

证券研究报告 | 国防军工 | 2024年3月28日

# 核能领域深度研究报告： 混合堆有望快速建成，核电发展大势所趋

分析师	李鲁靖	登记编号：S1220523090002
	刘明洋	登记编号：S1220524010002
	赵璐	登记编号：S1220524010001



## 摘要

- 核聚变是两个轻原子核结合成一个较重的原子核并释放出巨大能量的过程，反应需要同时满足三个条件：**足够高的温度（T）、一定的密度（n）和一定的能量约束时间（ $\tau E$ ）**，三者的乘积称为聚变三乘积。
- 各国推出相关政策大力支持聚变能源的发展。2023年12月，美国与来自四大洲的22个国家发布了《三倍核能宣言》，提出到2050年将核能装机容量增加两倍，同时，美国在COP28宣布聚变能源国际参与计划；12月29日，中国可控核聚变创新联合体正式宣布成立，明确可控核聚变领域为未来能源的唯一方向。
- 聚变裂变混合堆将聚变作为裂变反应堆的中子源，综合了快堆和聚变堆的优势：**经济简便，安全度高，燃料可持续性好，有望提前实现聚变能商业化应用**。技术难题：1) **结构材料难题**：符合条件的反应室壁材料目前仍未找到。2) **控制难题**：混合的裂变包层是在没有链式反应的状态下运行，一旦出现链式反应的条件，就会发生严重事故。
- 国际聚变裂变混合堆项目：1) **俄罗斯DEMO聚变中子源（FNS）的聚变-裂变混合设施**；2) 俄罗斯托木斯克理工大学创建了一种独特的混合反应堆热核组件；3) **韩国“聚变嬗变反应堆”（FTR）**；4) **意大利IGNITOR项目**
- 国内Z箍缩驱动聚变裂变混合能源堆（**Z-FFR**）兼顾现有技术基础、先进性、工程可行性和经济性；**电磁驱动聚变大科学装置基础设施**由中国工程物理研究院承担研制，主要用于验证Z箍缩局部点火聚变可行性；**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，项目落户江西。
- 核电具有**高效、污染小、环境友好、单机容量大、发电量稳定**等优势；目前我国运行核电机组共**55台(+3.8%)**(不含台湾地区)，总装机容量**5703.334万千瓦(+2.51%)**，核电机组数量和总装机容量位居全球第三位；到2035年，我国核电在运和在运装机容量将达2亿千瓦左右；三代核电投资逻辑主要为批复机组数量的增加对应业绩的逐渐兑现+国产替代+较稳定的高毛利。
- ◆ **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  
 核电运营龙头：中国核电；核电站配套：中核科技、佳电股份、江苏神通、海陆重工  
 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

# 目录

- 第一部分 可控核聚变：能源革命的世纪出路
- 第二部分 聚变裂变混合堆：有望提前实现聚变能产业化的一大途径
- 第三部分 核电概况
- 第四部分 相关上市公司
- 第五部分 风险提示

## 第一部分 可控核聚变：能源革命的世纪出路

1.1 聚变能是未来能源换代的根本出路

1.2 可控核聚变基本原理-原子核聚合释放出巨大能量的过程

1.3 可控核聚变技术难点-温度、密度、能量约束时间（聚变三乘积）

1.4 国际相关政策梳理-核能发展得到多方支持

## 1.1 聚变能是未来能源换代的根本出路

- 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。可控核聚变能源总量无穷无尽、不受制约，又不会对环境造成污染，是改善未来能源结构，推动在半世纪实现能源顺利换代的根本出路。
- 各国都将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。
- 无限能源：可控核聚变前景良好但需投入大量研发
- 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。氘氚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吨氘氚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。



