

证券研究报告 | 国防军工 | 2025年06月11日

军工团队·行业专题报告

紧凑型核聚变路线——直线型核聚变装置（场反位形）

分析师

李鲁靖

登记编号：S1220523090002

刘明洋

登记编号：S1220524010002

黄凯伦

登记编号：S1220524090001



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

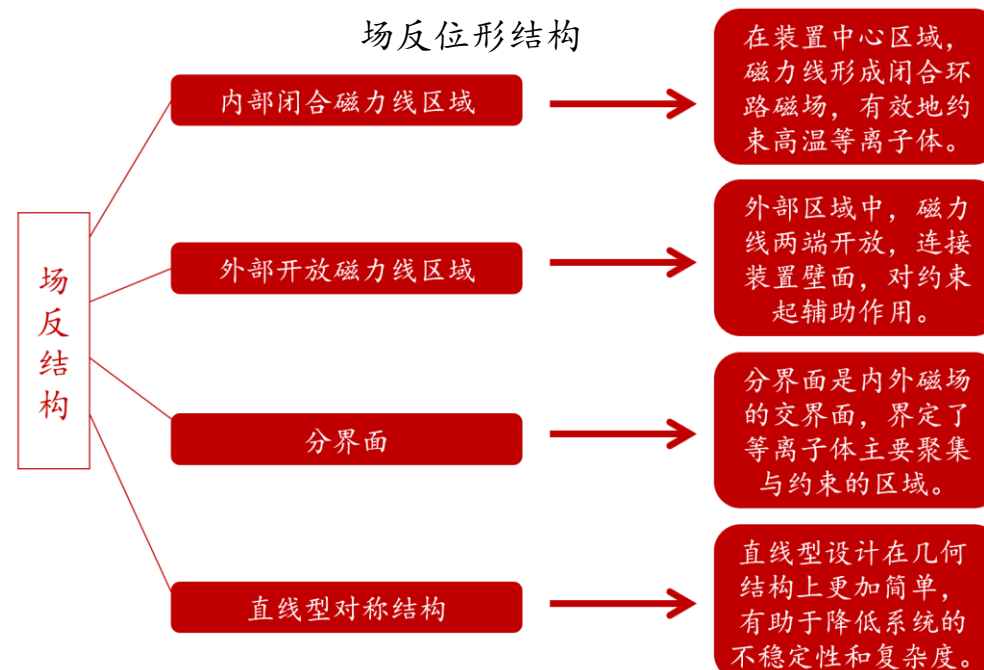
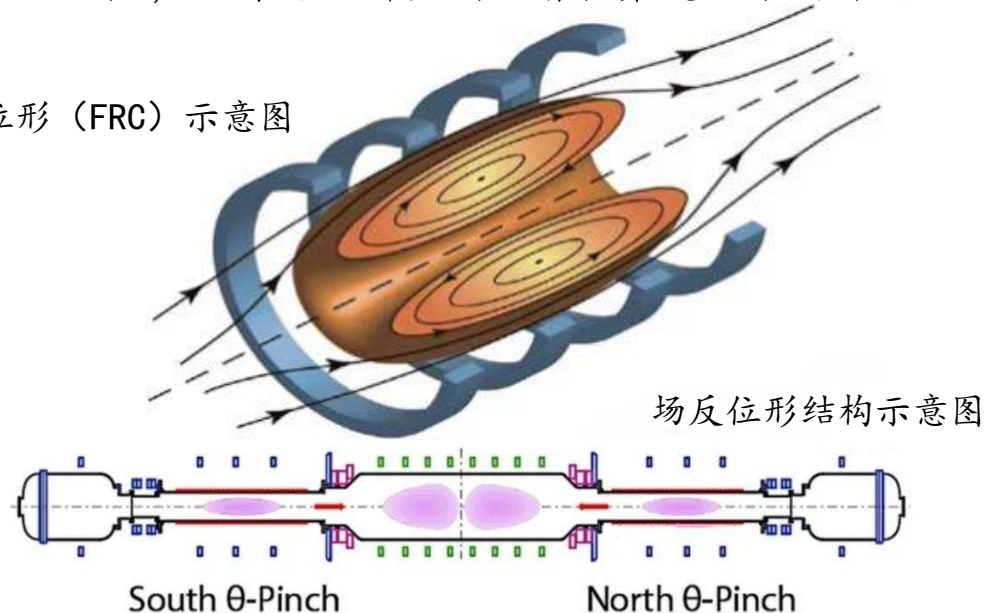
- 可控核聚变的技术路线主要可分为磁约束与惯性约束两大类，其中磁约束核聚变在当前占据主流地位，主要包括托卡马克（环形磁场）、直线型场反位形（Field-Reversed Configuration, FRC）、仿星器（复杂外线圈磁场）。其中场反位形直线形装置受到AI企业（微软、OPEN AI等）的重点青睐，与数据中心等场景应用契合度较高。
- 场反位形（FRC）作为一种磁约束聚变技术，利用等离子体自身产生的磁场与外部磁场相互作用，形成一种封闭环形结构以约束等离子体的方式。随着相关技术的发展，FRC凭借其优势或有望成为率先实现商业化的技术路线。
- 场反位形（FRC）的运行机理主要包括两大步骤：①自持等离子体环的形成②等离子体输运与压缩融合。其主要具有三大优点：无需依赖外部加热源、降低宏观不稳定性、易于工程化。
- 通过FRC实现聚变主要有两种技术路线：磁化靶FRC、准稳态FRC。
- 由于场反技术仅需要较小的外部磁场（低成本）来封闭高温、高密度（高性能）的等离子体，因此，其对磁体的需求相较于托卡马克而言大大降低。而由于FRC装置的技术特点，其对于电源系统的需求将大幅提高，主要为脉冲式放电，真空开关、PSM电源、电容占比或较大幅度提升。鉴于托卡马克装置中磁体与电源系统占比高达43%，我们预估在场反装置中，由于体积的减小，土建和外围电路成本显著下降，电源系统（真空开关、电容、电源系统）占比或达50%。此外，聚变反应场所（真空室/堆内构件）及燃料/检测等关键系统预计将保持高价值比例。
- 场反位形技术在国内外的应用主要包括美国的TAE Technologies、Helion Energy，日本的LINEA innovations以及中国的诺瓦聚变、瀚海聚能和星能玄光。
- 投资建议：重点关注紧凑型核聚变装置技术——场反位形直线型装置高价值量部分
- 1) 开关及电源类：旭光电子（真空开关、大功率电子管、氮化铝核心材料）、四创电子（PSM电源）、英杰电气（电源总成），王子新材/胜业电气（电容器），爱科赛博（电源总成），百利电气等
- 2) 真空室/堆内构件等部件：合锻智能（真空室扇区、窗口延长段、重力支撑，同时拓展其他堆内构件）、安泰科技（钨铜偏滤器、钨铜限制器、包层第一壁、钨硼中子屏蔽材料），派克新材（聚变金属结构锻件），上海电气（杜瓦、真空室、TF线圈等），斯瑞新材（耐高温高强高导原材料）
- 3) 燃料、检测、辅助系统：国光电气（传输分系统、涉氚燃料各类设备及零部件）、皖仪科技（检测设备）
- 4) 超导磁体：永鼎股份（高温超导带材），东方钨业（超导铌材、铍材料），西部超导（低温超导线材），精达股份（高温超导带材）
- 5) 核心模块建设及分系统制造：利柏特、中国能建

