国内磁约束主要进展：1)2023年8,新一代人造太阳“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；2)2023年4月，EAST成功实现了403秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行，创造了托卡马克装置高约束模式运行新的世界纪录；3)2023年11月BEST(紧凑型聚变能实验装置)完成园区基坑施工，计划2024年年初启动园区建筑土建施工；4)聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT), 聚变工程实验反应堆(CFETR)也在持续推进；5)2024年3月，洪荒70托卡马克总体安装完工，是全球首台全高温超导托卡马克装置；洪荒170为下一代托卡马克装置，预计2027年完成；6)星环聚能与清华大学联合建设的聚变实验装置SUNIST-2球形托卡马克。
- 根据FIA2023年度报告，2023年研究可控核聚变的公司共融资62亿美元，其中私人投资59亿美元。从2022到2023年，新增14亿美元投资，新增了13家聚变公司，包括能量奇点。国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势。
- 建议关注：
聚变能装置核心零部件：国光电气；核工业基础件：航天晨光；
可控核聚变超导线材：西部超导；高温超导感应加热装置：联创光电；
高温超导带材：永鼎股份；聚变堆真空室：合锻智能
- 风险提示：可控核聚变技术发展不及预期；ITER项目推进不及预期；国内可控核聚变项目推进不及预期

- 第一部分 中国发电量逐年平稳增长,世界电力需求保持弹性
- 第二部分 国内外可控核聚变项目持续推进
- 第三部分 资本市场对可控核聚变投入逐渐爆发
- 第四部分 相关标的:核聚变相关上市公司
- 第五部分 风险提示

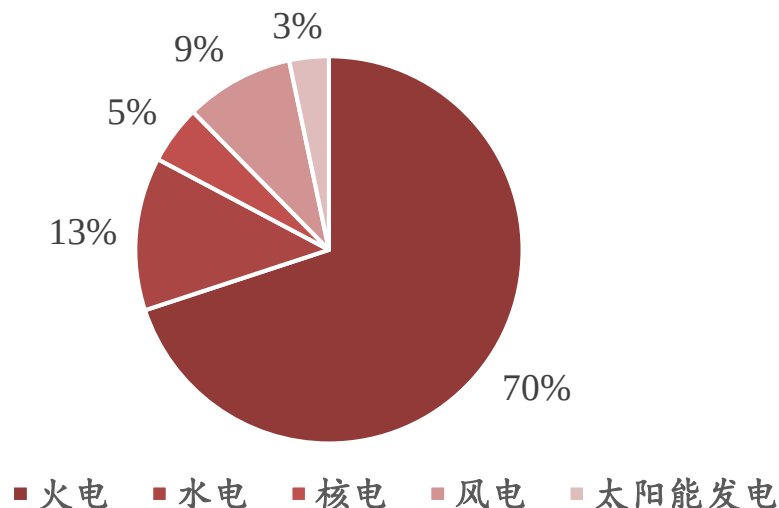
第一部分 中国发电量逐年平稳增长,世界电力需求保持弹性

- 1.1 中国发电量逐年平稳增长且结构多元,发电装机不断扩容
- 1.2 中国用电量增长动力主要来源于第二产业,世界电力需求增速放缓
- 1.3 电费:2024第一季度部分地区电价上涨,地区差异明显
- 1.4 聚变能是未来能源换代的根本出路

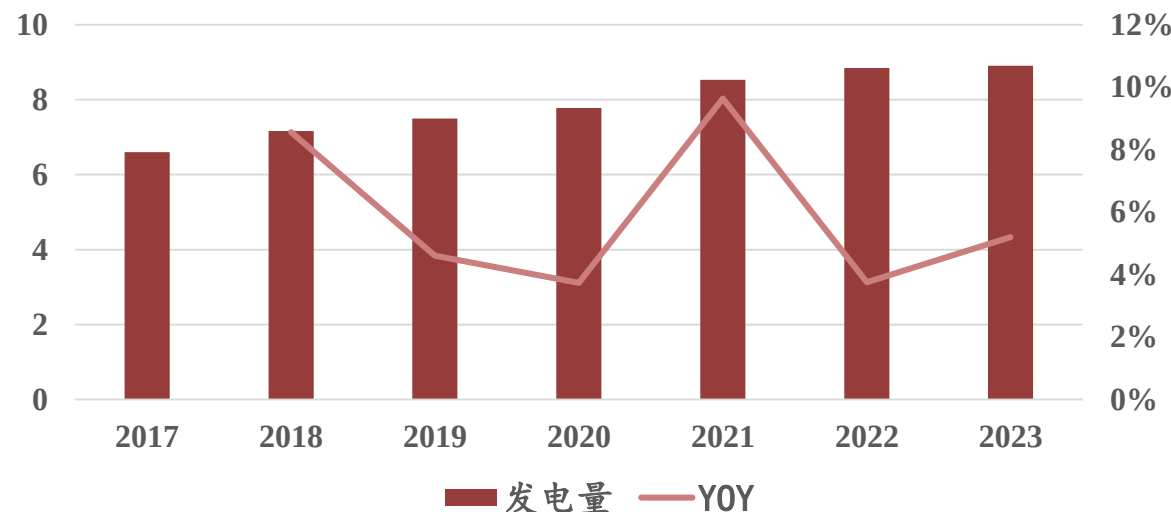
1.1 中国发电量逐年平稳增长且结构多元，发电装机不断扩容

- **全国发电量逐年平稳增长且结构多元：**2023年，全国规模以上电厂发电量8.91万亿千瓦时(+5.2%)，水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源发电量31906亿千瓦时(+7.8%)，其中，水电发电量同比下降(-5.6%)，煤电发电量占比仍接近六成。全年全社会用电量9.22万亿千瓦时(+6.7%)，其中11月用电量7360亿千瓦时(+11.6%)。
- **全国发电装机不断扩容：**2023年全国发电装机容量29.2亿千瓦(+13.9%)，人均发电装机容量自2014年底历史性突破1千瓦/人后，在2023年首次突破2千瓦/人，达到2.1千瓦/人。非化石能源发电装机在2023年首次超过火电装机规模，煤电装机占比首次降至40%以下。具体来看，太阳能发电装机容量约6.1亿千瓦(+55.2%)；风电装机容量约4.4亿千瓦(+20.7%)；水电发电装机容量约4.2亿千瓦(+1.8%)；火电装机容量约13.9亿千瓦(+4.1%)；核电装机容量约0.6亿千瓦(+2.4%)。
- **预测到2024年底，全国发电装机容量预计达到32.5亿千瓦(+12%)，其中新能源发电累计装机规模将达到13亿千瓦左右，占总装机容量比重上升至40%左右，首次超过煤电装机规模。**
- **用电量逐年增长，仅靠发电机扩容已不能满足日益增长的用电需求。**

图：2023年全国发电量结构图



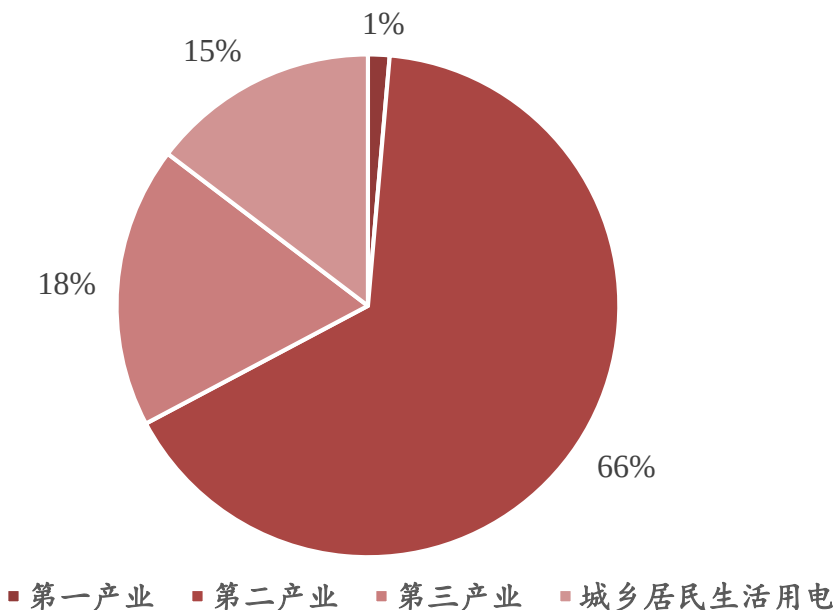
图：2018-2022全国发电量情况（万亿千瓦小时）



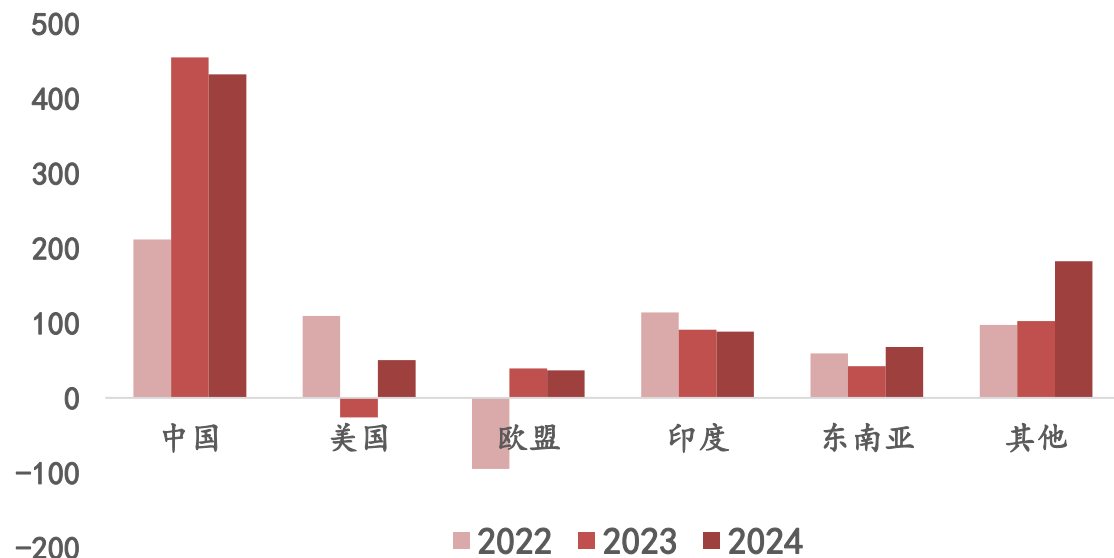
1.2 中国用电量增长动力主要来源于第二产业，世界电力需求增速放缓

- 2023年全国全社会用电量92241亿千瓦时，增速比2022年提高3.1个百分点。全国人均用电量6539千瓦时，比上年增加423千瓦时/人，国民经济回升向好拉动电力消费增速同比提高。
- 分产业看，第一产业用电量1278亿千瓦时(+11.5%)；第二产业用电量60745亿千瓦时(+6.5%)；第三产业用电量16694亿千瓦时(+12.2%)；城乡居民生活用电量13524亿千瓦时(+0.9%)。
- 2023年发达经济体用电量下降抑制了全球电力需求的增长。2023年全球电力需求增长了2.2%，低于2022年2.4%的增长率。2023年，宏观经济环境低迷以及高通胀导致制造业和工业产出减少，发达国家电力需求大幅度下降。预计未来三年全球电力需求将以更快的速度增长，到2026年平均每年增长3.4%。

图：2023全国产业用电量



图：2022-2024全球各区域年度用电量变化（亿千瓦时）



1.3 电费：2024第一季度部分地区电价上涨，地区差异明显

■ 2024年第一季度大部分地区电价开始上涨。其中，广东和深圳1-3月购电价格稳定攀升，并列位居第一名，海南省购电价格大幅度下滑，处于第二位。价格末三名的地区分别为蒙东、新疆、云南。用电量需求越来越大，我们需要开发一种可商业化的清洁能源来解决目前限电、电价贵、电供应不能满足需求的问题，而核能就是未来能源换代的新出路。

图：2023年6月-2024年3月全国部分地区电网代理购电价格表(元/兆瓦时)

地区	2023年6月	2023年7月	2023年8月	2023年9月	2023年10月	2023年11月	2023年12月	2024年1月	2024年2月	2024年3月
江苏	437.8	476.9	473.8	442.3	440.1	463.4	464.1	459	447.3	436.2
安徽	461.28	461.28	461.28	461.28	461.28	461.28	461.28	436.38	436.75	436.75
广东	550.1	565.9	578.4	562.8	533.3	530.2	543.4	502.3	507.5	516.9
山东	358.9	377.5	387.5	399.1	399.7	398.4	391	462.1	464.8	471.9
山西	343.866	373.156	371.282	361.418	373.683	396.530	389.632	349.974	360.07	360.214
北京	419.825	421.649	421.078	413.106	400.440	394.759	405.793	409.861	399.348	398.787
河北	不满1千伏	364.4	364.4	364.4	364.4	364.4	364.4	415.8	445.8	421.4
	其他工商业	429.4	419.2	440.1	464.4	452.4	422.80	432.8		
冀北	不满1千伏	372	372	372	372	372.0	372.0	411.9	424.4	415.6
	其他工商业	424.5	423.8	431.7	430.7	435.2	428.1	433.9		
河南	不满1千伏工商业	453.3	453.3	453.3	453	453	453	453.76	412.3	409.078
	1-10千伏及以上工商业	512.4	500.6	503.6	525.4	514.8	496.3	494.9	484	473.4
	上海	525.7	501.6							480.4
浙江	455.8	476.1	470.4	440.1	418.4	428.1	415.9	429.7	459.0	467.9
重庆	440.677	529.964	530.435	472.757	440.242	431.534	440.723	483.213	483.437	439.314
四川	341.6	359.9	396.1	336.5	339.7	380.0	484.7	456.9	475.4	476.7
黑龙江	420.745	420.925	420.745	420.744	420.744	420.744	420.745	404.42	404.428	404.428
辽宁	417.89	419.32	430.606	434.565	431.125	418.669	426.444	424.5	445.267	416.978
吉林	447.72	447.72	447.72	447.72	447.72	447.72	447.24	421.29	421.809	421.809

1.4 聚变能是未来能源换代的根本出路

- 聚变能具有燃料丰富、清洁、安全性高、能量密度大等突出优点，被视为终极能源。
- 1) **安全可靠**。国际原子能机构表示，可控核聚变在运行中不会出现类似裂变型的事故或核熔毁的“失控”链式反应。2) **环境友好**。氘氘核聚变反应的产物是惰性氦，不产生高放射性、长寿命的核废物，也不会产生有毒有害气体或者温室气体。3) **经济性明显**。据测算，相比满足每年全球一次能源消耗需要98万吨天然铀、1451个三峡电站、200亿tce，聚变仅需消耗一个标准泳池的重水，考虑到重水价格每克不足千元，聚变电站每年的重水消耗量仅为克级水平，远少于裂变电站。4) **能量密度高**。1吨氘氘聚变反应释放的能量，相当5.7吨裂变燃料或700万吨原油燃烧释放的能量。地球上蕴藏的核聚变能约为全部可进行核裂变元素释出能量的1000万倍。
- 各国都将核聚变能作为未来理想的清洁能源。2023年12月，美国气候特使在第28届联合国气候变化大会(COP28)宣布了美国聚变能源国际参与计划，并为核聚变能源的发展布局。12月29日，由中核集团牵头，联合24家央企、科研院所、高校等组成的可控核聚变创新联合体宣布成立，中国聚变能源有限公司揭牌，明确可控核聚变领域为未来能源的唯一方向。
- 民营资本涌入也在推进产业发展。根据FIA数据，2022年全球私营核聚变公司获得超过48亿美元投资，比21年增加139%，私人投资对核聚变的投资额首次超过政府资助。2023年，全球私营聚变公司获得的投资额从48亿美元增加至62亿美元。

