

市场洞察：“终极能源”曙光，可控核聚变进展全解析

Briefing Report: The Dawn of Ultimate Energy, A Comprehensive Analysis of Controlled Nuclear Fusion Progress

市場速報：「究極のエネルギー」の夜明け：制御核融合の進歩の完全分析

报告标签：可控核聚变、研究进展、未来发展
2025年6月

Q1：什么是可控核聚变？人类为何要研发可控核聚变？

■ 可控核聚变是人类在地球上可控地实现核聚变反应来直接获得核聚变的過程

核能是一种高效且清洁能源，源于物质元素的原子核发生变化时释放的能量。与支持生命的化学能不同，核能是原子的核内能量，参与生命物质转化的化学能都是核外能量，这些化学反应不会引起原子核的变化。核能释放的能量主要分为两类，一类是核裂变（nuclear fission），指重元素的原子核（通常采用铀、钚、钍等）分裂为较轻元素的原子核时释放的能量，称为核裂变能；一类是核聚变（nuclear fusion），指小质量元素的原子核（通常采用氢的同位素氘和氚）聚合成重核时释放的能量，称为核聚变能。

由于核聚变反应是在高温、高密度与高能量约束时间的等离子体中实现的，如D-T反应所要求的燃料温度不低于1亿度，D-D反应所要求的温度不低于5亿度。**可控核聚变就是指人类在地球上可控地实现核聚变反应来直接获得核聚变的过程。**

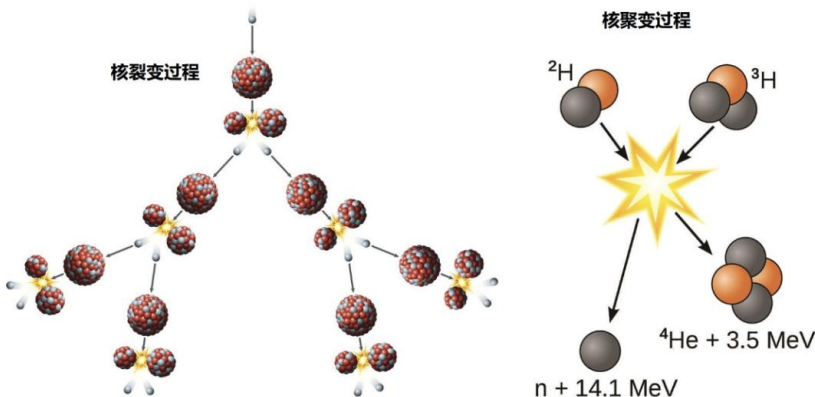
就单位质量而言，核聚变释放的能量要比核裂变释放的能量大

3 ~ 4 倍

■ 地球矿石燃料资源日益枯竭，新能源资源受到环境、季节、地理位置等条件的限制，核能是人类最能和平利用的能源

进入21世纪后，依靠人类目前的技术，可开发的能源资源已面临严重不足的危机。世界煤、石油和天然气等矿石燃料资源日益枯竭。据世界能源会议统计，世界已探明可采煤炭储量共计15,980亿吨，预计还可开采200年；探明可采石油储量共计1.211亿吨，预计还可开采30~40年；探明可采天然气储量共计119万亿米³，预计还可开采60年。新能源资源中，风能、潮汐能、地热能等资源的开采受到环境、季节、地理位置等条件的限制，太阳能生成成本较高。核聚变反应会释放出巨大的能量，就单位质量而言，核聚变释放的能量要比核裂变释放的能量大3~4倍，核聚变能源是人类最能和平利用的能源。

图表1：核裂变和核聚变示意图



来源：中国新材料产业技术创新平台、国家原子能机构、头豹研究院

Q2：可控核聚变为何是人类“终极能源”的曙光？

- 可控核聚变具有燃料丰富、安全可靠、清洁环保、能量密度高、经济性明显、高能中子应用广泛等突出优点，被视为人类最理想的终极能源

按地球的海水储量计算，
可控核聚变产生的能量至少可供全人类使用

3,000 万年

核聚变燃料丰富且易于获取：只要将氢的同位素氘和氚的原子核无限接近，使其发生聚变反应，就能释放出巨大能量。核聚变燃料之一的氘广泛地分布在海水中，1升海水里提取出的氘，在完全的核聚变反应中可释放相当于燃烧300升汽油的能量。而氚则可以利用聚变产生的中子与丰富的天然锂反应产生。如果实现以D为燃料的受控核聚变，按地球的海水储量计算，可获取 2×10^{11} TW·a（太瓦年）的核聚变能，若按照每年20TW的速度消费，可供全人类使用100亿年；即使以D-T为燃料，也可供人类使用3,000万年。