图：中核科创基金合作签约仪式



图：美国气候特使在COP28会上发言

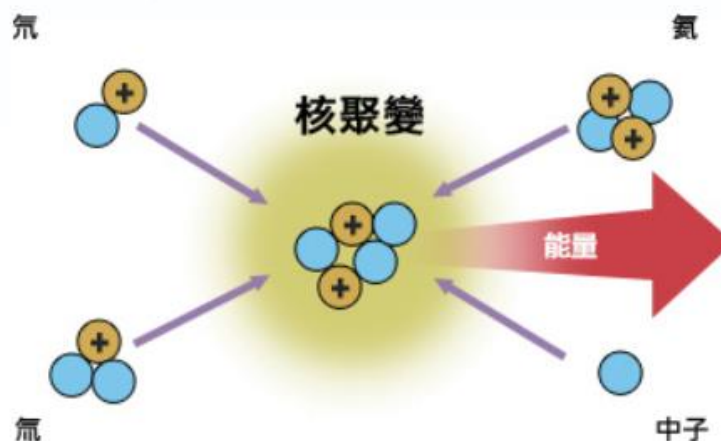
## 1.2 可控核聚变基本原理-原子核聚合释放出巨大能量的过程

- 核聚变是两个轻原子核结合成一个较重的原子核并释放出巨大能量的过程。最早发展的理论基础来源于爱因斯坦。1905年，爱因斯坦推导出了物理学史上最著名的方程 $E=mc^2$ 。如果能够把物质的质量转化为能量，将可以获得巨大的能量收益。1克静止物质对应的能量相当于2.1万吨TNT炸药爆炸释放的能量。
- 在一定条件下，一个氘核(由一个质子一个中子组成)和一个氚核(由一个质子和二个中子组成)会发生聚变核反应，生成一个氦核(二个质子和二个中子组成)，并放出一个中子。精密的测量表明，氦核加上一个中子的质量之和小于一个氘核与氚核反应前的质量之和，发生了明显的质量亏损。爱因斯坦质能公式 $E=mc^2$ 表明，反应过程中出现的质量亏损转化为巨大的能量释放出来。
- 主要的聚变反应主要有四种，分别是氘氘，氘氘，氘氦以及氢硼反应。

图：常见的聚变反应 D:氘 T:氚 He:氦

Reaction	$\sigma_{max}/b$	$\epsilon_{max}/keV$
$D + T \rightarrow \alpha + n$	5.0	64
$D + D \rightarrow T + p$	0.096	1250
$D + D \rightarrow {}^3_2He + n$	0.11	1750
$D + {}^3_2He \rightarrow \alpha + p$	0.9	250
$p + {}^6_3Li \rightarrow \alpha + {}^3_2He$	0.22	1500
$p + {}^{11}_5B \rightarrow 3\alpha$	1.2	550
$p + {}^{12}_6C \rightarrow \gamma + {}^{13}_7N$	$1.0 \times 10^{-4}$	400