图：中国聚变能源有限公司揭牌



图：美国气候特使在COP28会上发言



第二部分 国内外可控核聚变项目持续推进

2.1 实现可控核聚变有磁约束和惯性约束两种途径

2.1.1 国际惯性约束代表项目

2.1.2 国际磁约束看见曙光，但道阻且长

2.2 可控核聚变创新联合体成立，我国可控核聚变产业化或加速

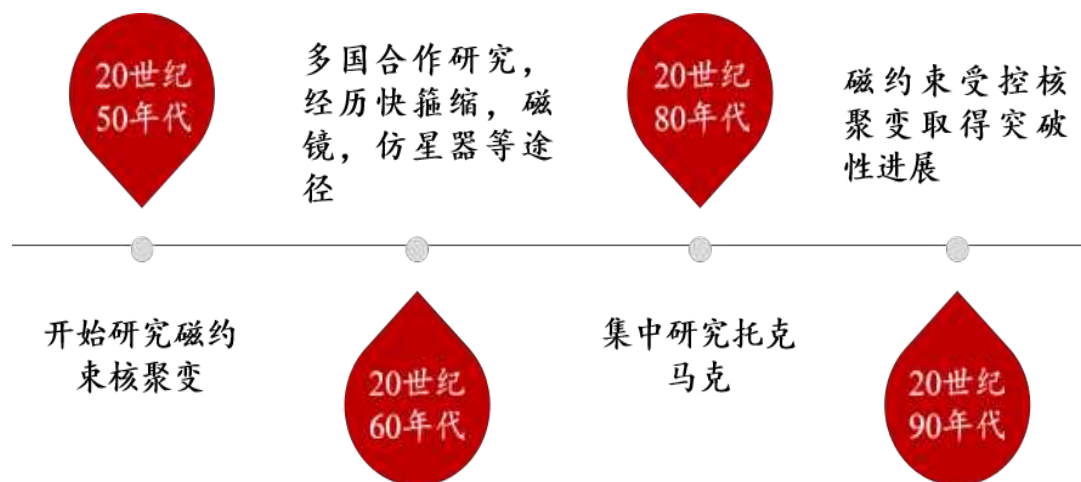
2.2.1 国内惯性约束代表项目-“神光-III”蓬勃发展

2.2.2 国内磁约束研究进展-国家队、初创公司快步向前

2.1 实现可控核聚变有磁约束和惯性约束两种途径

- 实现可控核聚变有**磁约束**和**惯性约束**两种途径。国际磁约束核聚变研究始于20世纪50年代，经历了从最初的少数几个核大国进行秘密研究阶段，到50年代末的技术解密，再到60年代后世界范围内很多国家合作参与的研究阶段。在磁约束可控核聚变途径的探索方面，也经历了快箍缩、磁镜、仿星器等探索。从80年代开始，主要集中于以托卡马克装置为主的研究途径上。虽然从发展聚变堆的角度来看，托卡马克目前仍有一些关键问题需要通过实验加以验证，公认的是只有它才具备建造实验性聚变反应堆的基本条件。

图：磁约束发展历程



图：惯性约束发展历程



2.1.1 国际惯性约束研究进展-美国国家点火装置（NIF）

■ NIF是世界上最大的激光驱动惯性约束聚变装置，于1997年开始建造，2009年正式建成投入使用，耗资约35亿美元。尽管从驱动能量层面来看，NIF已经完全达到聚变点火的要求，但是从2010年10月首次进行集成点火实验，到**2022年12月实现可控聚变点火**，经历了12年，期间受到大量质疑与批评。

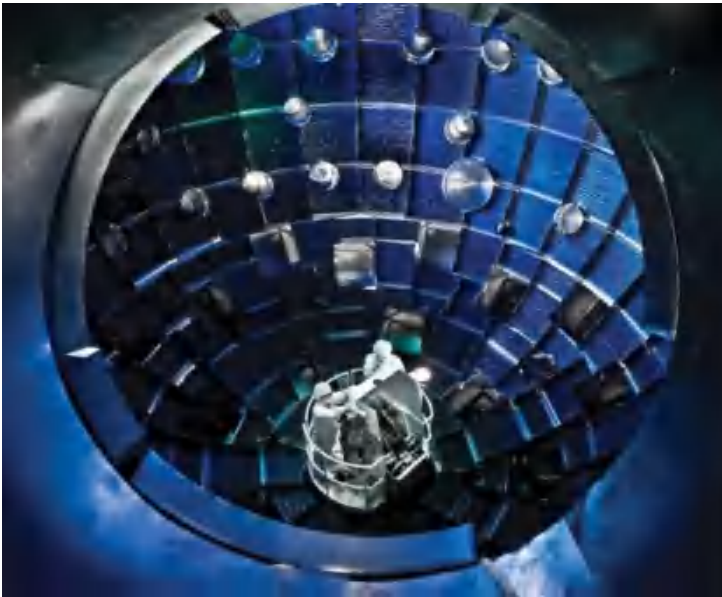
■ 在这12年中，科学家们从5000多次失败中不断完善和修正实验。从2010年到2012年，NIF启动National Ignition Campaign（NIC）进行一系列点火实验，但是由于缺乏对大能量激光器强辐射驱动的预测能力，以及没有细致考虑参量不稳定性和流体力学不稳定性问题引起驱动不对称性与燃料混合，最终实际达到压强只有聚变所需压强的1/3，在输入能量为1.8兆焦的条件下，输出能量只有约2.5千焦，远远没有达到聚变点火的要求。

■ 2021年8月8日，NIF终于在实验中接近了点火阈值，**到达了聚变点火的门槛。**

■ 2022年12月5日，NIF经过多次实验失败后终于实现了能量增益大于1，实现了聚变点火。

■ 2023年7月30日，再次实现能量净增益，且产生了比12月更高的能量输出。

图：在NIF的目标舱内，192束激光束集中在花椒大小的聚变燃料芯块上



图：在劳伦斯利弗莫尔国家实验室，2022年12月5日，192束激光束向一个微小的燃料球传递了超过200万焦耳的紫外线能量，以产生聚变点火。

2.1.1 国际惯性约束研究进展-法国激光聚变装置(LMJ)

■ 法国兆焦耳激光器(LMJ)是与NIF类似的惯性约束聚变装置，由替代能源与原子能委员会（CEA）于2014年在法国大西洋沿岸建成，耗时15年，耗资30亿欧元。

■ 与NIF类似，两个装置都是为了同一个目的而建——即让数十束强激光射向一个目标靶标，在瞬间形成极高温和极大压力。两个设施也都是出于军事目的：复制微型核爆炸。装置的另一个目的是实现惯性核聚变（IFE）研究，LMJ装置用激光脉冲打破氢同位素的胶囊，使氢同位素熔合成氦，释放出其中蕴藏的巨大能量，该装置将在未来某一天被用于核电站。

●就其核心来说，两个装置就像是一对“双胞胎”。和NIF相同，LMJ的研究人员也在使用光纤激光器制造出一束持续时间仅为十亿分之几秒的红外线。然后，这束较弱的红外线会进入前置放大器——在脉冲到来前，用氙气闪光灯使掺钕激光玻璃厚片充满能量。它们会把能量传入光束中，在光线分成很多平行光并被送到主放大镜之前（同样的掺钕激光玻璃与同样的疝气灯，不过规模更大），使其达到1焦耳。

■ LMJ在2014年12月30日建成，并进行了第一组与核武器相关的实验。

图：法国激光核聚变反应实验室(LMJ)：在反应室中置入兆焦级激光



●LMJ有22个主放大镜链条，每个放大镜都可以容纳八组平行光束。在每次激光射击中，八组光线在四组放大镜之间来回反弹并使能量增加至2万倍。最后重新把这些光线集合在一起之后会向反应室中心的目标点上传递1.5兆焦的能量，而NIF的激光则可以传递1.8兆焦的能量。

2.1.2 国际磁约束研究进展-以托卡马克为代表的磁约束核聚变

- 20世纪80年代以来，国际磁约束可控核聚变研究取得了显著进展，一批大型和超大型托卡马克装置(美国的TFTR、欧共体的JET、日本的JT-60U、苏联的T-15等)相继建成并投入运行。多项聚变工程关键技术迅速发展，主要物理参数已接近达到为实现可控核聚变所要求的数值。在典型的装置上，聚变燃料已可被加热到2亿~4亿℃的高温，表征聚变反应率最重要参数（聚变三乘积）已达到 $1.5 \times 10^{21} \text{ keV/m}^3 \text{ s}$ ，人类已经看到了实现聚变能源的曙光。
- 进入90年代，国际可控核聚变研究取得了突破性的进展。1991年末，人类首次用可控的方法在欧洲共同体联合环JET装置上进行了首次氘-氘放电实验。随后，在美国普林斯顿大学的TFTR装置上的氘-氘放电也获得成功，其输出的功率更高，达到了10.7 MW，获得聚变能6.5 MJ。1997年JET装置创下了输出聚变功率16.1 MW、聚变能21.7 MJ的世界纪录。1998年，在日本原子能研究所的JT-60U托卡马克装置上进行的D-D反应的实验，其等效的氘-氘聚变反应的能量增益因子Q（能量增益因子定义为，聚变反应产生的能量与输入装置能量之比）已达到1.25。
- 2021年，JET（欧洲联合环）完成核聚变研究的一项重大突破：在5秒内产生了能量输出为59兆焦耳的稳定等离子体，打破了此前1997年同样由JET创下的21.7兆焦耳的纪录。然而，从单次实验到核聚变能源实用化仍道阻且长，需要世界各国的共同研发。JET装置于2023年底完成了最后一次实验，此后将重新调整用途，进行退役，预计持续到2040年。

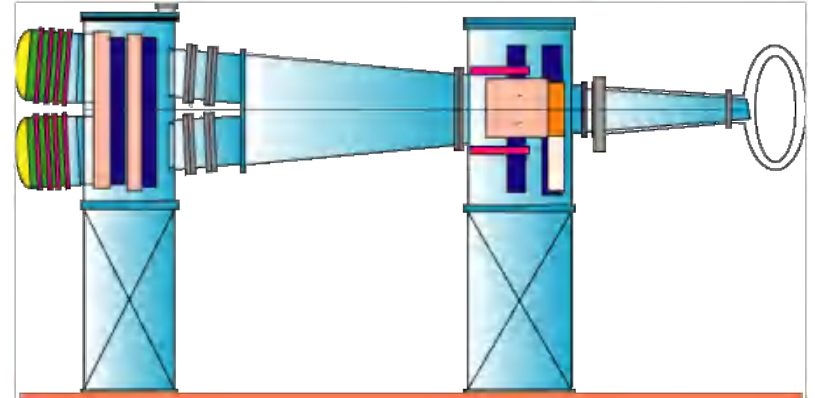
图：美国TFTR装置鸟览



图：JET设施



图：JT-60U中性粒子束喷射器



2.1.2 国际磁约束研究进展-JT-60SA成功点火

- 2023年10月24日，世界上最新、规模最大的核聚变反应堆——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。据《科学》报道，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。ITER计划欧洲执行机构——欧洲聚变能组织（F4E）和日本量子科学技术研究所（QST）合作开发了JT-60SA。F4E项目主管Sam Davis表示，JT-60SA的成功点火“向世界证明了该装置实现了基本功能”。QST JT-60SA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。据悉，到2050年，日本希望建造一座示范发电厂——DEMO，它将成为JT-60SA和ITER未来商业化运行的垫脚石。

图：JT-60SA



2.1.2 国际磁约束研究进展-ITER项目

- ITER项目有35个国家参与，项目内容是建造一个最大的托卡马克，该装置必须证明聚变产生的能源可以用作大型规模能源，不排放二氧化碳，用来发电。ITER的主要目标是产生“燃烧等离子体”并了解它们的行为。在燃烧的等离子体中，氘-氚聚变反应产生的氦核释放的能量足以维持介质的温度，从而减少甚至完全消除对外部加热系统的需要。ITER还必须确保掌握集成工业聚变反应堆运行所必需的所有技术（超导磁体、极端环境下的远程操纵、电力提取等）。ITER成员（中国、欧盟、印度、日本、韩国、俄罗斯和美国）参与合作建设和运营ITER实验设施。
- ITER计划分三个阶段进行：第一阶段为实验堆建设阶段，从2007年到2021年；第二阶段为热核聚变运行实验阶段，持续20年，其间将验证核聚变燃料的性能、实验堆所使用材料的可靠性、核聚变堆的可开发性等，为大规模商业开发聚变能进行科学和技术认证；第三阶段为实验堆退役阶段，历时5年。
- ITER具体的科学计划是：在为期十年的第一阶段，通过感应驱动获得聚变功率500 MW、Q大于10、脉冲时间500 s的燃烧等离子体；第二阶段，通过非感应驱动等离子体电流，产生聚变功率大于350 MW、Q大于5、燃烧时间持续3000 s的等离子体。如果约束条件允许，将探索Q大于30的稳态临界点火的燃烧等离子体。ITER计划科学目标的实现将为商用聚变堆的建造奠定可靠的科学和工程技术基础。



图：平台的安装

- 目前ITER处于装配第一阶段(2022年3月-2024年12月：重点组装核心机器以及第一等离子体运行所需的系统
- 第二阶段(2026年6月-2028年6月):通过机器引入容器内组件，如ITER包层等等。
- 第三阶段(2030年6月-2031年9月):安装加热系统以及中性束诊断系统
- 第四阶段(2034年3月-2035年3月):全氚厂和热电池设施的实施为2035年6月的聚变发电运行开辟了道路。

2.2 可控核聚变创新联合体成立，我国可控核聚变产业化或加速

- 早在1983年6月,国务院科技领导小组提出了中国核能发展“三步(压水堆—快堆—聚变堆)走”的战略,以及“坚持核燃料闭式循环”的方针;在《国家能源发展“十二五”规划》中,提出了安全高效发展核电的主要任务,继续明确了坚持热堆、快堆、聚变堆“三步走”的技术路线。从核能所使用的资源角度来看,中国核能发展的**第一步**,发展以压水堆为代表的**热中子反应堆**,即利用加压轻水慢化后的热中子产生裂变的能量来发电的反应堆技术,利用铀资源中0.7%的 ^{235}U ,解决“百年”的核能发展问题;**第二步**,发展以快堆为代表的**增殖与嬗变堆**,即由快中子引起裂变反应,可以利用铀资源中99.3%的 ^{238}U ,解决“千年”的核能发展问题;**第三步**,发展**可控聚变堆技术**,希望是人类能源终极解决方案,“永远”的解决能源问题。
- 近年来我国紧跟世界科研步伐,可控核聚变技术取得多项进展。
- 随着2023年12月美国在COP28宣布聚变能源国际参与计划,12月29日,我国以“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。会议表示,今年以来,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**。会议提出,可控核聚变作为人类能源问题的理想解决方案,已成为大国科技竞争的前沿阵地。



