

证券研究报告

2024年02月20日

行业报告：行业专题研究

机械设备

可控核聚变：聚变创造梦想，核力展望未来

作者：

分析师 朱晔 SAC执业证书编号：S1110522080001



天风证券
TF SECURITIES

行业评级：强于大市（维持评级）
上次评级：强于大市

请务必阅读正文之后的信息披露和免责声明

摘要

□ 人造太阳，未来可期：

- ✓ 核聚变是一种小质量原子的原子核互相聚合生成中子并伴着巨大能量释放的热核反应，可产生大量能量，可控核聚变相当于可控的人造太阳。作为核能的开发方式之一，其相比核裂变在安全、绿色、能量密度等方面更具优势，**被认为是未来能源的唯一方向。**
- ✓ 进行核聚变需要满足十分苛刻的外部条件，并对高温聚变物质进行约束，目前解决可控核聚变主要有三种：磁约束、惯性约束和引力约束，其中以磁约束为原理的托卡马克被普遍认为是最有希望实现可控核聚变的装置。

□ 聚势而强，核项目遍地开花：

- ✓ 核聚变产业强势发展，各国积极发展核项目；蓬勃而生的核聚变产业带动高温超导材料的需求，超导材料的发展也有望大幅降低聚变装置成本与规模，加速核聚变商业化进程。
- ✓ 全球主要国家积极采取行动推动技术突破，*ITER*是各国合作在建的规模最大的可控磁约束核聚变装置，为下一步可控核聚变的成功商业化奠定基础。我国已确定以磁约束聚变作为核聚变技术发展的主要路线，明确未来发展目标与方向，我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置*EAST*，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。

□ 风口已至，展望未来：

- ✓ 核聚变产业公司数量快速增加，融资总额持续增长，全球聚变公司2023年累计融资超过62亿美元，国内市场的星环聚能、能量奇点在近两年内均已获得两轮融资，且融资金额颇高。
- ✓ 政策对核电发展的支持力度加强，核电站核准提速，2019年起我国核电核准速度呈上升趋势，核电机组核准审批步入常态化。同时全球电力需求巨大，带动可控核聚变潜在市场。据预测，**全球核聚变市场规模将从2022年的2964亿美元增长至2027年的3951.4亿美元，CAGR为6.0%。**
- ✓ 但现阶段技术发展仍处于培育期，真正实现“可控”和“商业化”还需时间沉淀，要攻克技术、材料、工程等多重难题。

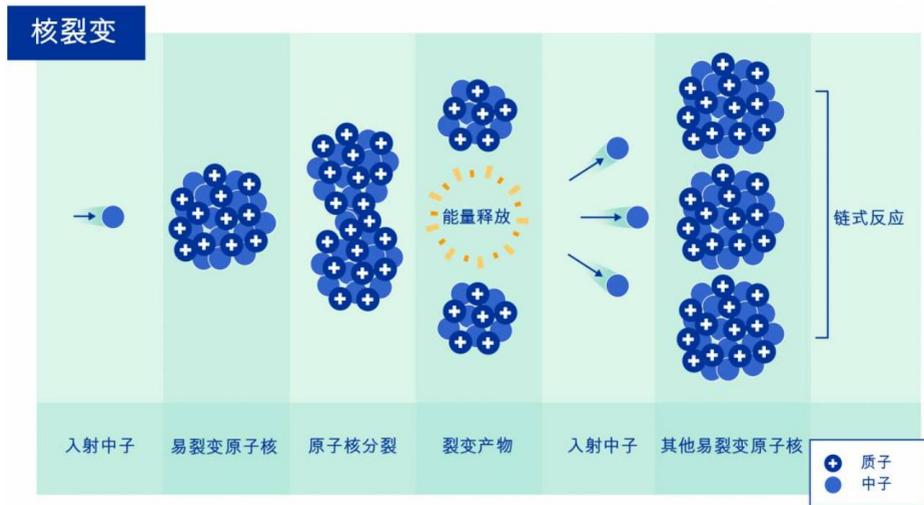
□ **风险提示：**核聚变研究成本较高，核聚变项目推进不及预期，核聚变商业化进程不及预期等。

1 人造太阳，未来可期

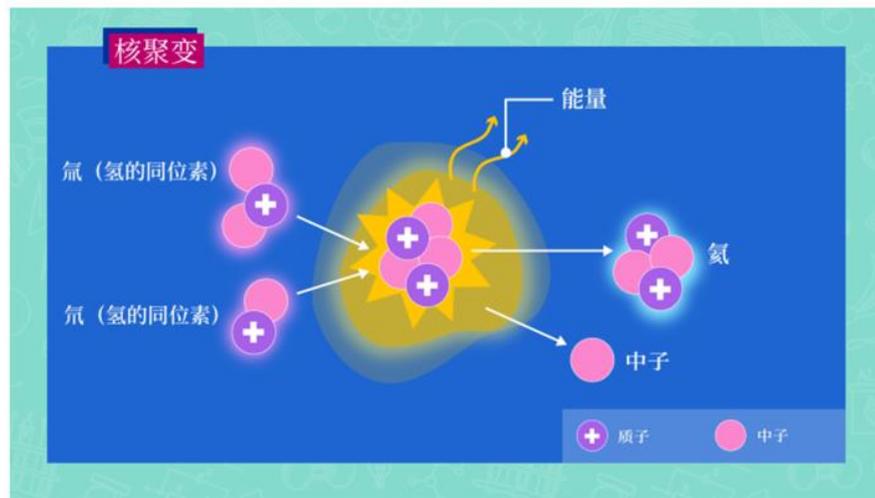
1.1 可控核聚变——未来能源唯一方向

- **可控核聚变**，本质是模拟太阳内部发生的氢核聚变反应。太阳之所以有源源不断的能量，就在于其内部一直在进行大量的核聚变。核聚变又称核融合，是一种小质量原子的原子核互相聚合生成中子并伴着巨大能量释放的热核反应，可以产生大量的能量。可控核聚变意味着人们可以控制核聚变的开启和停止，核聚变的反应速度和规模可以随时被调控，相当于可控的人造太阳。
- **核裂变反应堆发电是全球化趋势，但不是长久之计**。传统的核反应堆采用核裂变释放出的热能代替煤炭燃烧生热，进而通过锅炉加热水，带动涡轮发电机进行发电。核裂变的原理是用低浓度铀235作为原料，用中子撞击一个铀235原子进而释放两个中子形成链式反应，持续放出能量。虽然核裂变发电相比传统煤炭发电燃料效率更高、更清洁，但核废料问题尚未解决，且铀储量有限，不满足人类可持续发展要求。

图：核裂变过程示意图



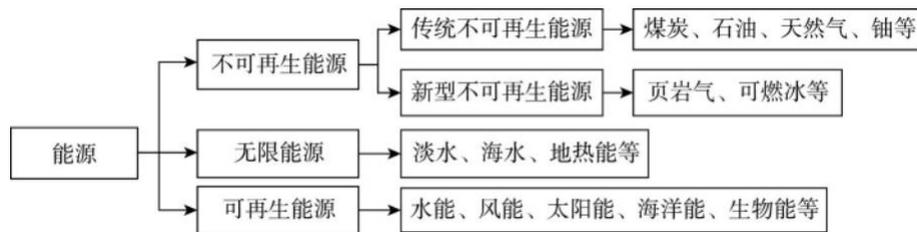
图：核聚变过程示意图



1.1 可控核聚变——未来能源唯一方向

- 能源是现代社会存在和发展的物质基础，现存多种能源均存在局限性。人类广泛开发利用的能源，包括煤、石油、天然气等化石能源，不仅不可再生，在使用过程中还产生大量污染。太阳能、地热、风能、潮汐能等形式的清洁能源，只能在局部地区开发利用。页岩气、可燃冰等新能源也有消耗殆尽的一天。
- 可控核聚变被视为未来能源的唯一方向。可控核聚变作为核能的开发方式之一，相比核裂变在安全、绿色、能量密度等方面更有优势，被认为有望提供近乎无限的清洁能源。一旦实现核聚变商业规模发电，将一举解决困扰全人类的能源紧缺问题，为应对气候变化、保护环境和解决贫困与发展问题注入不竭动力，从而改变人类的未来。

