

核聚变

技术升级和产业投资共振，人类终极能源渐行渐近

行业投资评级：强于大市

鲍学博 / 马强

中邮证券研究所 军工团队

中邮证券

2023年11月29日

- 核聚变发电具有更低的燃料成本、燃料资源充足、不会对环境造成危害以及更高的安全性等优势，被誉为“人类终极能源”。国际核能大国分别给出了聚变能发展规划，在关键节点DEMO的设计、建造、运行上，美国、欧盟、俄罗斯、日本和印度等分别给出了2035年左右的时间规划。
- **聚变-裂变混合实验堆即将建设，加速核聚变商业应用。**混合堆相当于热核聚变中子源与次临界裂变堆结合，相比于纯聚变堆，混合堆大幅降低堆芯等离子体性能及第一壁材料要求；相比裂变堆，混合堆铀资源利用率高，且燃料增殖能力强于快堆、乏燃料嬗变优势显著、建造成本低于快堆，是实现闭式燃料循环、解决千年能源需求最具前景的方案。国内聚变-裂变混合实验堆Q值大于30，实现连续发电功率100MW，总投资超200亿元，即将进入建设阶段。
- **高温超导技术突破，新型核聚变装置已开始普遍使用。**国外，美国CFS核聚变装置采用高温超导磁体实现装置紧凑型和小型化；英国Tokamak Energy宣布已建造出世界首套新一代高温超导磁体；国内，即将建设的聚变-裂变混合堆、正在建设阶段的能量奇点“洪荒70”以及星环聚能正在完成设计的“CTRFR-1”都将采用高温超导磁体。
- **民营资本涌入推进产业发展。**根据FIA数据，2022年全球私营核聚变公司获得超过48亿美元的投资，比2021年增长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。新增资金包括美国TAE技术公司2.5亿美元、中国新奥科技发展有限公司2亿美元、日本京都聚变技术公司7900万美元、中国能源奇点公司5500万美元等。2023年4月，日本推出《核聚变能创新战略》，旨在通过建立庞大的国内核聚变产业，在未来商业化利用核聚变能中占据主导地位，并提出在2050年实现核聚变发电目标。
- **建议关注同时受益于国内外核聚变发展加速以及新建聚变装置中高温超导磁体推广应用的联创光电、永鼎股份等，建议关注核聚变相关设备、材料制造商国光电气、西部超导、安泰科技等。**
- **风险提示：**核聚变技术进展不及预期；国内外核聚变产业政策支持不及预期；世界电力需求不及预期或其他替代技术快速进步等。

目录

- 一 | **核聚变：解决人类能源问题的终极方案**
- 二 | **发展现状：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步**
- 三 | **聚变-裂变混合堆：千年能源方案，实验堆即将建设**
- 四 | **超导磁体是托卡马克装置的关键，应用从低温超导发展至高温超导**
- 五 | **民营资本涌入推进产业发展，日本已将核聚变上升至国家产业政策**
- 六 | **相关标的及风险提示**



核聚变：解决人类能源问题的终极方案

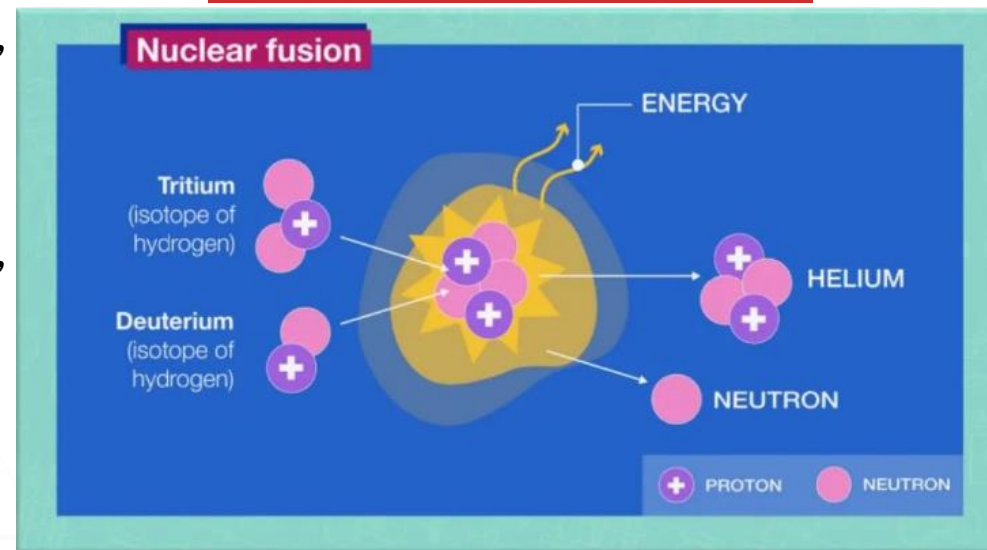
- 1.1 核聚变：人类终极能源，以托卡马克装置最成熟
- 1.2 产生有效聚变功率输出有较高反应条件要求，目前面临三大技术挑战
- 1.3 国际聚变能发展规划