图：中核科创基金合作签约仪式

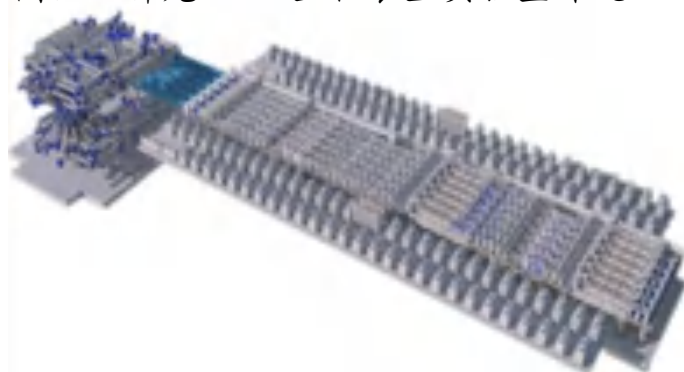
2.2.1 国内惯性约束研究进展-“神光-III”蓬勃发展

- 中国的惯性约束聚变研究起步稍晚，但也在蓬勃发展。“神光-III”主机装置历经十余年研制，于2015年顺利完成建设项目，全面达到设计指标，成为世界上投入运行的第二大激光驱动器，同时也是亚洲最大的高功率激光装置，在我国惯性约束聚变（ICF）研究发展历史上具有里程碑的意义。目前，中国正在建造功率更高的“神光”IV号装置。
- “神光-III”主机装置包含48束阵列化的大口径高功率脉冲激光，主要由前端、预放、主放大级、靶场、光束控制与参数测量、计算机集中控制等六大系统组成，具备三倍频180KJ/3ns,峰值功率60TW的输出能力。该装置的成功研制，标志着我国已具备十万焦耳级ICF实验能力，为我国开展关键物理过程研究、高能量密度物理研究提供了重要实验平台，造就了一支高素质的专业技术队伍，为我国研制更强驱动能力的激光装置奠定了坚实的技术基础。

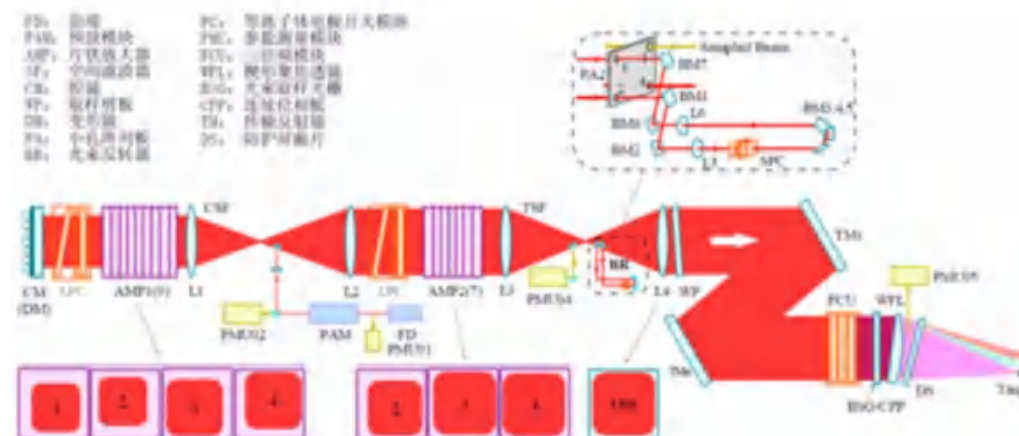
图：“神光-III”主机装置前端、预放和主放系统



图：“神光-III”主机装置实验室外观



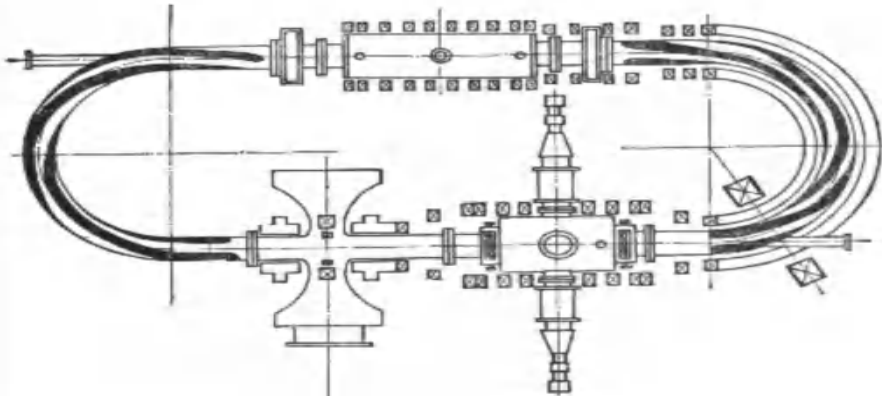
图：“神光-III”主机装置主体光路示意图



2.2.2 国内磁约束研究进展-东方超环EAST，中国环流器二号A(HL-2A)等多个代表项目

- 1958年，在国际可控核聚变正式纳入原子能和平应用范围的推动下，我国在中国科学院物理研究所和原二机部401所（现中国原子能科学研究院）几乎同步地相继展开实验研究。创始初期，都建造了**最简单的直线箍缩装置**，如“雷公”，为我国第一代可控核聚变研究人员提供了真实的实验舞台。
- 1959年冬，在国家科学技术委员会召开的“第一次全国电工会议”上明确由黑龙江原子核物理研究所进行“磁镜”研究，该所建立了可控热核反应研究小组。到1960年代中期，开始建造**仿星器装置“凌云”**。20世纪70年代，在当时国内生产技术极为落后、对外封闭而不能交流的情况下，过早选用了超导技术，被迫从液氦制造设备、超导线材等研制开始，因未能获得可供物理研究的等离子体而被迫中止。之后，转入以托卡马克为重点。
- 我国是全球范围内少数几个能够独立开展可控核聚变技术研究和聚变装置组建的国家之一。中科院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所先后建成了“合肥托卡马克6号模拟装置”（HT-6B、HT-6M）、“合肥超环-7”（HT-7）、“东方超环”（EAST）、紧凑型聚变能实验装置（BEST）等多台磁约束聚变装置。“九五”期间，中国环流器二号A（HL-2A）装置通过国家立项建造，由中国核工业集团西南物理研究院在2002年建成并成功投入实验运行。
- HL-2A装置是我国第一个具有偏滤器位形的大型托卡马克装置。至2009年，以中国环流器二号A（HL-2A）和EAST两个聚变装置为代表，标志着我国磁约束核聚变研究已经跻身于世界中等规模实验装置的行列，综合实力和科学技术达到和接近了国际水平，大大提高了中国聚变研究在国际上的地位。

图：仿星器装置“凌云”结构图



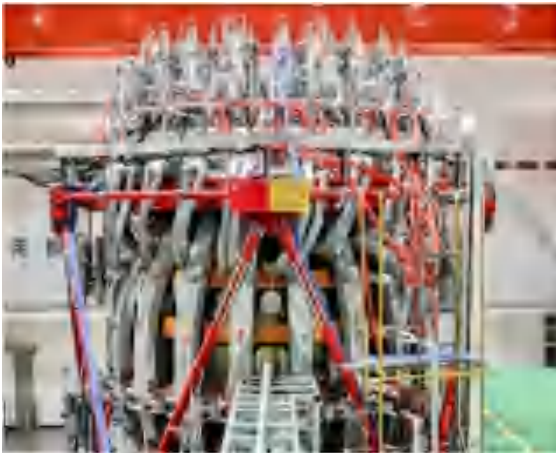
图：HL-2A装置



2.2.2 国内磁约束研究进展-西物院“环流系列”向高性能聚变等离子体运行前进

- 我国的环流系列发展：环流器一号装置（HL-1）（1984-1992）、环流器新一号装置（HL-1M）（1994-2001）、环流器二号A（HL-2A）（2002）、环流器二号M装置（HL-2M）。HL-2M装置的建造目的是研究未来聚变堆相关物理及其关键技术，研究高比压、高参数的聚变等离子体物理,为下一步建造聚变堆打好基础。
- 核工业西南物理研究院（西物院）的“环流系列”不断研发与突破。2020年12月，中国环流器二号M装置(HL-2M)在成都建成并实现首次放电；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，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8月25日，新一代人造太阳“中国环流三号”取得重大科研进展，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。在实现百万安培等离子体电流高约束模式运行的基础上，新一代人造太阳“中国环流三号”团队，将进一步发展高功率加热和电流驱动、等离子体先进运行控制等核心技术，实现堆芯级等离子体运行，研究前沿聚变物理，为我国开展聚变燃烧实验、自主建造聚变堆奠定坚实基础。

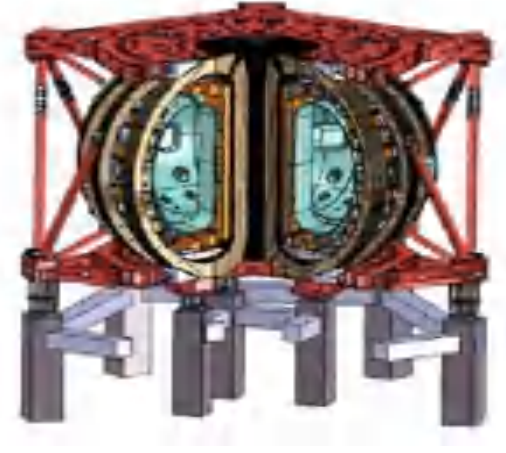
图：“中国环流三号”



图：“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



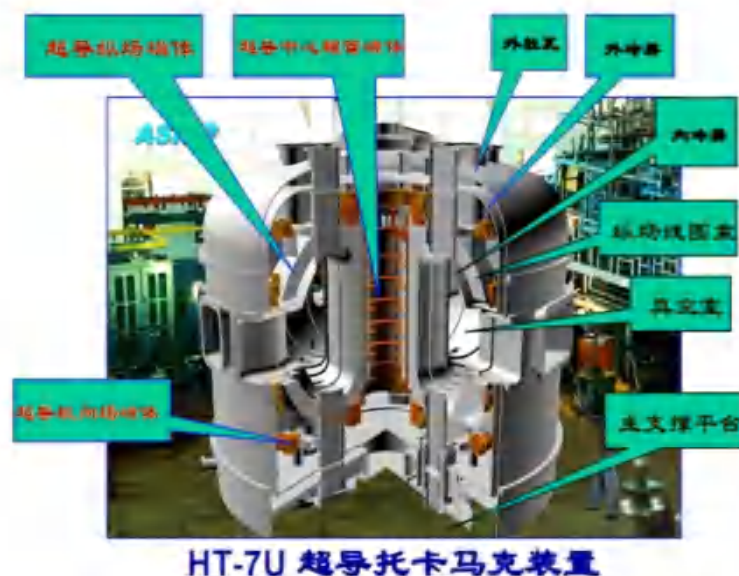
图：HL-2M装置结构示意图



2.2.2 国内磁约束研究进展-等离子体所“东方超环”（EAST）创造新世界纪录

- 由中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所（等离子所）自主设计研制的具有完全知识产权的世界首个全超导非圆截面托卡马克装置EAST可以对磁约束核聚变相关的前沿物理问题开展实验研究和工程验证，为未来稳态、安全、高效的聚变堆提供物理和工程技术基础。
- EAST内部部件是指所有装在EAST真空室内部的硬件结构，其主要作用为在未来EAST长脉冲放电时作为真空室结构的屏蔽第一壁，抵抗核聚变反应产生的热流和粒子流。2023年4月12日，中外合作的世界首个全超导托卡马克核聚变实验装置EAST获重大成果，成功实现了403秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行，创造了托卡马克装置高约束模式运行新的世界纪录。4月13日，团队再次重复了403秒稳态长脉冲高约束模等离子体运行，标志着EAST装置高参数长脉冲稳态运行的可靠能力。
- 2023年下半年，BEST（紧凑型聚变能实验装置）在合肥市庐江区招标。2023年11月已经完成园区基坑施工，计划2024年年初启动园区建筑土建施工。

图：EAST装置主机及内部构件示意图



图：真空室外部结构



2.2.2 国内磁约束研究进展-等离子体所 中国聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)

- 聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）是《国家重大科技基础设施建设“十三五”规划》中优先部署的大科学装置。为我国开展聚变堆设计及核心部件研发、大规模低温和超导技术研究、强流离子束与基础等离子体研究等提供技术支撑。工程目标是建成参数高、功能完备的综合性研究设施。
- CRAFT主要面向磁约束核聚变堆开展近堆芯等离子体行为研究，并对超导磁体和偏滤器等关键部件在聚变堆条件下的可靠性、稳定性和安全性进行探究和评估。 CRAFT主要建设内容为超导磁体研究系统和偏滤器研究系统，其中超导磁体研究系统要建设三个大型超导磁体，包括：纵场（TF）原型线圈磁体、中心螺线管模型线圈（CSMC）磁体、高温超导中心螺线管缩比线圈磁体。
- 2021年7月，下一代“人造太阳”——中国聚变工程实验堆已完成工程设计。目前，聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）尚未完成全部建设，2022年3月26日CRAFT园区正式在合肥交付启用。根据中国磁约束核聚变路线图，未来瞄准建设世界首个聚变示范电站。这是磁约束核聚变领域又一个国家重大科技基础设施项目，**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，保证未来聚变工程堆建设和关键部件研发的顺利进行。**