核聚变安全可靠：核聚变是内在安全的能源。燃烧等离子体一旦形成，任何运行故障都能使等离子体迅速冷却，从而使聚变反应在短时间内自动停止，这意味着核聚变反应堆本身具有内在的安全性。此外，核聚变能源可按需提供，不受天气等环境因素影响，可靠性更强。

核聚变清洁环保：核聚变是相对清洁和环境友好的能源。核聚变电站不产生化石燃料电站所释放的二氧化碳等温室气体，没有裂变产物。

核聚变经济性明显：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。

此外，核聚变反应所产生的大量高能中子在军事上以及其他领域都有广泛的用途。因此，核聚变能是目前认识到的最终解决人类能源问题的最重要途径之一，研究核聚变、开发核聚变能具有重大科学意义和战略意义。

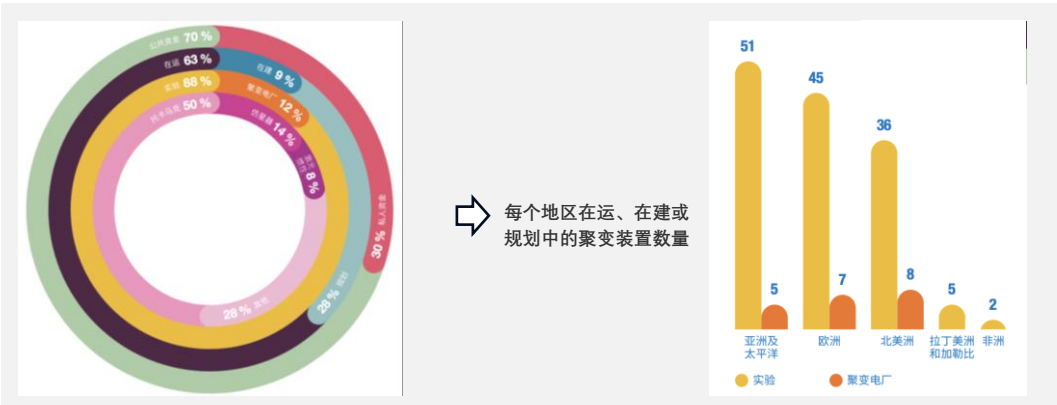
图表2：可控核聚变的优势

优势	具体内容
能量密度高	就单位质量而言，核聚变释放的能量要比核裂变释放的能量大3~4倍
燃料丰富	1升海水里提取出的氘，在完全的核聚变反应中可释放相当于燃烧300升汽油的能量 - 氚则可以利用聚变产生的中子与丰富的天然锂反应产生
安全可靠	燃烧等离子体一旦形成，任何运行故障都能使等离子体迅速冷却，从而使聚变反应在短时间内自动停止
清洁环保	核聚变电站不产生化石燃料电站所释放的二氧化碳等温室气体，没有裂变产物
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

来源：国家原子能机构、头豹研究院

Q3: 国内外可控核聚变的研究进展如何?

图表3: 2024年全球聚变装置及其运行状况



- 全球聚变装置88%仍处于实验设计阶段，其中托卡马克装置约占目前全球聚变装置的50%，是最主流方案

全球聚变装置大部分仍处于实验设计阶段。截止2024年，处于实验阶段的聚变装置占比88%，合计有139台；聚变电厂的聚变装置占比仅12%，合计有20台。从地区分布情况来看，北美、欧洲、亚太区在电站建设进度上领先，亚太在实验堆方面数量最多。公共资金是聚变项目的主要资金来源，世界核聚变装置的建设资金70%来自公共资金，30%来自私人资金。