图：能源分类



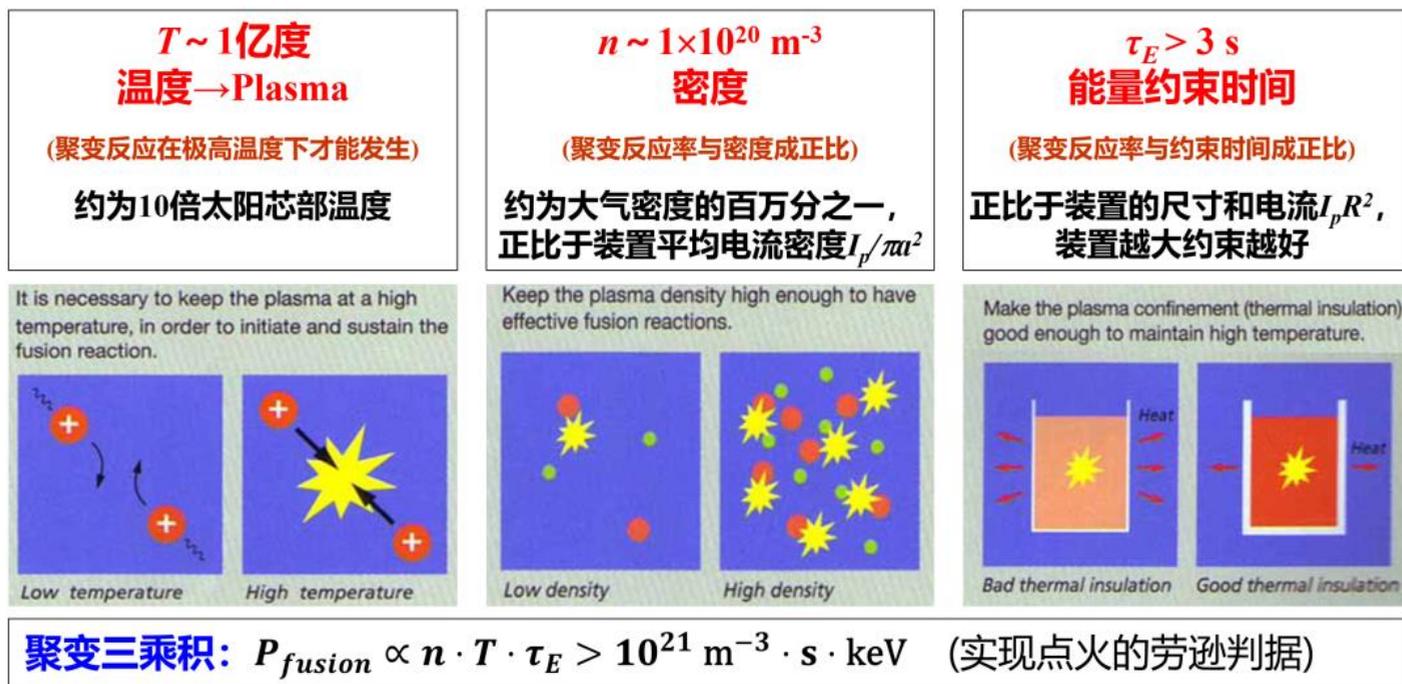
表：可控核聚变的优势

安全可靠	核聚变反应需要氘氚燃料达到上亿摄氏度的高温和足够高的密度等苛刻条件，任何一点细微条件的缺失，都会导致温度密度的下降，致使聚变反应停止。
环境友好	在氘氚核聚变过程中主要产生惰性氦，不产生高放射性、长寿命的核废物，也不会产生任何有毒气体或者温室气体。
经济性明显	满足全球每年一次能源消耗需要98万t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，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。
能量密度高	1t氘氚聚变反应释放的能量，相当于5.7t裂变燃料或700万t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。
原料充足	1公升海水里提取出的氘，在完全的聚变反应中可释放相当于燃烧300公升汽油的能量；而氘可通过中子与锂反应生成，在地壳和海水里，锂都是大量存在的。

1.2 核聚变反应三要素——温度、密度、能量约束时间

- 相比核裂变的链式反应，核聚变需要满足的外部条件十分苛刻。一是足够高的温度，需要施加大约1亿℃高温才能将两个原子核变成等离子体，该温度相当于太阳核心温度的10倍，这对反应容器的耐受温度提出极限挑战；二是一定的密度，这样两原子核发生碰撞的概率就大；三是一定的能量约束时间，等离子体在有限的空间里被约束足够长时间，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之比率。核聚变至少需要做到稳定运行240h才具备商业价值，而2023年4月创造的最高纪录是EAST达到的403秒稳态高约束等离子体。
- 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。

图：实现聚变反应的三要素



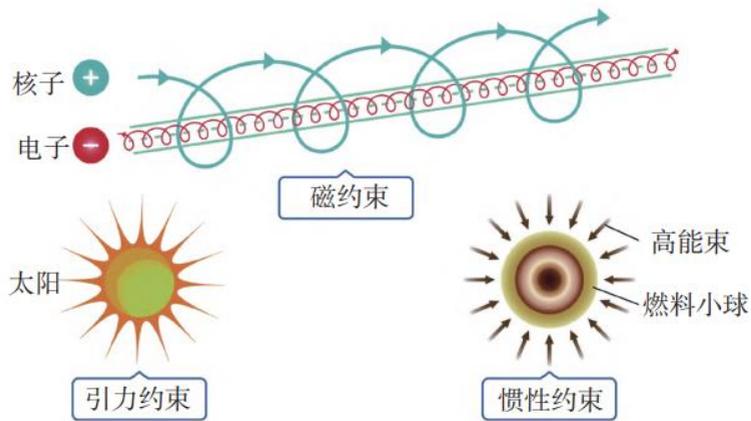
1.3 可控核聚变的三条技术路线

- 要获得持续的核聚变能，除了满足严苛的外部条件，还要对高温聚变物质进行约束，延长可控聚变反应时间。解决可控核聚变主要有三种：**磁约束、惯性约束和引力约束**。其中引力约束在地球上无法实现，惯性约束由于电-激光转化损耗极高暂不具备开发前景，磁约束能量转化效率更高，是更具发展潜力、更成熟的路线。
- ✓ **引力约束主要是靠强大的万有引力来提供对聚变燃料的约束力**。比如太阳的核心温度达1500万° C，巨大的质量（质量为地球33万倍）形成巨大的万有引力使外层的氢不断往中心挤压，形成极高的密度，在高温和高压的作用下，氢核裸露，再加上太阳有足够长的能量约束时间，使得核聚变反应得以持续发生。

表：聚变约束的三种途径原理介绍

约束途径	原理介绍	主要应用
引力约束	通过物质自身质量产生巨大的引力来实现对等离子体的约束，类似于太阳的核聚变过程。	太阳
磁约束	利用磁场约束带电粒子沿磁力线运动，使等离子体在高温和高压下发生核聚变反应。	箍缩、磁镜、托卡马克和仿星器等
惯性约束	通过超高功率激光或粒子束将微型燃料球加热并压缩至极高密度，引发核聚变反应。	氢弹爆炸