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；国内项目推进不及预期。

1.1 可控核聚变领域黑马：场反位形技术（FRC）

- 可控核聚变的技术路线主要可分为磁约束与惯性约束两大种类，其中磁约束核聚变在当前占据主流地位，主要包括托卡马克（环形磁场）、场反位形（Field-Reversed Configuration, FRC）、仿星器（复杂外线圈磁场）。随着相关技术的飞速发展，系统结构简单、造价及运行成本低的FRC备受关注，被称为可控核聚变领域的“黑马”，成为有望率先实现商业化的技术路线。
- 场反位形（FRC）：作为一种磁约束聚变技术，场反位形可看作紧凑环（compact torus）的一种，其在上世纪就已被提出，科学家基于对磁场与等离子体相互作用等理论的研究，设想出利用等离子体自身产生的磁场与外部磁场相互作用，形成一种封闭环形结构以约束等离子体的方式（一个足够密度的高能电子层可能会反转磁场），值得注意的是，场反位形装置只有极向场，没有环向场或几乎可以忽略。相比其他磁约束技术路线，FRC具有高比压 β 、易转移、可直接发电等明显优点，被作为一种热门的潜在聚变方案进行研究。

场反位形（FRC）示意图



1.2 场反技术的运行机理与优势

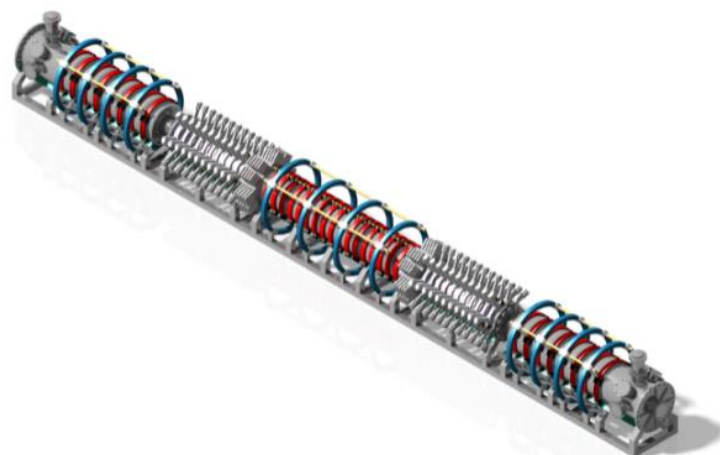
- 以瀚海聚能公司研发的HHMAX-901装置为例，其运行机理主要包括两大步骤：①自持等离子体环的形成②等离子体输运与压缩融合。