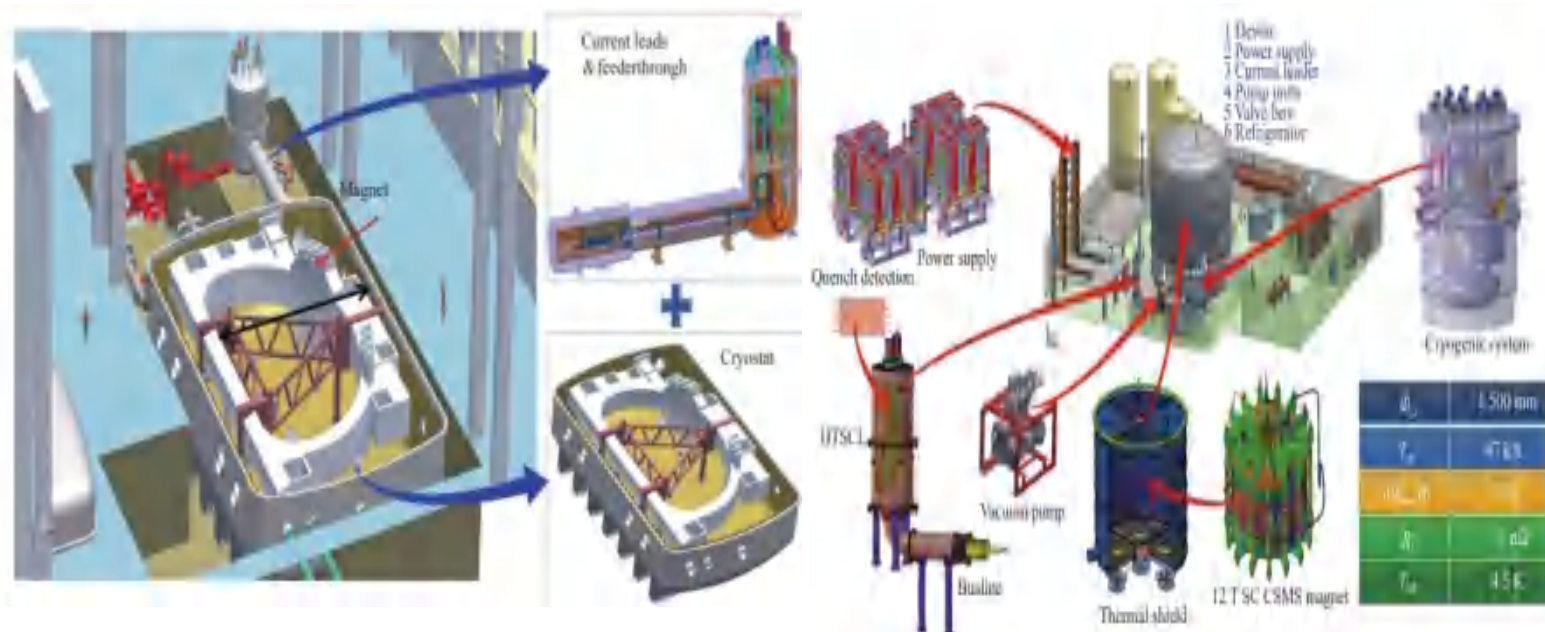


图：聚变堆主机关键系统综合研究设施（CRAFT）效果图

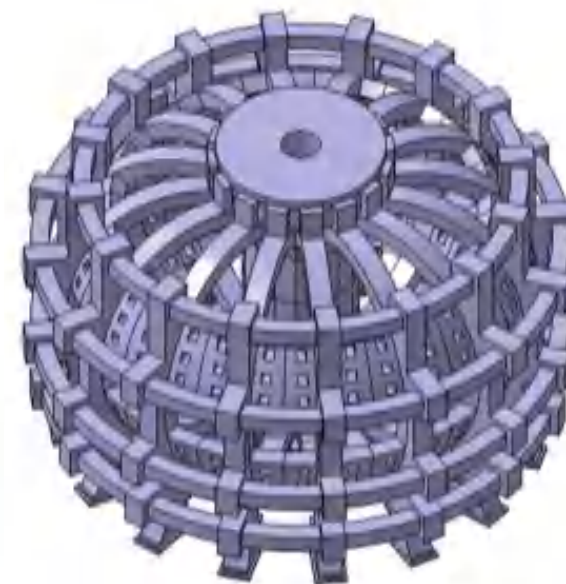
2.2.2 国内磁约束研究进展-中国聚变工程实验堆(CFETR)

- 2017年，中国推出比ITER规模更大的聚变工程实验反应堆（CFETR），计划到2035年建成，开始大规模科学实验，中国核聚变研究由此开启新征程。CFETR计划分三步走，完成“中国聚变梦”。第一阶段到2021年，CFETR开始立项建设；第二阶段到2035年，计划建成聚变工程实验堆，开始大规模科学实验；第三阶段到2050年，聚变工程实验堆实验成功，建设聚变商业示范堆，完成人类终极能源。CFETR将为世界提供关键的能力，以开发和实验未来商用电厂所需的关键元素。CFETR将为中国立足于聚变能发展前沿提供强大基础。

图：CFETR TF 原型线圈及其测试平台



图：CFETR超导磁体系统



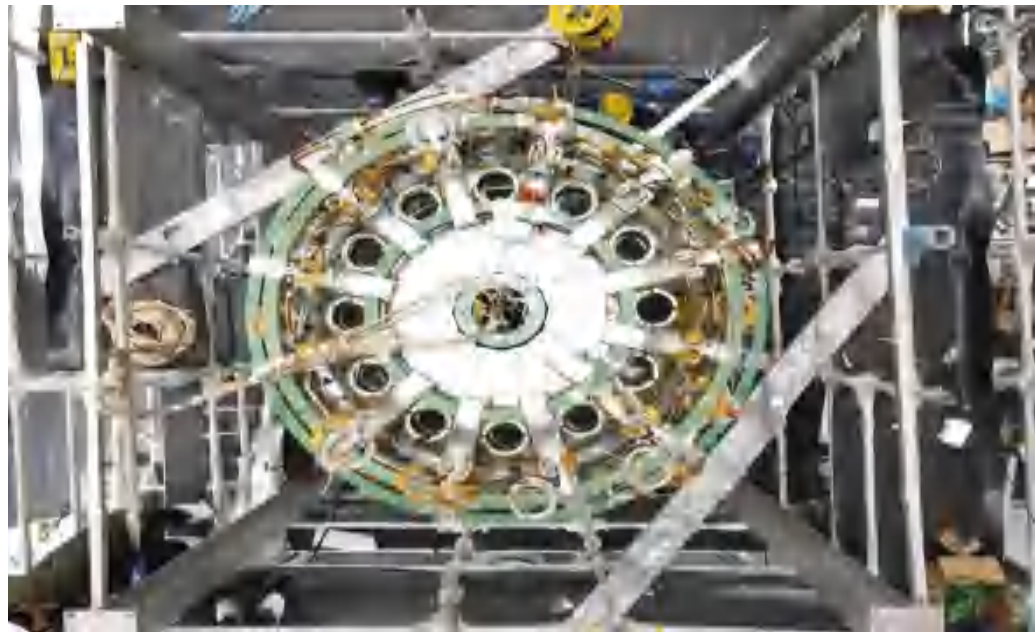
2.2.2 国内磁约束研究进展-能量奇点:洪荒70高温超导托卡马克

- 洪荒70是全球首台全高温超导托卡马克装置，率先在完整装置层面验证高温超导托卡马克技术路线的工程可行性。装置由能量奇点设计、研发和建设，总体安装由中国核工业第五建设有限公司承建。洪荒70的设计工作开始于2022年3月，2023年8月启动总体安装。2024年3月，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至此建成，洪荒70将开始磁体降温和调试运行，以尽快实现等离子体放电。洪荒170为公司下一代托卡马克装置，预计到2027年完成。
- 能量奇点能源科技（上海）有限公司，成立于2021年，位于上海市，是一家以从事科技推广和应用服务业为主的企业。企业注册资本174.6233万人民币，并已于2023年完成了Pre-A轮，交易金额近4亿人民币。董事长兼总经理为杨钊，董事有叶雨明、吴頔，监事为董阁。公司核心技术有高温超导磁体，基于高温超导材料的先进磁体系统是实现聚变商业发电的关键一环。高温超导磁体可以显著提升装置性价比，显著增强聚变能源商业化潜力。先进等离子体物理，实现等离子体长时、稳定运行的科学和工程基础正在逐步构建。人工智能技术，人工智能技术在可控核聚变领域具有广阔应用空间。

图：融资历程



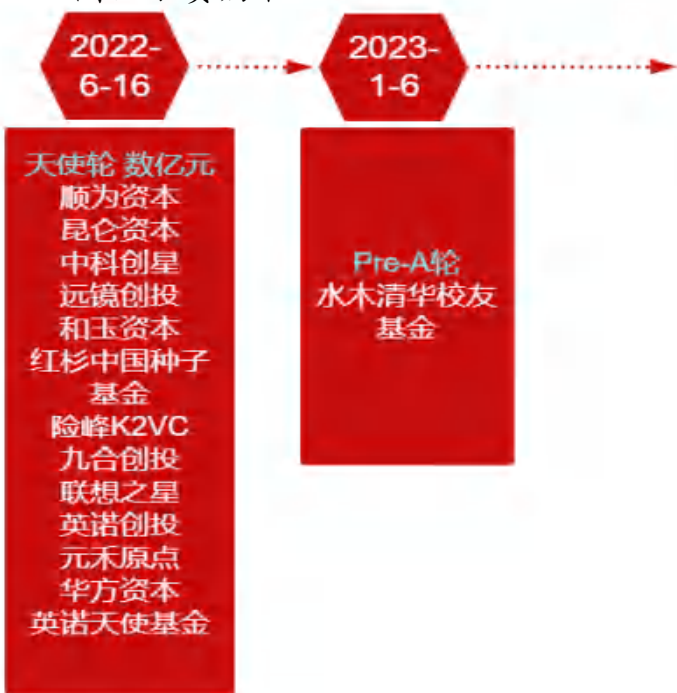
图：洪荒70装置结构图



2.2.2 国内磁约束研究进展-球形托卡马克 多个指标全国第一

- 2023年第三季度，由清华大学设计、星环聚能与清华大学联合建设的聚变实验装置SUNIST-2球形托卡马克关键等离子体参数和脉冲大功率电源性能较上一季度翻倍提升，环向磁场等指标在球形托卡马克领域已达国内第一、世界第三；星环聚能在高温超导磁体、重复重联运行方式和非感应启动等关键聚变工程和物理领域取得了一系列显著进展。
- 陕西星环聚能科技有限公司，成立于2021年，位于陕西省咸阳市，是一家以从事科技推广和应用服务业为主的企业。企业注册资本140万人民币，实缴资本112万人民币，并于2023年1月完成了Pre-A轮投资。2024年3月，由上海知识产权基金领投，公司再次完成了数亿元Pre-A轮投资，资金将主要用于星环聚能新一代聚变验证装置的设计、研发和建造。公司创始团队核心成员均来自清华大学工程物理系核能所团队，该团队运行国内首个球形托卡马克（SUNIST）近二十年，在球形托卡马克及其技术等方面有深厚的积累，是目前国内系统性从事磁约束可控聚变研究的顶尖团队之一。

图：融资历程



图：SUNIST-2球形托卡马克



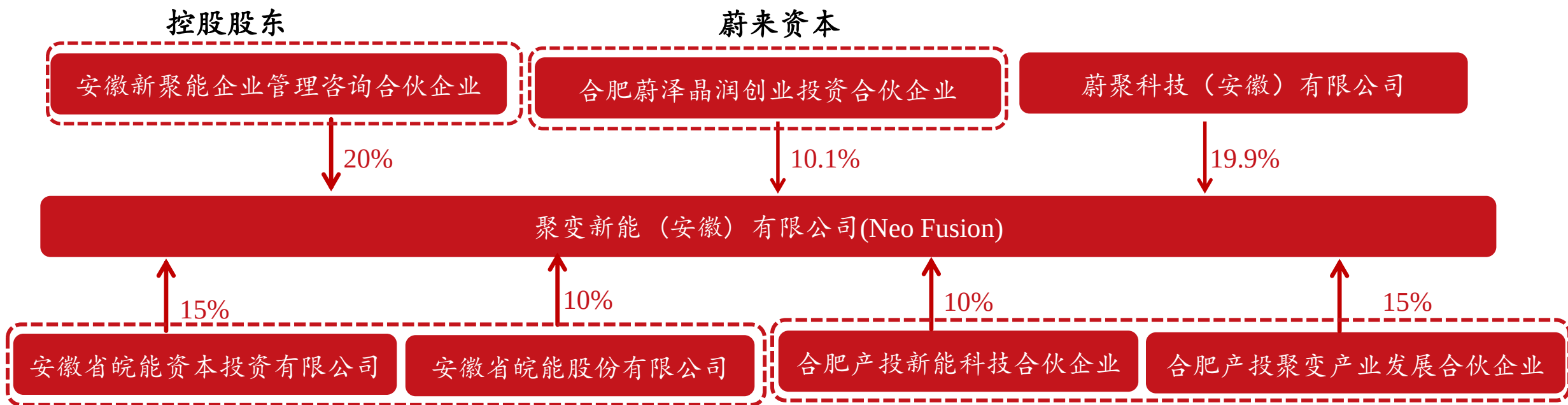
星环聚能的发展规划分为三步：

- 第一步是建立原理验证装置，计划在今年一季度完成；
- 第二步是构建技术验证装置CTRFR-1，一台接近聚变堆要求的中型高温超导球形托卡马克，预计2027年实现；
- 第三步则是打造商用示范堆CTRFR-2，将与业界合作验证聚变堆的燃料循环、功率输出、抗中子与热负荷材料等问题，计划2032年实现。

2.2.2 国内磁约束研究进展-聚变新能 参与建设BEST装置

- 2023年，聚变新能有限公司与等离子体所合作在合肥市建设紧凑型聚变能实验装置BEST。2023年11月已经完成园区基坑施工，计划2024年年初启动园区建筑土建施工。据天眼查显示，公司已经开展BEST装置的多项招标项目。
- 2023年，蔚来与安徽省和合肥市的国有资本共同组局成立聚变新能(安徽)有限公司(Neo Fusion)，以实现可控核聚变的商用发电为愿景，背后技术主要来自两家合肥的科研院所(中国科学院等离子体物理研究所,合肥综合性国家科学中心能源研究院)。聚变新能主要从事于新兴能源技术研发、新材料技术研发及发电技术服务等。在发展模式上，公司明确规划了“聚变实验装置—聚变工程示范堆—商业聚变电站”三大发展阶段，其中，紧凑型聚变能实验装置 BEST 的建设方案已通过国际聚变权威专家多轮评审。同时，为实现聚变能商业化的目标，公司计划适时开展聚变工程示范堆的研发工作。

图：股权结构图



安徽省能源集团有限公司(安徽省国资委为实控人)的控股子公司 指合肥市产业投资控股(集团)有限公司，实控人是合肥市国资委

2.2.2 国内磁约束研究进展-玄龙-50 国内首座中等规模球形物理实验装置

- 在过去的五年，新奥已经累计投入约30亿元用于聚变能研发，建立了“河北省紧凑型聚变重点实验室”，建成了国内首座中等规模球形环物理实验装置“玄龙-50”，组建了百余人、专业化的高层次技术研发团队，构建了开放式生态研发模式，还与国内外专业科研院所建立了广泛的技术合作。
- EXL-50 (ENN Xuanlong-50, 玄龙-50) 是基于聚变中心根据新奥科技（新奥能源研究院）的总体规划，建设成功的紧凑型聚变研究装置。该装置是新奥自主设计建造的中型球形托卡马克实验装置。2018年10月开始启动，主体于2019年6月建设完成，并投入放电运行至今，装置在无中心螺线管ECRH电流驱动实验方面取得了一系列的进展。EXL-50装置的主机部分高7.5米，长宽6.8米，由真空室、环向场线圈、极向场线圈、支撑系统等四大部件组成。
- 2022年，新奥启动了与国际同类装置整体参数领先的球形环新装置—新奥“和龙”建设计划。项目计划硬件投资40亿元，在四年内建成。下一步将通过“和龙”装置，探索解决球形环氢硼聚变中的各项科学问题和关键技术。新奥聚变研究的下一代球形环装置“和龙-2”的物理设计也已全面开展，将成为攻关和验证球形环氢硼聚变路线可行性的关键装置。2022年新奥决定将玄龙-50改造升级为玄龙-50U，籍此作为下一代和龙-2装置的前序平台。2024年1月24日，玄龙-50U正式启动，获得了重复稳定的放电，等离子体电流超过100kA，等离子体平顶维持2秒。玄龙-50U较玄龙-50，对主体真空室、环向场线圈、极向场线圈、电源系统进行了升级，新增了中心螺线管，磁场提升了约两倍，等离子体密度和离子温度等物理参数也将显著提升，总体性能与美国NSTX、英国MAST等国际大型球形环处于同一级别。