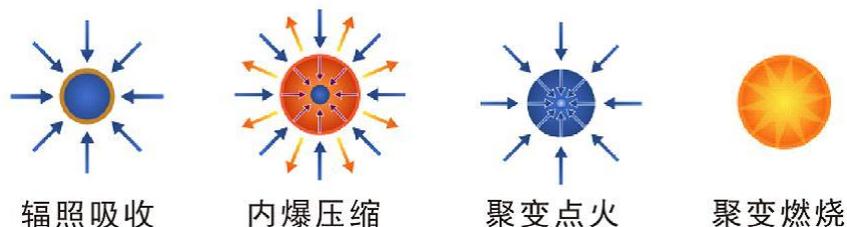
图：聚变约束的三种途径



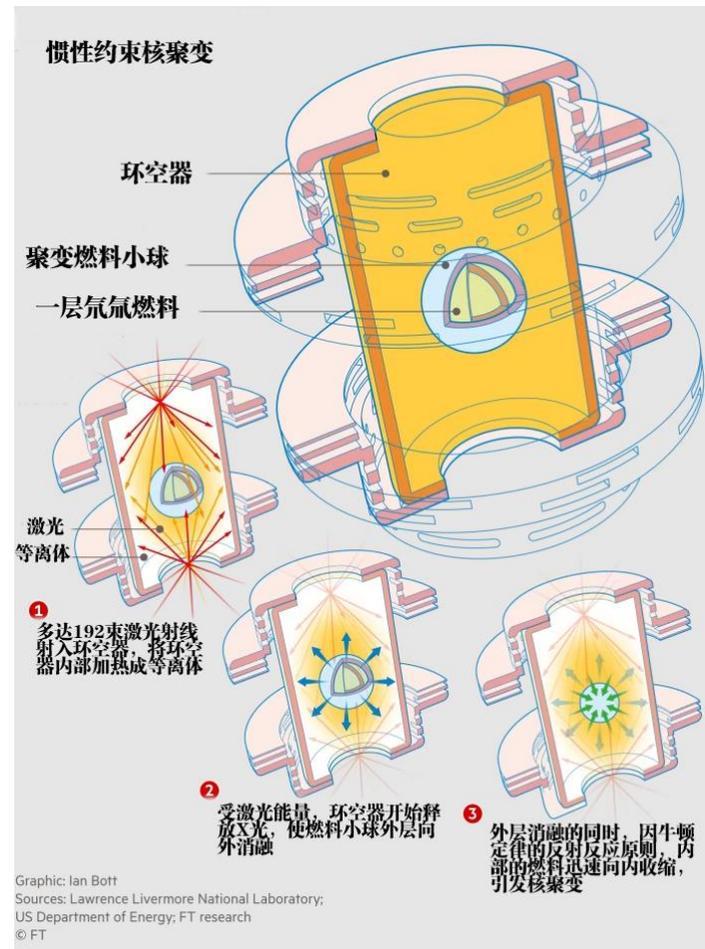
1.3 可控核聚变的三条技术路线

- ✓ 惯性约束是利用粒子的惯性作用来约束粒子本身，从而实现核聚变反应的一种方法。通过多束激光或粒子束从四面八方一个非常微小的聚变燃料丸（通常是氘和氚的混合物）倾注巨大的能量使其达到极高的温度和压力，巨大的压力使聚变燃料的密度在短时间达到极限值，使其被喷出的同时利用反冲的力量使燃料丸内部氘氚燃料压缩，由于这些粒子的惯性作用，它们会持续被挤压一段时间，并为核聚变提供发生的条件。
- 该方法实际上是控制多次不可控的小核聚变来控制核聚变总体强度。其技术难点在于点火瞬间需要快速获得高温，且燃料丸需要具备一定的密度，并维持足够长的反应时间。
- 惯性约束核聚变以美国的国家点火计划(NIF)、我国的神光计划为代表。

图：惯性约束核聚变经典过程（以直接驱动方式为例）



图：NIF惯性约束聚变



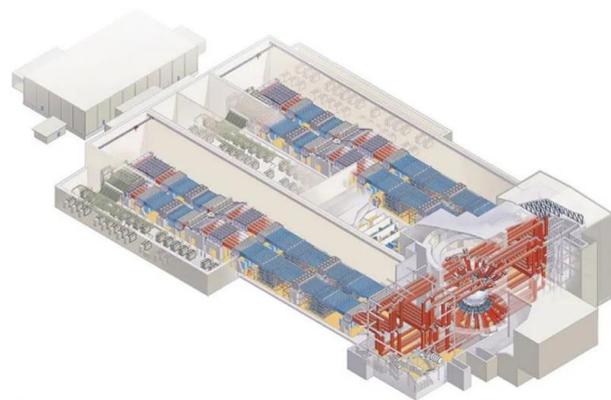
1.3 可控核聚变的三条技术路线

- **NIF的四次点火实现核聚变的重大突破。**美国国家点火装置（NIF）是美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（LLNL）下属的一个大型实验设施，是世界上最大的激光聚变装置，通过聚焦激光束到微型燃料球上，能够产生高温高压的环境，实现核聚变反应。点火，就是指聚变反应堆释放的能量超过了输入的能量，这是可控核聚变技术的一个重要指标。
- NIF的主要组成部分是192个激光束线，每条激光束线都可产生高达500兆焦耳（MJ）的脉冲能量。当这些激光束线同时聚焦在一个小球上时，可以形成数十亿度的高温和高压条件。
- NIF的激光器虽然强大，但是效率很低。每次点火都需要消耗大量的电力，而且只能持续几十亿分之一秒。要实现可持续的核聚变反应，还需要更高的能量增益，更稳定的反应过程，更经济的运行成本。

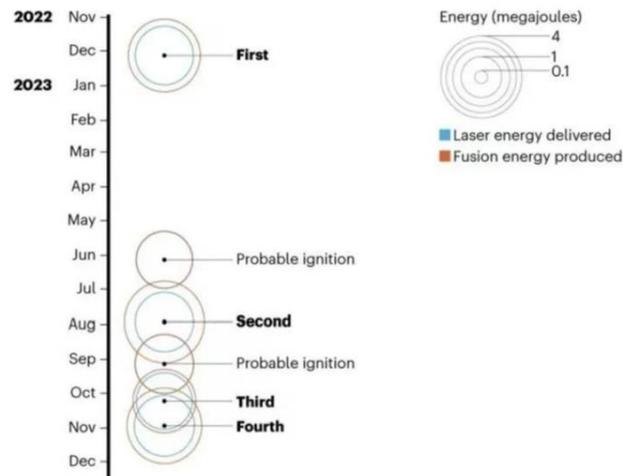
表：美国NIF4次点火情况

次数	时间	实验情况
第一次	2022年12月14日	向目标输入了2.05MJ的能量，得到了3.15MJ的能量输出，实现人类历史上第一次核聚变点火，首次实现了可控核聚变净能量增益，Q值达到1.53，
第二次	2023年7月30日	向目标输入2.05MJ能量，产生比太阳核心高六倍的温度，得到了3.88MJ的能量输出，比输入能量增加了89%，创下历史最高
第三次	2023年10月8日	增加了能量输入到1.9MJ，得到了2.4MJ的能量输出
第四次	2023年10月30日	能量输入首次达到到2.2MJ，得到了3.4MJ的能量输出