①：早在上世纪相关理论提出时，就确定了通过特殊的磁场配置，可形成一个内部磁场与外部磁场方向相反的“场反转”结构，从而使得等离子体在内部区域形成一个闭合的环状磁场结构。如今的研究则是不断优化这一磁场配置，提高等离子体环的形成效率和质量。

②：基于前期的理论基础，在装置两端分别产生FRC等离子体，并通过线圈时序通电构造出阶梯状磁场分布，驱动等离子体向中心输运，同时进一步压缩，在中心区完成融合，以提升等离子体参数。当前的技术发展重点在于更精确地控制磁场分布、时序以及等离子体输运和压缩过程，以达到更高的等离子体参数。

- 场反位形（FRC）的优点主要有以下三点：无需依赖外部加热源、降低宏观不稳定性、易于工程化。

瀚海聚能的FRC聚变装置



FRC的优点

无需依赖外部加热源

无需长时间维持等离子体

实现磁能向内能的转化，装置加热效率高

降低宏观不稳定性

抑制宏观不稳定性

维持等离子体的稳定性和延长受控时间

易于工程化

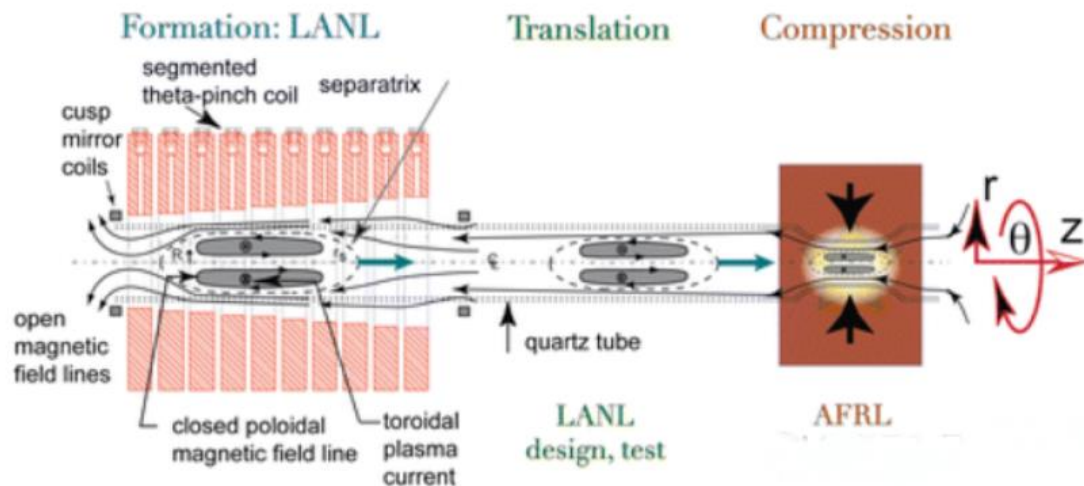
更为简洁而降低了工程实现的难度

有效减少装置体积和成本

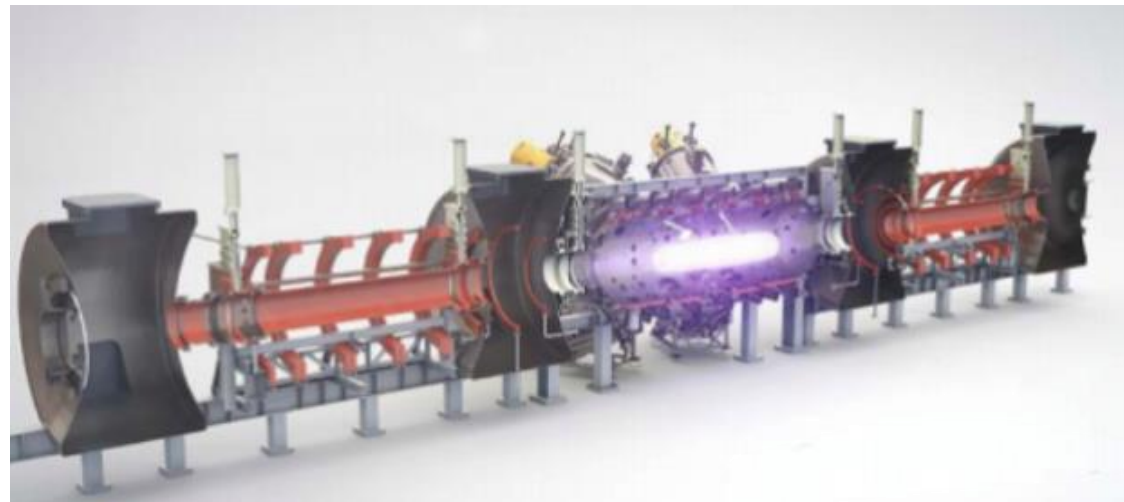
1.3 场反位形的技术路线

- 通过FRC实现聚变主要有两种技术路线：磁化靶FRC、准稳态FRC。
- 磁化靶FRC：将FRC作为磁化靶等离子体，脉冲压缩至聚变条件。目前Helion就是基于此方案，其在2021年获得了近5亿美元的投资。其难点在于高密度磁化靶FRC的形成、传输以及寿命。
- 准稳态FRC：采用碰撞融合技术来生成场反位形。先在装置两端的形成区，由角向箍缩生成两个独立的场反位形，然后转移至融合区以超声速对撞融合形成稳定的场反位形。目前将FRC进行准稳态运行的是TAE公司，其方案是利用中性束注入（NBI）来维持FRC，最终目标是实现氢硼聚变。TAE最主要的进展是在C-2W装置上把FRC的能量约束时间大幅提升至了10ms量级，并且极大的推进了人们对FRC的理解。该方案的难点在于FRC的电流驱动以及稳定性问题。