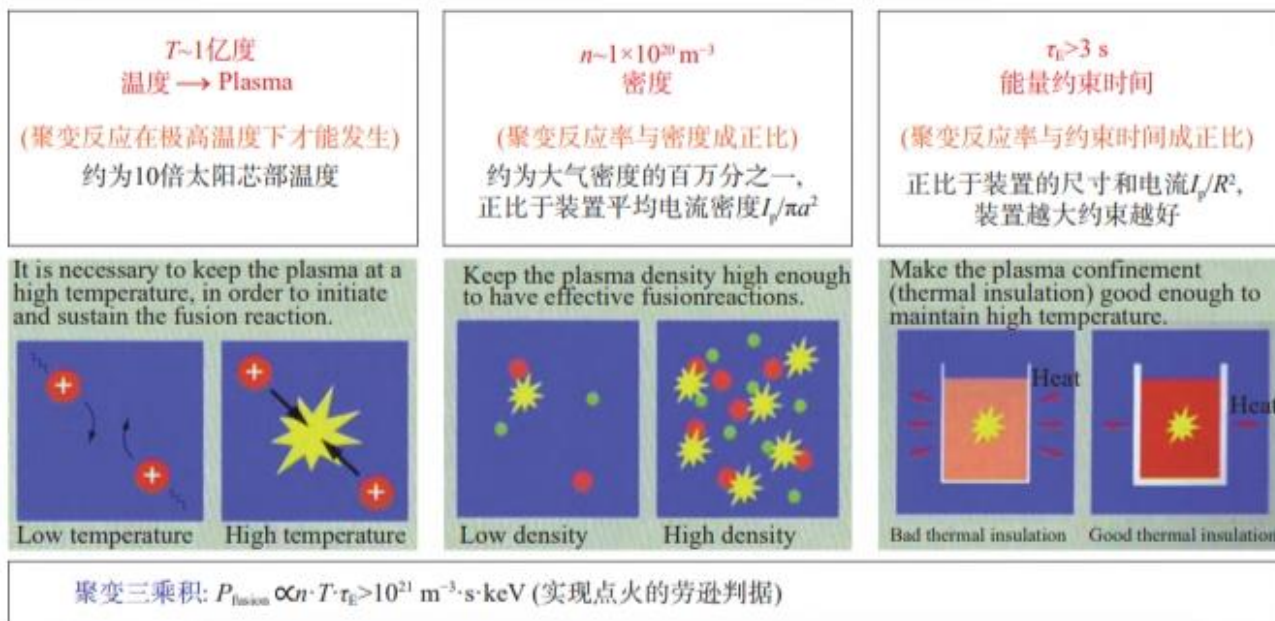
图：氘氘核聚变



➤ 在聚变反应中，氢的两种同位素，氘和氚的原子核，在极端的温度和压力下被迫聚在一起，聚变形成氦核。在这个过程中，一部分氢的质量以能量的形式释放出来。

### 1.3 可控核聚变技术难点-温度、密度、能量约束时间（聚变三乘积）

- 实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：足够高的温度（T）、一定的密度（n）和一定的能量约束时间（ $\tau_E$ ），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( $10^{20} \text{s keV/m}^3$ )才能产生有效的聚变功率输出。
- 首先是高温，实现核聚变反应需要将氘氘原子核压缩到很小尺度的核力范围内，但由于原子核带正电，必须在极高温下才能获得足够的能量以克服彼此间的库仑势垒，原子核靠得更近时通过量子隧穿效应产生核聚变反应的几率更大。要在地球实现高效核聚变反应，温度大约需要维持在1亿摄氏度才能保证较高反应几率。
- 其次是密度，用以衡量等离子体约束区单位体积内粒子的个数。保持足够的密度意味着单位体积内拥有更多的氘氘原子核，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。
- 最后是能量约束时间，高温等离子体的能量以辐射和热传导的形式逸出，为唯象描述热传导损失功率，将等离子体总能量热传导损失所需时间定义为能量约束时间，是聚变装置重要指标。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。



## 1.4 国际相关政策梳理-核能发展得到多方支持

时间	事件
2022年2月14日	美国能源部宣布为包括核聚变在内的新型清洁能源技术项目提供1.75亿美元，受资助者中有四个聚变能源项目，包括：300万美元用于麻省理工学院的液体浸没毯：稳健会计（LIBRA）实验，以测试氙育种、\$1.5M给普林斯顿等离子体物理实验室，以测试实现经济pB11聚变途径的方法、\$3.1M给洛斯阿拉莫斯国家实验室，用于聚变等离子体组件中钨合金的材料研究、向PolymathResearch提供200万美元，用于用于惯性聚变能量的长波长激光器。
2023年3月9日	白宫发布了定于10月开始的2024财年的预算请求。在预算范围内，能源部聚变能源科学办公室的聚变能源研究资金超过10亿美元。
2023年9月25日	美国能源部长格兰霍姆表示，作为美国向清洁能源过渡的一部分，拜登政府希望在10年内建立一座商业核聚变设施。目前，拜登政府的目标是到2035年实现电力行业无碳污染，到2050年实现经济净零排放。
2023年10月13日	日本文部科学省（MEXT）宣布，继日本今年早些时候启动了一项旨在加速核聚变的国家战略之后，向核聚变公司提供第一轮联邦资助。四分之二的奖项颁给了聚变开发商，FIA成员KyotoFusioneering和HelicalFusion，两个奖项颁给了供应商公司LiSTieCorporation和MiRESSOCorporation。这笔资金标志着日本推动核聚变加速的最新一步。
2023年10月31日	一封由72名国会议员签名的两党联名信被送交众议院拨款委员会，信中要求增加对聚变能商业化的资金投入。这是代表Beyer, Obernolte, Trahan和Lofgren领导的这封信。
2023年11月10日	75家美国公司和大学致函参议院和众议院拨款委员会，敦促增加聚变能源资金。社区要求核聚变的资金达到总统预算请求所要求的水平，达到《芯片和科学法案》授权的全部水平。委员会应该“资助和优先考虑”聚变能源，正如两党的CHIPS和科学法案，美国国家科学院关于“将聚变带入美国电网”的共识报告和聚变能源科学咨询委员会的“长期计划”中所述。
2023年12月2日	美国与来自四大洲的22个国家发布了《三倍核能宣言》，提出到2050年将核能装机容量增加两倍，并承认核能在实现全球温室气体净零排放和1.5°C目标方面发挥的关键作用，鼓励国际金融机构将核能纳入能源贷款政策。
2023年12月5日	美国在COP28宣布聚变能源国际参与计划，这项战略确定了五个工作领域，并以拜登总统的“商业化核聚变能源的宏伟愿景”为基础。此外，经合组织核能署（NEA）发起了名为“加速先进小型模块化多用途反应堆（SMRs）发展以实现净零排放”的倡议。
2023年12月7日	美国、加拿大、法国、日本和英国宣布计划为全球核能供应链筹集42亿美元，将在未来三年内提高铀浓缩和转化能力，并建立一个不受俄罗斯影响的有弹性的全球铀供应市场。