图：NIF国家点火装置



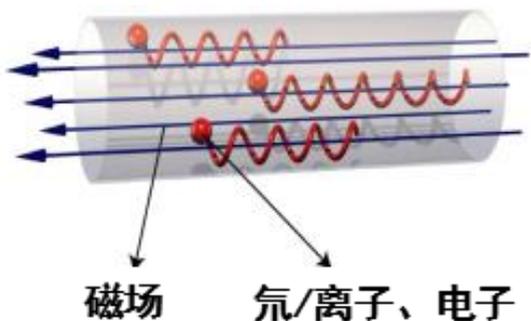
图：美国NIF4次点火



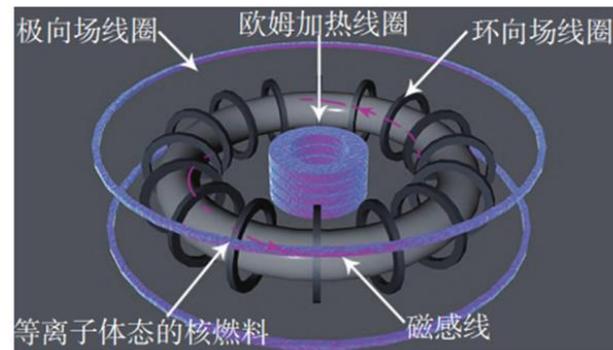
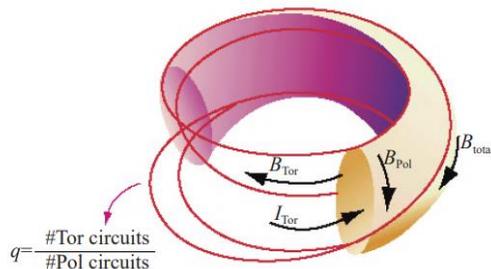
1.3 可控核聚变的三条技术路线

- ✓ **磁约束是指用磁场约束等离子体的运动，从而实现核聚变的方式。**以提高温度为突破口，聚变燃料在极高温下会完全电离为由原子核和自由电子组成的等离子体，让这团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不再自由只能沿着磁场方向做回旋运动，从而受到约束，将高温的燃料与反应容器隔绝开。
- **磁约束核聚变常用的实现方式是托卡马克和仿星器。**托卡马克在保持等离子体温度方面更出色，而仿星器在保持等离子体稳定方面更出色。**环形托卡马克被普遍认为是最有希望实现可控核聚变的装置，也是目前主流的研究方向。**中国的东方超环（EAST）和国际热核聚变实验堆（ITER）均利用其来尝试实现核聚变反应过程。
- “托卡马克”的名字由俄文中环形、真空室、磁、线圈四个词的前几个字母组成，通过在环形真空室中构造出一个闭合的螺旋磁场，完成对高温等离子体的约束，聚变燃料在周而复始的运动中完成核聚变反应。

图：磁约束等离子体



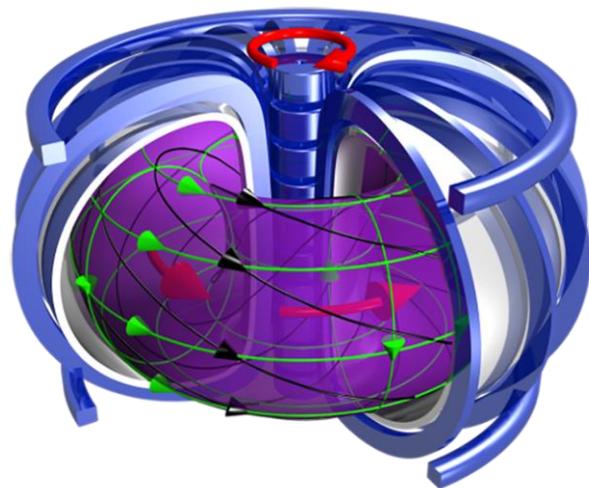
图：托卡马克约束磁场与基本结构示意图



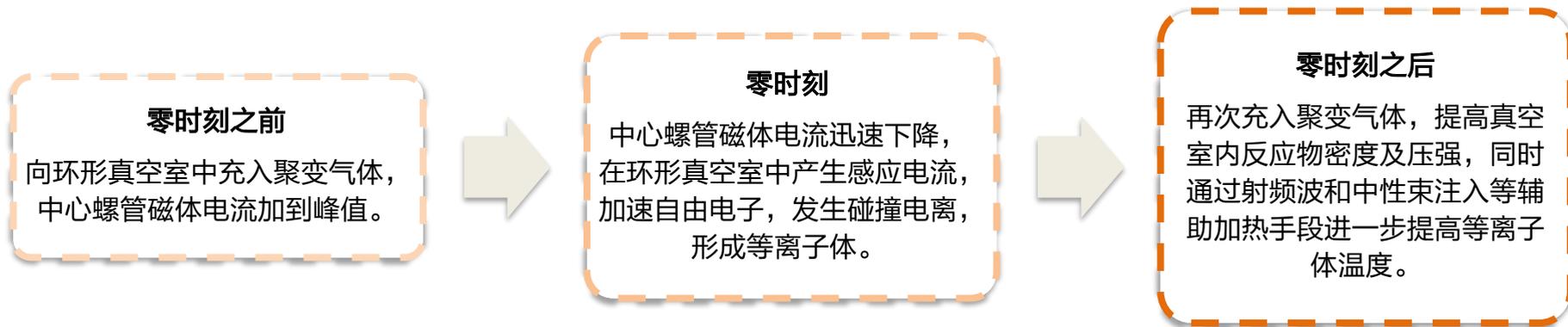
1.3 可控核聚变的三条技术路线

- 托卡马克装置是一个环形的真空室和多组磁体组成。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。
- 托卡马克工作时：由变压器引起的电场驱动电流（红色大箭头）通过等离子体柱，产生一个极向磁场，将等离子体电流弯曲成一个圆形（绿色垂直圆圈）。将等离子体柱弯曲成一个圆圈可以防止泄漏，并且在一个环形容容器内这样做会形成一个真空。另一个围绕圆圈长度的磁场被称为环向磁场（绿色水平圆圈）。这两个场结合形成一个类似螺旋结构（黑色所示）的三维曲线，等离子体在其中受到高度约束。

图：托卡马克工作原理



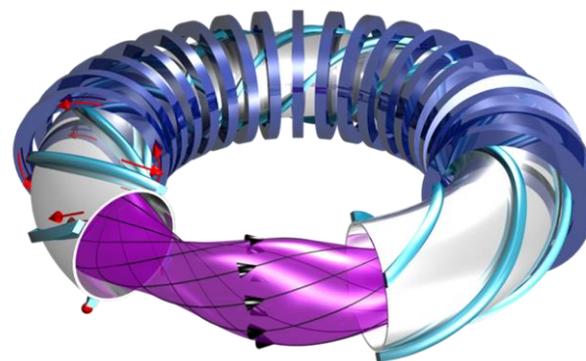
图：托卡马克典型等离子体放电过程



1.3 可控核聚变的三条技术路线

- 虽然根据磁场位形的不同，人类还曾经建造了磁镜、仿星器、球形环、紧凑环、直线箍缩、环箍缩等多种类型磁约束核聚变装置，例如仿星器，它在不需要变压器的情况下扭转磁铁，也可以形成螺旋状，被认为能够更好地控制等离子体，防止其破裂，但结构复杂、体积大，成本过高。磁约束核聚变研究70年的历史表明，基于托卡马克装置的磁约束核聚变是目前最有希望实现聚变能和平利用的途径。