- 对于磁化靶FRC或是准稳态FRC聚变方案来说，形成一个高参数的初始FRC是非常关键的。碰撞融合FRC作为一种产生高质量FRC的方法，是国内外诸多实验装置的研究重点。从C-2装置上的实验结果来看，与单边传输FRC相比，对撞融合FRC呈现诸多优点：a) 极向磁通增加；b) 等离子体温度提升；c) 磁通约束时间增加，输运降低。

磁化靶FRC方案示意图

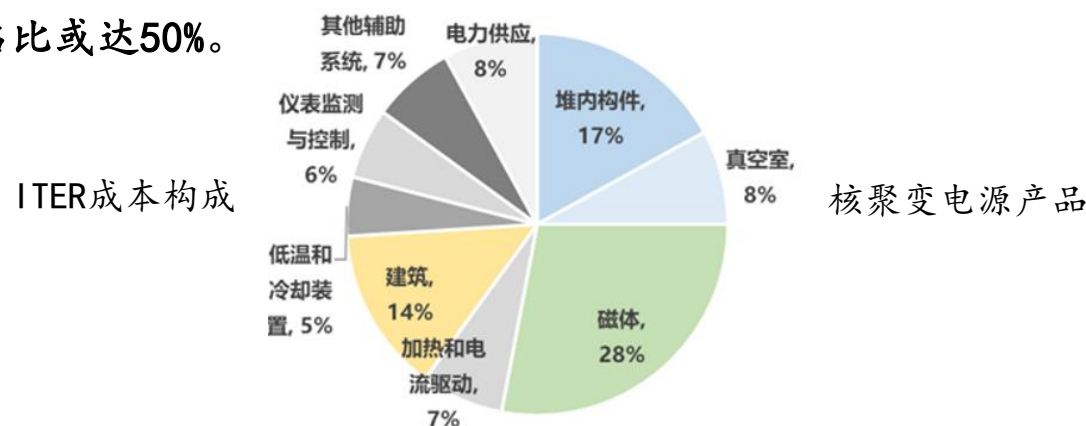


TAE公司的C-2W装置



1.4 场反位形成成本占比：或更依赖高性能电源系统

- 电源系统在ITER装置中占据着极其重要的地位，功能主要有三点：1) 为微波、中性粒子等装置提供能量，维持聚变反应所需高温等离子体环境。2) 为各超导线圈导通电流，产生对应强磁场以约束和控制等离子体位形。3) 为聚变装置各辅助系统供电及磁体失超的保护电路。
- 从托卡马克装置（如ITER）的成本构成来看，涉及电源部分的分别是电力供应（8%）、加热和电流驱动（7%），即电力、电源部分共计占比15%。我们认为电源系统在场反位形的成本中所占比重或有所提高。其原因主要有以下几点：
 - FRC的磁化靶路线（如Helion方案）需通过脉冲式压缩将等离子体瞬间提升至聚变条件；准稳态路线（如TAE方案）依赖中性束注入（NBI）的持续电流驱动维持稳定性。两种路线均需毫秒级精度的瞬态能量输入，远超托卡马克稳态运行的电源需求。此外，真空开关也需具备相较于托卡马克装置中更高的工作频率。
 - 以TAE的C-2W装置为例，其把FRC的能量约束时间大幅提升至了10ms量级，这或许需要频繁重复的快速能量注入，依赖大容量电容组实现脉冲蓄能以及具备更高操作寿命的真空开关。
- 由于场反技术仅需要较小的外部磁场（低成本）来封闭高温、高密度（高性能）的等离子体，因此，其对磁体的需求相较于托卡马克而言大大降低。而在托卡马克装置中磁体与电源系统占比高达43%，因此我们预估在场反装置中，电源系统占比或达50%。