托卡马克装置约占目前全球聚变装置的50%，是最主流方案。目前，能实现核聚变的基本方法有两种：磁约束核聚变和惯性约束核聚变。磁约束核聚变实现途径有托卡马克聚变堆、仿星器聚变堆、球马克聚变堆、串级磁镜聚变堆等，其中托卡马克是聚变装置的主流。惯性约束核聚变实现途径主要为激光器。截止2024年，世界核聚变装置的50%为托卡马克，14%为仿星器，8%为激光惯性，28%为其他装置，托卡马克、仿星器、激光惯性、其他路线装置分别有79台、23台、12台、45台。

全球最大核聚变合作项目ITER的全功率实验计划将于2036年开始。ITER是全球最大的核聚变合作项目，其35个参与国占世界人口的一半以上，占全球国内生产总值的85%。国际热核聚变实验堆（ITER）的组装工作于2020年在法国开始。ITER将在本十年的后半期开始进行首次实验，全功率实验计划于2036年开始。

2024年，全球处于实验阶段的聚变装置有

139 台

2024年，聚变电厂的聚变装置有

20 台

来源：IAEA、头豹研究院

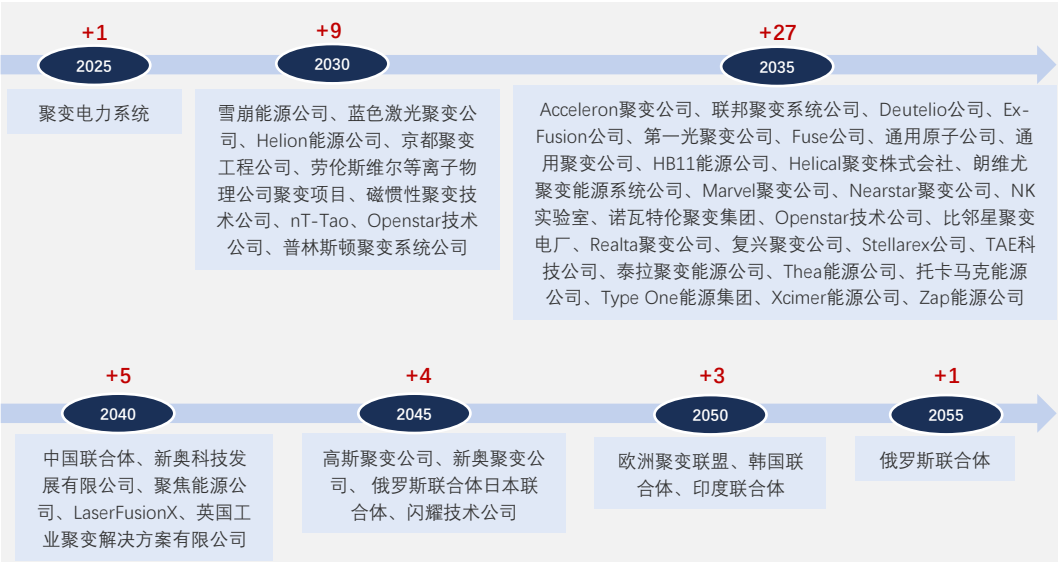
Q4：未来，全球将有哪些聚变电厂即将完工？

■ 未来将有50座聚变电厂目标完成日期在21世纪20年代末至50年代中期之间

在加拿大、中国、德国、以色列、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、瑞典、英国和美国，至少有20个聚变电厂概念处于不同的开发阶段，目标完成日期都在21世纪20年代末至50年代中期之间。从全球范围看，2025年预计将有1个聚变电力系统完工，2030年预计将有9个聚变电厂完工，2035年预计将有27个聚变电厂完工，2040年预计将有5个聚变电厂完工，2045年预计将有4个聚变电厂完工，2050年预计将有3个聚变电厂完工，2055年预计将有1个聚变电厂完工。

中国聚变工程实验堆（CFETR）是一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念，是中国实现聚变能路线图中的下一代装置，建造工作预计将于2040年完工。中国聚变工程实验堆预计将弥补国际热核实验堆与聚变电厂之间的差距，并验证净电力增益和0.5的占空比。中国聚变工程实验堆的研究和开发计划分为两个阶段。在第一阶段，工作重点将是实现稳态运行和验证氦自给自足，聚变功率达到200兆瓦。这一阶段将解决与自持燃烧等离子体物理研究与发展有关的问题，以确定先进稳态运行的可行性。第二阶段将重点验证聚变功率超过1吉瓦后的电厂相关技术。第二阶段的关键成果就是为设计商业发电厂搭建一个RAMI数据库。中国聚变工程实验堆的一些概念设计参数包括：大半径=7.2米，小半径=2.2米，等离子体拉长比 $K_{95}=2$ ，等离子体电流=14兆安，轴磁场强度=6.5特斯拉，归一化贝塔值 $\beta_N=2.3$ ，预计科学能量增益 $Q_{sci}=20$ 。