图：仿星器装置图



表：各种核聚变装置对比

名称	原理	优点	缺点	代表性装置	最新发展进程
托卡马克	磁约束聚变	目前具发展前景、最接近聚变堆参数的装置	装置规模大、系统复杂、成本高	ITER、EAST、环流三号、Jet	2023年4月，EAST装置获得了403秒稳态高约束等离子体运行，创下新纪录 2023年8月，HL-3首次实现100万安培等离子体电流高约束模运行
仿星器	磁约束聚变	能较好的维持等离子体的稳定运行	需要三维结构的线圈，结构复杂、制造难度大、成本高。	W7-X	2023年W7-X创造纪录持续放电八分钟
激光聚变装置	惯性约束聚变	能量增益倍数Q值比较高	维持时间短、电光能转换效率极低、成本高	NIF、神光系列	NIF四次点火

2

聚势而强，核项目遍地开花

2.1 核聚变产业链

- 核聚变产业链的上游主要是原料供应，覆盖有色金属(钨、铜等)、特种钢材、特种气体(氘)等原料供应。
- 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。
- 下游核电建设和运营，主要目标市场为发电。

图：核聚变电厂主要产业链及相关公司



2.2 核聚变产业发展带动超导磁体的需求

- **超导磁体是托卡马克关键组成部分。**所有托卡马克的终极目标是将氘氚聚变原料加热到点火点或更高的温度，并加以控制地持续尽可能长的反应时间，以追求连续的聚变能量输出。即使采用导电性良好的铜作为导体绕制线圈，由于电流巨大线圈不可避免地存在发热问题，从而限制了磁约束核聚变的长时间稳态运行。由于超导体具有零电阻效应，且承载电流密度更高有利于建造更加紧凑、更高场强的聚变装置，因此可以极大提升等离子体的约束时间，有效改善长脉冲稳态运行。
- **超导磁体几乎占托卡马克总成本的一半。**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，使聚变发电初步具备商业化潜力，核聚变能研发进入工程可行性阶段，同时可控核聚变实验也将带动超导磁体需求的增加。

表：超导材料的三大特性

零电阻

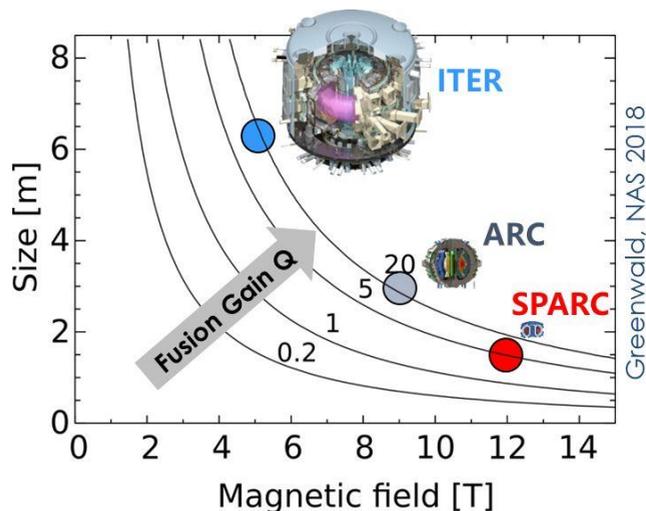
超导材料最基本性质，即当温度降至临界温度 T_c 以下时，其电阻变为零。超导材料的零电阻特性可以用来超导输电和制造大型超导磁体。其中，超导磁体是超导的关键技术，超导产业的发展战略即是以超导磁体技术为核心向其他商业应用领域扩展，应用场景涵盖非磁金属熔炼、磁选矿、磁控单晶硅生长炉、可控核聚变等领域。

“迈斯纳效应”，指将超导体置于外磁场中时，超体会表现出完全抗磁性，即把完全抗磁性原来处于体内的磁场排挤出去，其内部的磁感应强度为零。利用超导材料的完全抗磁性可以制造超导磁悬浮列车等。

量子隧穿效应

“约瑟夫森效应”，是指在薄绝缘层隔开的两种超导体之间有电流通过，即有电子对能穿过薄绝缘层（量子隧穿），而超导结上并不出现电压。量子隧穿效应可用于弱电磁信号的检测，如制造超导量子干涉仪（SQUID）等。

图：从ITER到ARC到SPARC，反应堆的尺寸一直在缩小



2.3 全球各国积极布局核聚变产业

- 目前全球主要国家均推出政策、采取行动推进核聚变的商业化进程，全球可控核聚变不断取得技术突破，更接近聚变发电。

图：国外核聚变最新进展

主体	时间	介绍	进展
美国国家点火设施NIF	2023年11月	LLNL下属的一个大型实验设施，是世界上最大的激光聚变装置，通过聚焦激光束到微型燃料球上，能够产生高温高压的环境，实现核聚变反应。	2022年12月，NIF首次实现聚变点火，创造了聚变能试验纪录。2023年又接连进行了三次点火实验，最高一次达到了3.88MJ，比输入能量增加了89%。
美国托卡马克核聚变堆SPARC	2023年3月	SPARC是一个中型托卡马克装置，其中等离子体被新型高温超导磁体产生的强磁场紧密限制，它的目标是从等离子体中提取净能量(Q大约为10)，并产生50MW到140MW的聚变能量。	CFS公司与意大利Eni公司签署战略框架协议，将致力于SPARC项目，计划于2025年投入使用，最终为ARC铺平道路。
欧洲JET装置	2021年12月	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，在JT-60SA开始运行之前，是目前世界上最大的聚变反应堆，是ITER的迷你版。	2021年12月创纪录的5秒脉冲内59MJ的聚变能量输出。
欧洲W7-X装置	2023年	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，配备了用于墙面元件的水冷系统和升级的供暖系统。	实现了等离子体放电长达8分钟，产生1.3GJ的能量周转。
日本JT-60SA	2023年11月2日	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。	成功点火，可将等离子体加热到2亿摄氏度并维持约100秒，为ITER的建造奠定了基础。
俄罗斯T-15MD	2023年4月	位于俄罗斯联邦库尔恰托夫研究所，独特之处在于高功率和紧凑尺寸相结合，高性能辅助等离子体加热与电流驱动系统将允许同时实现高等离子体温度和密度，脉冲时长可达2030秒。	2023年4月，实现了首次稳定的等离子体操作。

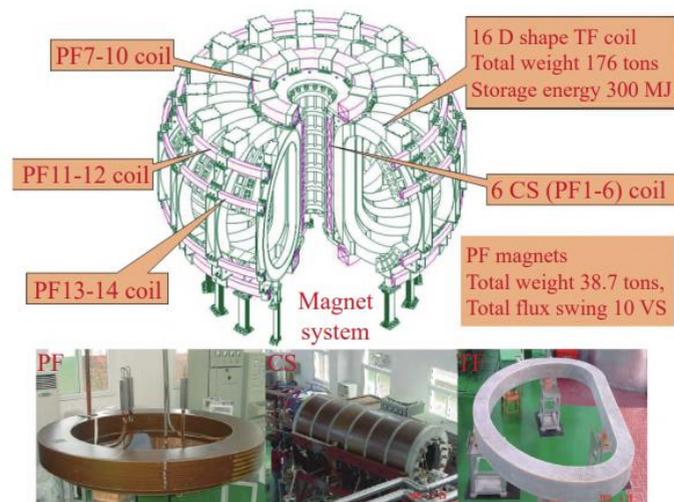
2.3 全球各国积极布局核聚变产业

- 我国已确定以磁约束聚变作为核聚变技术发展的主要路线，其中关键技术已达到全球领先水平。中国可控核聚变研究始于20世纪50年代中期。1994年，建成了第一台超导托卡马克装置HT-7。2002年，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。2008年至2023年11月20日，我国国家磁约束核聚变能发展研究专项共部署220个项目，总计安排经费约60亿元，取得多项国际和国内第一的研究成果。