700V/20kA高精度高稳定度直流电源



10kV光电开关驱动源



20kV开关驱动源



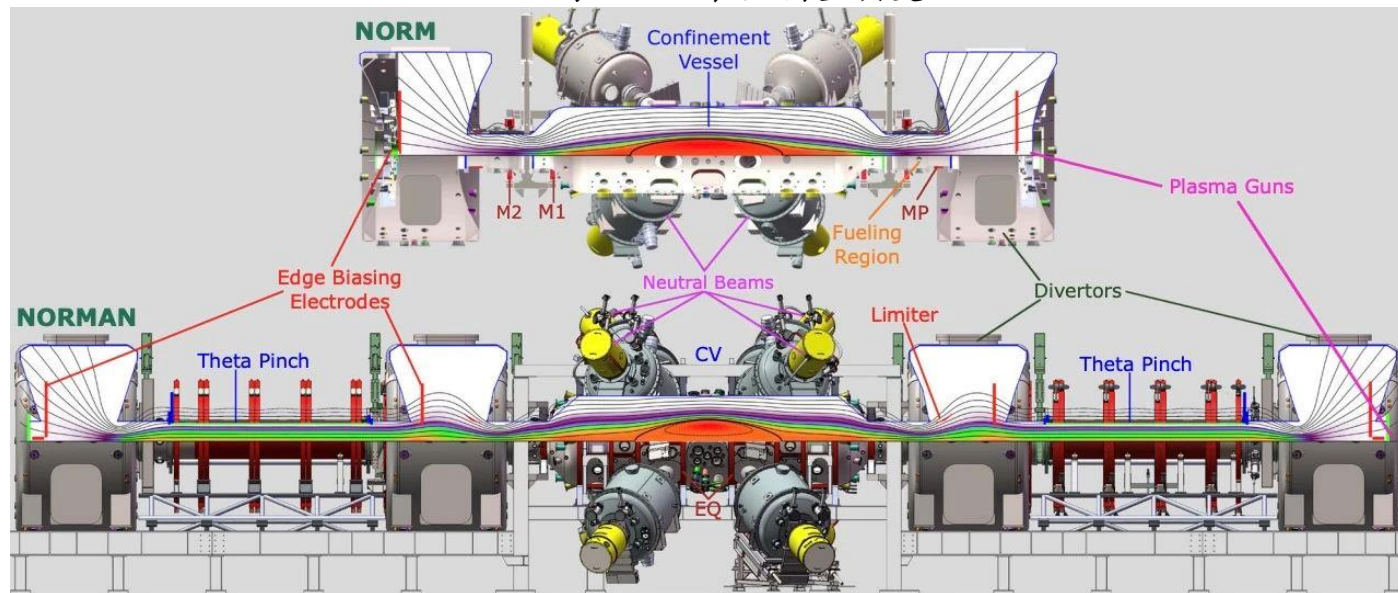
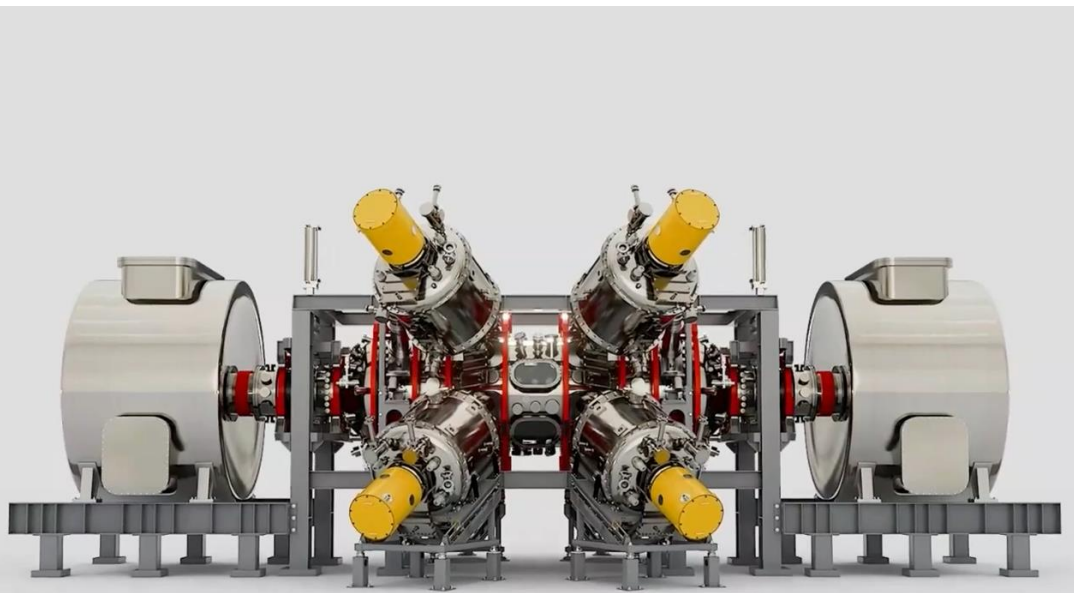
多功能激光试验系统能源组件