图：玄龙-50

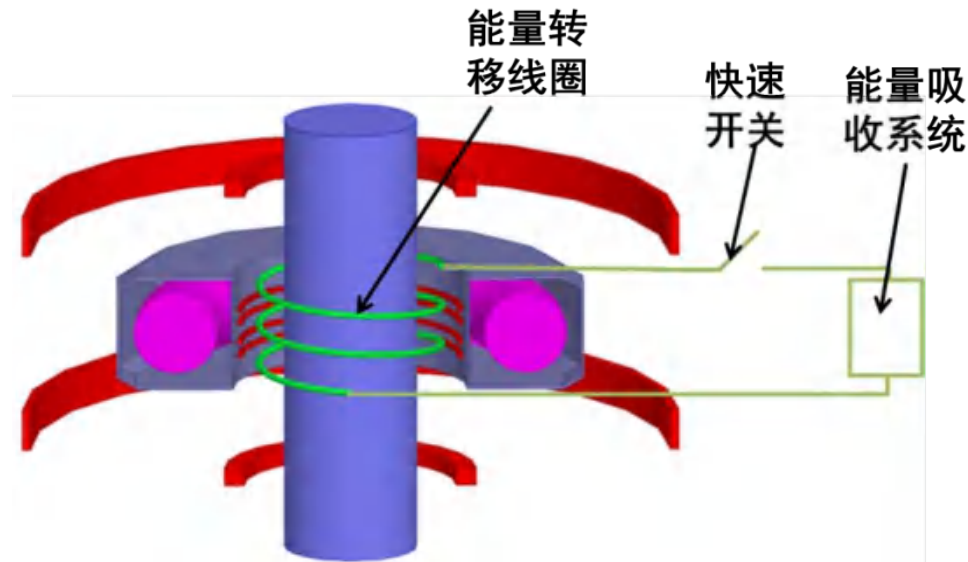


图：玄龙-50U

2.2.2 国内磁约束研究进展-聚变实验装置J-TEXT 高校中唯一的大中型托卡马克装置

- 2016年，华中科技大学聚变与等离子体所依托J-TEXT装置开展联合研究，与美国德克萨斯大学奥斯丁分校、韩国国立聚变研究所、英国卡拉姆实验室等多个国际知名磁约束聚变研究机构建立了良好的合作关系，签署了正式的合作协议，汇聚了众多的国际领军人才，取得了一批具有国际影响力的研究成果。2016年11月教育部正式将华中科技大学申报的“磁约束聚变与等离子体”国际合作联合实验室列入立项建设名单。
- J-TEXT是我国高校中唯一的大中型托卡马克装置，也是依托于华中科技大学成立的“磁约束核聚变教育部研究中心”的主要研究平台。
- 如图示是J-TEXT能量转移系统的示意图，能量转移线圈绕在中心柱上，并与快速开关和能量吸收部件相互串联构成能量转移回路。通过相关研究实现等离子体大破裂的抑制与缓解，对于ITER及未来聚变堆建设具有极为重要的意义。

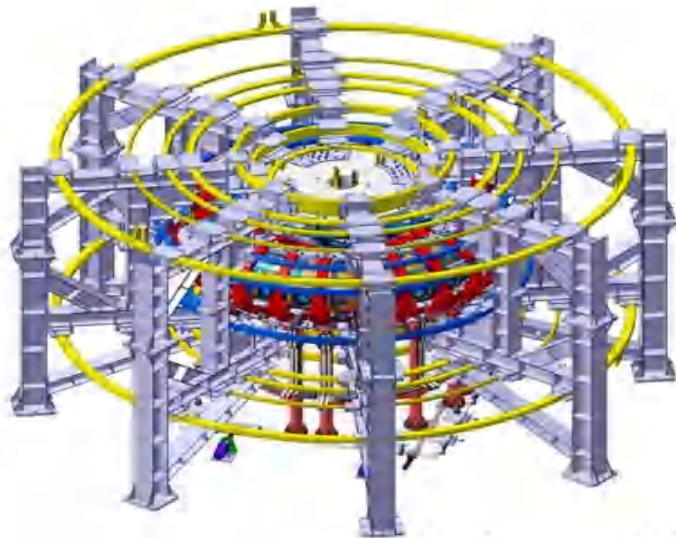
图：等离子体破裂电磁能量转移结构原理图



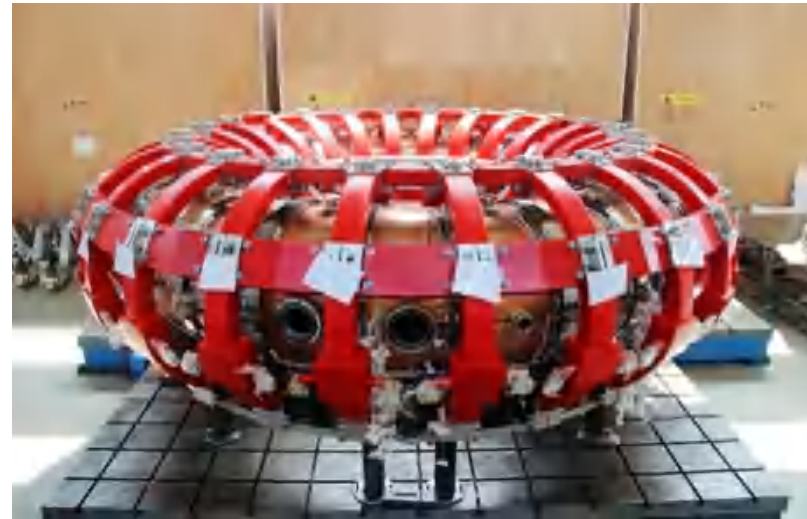
2.2.2 国内磁约束研究进展-自行设计研制的反场箍缩装置KTX

- KTX是中国完全自行设计、自主研制集成的国际先进反场箍缩装置。项目由中国科学技术大学物理学院基础等离子体物理重点实验室承担，属科技部“国家磁约束核聚变能发展研究专项”支持的大型装置建设项目。装置在2015年8月1日正式竣工，经过两个多月的系统调试，于11月3日正式运行放电。
- 反场箍缩是有别于托卡马克、仿星器位形的另一类环形磁约束聚变装置，其主要特点是约束等离子体的磁场是由等离子体内部电流所产生，具有纯欧姆加热达到聚变点火条件、高质量功率密度等优势，是未来磁约束反应堆位形的候选方案。
- 装置设计的各项指标均达国际同类装置先进水平，它的建成，将为国内外从事等离子体物理研究的科研人员提供一个全新的大型实验平台，对中国磁约束聚变领域高端人才培养，发展磁约束聚变能科学技术研究都具有重要意义。
- KTX装置采用真空室双C开合可进性设计，解决了当前反场箍缩装置可进性差、真空室维护更新难、费用高的缺陷，为装置的先进锂壁运行提供了必备的实验条件。

图：KTX装置主机结构图



图：KTX装置真空室与纵场磁体整体穿插组合及双C组件合龙成功



第三部分 资本市场对可控核聚变投入逐渐爆发

- 3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势
- 3.2 国际可控核聚变融资快速增长-部分核聚变公司主要进展

3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

- 根据FIA2023年度报告，截至2023年7月，研究可控核聚变的公司共融资62亿美元，其中私人投资59亿美元，政府资助2.72亿美元。从2022到2023年，新增14亿美元投资，新增了13家聚变公司。国际上知名投资者有比尔盖茨、谷歌公司、索尼公司、尼康公司，等等。行业内创造出了975个新职业，提供了大概3000个工作岗位。从2022年至2023年，全球在可控核聚变领域的整体融资规模呈现快速增长。

图：2022年国际大规模融资情况



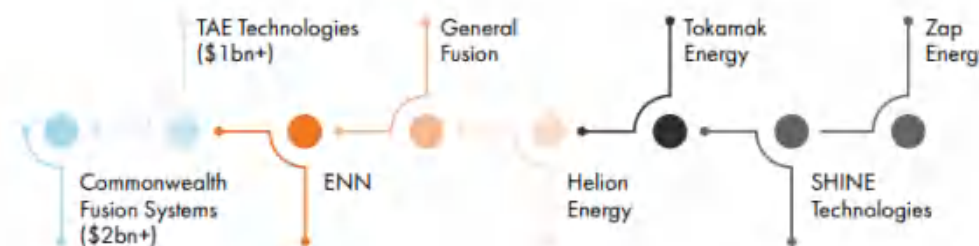
图：2023年国际大规模融资情况



图：截至2023年，核聚变公司总融资



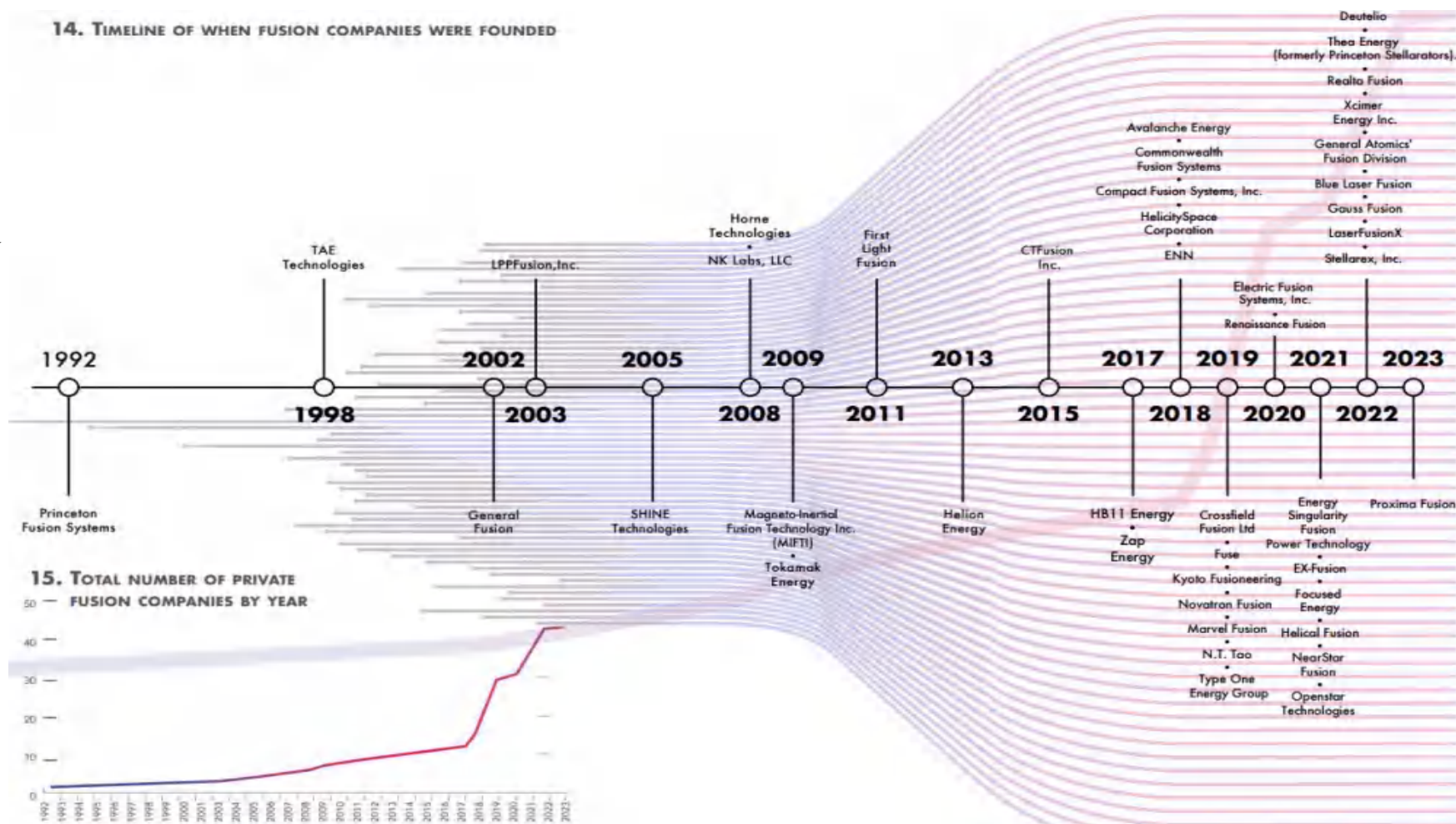
图：截至2023年，融资规模超过2亿美元的公司



3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

- 根据FIA2023年度报告，聚变公司前景广阔，具有较强商业价值。近年来，全球范围内新建立的聚变公司数量呈现爆发式增长。
- 国内的能量奇点、星环聚能被列为独角兽公司，市场对聚变公司的未来比较乐观。

图：聚变公司建立时间表



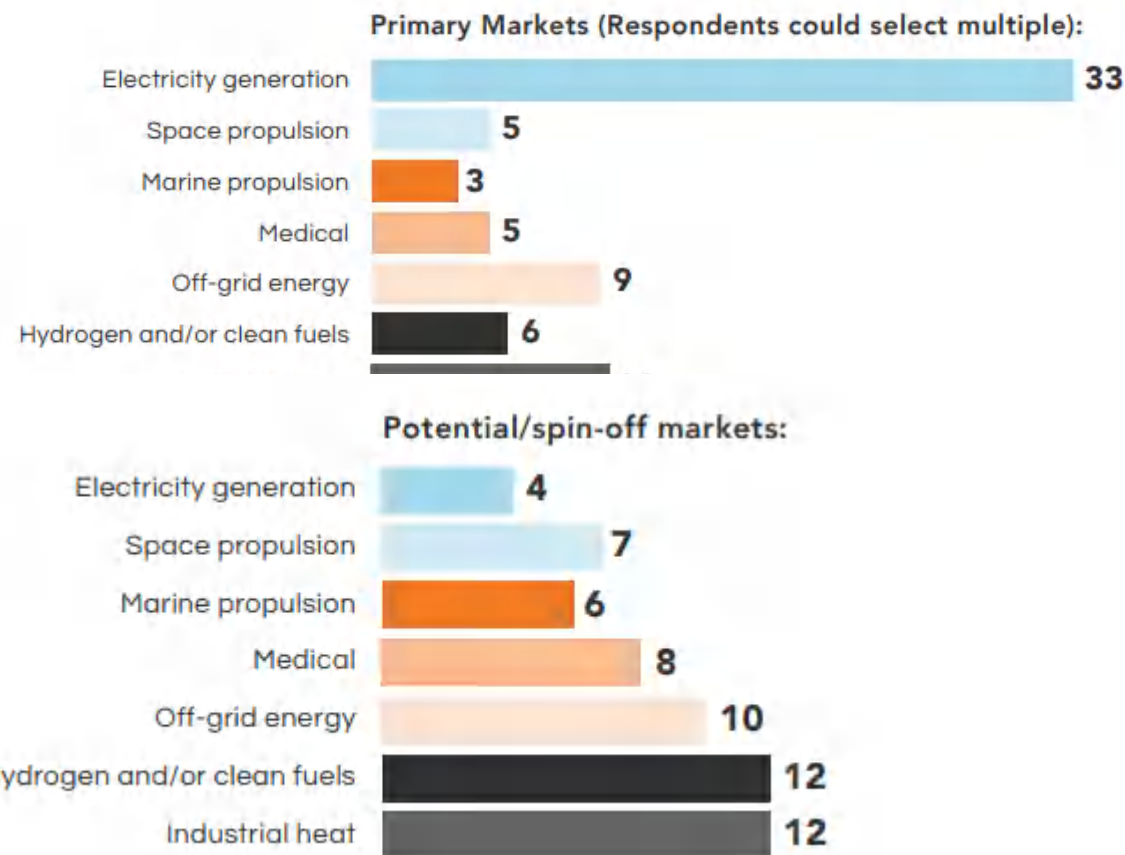
3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