图：我国核聚变发展路线

时间	主体	进展
2020年12月	中国环流器二号M装置	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	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	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	EAST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	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。
2023年12月29日	可控核聚变创新联合体	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原有限公司。

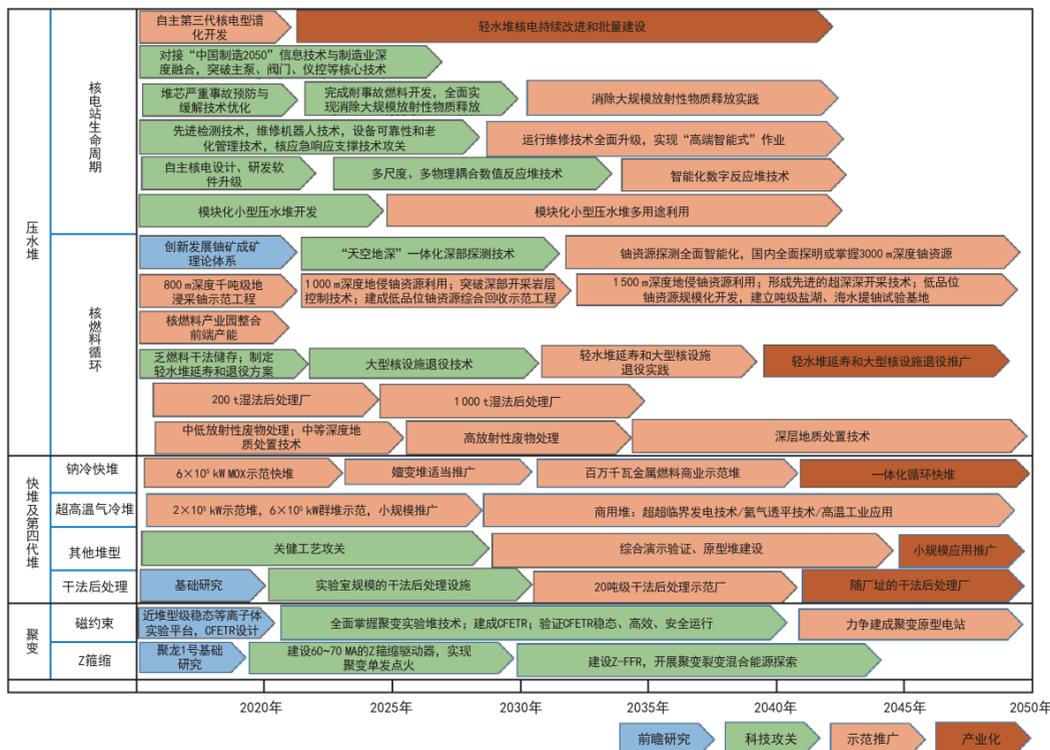
图：我国的“东方超环“EAST 超导磁体系统



2.3 全球各国积极布局核聚变产业

- 为了尽早地实现可控聚变核能的商业化，我国充分利用现有的托卡马克装置和资源，制定了完整的符合我国国情的中国磁约束聚变发展路线示意图，明确未来发展目标与方向，2023年11月11日，“三步走”发展40年论坛在京举行，明确了“热堆走稳，快堆走实，聚变堆走好”的原则。

图：核能技术发展路线图



图：中国磁约束聚变发展路线图



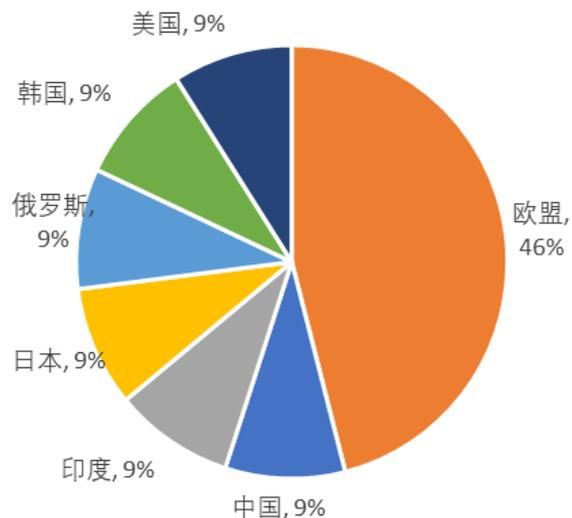
表：我国磁约束聚变的近期、中期、长期目标

名称	时间	目标
近期目标	2015-2021年	建立近堆芯级稳态等离子体实验平台，吸收消化、发展与储备聚变工程实验堆关键技术，设计、预研聚变工程实验堆关键部件等。
中期目标	2021-2035年	建设、运行聚变工程实验堆，开展稳态、高效、安全聚变堆科学研究。
长期目标	2035-2050年	发展聚变电站，探索聚变商用电站的工程、安全、经济性。

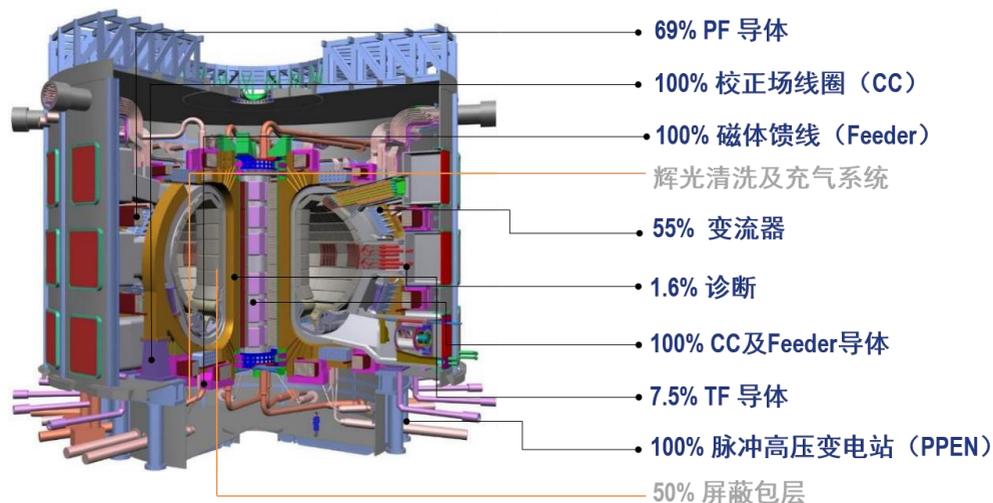
2.4 可控核聚变项目频出

- 国际热核聚变实验堆ITER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，是人类受控核聚变研究走向实用的关键一步。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，是我国以平等、全权伙伴身份参加的迄今为止规模最大的国际科技合作项目，中国在ITER项目中负责18个采购包的实物贡献，约占9%。
- 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。

图：ITER各国贡献成本划分（截至23年9月）



图：中国在ITER项目中负责的部分



2.4 可控核聚变项目频出

- EAST装置即东方超环，是我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置。由超高真空室、纵场线圈、极向场线圈、内外冷屏、外真空杜瓦、支撑系统等六大部件组成，EAST装置具有独有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构三大特性，是未来十年唯一能为ITER提供长脉冲稳态先进运行高参数非圆等离子体平台的实验装置，将会在发展稳态高性能等离子体物理的科学研究计划中处于世界前沿地位，进而为支持ITER和聚变能发展作出贡献。
- EAST装置具有三大科学目标：1兆安等离子体电流、1亿度高温等离子体、1000秒运行时间。EAST先后于2010年运行1兆安等离子体电流、2018年首次获得1亿摄氏度高温等离子体、2021年5月28日实现可重复的1.2亿摄氏度101秒和1.6亿摄氏度20秒等离子体运行、2021年12月30日实现1056秒长脉冲高参数等离子体运行，三大科学目标已经分别独立完成。