2.1 场反位形的应用：美国TAE Technologies

- TAE成立于1998年，总部位于美国加州，在英国、瑞士等国设有分支机构，致力于开发环境效益最优的商用核聚变能源。
- TAE公司采用场反位形技术路径，以氢硼作为聚变反应燃料，目标通过自主研发的粒子加速器技术、专用电源和实时主动反馈控制系统，成功抑制等离子体不稳定性，在稳态运行中产生适用于聚变的稳定等离子体。
- 今年4月，TAE宣布了一项重大里程碑。通过创新性仅使用中性束注入（NBI）技术，在Norm装置中心直接生成、加热并稳定FRC等离子体。相比传统FRC装置依赖复杂等离子体形成段（装置两端的石英长管）和超音速碰撞，新技术使系统尺寸、复杂性和成本降低达50%，同时也达成了最高稳态等离子体性能记录，为经济竞争力和商业化铺平道路。
- 2025年6月2日，TAE Technologies宣布其在最新一轮融资中筹集了超过1.5亿美元的资金，超额完成本轮初始融资目标，公司累计融资规模达到13.5亿美元。

TAE的聚变装置Norm

Norm与Norman装置构型演变



2.2 场反位形的应用：美国Helion Energy

- Helion Energy成立于2013年，总部位于美国华盛顿州的埃弗雷特。Helion Energy是一家私营清洁能源公司，它致力于开创一个通过核聚变技术产生零碳电力的新时代，正在建设首个商用核聚变电站，计划到2028年开始为微软数据中心供电。目前，公司采取磁惯性约束聚变技术，结合了磁约束与惯性约束聚变的技术优势，通过直接电能提取技术，形成创新型高效聚变技术路径，为聚变发电并网提供了实现路径。
- 公司主要技术路径为线性场反脉冲反应，其燃料来源为氘-氦3（DHe3）。其主要产品包括特伦塔（Trenta）、北极星（Polaris）。Helion Energy公司目前正为其位于韦纳奇市以南马拉加地区的拟建项目申请地方审批。

Trenta装置参数表

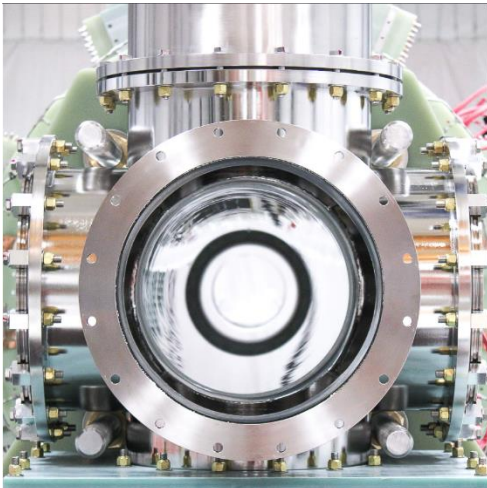
指标	Trenta装置
累计聚变脉冲数（Fusion pulses）	>10,000次
实现等离子体温度（Temperatures achieved）	9 keV（约1.04亿摄氏度）
运行周期（Operational lifetime）	2年
主体聚变反应证据（Bulk fusion evidence）	氘-氘（D-D）、氘-氦3（D-He ³ ）反应
装置总长（Total length）	15米
储能装置能量（Bank energy）	>10 MJ（兆焦耳）
峰值磁场强度（Peak field）	8 T（特斯拉）