图表4：全球在建聚变电厂的目标完工时间



来源：IAEA、头豹研究院

方法论

- ◆ 头豹研究院布局中国市场，深入研究19大行业，持续跟踪532个垂直行业的市场变化，已沉淀超过100万行业研究价值数据元素，完成超过1万个独立的研究咨询项目。
- ◆ 研究院依托中国活跃的经济环境，研究内容覆盖整个行业的发展周期，伴随着行业中企业的创立，发展，扩张，到企业走向上市及上市后的成熟期，研究院的各行业研究员探索和评估行业中多变的产业模式，企业的商业模式和运营模式，以专业的视野解读行业的沿革。
- ◆ 研究院融合传统与新型的研究方法，采用自主研发的算法，结合行业交叉的大数据，以多元化的调研方法，挖掘定量数据背后的逻辑，分析定性内容背后的观点，客观和真实地阐述行业的现状，前瞻性地预测行业未来的发展趋势，在研究院的每一份研究报告中，完整地呈现行业的过去，现在和未来。
- ◆ 研究院密切关注行业发展最新动向，报告内容及数据会随着行业发展、技术革新、竞争格局变化、政策法规颁布、市场调研深入，保持不断更新与优化。
- ◆ 研究院秉承匠心研究，砥砺前行的宗旨，从战略的角度分析行业，从执行的层面阅读行业，为每一个行业的报告阅读者提供值得品鉴的研究报告。

法律声明

- ◆ 本报告著作权归头豹所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式翻版、复制、发表或引用。若征得头豹同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“头豹研究院”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节或修改。
- ◆ 本报告分析师具有专业研究能力，保证报告数据均来自合法合规渠道，观点产出及数据分析基于分析师对行业的客观理解，本报告不受任何第三方授意或影响。
- ◆ 本报告所涉及的观点或信息仅供参考，不构成任何投资建议。本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。在法律许可的情况下，头豹可能会为报告中提及的企业提供或争取提供投融资或咨询等相关服务。本报告所指的公司或投资标的的价值、价格及投资收入可升可跌。
- ◆ 本报告的部分信息来源于公开资料，头豹对该等信息的准确性、完整性或可靠性不做任何保证。本文所载的资料、意见及推测仅反映头豹于发布本报告当日的判断，过往报告中的描述不应作为日后的表现依据。在不同时期，头豹可发出与本文所载资料、意见及推测不一致的报告和文章。头豹不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，头豹对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，读者应当自行关注相应的更新或修改。任何机构或个人应对其利用本报告的数据、分析、研究、部分或者全部内容所进行的一切活动负责并承担该等活动所导致的任何损失或伤害。

头豹业务合作

数据库/会员账号

可阅读全部原创报告和
百万数据，提供数据库
API接口服务

定制报告

行企研究多模态索引
引擎及数据库，募投可研、
尽调、IRPR等研究咨询

定制白皮书

对产业及细分行业进行
现状梳理和趋势洞察，
输出全局观深度研究报
告

招股书引用

研究覆盖国民经济19+
核心产业，内容可授权
引用至上市文件、年报

市场地位确认

对客户竞争优势进行评
估和调研确认，助力企
业品牌影响力传播

行研训练营

依托完善行业研究体系，
帮助学生掌握行业研究
能力，丰富简历履历

报告作者



陈夏琳
首席分析师
sharlin.chen@leadleo.com



于利蓉
行业分析师
lirong.yu@leadleo.com

业务咨询

- 客服电话：400-072-5588
- 官方网站：www.leadleo.com



商务咨询与深度合作

深圳办公室

广东省深圳市南山区粤海街
道华润置地大厦E座4105室

邮编：518057

上海办公室

上海市静安区南京西1717号
会德丰国际广场 2701室

邮编：200040

南京办公室

江苏省南京市栖霞区经济
开发区兴智科技园B栋401

邮编：210046