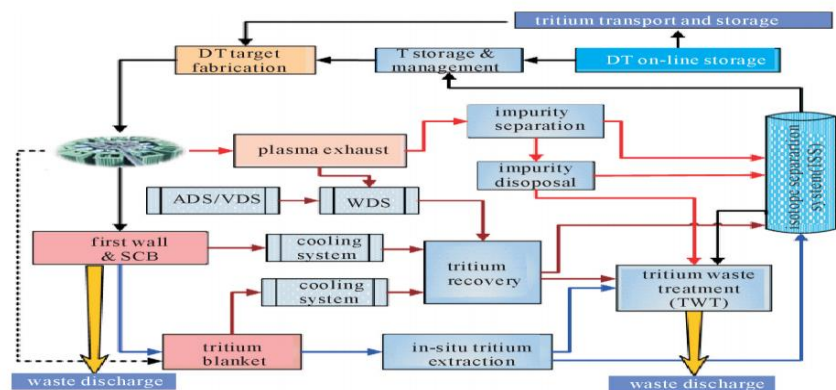
## 第二部分 聚变裂变混合堆：有望提前实现聚变能产业化的一大途径

- 2.1 聚变裂变混合堆将聚变作为裂变反应堆的中子源，综合各方优势
- 2.2 聚变裂变混合堆为核能系统和装置的特性和参数提供全新的可能性
- 2.3 国际聚变裂变混合堆项目如火如荼
- 2.4 核工业西南物理研究院：聚变-裂变混合堆
- 2.5 国内Z箍缩驱动聚变裂变混合能源堆（Z-FFR）等项目有望成为“千年能源”

## 2.1 聚变裂变混合堆将聚变作为裂变反应堆的中子源，综合各方优势

- 氘、氚聚变是巨大的能源同时也是一个巨大的中子源。聚变反应室产生的中子在聚变反应室外的U-238、Th-232包层中生产Pu-239或U-233等核燃料。
- 混合堆使用特殊的等离子枪获得相对较冷的等离子体，通过注入氘气保持一定的等离子量。向该等离子体中注入粒子能量为100keV的中性束产生高能氘和氚离子，保持氘离子和氚离子相互碰撞，形成氦核，并释放出高能中子。这些中子以脉冲方式从真空室到达再生区，轰击到U-238及Th-232靶上，产生一系列串级的引起中子和核燃料增殖的核过程，释放出比聚变中子能量稍低但数量增加几倍的次级中子。次级中子使U-238及Th-232变成Pu-239及U-233等优质核燃料，并释放出裂变能。裂变能量以热的形式被导出用于发电，输出的中子输运到产氚包层内与Li-6反应产生氚，补充聚变消耗。
- 聚变裂变混合堆综合了快堆和聚变堆的优势：
  - 经济简便：相比于初始装料投入巨大的快堆，混合堆不需要投入U-235或Pu-239等核燃料，可以直接用天然铀或核工业中积存下来的贫铀、乏燃料。
  - 安全度高：不同于快堆和压水堆，混合堆生产Th-239或U-233时不需要达到实现链式反应的条件。放射性元素钷可以在轻水反应堆中被处理，不用在混合反应堆中循环，大大减少增殖反应带来的危险。
  - 燃料可持续性好：混合堆中裂变燃料生产应用中可以使用钍而不是铀作为可转换燃料。

图：氘氚燃料循环流程图



图：混合反应堆不同类型

包层工作方式	设计优势	优缺点
快裂变型混合堆	利用聚变产生的高能快中子，在裂变包层产生一系列串级的核过程，大量生产钷-239或铀-233核燃料；	可以有效生产核燃料
抑制裂变型混合堆	在包层中放入大量的钷等慢化材料，使聚变产生的高能快中子很快慢化为热中子等能量低的中子。	不能有效生产核燃料，但可以简化包层内裂变热的导出问题

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/257002146032006060>