Trenta装置



Trenta作为公司破纪录的第6个聚变装置，其研发标志着清洁、安全、可持续聚变能源探索进程中的重要技术突破。

Polaris装置



Polaris装置作为聚变能源研发的下一代核心装置，将采用磁场强度更高、脉冲频率更快的创新设计，其性能超越前代Trenta装置。

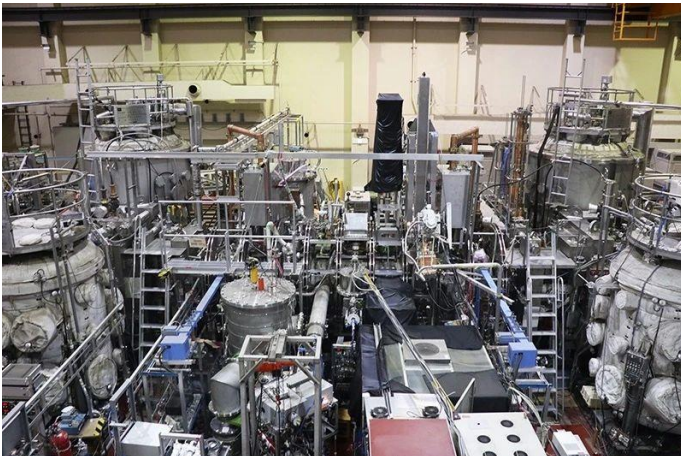
2.3 场反位形的应用：日本LINEA Innovations

- 位于东京都港区六本木的LINEA Innovations成立于2023年9月，由日本筑波大学(University of Tsukuba)与日本大学(Nikon University)联合创立，旨在实现基于场反位形(FRC)和磁镜混合约束的商业聚变反应堆。
- 在技术路径上，公司采用FRC和磁镜混合约束方法，通过自主开发的场反位形(FRC)产生高密度等离子体，与被磁镜捕获的高能束离子发生非热反应，从而实现高效聚变反应。公司目前正与日本大学、筑波大学等机构开展联合研究，推进革新性先进燃料核聚变技术的实用化。
- 融资历程：
 - 2024年1月，融资7000万日元（约48.44万美元）。由日本风险投资公司ANRI投资。
 - 2025年6月2日，LINEA Innovations官宣完成17.5亿日元（约1200万美元）的A轮融资，本轮融资由ANRI领投，7家风险投资公司、2家企业公司及1名个人投资者跟投。

通过本次融资，LINEA Innovations将加速场反磁镜混合的氢硼核聚变反应技术的验证与研发，力争在数年内实现反应验证。

公司中期目标是：在2030年代初期完成发电验证，并逐步向商业化过渡。

筑波大学的等离子体约束装置示意



Fusion发展路线图



2.4 场反位形的应用：瀚海聚能

- 瀚海聚能（成都）科技有限公司成立于2022年12月30日，是中国首家专注于直线型场反位形（FRC）可控核聚变技术的商业公司，致力于通过低成本、快速迭代的装置研发，为未来商业聚变发电堆提供高性价比的核心组件和整体解决方案。
- 技术路线：基于 HHMAX-FRC 研究的场反位形可控核聚变装置，功率密度约是托卡马克类的 100-1000 倍，运用模块化设计，工程实现难度低，装置可迭代性强，是商业化聚变的首选。
- 融资进展：2023年3月获轻舟资本种子轮投资；2024年4月完成华映资本、奇绩创坛、厚实基金领投的天使轮融资，累计融资超5000万元。
- 最新动态：2025年2月19日，在四川成都市国家级经济技术开发区，中国首家直线型可控核聚变公司瀚海聚能举行了聚变装置基地改建工程启动仪式，标志着瀚海聚能正式从技术研发迈入工程化实践的新阶段。