图：EAST主要部件示意图



表：EAST已逐年完成目标

时间	成就
2006年	EAST成功获得等离子体，首次放电成功
2010年	运行1MA等离子体电流
2012年	成功获得超过400秒的两千万度高参数偏滤器等离子体；获得稳定重复超过30秒的高约束等离子体放电。
2016年	成功实现了电子温度超过5千万度，持续时间达102秒的超高温长脉冲等离子体放电。
2018年	获得1亿°C高温等离子体
2021年	EAST实现长脉冲高参数等离子体运行1056秒
2023年	实现了高功率温度下稳态长脉冲高约束模式等离子体运行403秒，创造了托卡马克装置稳态高约束模运行新的世界纪录

3

风口已至，展望未来

3.1 核聚变市场乘风而上

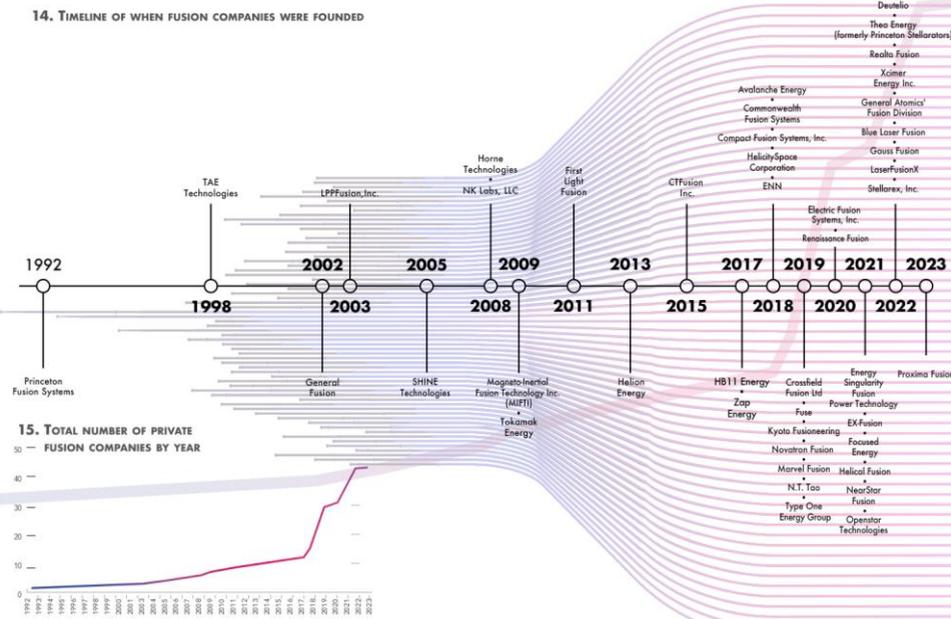
- 核聚变产业公司数量快速增加，有越来越多的团队选择加入聚变产业，技术路径也越来越多元化。公司数量从2022年33家增长到2023年接近50家，一年内有3家退出，13家新增。
- 聚变公司的地理分布也很广泛，共分布在12个国家，美国公司数量继续位居第一，达25家，是行业发展的主导市场，有2家公司位于中国，即新奥科技发展有限公司和能量奇点公司。
- 融资总额持续增长。截至2023年，全球聚变公司累计融资超过62亿美元，比2022年的48亿美元增加了约14亿美元，增幅达27%。尽管面临通胀和利率上升等宏观环境压力，投资者对聚变能商业应用的兴趣和支持仍在稳步增长。

图：聚变公司在全球的分布

By primary HQ



图：近30年内成立的相关公司



3.1 核聚变市场乘风而上

- 可控核聚变领域的融资热度持续升温，资本加持推动商业化进程。全球有超30家公司正致力于实现核聚变的商业化，累计融资超过62亿美元，2022年核聚变领域的私人投资额已接近30亿美元，一年的投资额超此前的投资总和。国内市场成立于2021年的星环聚能、能量奇点，在近两年来均已获得两轮融资，且融资金额颇高。

表：国内可控核聚变领域一级市场融资情况（部分）

企业名称	披露日期	融资金额	融资轮次	投资方
能量奇点	2023年4月28日	近4亿元	Pre-A轮	照明资本、米哈游、云和方圆、黑门投资
	2022年2月25日	4亿元	天使轮	米哈游、蔚来资本、红杉中国种子基金、蓝驰创投
	2023年1月6日	未披露	Pre-A轮	水木清华校友基金会
星环聚能	2022年6月16日	数亿元	天使轮	顺为资本、昆仑资本、中科创星、远镜创投、和玉资本、红杉中国种子基金、险峰长青、九合创投、联想之星、英诺创投、元禾原点、华方资本
翌曦科技	2022年9月19日	5000万元	种子轮	中科创星、合力投资、泓晟基金
	2020年12月22日	未披露	股权融资	正心投资
中科海奥	2018年1月23日	未披露	战略融资	合星资产、方德信基金
	2017年11月30日	未披露	战略融资	华文投资
	2015年10月27日	未披露	战略融资	合肥高投

3.1 核聚变市场乘风而上

- **高温超导技术不断突破，相关企业积极布局可控核聚变领域。**2023年12月29日，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，标志着国家及其他社会团体对于可控核聚变的重视程度及投入力度的进一步提升，我国可控核聚变进展加速。