- 目前全球核聚变公司，美国有25家，领先于其他国家；其次是日本、英国、德国，分别有3家；中国有4家核聚变公司。大部分核聚变公司主要聚焦于电力和工业用热两大领域，但是清洁能源作为潜在市场势头强劲，前景广阔。2023年新增的核聚变公司中，美国新增4家，中国新增2家（能量奇点，聚变新能），日本新增1家，德国新增2家，瑞典新增1家。此外，国内核聚变公司还包括新奥集团，星环聚能，翌曦科技。

图：2023年核聚变公司的分布图



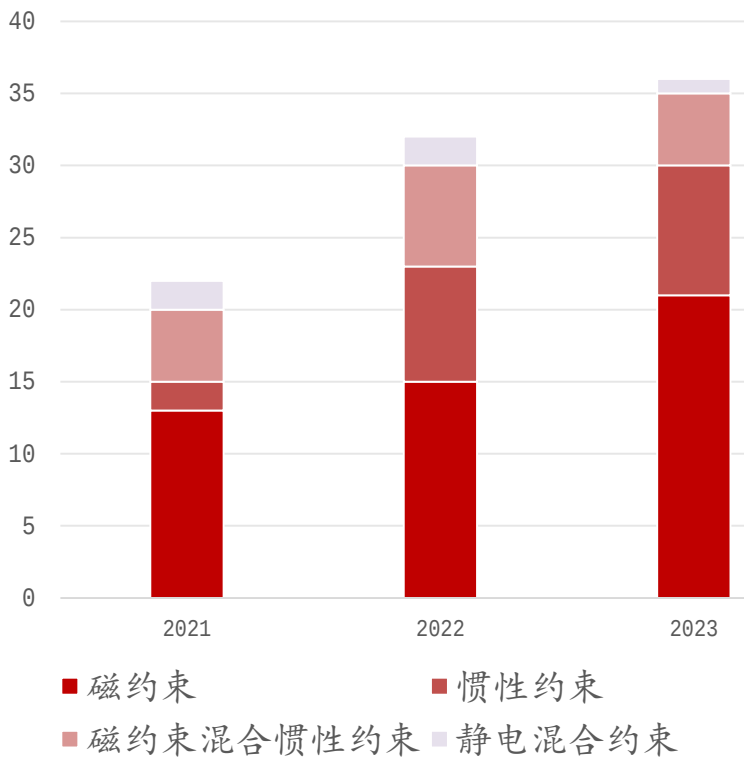
图：2023年核聚变公司的目标市场



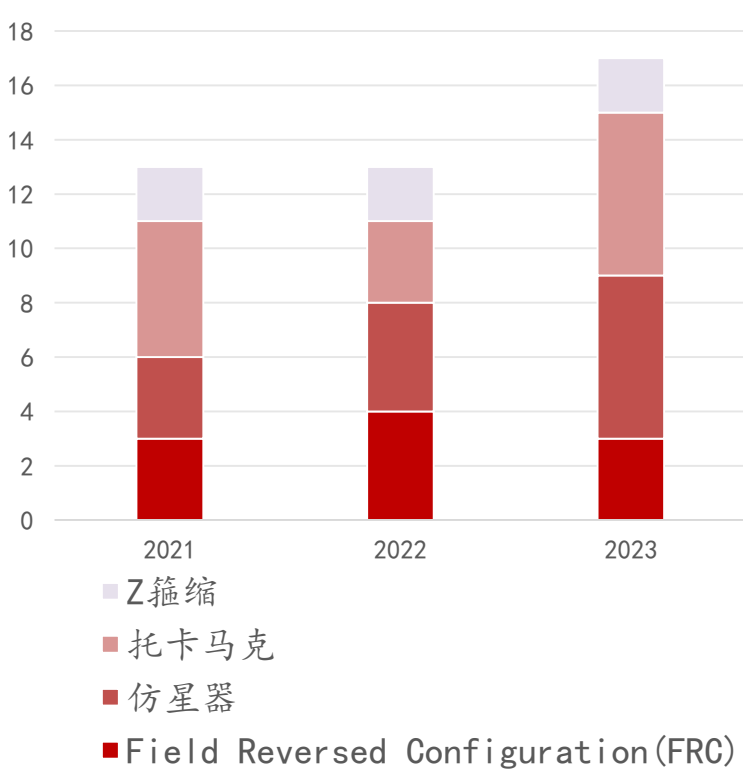
3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

■ 截至2023年7月，国内外最广泛的核聚变途径是磁约束（21家）、其次是惯性约束（9家），还有有5家公司同时进行磁约束和惯性约束的研究；使用最广泛的磁约束聚变途径是托卡马克（6家）、其次是仿星器（6家）。我国的聚变公司主要项目是托卡马克。从2022年到2023年，新增6家公司选择磁约束的实现途径，而2家公司放弃了磁约束的方法，也有公司选择了新的方法，如非热激光聚变、里德伯物质燃料基聚变等。可见磁约束仍是主流方向，但是也有公司在不断创新。大多数公司使用氘氘作为核聚变燃料，其次是氘氚。

图：2021-2023核聚变公司聚变实现途径



图：2021-2023核聚变公司具体聚变方法



图：2022-2023核聚变公司使用燃料方案

	2022	2023
氘 氘(DD)	2	3
氘 氘， 氘和硼-11	1	1
氘 氘(DHe3)	2	2
氘 氘(DT)	22	28
氘和硼-11(pB11)	5	5

3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

	公司名称	总融资规模 单位：亿	技术路线	
国际	COMMONWEALTH FUSION SYSTEM	> \$20	建造托卡马克 SPARC ，将托卡马克研究与新的突破性高温超导（HTS）磁体技术相结合。	
	HELION	\$5.77	Trenta (第六代聚变原型机), Polaris (第七代聚变原型机)预计将是第一个演示聚变发电的聚变装置	
	GENERAL FUSION	\$3	劳森机26 (LM26) -磁化靶核聚变（MTF）技术	
	TOKAMAK ENERGY	\$2.50	球形托卡马克	
	ZAP ENERGY	\$2.08	建立一个低成本、紧凑和可扩展的聚变能源平台，在没有磁线圈或高功率激光器的情况下限制和压缩等离子体。	
	MARVEL FUSION	\$1.12	惯性约束，利用低中子燃料实现聚变能	
	FIRST LIGHT FUSION	\$0.97	弹丸聚变技术 (Peoprojectile Fusion)是一种新的惯性聚变方法	
	KYOTO FUSIONEERING	\$0.91	等离子体加热、核聚变燃料循环和能量转换系统	
	AVALANCHE ENERGY	\$0.53	Orbitron 五千瓦的聚变微型反应堆	
	TYPE ONE ENERGY GROUP	\$0.3	仿星器	
	FUSE	\$0.18	组装世界上第一个和最高功率驱动器（1TW），并运行一个脉冲中子发生器，许可产生大于 10 ^ 13 热核中子	
	公司名称	融资规模		技术路线
国内	能量奇点	2022-2-25 天使轮 4亿元	米哈游 蔚来资本 红杉中国种子基金 蓝驰创投	洪荒70高温超导托卡马克
		2023-4-28 Pre-A 4亿元	米哈游 云和方圆 黑门投资 ENLIGHTENMENT	
	星环聚能	2022-6-16 天使轮 数亿元	顺为资本 昆仑资本 中科创星 远镜创投 和玉资本 联想之星 英诺创投 九合创投 元禾原点 华方资本 英诺天使基金 险峰K2VC 红杉中国种子基金	球形托卡马克
		2023-1-6 Pre-A	水木清华校友基金	
		2024-3-25 Pre-A 数亿元	上海知识产权基金 华成创投 华成创投 和玉资本	
	翌曦科技	2022-09-19 种子轮 5000万元	中科创星 合力投资	高温超导磁体
	新奥集团	暂未融资	紧凑型聚变研究装置	
	聚变新能	注册资本50亿元 2023-5-22 天使轮 15亿元	蔚来汽车 蔚来资本 皖能电力 合肥产投集团	可控核聚变商用发电

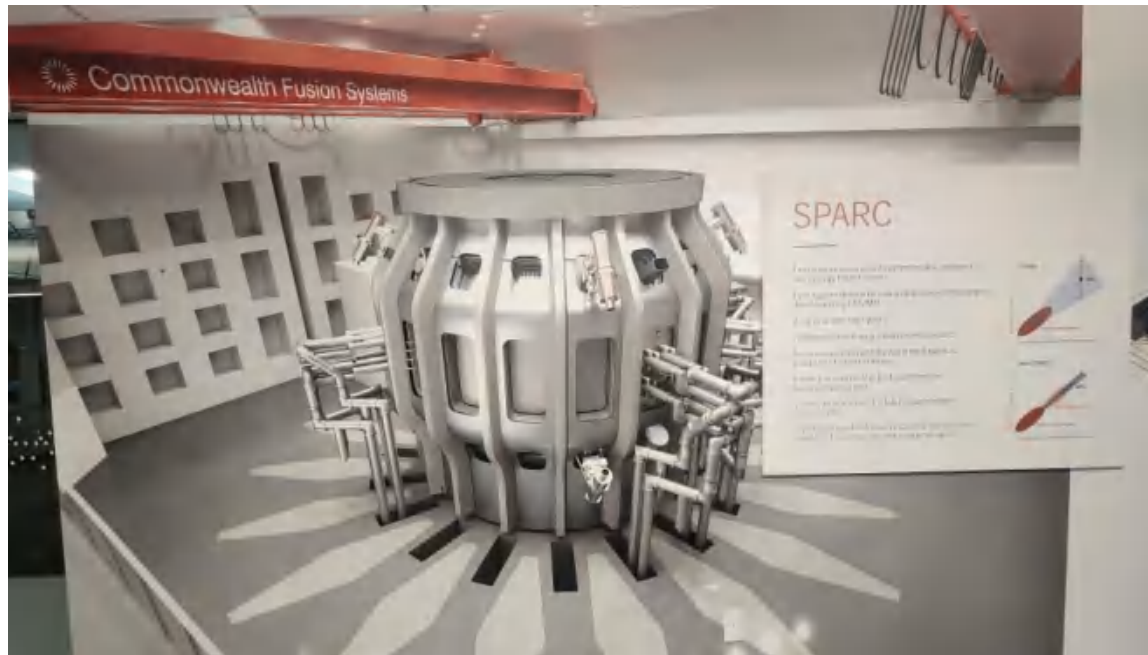
3.1 国内外可控核聚变融资快速增长，逐渐呈现爆发趋势

	公司名称	融资进程
国际	COMMONWEALTH FUSION SYSTEM	2019-6-17 种子轮，2019-6-27 A轮 1.15亿美元 领投方 突破性能源风险投资，2020-5-26 A轮 0.84亿美元 领投方 淡马锡，2021-12-1 B轮 180亿美元 领投方 老虎环球管理，2023-5-31 美国能源部
	HELION ENERGY	2014-8-14 种子轮 150万美元 领投方 Mithril Capital Management,2015-7-6 A轮，2015-10-1 500万美元，2016-1-1 B轮 0.213亿美元 领投方 Capricorn Investment Group,2019-1-1 C轮 0.1亿美元，2020-1-1 D轮 0.4亿美元 领投方 Dustin Moskowitz,2021-11-5 E轮 5亿美元 领投方 Sam Altman
	GENERAL FUSION	2015-5-19 风投 0.27亿加元 领投方 Khazanah Nasional,2016-3-4 0.128亿美元 加拿大可持续发展技术部，2018-10-26 0.493亿加元 战略创新基金，2019-3-1 二级市场 PenderFund Capital Management,2019-12-16 E轮 0.65亿美元 领投方 Temasek Holdings,2020-7-22 风投 领投方 GIC，2021-1-14 风投 Thistledown Foundation,2021-11-30 E轮 1.66亿加元 领投方 Temasek Holdings,2023-8-9 500万加元 Government of British Columbia,2023-8-9 E轮 0.335亿加元 领投方 BDC Capital Corporation,GIC
	TOKAMAK ENERGY	2014-3-31 风投 400万英镑 UK Innovation&Science Seed Fund,2016-4-7 风投 340万英镑，2017-1-15 风投 0.1亿英镑，2017-8-12 风投 400万英镑，2018-6-5 风投 0.16亿英镑，2019-2-28 风投 0.19亿英镑，2020-1-20 B轮 Hans-Peter Wild
	ZAP ENERGY	2018-11-15 680万美元，2019-12-10 非股权援助 100万美元，2020-4-20 100万美元，2020-7-12 A轮 650万美元，2021-5-5 B轮 0.275亿美元，2022-6-7 C轮 1.6亿美元 领投方 Lowercarbon Capital,2023-5-31 500万美元 美国能源部
	MARVEL FUSION	2022-2-3 A轮 0.35亿欧元 领投方 Earlybird Venture Capital
	FIRST LIGHT FUSION	2011-7-11 风投 100万英镑 领投方 IP Group，2013-10-18 B轮，2015-8-17 风投 0.23亿英镑，2017-11-17 风投 领投方 Oxford Science Enterprises，2020-12-23 风投 0.25亿美元。2021-6-11 二级市场，2022-2-14 C轮 0.45亿美元
	KYOTO FUSIONEERING	2020-1-31 种子轮 0.753亿日元 Kyoto University Innovation Capital,2020-10-12 种子轮 1.5亿日元，2021-1-19 种子轮 1.16亿日元 Coral Capital,2022-2-2 债权融资 7亿日元，2022-2-2 B轮 130亿日元 领投方 Global Brain Corporation,2023-5-16 C轮 1000亿日元 领投方 JIC Venture Growth Investments
	AVALANCHE ENERGY	2013-11-6 非股权援助，2022-3-30 种子轮 0.05亿美元 领投方 Prime Impact Fund，2022-11-1 种子轮，2023-4-24 A轮 0.4亿美元 领投方 低碳资本
	TYPE ONE ENERGY GROUP	2023-3-28 种子轮 0.29亿美元 领投方 Breakthrough Energy Ventures,TDK Ventures,Doral Energy-Tech ventures,2023-5-31 美国能源部