瀚海聚能的发展目标

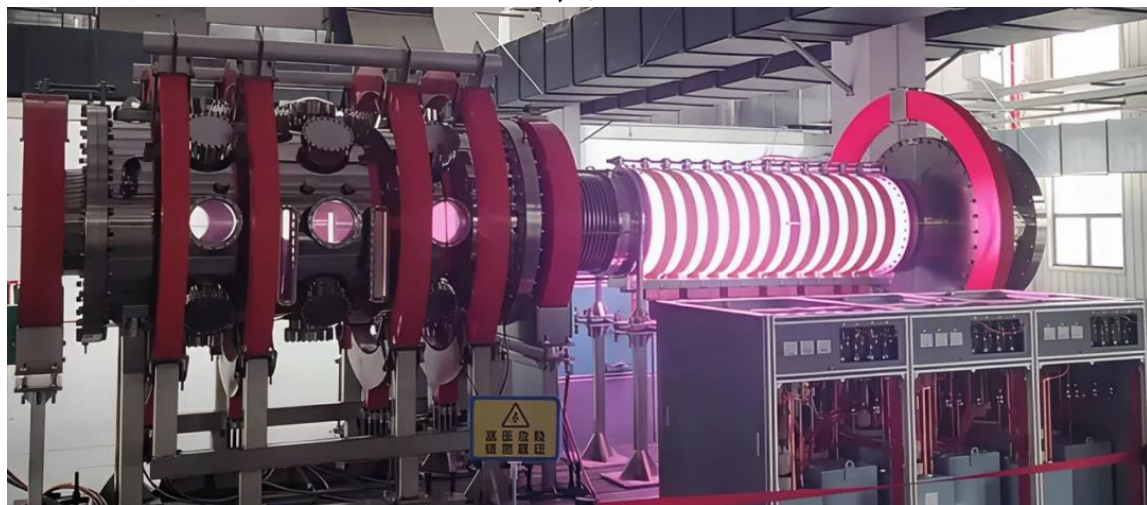
瀚海聚能装置基地



2.5 场反位形与磁镜混合应用：星能玄光

- 星能玄光成立于2024年3月，总部位于安徽合肥，其核心技术基于孙玄教授十余年前提出的先进场反磁镜聚变路径。自2013年起，该技术已在中国科学技术大学的KMAX-FRC课题组进行实践和开发。
- 星能玄光采用的先进场反磁镜技术，通过独创的三重约束磁场环境，即场反位形自组织约束、强磁镜、电势垒强化轴向约束相结合的方式，有望实现高温高密长约束时间的运行状态。
- 2025年2月，星能玄光研发建造的场反位形装置——Xeonova-1成功实现放电。该装置由星能玄光自主研发并建造。从设备进场安装到实现放电仅耗时两个月，再次刷新了国际上建设聚变装置的记录。Xeonova-1场反位形采取了传统的单边形成和磁镜捕获的设计，利用强磁场减速和压缩高速喷射的场反，在捕获区形成高温高密的等离子体团，捕获后等离子体团由于压强升高将膨胀接近导体壁，有利于研究和优化导体壁在场反压缩过程中的作用。
- 2024年11月29日，星能玄光完成亿元天使轮融资。本轮融资由招商局创投和中科创星领投，民银国际、博将资本、银杏谷资本、天创资本和个人投资者跟投，钛资本担任独家财务顾问。

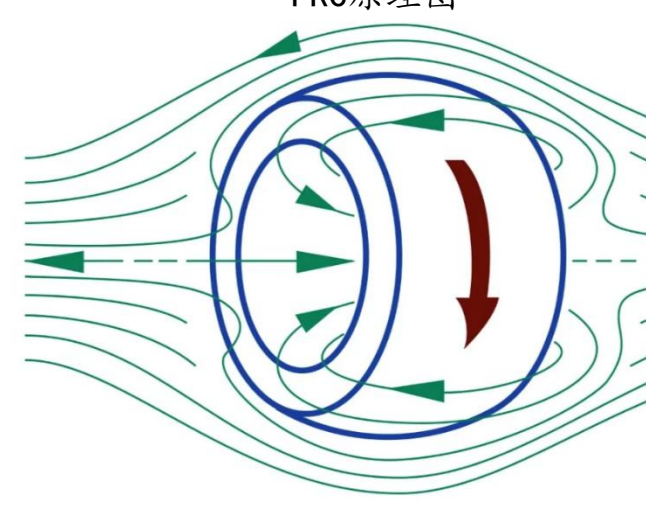
Xeonova-1装置



星能玄光小型化FRC注入装置实物图



FRC原理图



3.1 投资建议

- 投资建议：重点关注紧凑型核聚变装置技术——场反位形直线型装置高价值量部分
- 1) 开关及电源类：旭光电子（真空开关、大功率电子管、氮化铝核心材料）、四创电子（PSM电源）、英杰电气（电源总成），王子新材/胜业电气（电容器），爱科赛博（电源总成），百利电气等
- 2) 真空室/堆内构件等部件：合锻智能（真空室扇区、窗口延长段、重力支撑，同时拓展其他堆内构件）、安泰科技（钨铜偏滤器、钨铜限制器、包层第一壁、钨硼中子屏蔽材料），派克新材（聚变金属结构锻件），上海电气（杜瓦、真空室、TF线圈等），斯瑞新材（耐高温高强高导原材料）
- 3) 燃料、检测、辅助系统：国光电气（传输分系统、涉氚燃料各类设备及零部件）、皖仪科技（检测设备）
- 4) 超导磁体：永鼎股份（高温超导带材），东方钨业（超导铌材、铍材料），西部超导（低温超导线材），精达股份（高温超导带材）
- 5) 核心模块建设及分系统制造：利柏特、中国能建

分析师声明

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

免责声明

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

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

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

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



方正证券研究所

专注 · 专心 · 专业

北京市朝阳区朝阳门南大街10号兆泰国际中心A座17层
长沙市天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

上海市静安区延平路71号延平大厦2楼
深圳市福田区竹子林紫竹七道光大银行大厦31层

广州市天河区兴盛路12号楼隼峰院2期3层方正证券