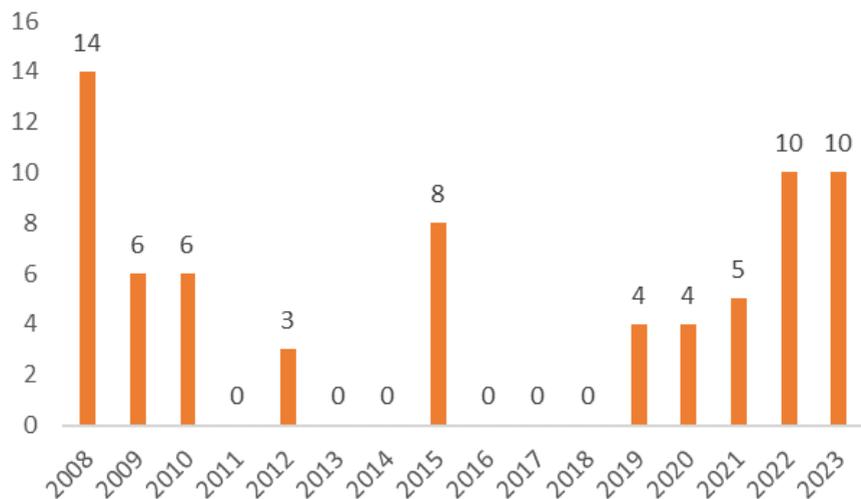
表：国内相关企业布局可控核聚变最新进展

公司名称	简介	布局
联创光电	主营业务为半导体激光系列及微电子元器件系列等产品。产品线涵盖激光系列及传统LED芯片产品、智能控制系列产品、智能装备线缆、金属材料产品等产品。	公司2013年开始研发兆瓦级高温超导加热设备，2022年3月公司交付给中铝的首台设备已经专家组验收通过，各项指标均合格。截至2022年9月30日，超导设备在手订单超过10台。
精达股份	主要业务为特种电磁线、特种导体以及模具制造和维修等研发、生产和销售业务。是国内电磁线生产制造的龙头企业，产品线涵盖有铜基电磁线、铝基电磁线、扁平电磁线、特种导体线材等系列产品。	参股企业上海超导的高温超导带材已经供货全球领先的可控聚变公司，产品主要应用于超导电缆、超导限流器、调相机、储能等、高场磁体等领域。
永鼎股份	主营业务为光缆、电缆的生产和销售、房地产开发和销售、境外工程承揽与施工、实业投资等业务。	公司超导带材产品已在超导感应加热设备、可控核聚变、超导电缆等下游应用中应用，以业内独有的磁通钉扎技术，研制应用于高强磁场工况下的高载流超导带材，推进了在超导感应加热和可控核聚变堆的应用。
国光电气	主营业务为真空及微波应用产品研发、生产和销售。公司产品线涵盖微波器件、核工业设备及部件、其他民用产品等产品；广泛应用于航空、航天、核工业、新能源等领域。	公司生产的偏滤器和包层系统是ITER项目的关键部件。
安泰科技	主营业务为先进金属材料的研发、生产与销售。公司产品线涵盖高端粉末冶金材料及制品产业、先进功能材料及器件产业、环保工程及装备材料产业等产品。	作为独家供应商为EAST批量提供了上偏滤器全钨复合部件，也是ITER的钨铜复合部件的重要供应商。公司在核聚变全钨偏滤器复合部件的研究和制造方面走在世界的前列。
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的研发、生产和销售。是目前国内唯一的低温超导线材商业化生产企业，是目前全球唯一的钽铌锭棒、超导线材、超导磁体的全流程生产企业。	开发出核聚变用 NbTi 线材导体结构设计、长线塑性加工和磁通钉扎控制技术，我国承担ITER中 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。

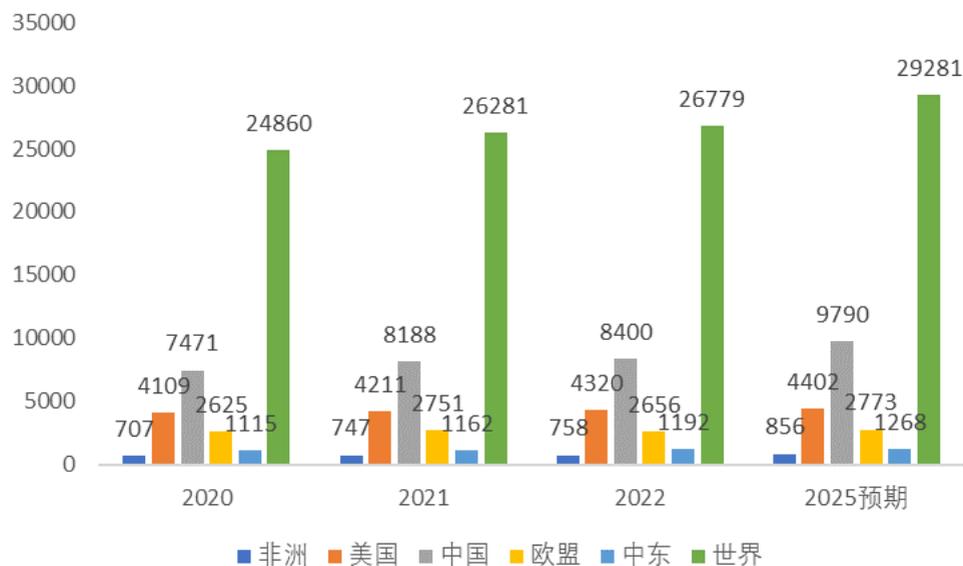
3.1 核聚变市场乘风而上

- **政策对核电发展的支持力度加强，核电站核准提速。**由于2011年福岛核电事故，我国核电项目审批陷入了几年的停滞期。2019年起我国核电核准速度呈上升趋势，2020年至2022年分别核准4台、5台、10台，2023年维持高核准量10台，核电机组核准审批步入常态化。
- **全球电力需求巨大，带动可控核聚变潜在市场。**2022年全球电力需求26.779万亿千瓦时，同比增长1.9%。其中中国电力需求8.4万亿千瓦时，占全球的31.2%，比上年提高2个百分点。据Keytone ventures预测，全球核聚变市场规模将从2022年的2964亿美元增长至2027年的3951.4亿美元，CAGR为6.0%。

图：2008-2023年我国历年核电机组核准数量（台）



图：2020-2025世界电力需求（万亿千瓦时）



3.2 未来发展任重道远

- 核聚变“可控”和“商业化”依然道阻且长。根据科尔尼管理咨询，“核聚变技术需要几十年的时间才能取得规模性的商业运用，各类挑战将继续阻碍核能源在未来五年内作为替代性可再生能源的进程”。
- 现阶段技术发展仍处于培育期，真正实现“可控”和“商业化”还需攻克技术、材料、工程等多重难题。

表：核聚变面临的技术、材料和工程等方面的挑战

序号	分类	具体难题
1	技术层面	实现核聚变可控需要满足一系列极其苛刻的外部条件，包括极高的燃烧温度、超强的燃烧压力以及连续约束时间等。例如，在温度方面，在地球上创造聚变需要施加大约1亿℃高温。
2	材料层面	产氦包层是聚变堆实现氦自持和发电的堆芯核心部件之一，目前的优势氦增殖剂材料填充率有限及无法自由调控，严重影响包层结构和性能的稳定性的。
3	材料层面	超导材料因在特定温度条件下呈现出电阻等于零、排斥磁力线的特点，理论上是适应聚变环境的理想材料。但高温超导材料具有力学性能差、不易加工等特点，在巨大电磁力之下表现得异常脆弱。
4	工程层面	NIF选择惯性约束路线首次实现可控核聚变Q值大于1引起社会各界的广泛关注，但是“净能量增益”掩盖了电光能转换效率极低的问题，如果向前追溯产生激光消耗的能量，实际全流程Q值不足0.02。
5	工程层面	从科学层面可行到工程和商业层面可行，还存在着巨大鸿沟。中国科学技术大学有关专家判断，Q值>10才有商用意义，中核集团则认为至少要超过30。据国防科工局有关人士研判，Q值至少达到4至6才能将聚变转化为稳定的电力输出，但即便是相对先进的磁约束路线的Q值最高纪录也仅为0.67。

- 核聚变研究成本较高；
- 核聚变项目推进不及预期：目前处于较为早期的基础研究阶段，推进项目的过程中有较大的技术、材料、工程等方面的难题尚未解决；
- 核聚变商业化进程不及预期：聚变反应堆至少还有很多年才能投入使用，短期内对保障能源安全和应对气候变化的贡献有限，清洁和丰富的能源只可能来自可再生能源。

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。

一般声明

除非另有规定，本报告中的所有材料版权均属天风证券股份有限公司（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“天风证券”）。未经天风证券事先书面授权，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天风证券的商标、服务标识及标记。

本报告是机密的，仅供我们的客户使用，天风证券不因收件人收到本报告而视其为天风证券的客户。本报告中的信息均来源于我们认为可靠的已公开资料，但天风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，天风证券及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，天风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。

天风证券的销售人员、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。天风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。天风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，天风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，投资者应当考虑到天风证券及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。

投资评级声明

类别	说明	评级	体系
股票投资评级	自报告日后的6个月内，相对同期沪深300指数的涨跌幅	买入	预期股价相对收益20%以上
		增持	预期股价相对收益10%-20%
		持有	预期股价相对收益-10%-10%
		卖出	预期股价相对收益-10%以下
行业投资评级	自报告日后的6个月内，相对同期沪深300指数的涨跌幅	强于大市	预期行业指数涨幅5%以上
		中性	预期行业指数涨幅-5%-5%
		弱于大市	预期行业指数涨幅-5%以下

THANKS