3.2.1 国际可控核聚变融资快速增长—Commonwealth Fusion 托卡马克

- 2021年12月，Commonwealth Fusion从比尔·盖茨（Bill Gates）、盖茨的气候投资公司Breakthrough Energy Ventures、谷歌（Google）、约翰·多尔（John Doerr）、科斯拉风险投资公司（Khosla Ventures）、低碳资本（Lowercarbon Capital）、马克·贝尼奥夫（Marc Benioff）的TIME Ventures等筹集了20亿美元的风险投资资金；2023年6月份，Commonwealth Fusion作为美国能源部选择的八家公司之一，获得了美国能源部4600万美元资金。
- Commonwealth 正专注于建造名为 **SPARC** 的托卡马克，目标是在 2025 年启用它，它将展示净能量增益。Commonwealth在2021年开始在园区内建造SPARC大楼、制造工厂和公司总部。SPARC和ITER都是托卡马克装置，即利用磁场约束核聚变过程，但是**SPARC使用高温超导磁体(HTS)实现与ITER相似的性能，但是体积要小40多倍。**
- 预计在2025年通过SPARC从聚变中获得具有商业相关性的净能源；预计21世纪30年代初完成第一座名为ARC的聚变发电厂建设。

图：SPARC设备渲染图



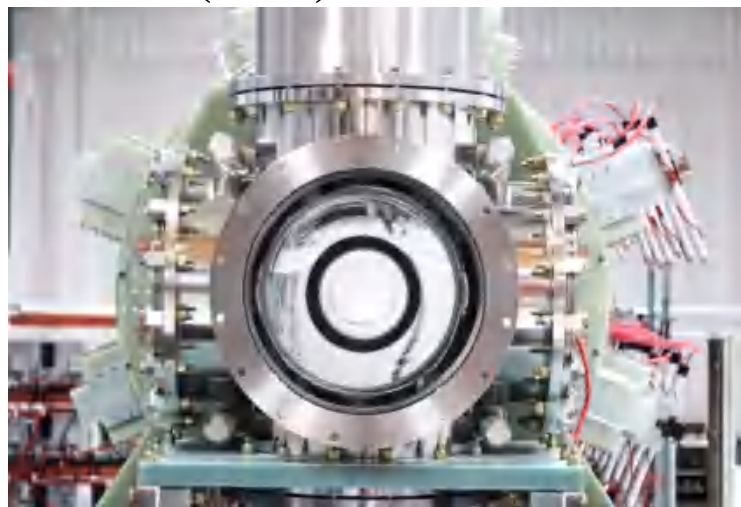
3.2.2 国际可控核聚变融资快速增长—Helion 聚变原型机

- 2020年9月23日,Helion Energy, 一家致力于通过聚变发电创造零碳电力新时代的清洁能源公司, 宣布在最近一次融资后, 其估值为125亿美元。2020年9月22日, Helion 完成了4000万美元的D轮融资, 由投资者和企业家 Asana 联合创始人兼首席执行官兼 Facebook 联合创始人 Dustin Moskovitz 领投。这笔新资金将使该公司能够加快其第6个核聚变原型Trenta的工作。2021年11月, Helion完成5亿美元的E轮融资, 此轮融资由OpenAI的首席执行官和Y Combinator的前总裁Sam Altman领导。
- 2021年, Helion 成为了第一个达到一亿摄氏度的私营公司, 核聚变的理想温度大约是这个温度的两倍, 这一成就对于实现高效核聚变反应非常重要。Trenta是Helion的第6代核聚变原型机, 是第一个达到商业相关聚变条件的私人资助的聚变装置。北极星是第七代聚变原型机, 具有更强的磁铁, 脉冲速度比Trenta快100倍, 北极星有望成为第一台展示聚变发电的核聚变机。
- Helion宣布了建造世界上第一座核聚变发电厂的计划, 该发电厂将于2028年运营。同时, 2023年5月10日, 微软与Helion签署购电协议。

图: Trenta装置



图: 北极星(Polaris)装置



3.2.3 国际可控核聚变融资快速增长—General Fusion 磁化靶聚变技术

- General Fusion于2023年8月9日宣布了2500万美元的新资金，并计划在不列颠哥伦比亚省建造一台演示机。聚变能源公司正试图复制太阳和恒星的力量，将原子粉碎在一起，并捕获反应产生的能量。这家拥有21年历史的公司已经筹集了大约3.3亿美元的资金，最新一轮融资由现有投资者BDC Capital和GIC参投，其中包括不列颠哥伦比亚省政府的370万加元赠款。
- General Fusion的新型磁化目标聚变机被称为劳森机26（LM26），其尺寸约为其计划中的商业聚变装置的一半。反应堆应该能够达到超过1亿摄氏度 - 比太阳中心的温度高出六倍以上。该公司的目标是到2025年使LM26达到核聚变条件，并在2026年实现科学的盈亏平衡等效值——指使用氘作为燃料达到氘-氘盈亏平衡等效。General Fusion的目标是到2030年代初将其技术商业化，并与两个美国国家实验室建立了合作伙伴关系，以推进这一目标。



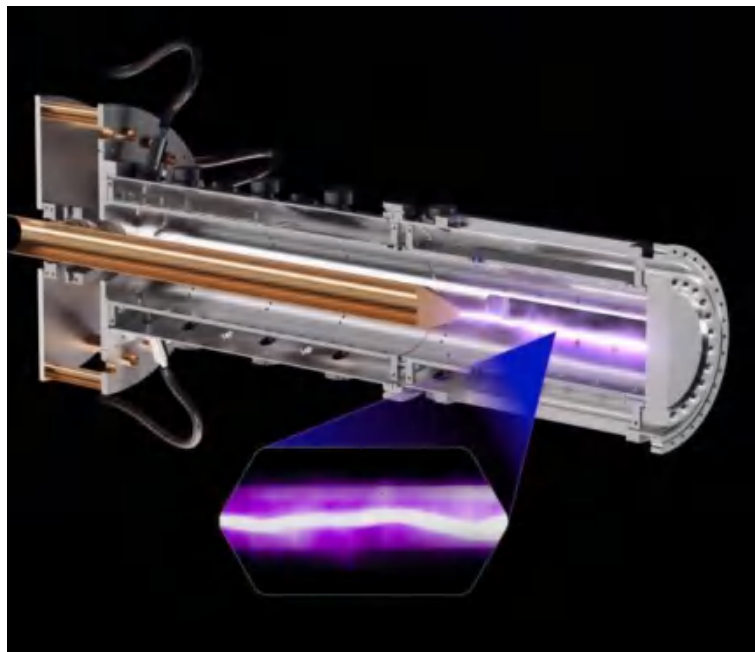
图：LM26的等离子体注射器

- 等离子体注射器已经达到了LM26所要求的温度和能量约束时间
- LM26的结果将验证公司压缩磁化等离子体、以及在大规模上实现聚变条件的能力，装置使用General Fusion独特而实用的聚变方法，而无需使用超导磁体或高功率激光器。

3.2.4 国际可控核聚变融资快速增长—Zap Energy Z箍缩

- Zap Energy在2021年5月5日通过B轮融资0.275亿美元，2022年6月7日通过C轮融资1.6亿美元，领投方为Lowercarbon Capital, 2023年5月31日，美国能源部拨款500万美元。截至2023年6月，公司的总资金约为 2 亿美元的风险投资和 1280 万美元的政府拨款。
- ZAP Energy正在开发一种Z箍缩技术，通过过热材料灯丝驱动电流，产生强大的磁场，从而压缩等离子体。电流越强，等离子体的温度和密度越大，从而达到实现核聚变的条件。
- ZAP Energy正在建造一个低成本，紧凑并且可扩展的模块化聚变能源平台，每个模块都是一个紧凑的氘氘反应堆，能够承受高能中子撞击，反应堆通过限制和压缩等离子体的方式实现聚变，而不需要磁性线圈或高功率激光器。每个模块预计产生50兆瓦的电力，模块化设计能够向小社区供电，规模化可以满足城市的用电需求。

图：使用Z箍缩技术产生不到两英尺长的等离子体丝



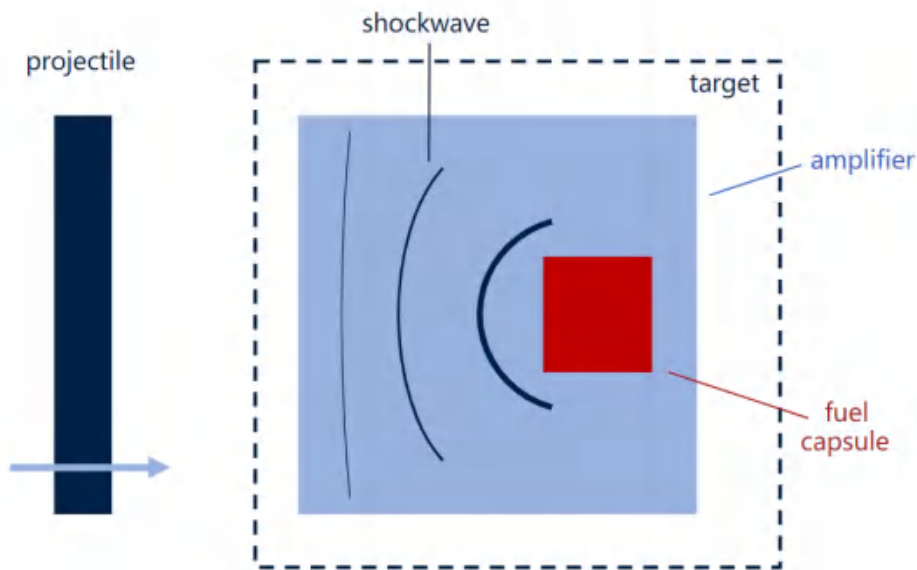
图：紧凑经济型氘氘模块反应堆



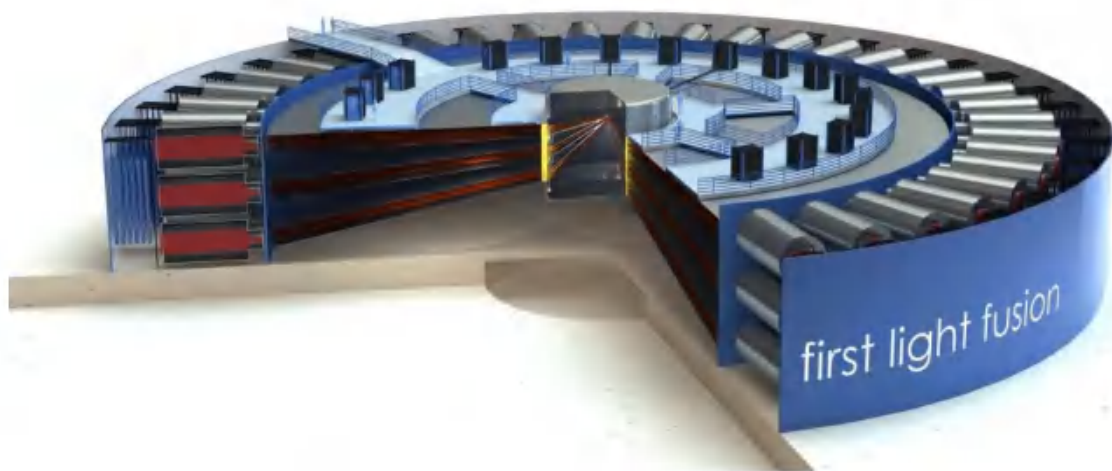
3.2.5 国际可控核聚变融资快速增长—First Light Fusion 惯性约束

- 作为牛津大学的核聚变分支机构，First Light的使命是用最简单的机器解决聚变发电的问题。公司使用的弹丸聚变技术(Peoprojectile Fusion)是一种新的惯性聚变方法,通过利用弹丸撞击含有核聚变燃料的目标，使其内爆达到核聚变发生所需要的温度和密度，这种方法更简单、更节能、物理风险更低。
- First Light的两个核心目标分别是放大器和燃料舱。放大器通过增加弹丸撞击产生的压力降低所需的撞击速度，同时，放大器也使得能量收敛，撞击使得燃料从许多方向被压扁，这对于达到聚变所需的最终密度至关重要。
- 公司预计在2024年开始建造M4-聚变示范装置，预计2027年建造完成。该装置将是世界上最大的脉冲功率驱动器，使用公司独特的靶技术和相应弹丸技术，有望成功实现“点火”，这是实现核聚变能源的关键一步，同时该装置也是试点聚变发电厂的基石。公司希望建造一座发电量约为150兆瓦的发电厂，每30秒实现一次聚变，成本不到20亿美元。发电厂具有防止中子损伤，运用锂产生氦燃料，以及约束聚变能量三大优势，

图：弹丸聚变演示图



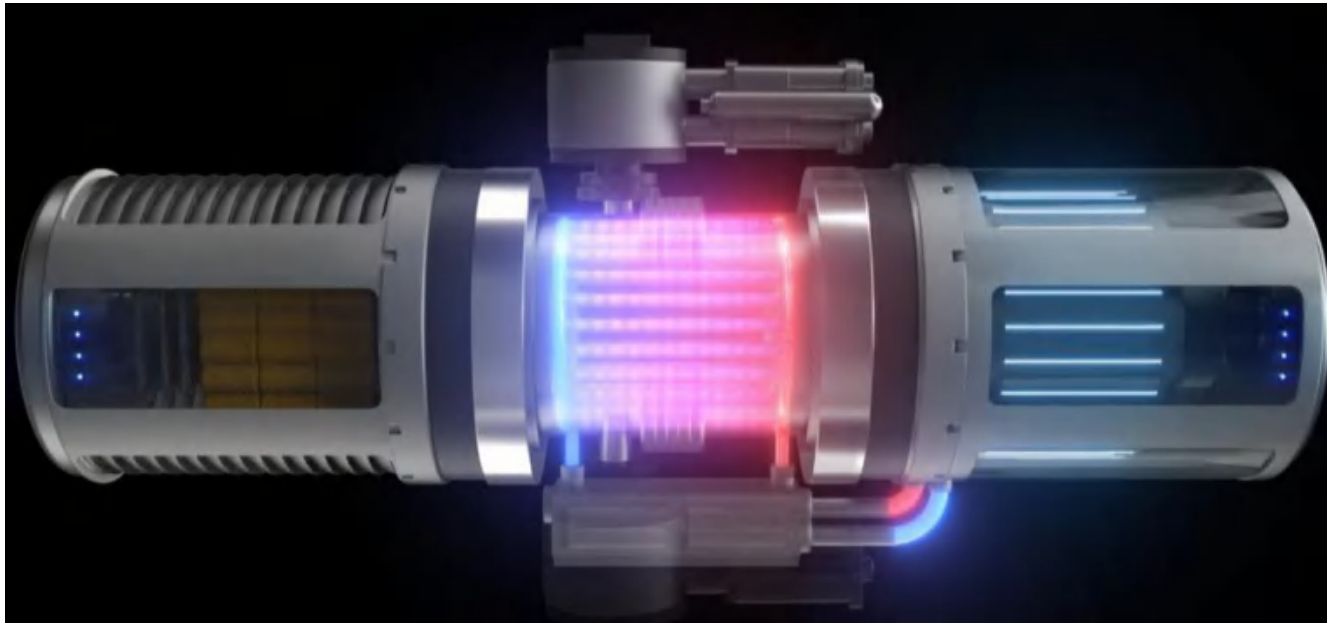
图：M4示范装置



3.2.6 国际可控核聚变融资快速增长—Avalanche Energy 聚变微型反应堆

- Avalanche Energy 2023年4月24日宣布了4000万美元的融资, Chris Sacca的 Lowercarbon Capital 领投了 A 轮融资, Founders Fund 和 Toyota Ventures 参投。
- 公司第二代聚变装置Marty实现在200 kV (千伏) 下运行, 打破了威斯康星大学麦迪逊分销之前创造的190千伏记录。Avalanche的目标是在2024年4月之前达到300kV。
- 2022年, Avalanche赢得了五角大楼国防创新部门(DIU)的合同, 开发一种名为Orbitron的模块化5Kw微型聚变反应堆, 该装置将在运输行业与氢燃料电池竞争, 也可以接入更小的电网使用, 或者与清洁能源结合使用。预计到2027年底Orbitron聚变设备将用于飞行演示。

图: Orbitron装置

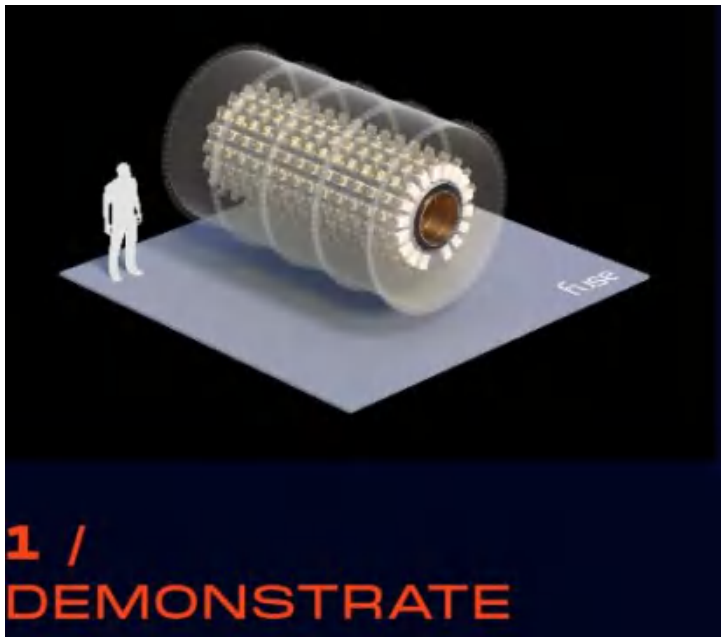


- 装置设计足够小, 可以放到桌子上; 重量轻。
- 模块化。Orbitron通过组装电压可以实现5Kw-100Kw。
- 避免了高功率磁铁或激光的成本和复杂性。

3.2.7 国际可控核聚变融资快速增长—Fuse 混合堆

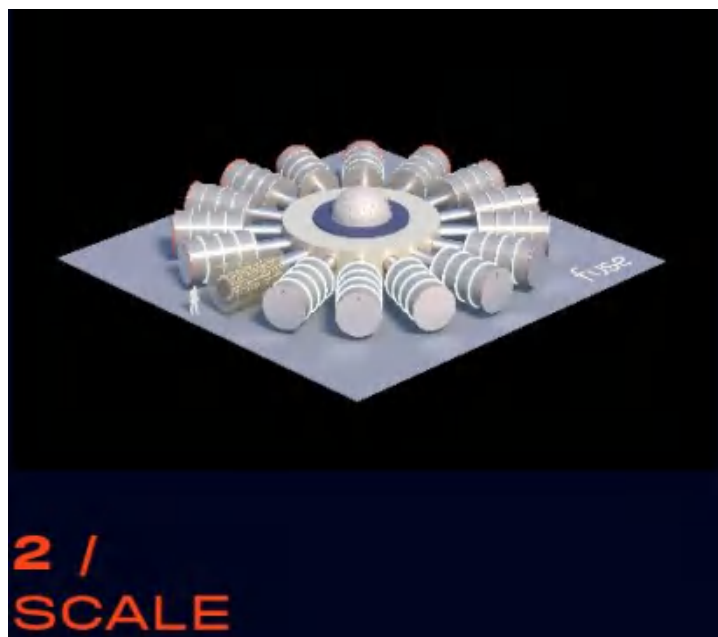
- 不同于NIF激光驱动惯性约束聚变的方法，**Fuse**使用脉冲驱动(释放一个巨大的电池发送能量脉冲，进入聚变目标，使其内爆)。Fuse正在组装世界上第一个也是最高功率(1TW)的驱动器-TITAN，这也是实现磁化线性惯性聚变(MAGLIF)的重要步骤。Fuse是唯一一家致力于MagLIF的美国公司。
- **Fuse正在建造下一代脉冲功率机器(NGPP)**, 同时也在运行一个获得许可的脉冲中子发生器。

图：建立聚变发电厂的前景展望



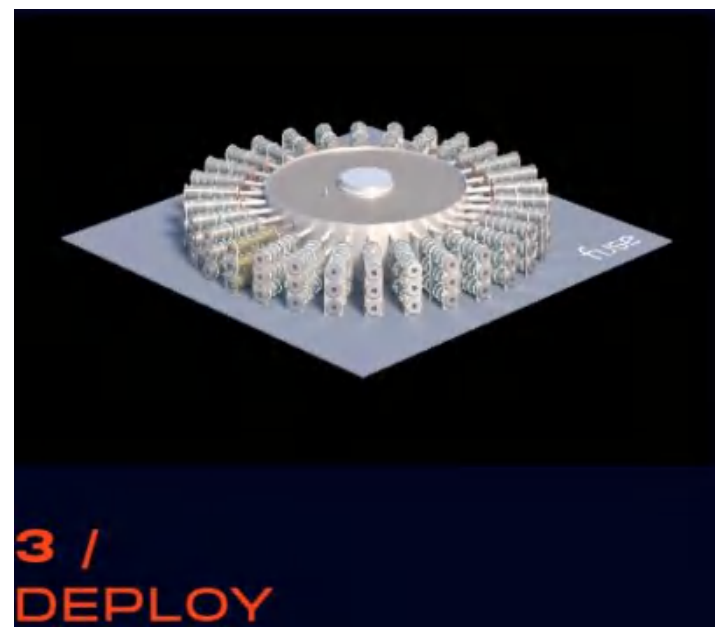
TITAN -2023

TITAN是MAGLIF的构建模块



Z-STAR -2025

Z-STAR是15TW的MAGLIF发生器



APEIRON-I - 202X

建立MAGLIF混合发电厂

第四部分 相关标的：核聚变相关上市公司

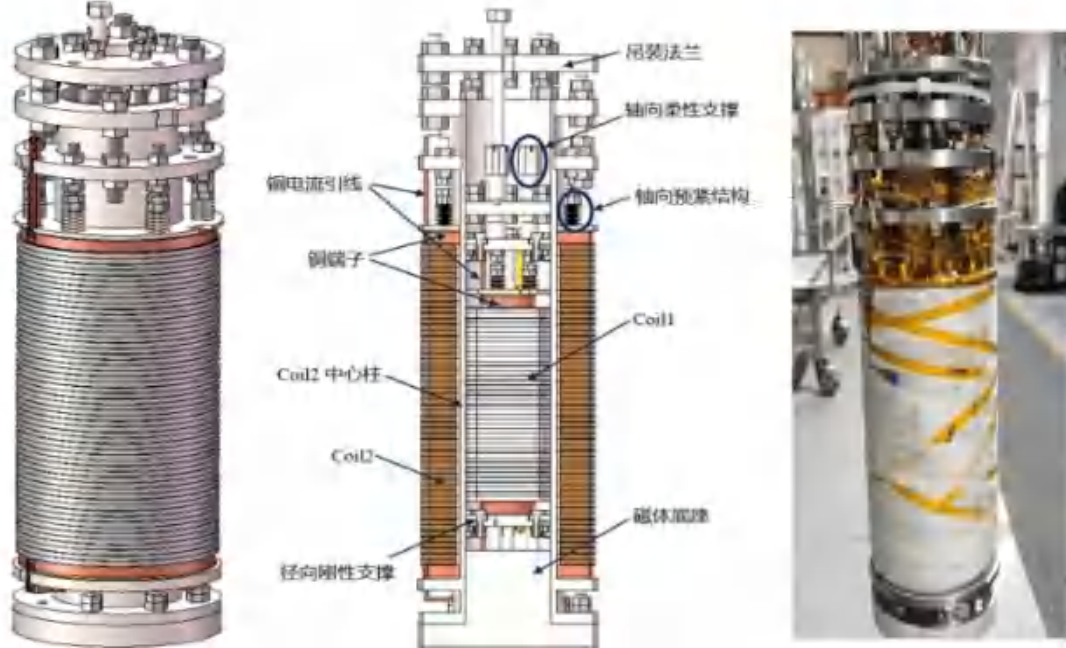
4.1 重点关注：核聚变领域未来突破方向

4.2 相关上市公司

4.1 重点关注：核聚变领域未来突破方向

- ◆ **Q值**，即能量增益因子，指核聚变反应输出能量与维持等离子体稳态的输入能量之比。目前NIF实现了 $Q>1$ 的净能量增益。
- ◆ 国内**BEST,HL-3**等关键实验堆进展，国际**ITER, JT60-SA**等项目进展。
- ◆ 聚变裂变混合堆的投资计划。
- ◆ **等离子体运行状态参数关键突破**。目前，JET装置5秒内产生了能量输出为59兆焦耳的稳定等离子体，HL-3实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行，东方超环“EAST”实现了403秒稳态长脉冲高约束等离子体运行。
- ◆ **关键供应链突破**：1)高温超导产业化，室温超导出现； 2) 需要实现“包层”技术，用于增殖堆内核聚变反应释放的高速中子；使其撞击锂(6Li), 产生氚(T)后重新注入反应堆； 3)需要严格管理放射性物质氙的技术； 4) 需要开发排除等离子体内杂质(α 粒子等)的“偏滤器”； 5) 需要前所未有的大型反应堆。

图：等离子体所研制的全REBCO（稀土钡铜氧）高温超导磁体



图：运用在EAST上的钨铜偏滤器



4.2 相关上市公司

◆聚变能装置核心零部件：国光电气

主要产品是微波器件、核工业设备及部件和其他民用产品。其中，托卡马克装置第一壁板、偏滤器、包层系统满足ITER要求。

◆高温超导感应加热装置：联创光电

控股子公司联创超导是目前全球首家兆瓦级高温超导感应加热装置生产单位，超导磁体是托卡马克装置的关键组成部分。

◆核工业基础件：航天晨光

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产品，以核电膨胀节、核电软管等为代表的核工业基础件产品位列国内龙头。

◆可控核聚变超导线材：西部超导

主要从事高端钛合金材料、超导产品和高性能高温合金材料及应用的研发、生产和销售，其可控核聚变超导线材满足ITER要求。

◆高温超导带材：永鼎股份

主营产品是第二代高温超导带材及其应用设备和超导电气产品，超导带材应用产品有高温超导磁体、全高温超导可控核聚变堆。

◆聚变堆真空室：合锻智能

在聚变堆真空室制造工艺研究方面取得了一定的成果。

核心标的2023-2025年盈利预测表

股票 代码	股票 简称	总市值（亿元）	营业收入（亿元）			归母净利润（亿元）			PE		
			2023E	2024E	2025E	2023E	2024E	2025E	2023E	2024E	2025E
688776.SH	国光电气	65.03	7.44	14.87	21.14	0.90	2.52	3.57	117.15	25.76	18.22
600363.SH	联创光电	127.65	31.45	34.92	39.43	4.52	6.08	7.64	28.24	20.98	16.71
600501.SH	航天晨光	52.58	39.58	54.08	68.36	0.84	1.61	2.47	62.60	32.66	21.29
688122.SH	西部超导	241.68	41.59	59.34	74.50	7.53	12.58	16.17	45.91	19.20	14.94
600105.SH	永鼎股份	67.42	46.08	53.02	60.43	1.08	1.29	1.55	62.18	52.29	43.36
603011.SH	合锻智能	40.79	25.51	34.52		2.44	3.79		16.72	10.76	

5 风险提示

■ 可控核聚变技术发展不及预期

核聚变发电面临的技术挑战极为复杂。等离子体不稳定性一直是核聚变的一个难题，等离子体很难控制，极易“撕裂”，并且逃逸出用来约束它的强大磁场，使得聚变反应突然中断。目前，托卡马克装置是目前最成熟的聚变堆设计方案，其使用超导材料产生强磁场，将等离子体约束在真空室中心，避免与反应堆壁接触。除此之外核聚变商业应用还要考虑燃料的及时补充、反应堆壁材料的耐高温性能，以及高效转化聚变能量为电力的问题。目前还没有一款聚变堆能同时解决这些关键问题，导致各家企业都处于试错阶段。

■ ITER项目推进不及预期

ITER组织于2023年9月审查了新的计划，其中部分内容是为了尽量减少维修真空容器和隔热屏的影响。2022年11月，两个关键的托卡马克组件在组装过程中发现了缺陷，导致项目进一步延迟，此前该项目已经受到了新冠病毒大流行的影响。核许可证的修订也造成了拖延。ITER之前的目标是在2025年前制造出第一个等离子体，目标不得不推迟。ITER组织表示，将在2024年6月向ITER理事会提交一个新的项目基线，分为三个主要阶段：增强的第一等离子体，DT-1和DT-2加上相关的综合调试阶段。2024年2月29日，ITER组织与中核工程牵头的中法联合体签署ITER真空室模块组装合同。

■ 国内可控核聚变项目推进不及预期

“中国环流三号”2023年8月首次实现100万安培等离子体电流下的高约束模式运行，接下来团队将进一步发展高功率加热和电流驱动、等离子体先进运行控制等核心技术，实现堆芯级等离子体运行；等离子体2023年在合肥市建设紧凑型聚变能实验装置BEST；东方超环EAST 2023年4月创下了托卡马克装置高约束模式运行的世界纪录；2024年3月，洪荒70托卡马克总体安装完工，此后将开始磁体降温和调试运行，以尽快实现等离子体放电，洪荒170为公司下一代托卡马克装置，预计到2027年完成；2023年，星环聚能和清华大学合作建设的SUNIST-2聚变实验装置成功运行。

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

北京市西城区展览路48号新联写字楼6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