一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

1.1 核聚变：人类终极能源，以托卡马克装置最成熟

- 核聚变，又称核融合、融合反应、聚变反应或热核反应。核聚变由质量小的原子（主要是指氘或氚），在一定条件下（如超高温和高压）发生原子核互相聚合作用，生成新的质量更重的原子核（如氦核），并伴随着巨大的能量释放的一种核反应形式。因此，核聚变被视为几乎无限的能量来源，洁净、安全而自持，为解决人类未来的能源展示了最好的前景。
- 核聚变能是人类未来更理想的新能源。核聚变产生的能量是核裂变的3-4倍，其副产品是惰性、无毒的氦气，不会影响环境安全。在燃料上，核聚变燃料之一的氘广泛地分布在海水中，1升海水中含的氘全部聚变反应所产生的能量与300升汽油完全燃烧所释放的能量相当，海水中氘的储量可供人类使用几十亿年。此外，核聚变反应需要在高温等离子体和外部磁场限制的环境下才可以进行，同时它可以在几秒钟内得到控制或停止，本质上是安全的。

图表1：氘氚聚变反应

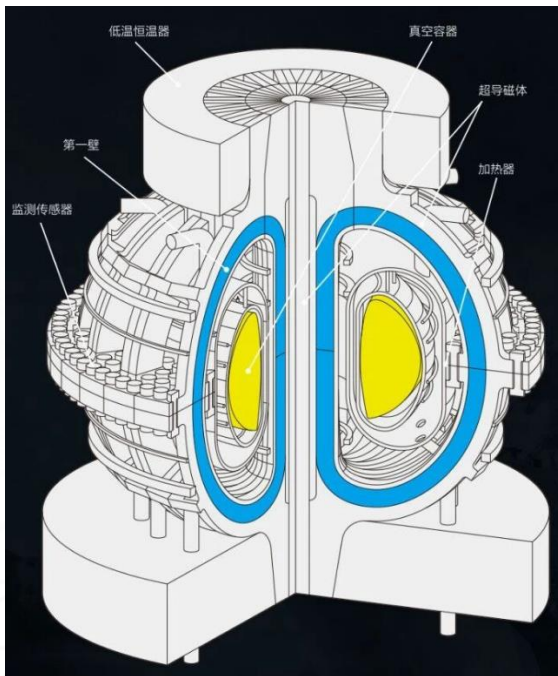


一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

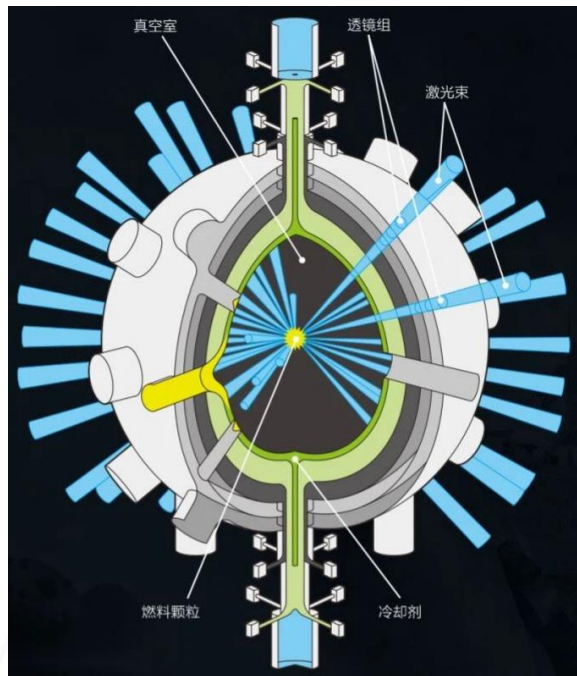
1.1 核聚变：人类终极能源，以托卡马克装置最成熟

- MCF：托卡马克装置，用强磁场约束并加热等离子体，自20世纪60年代，目前已经建造了200多台功能性的托卡马克装置；ICF：高能脉冲激光或离子束将小燃料颗粒压缩到极高密度，产生的冲击波加热还未消散的等离子体；MTF：磁场约束低密度等离子体，用激光对其加热并压缩；

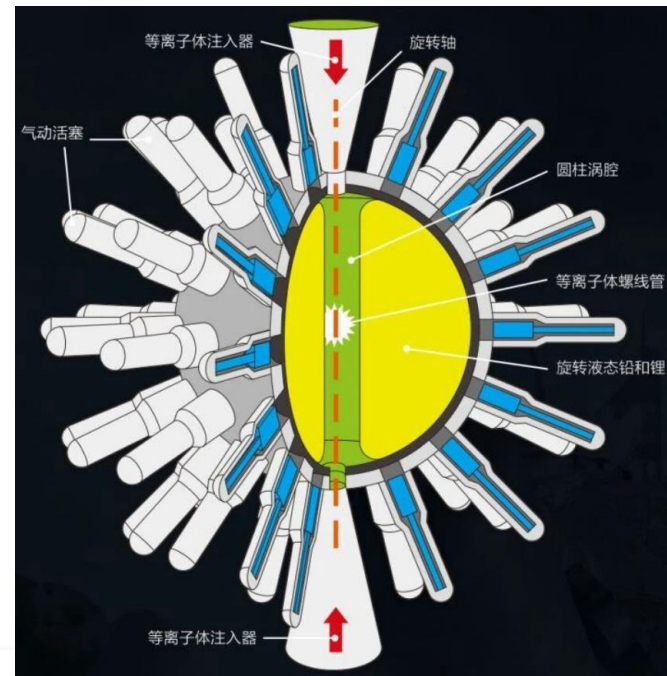
图表2：磁约束聚变(MCF)



图表3：惯性约束聚变(ICF)



图表4：磁化靶聚变(MTF)

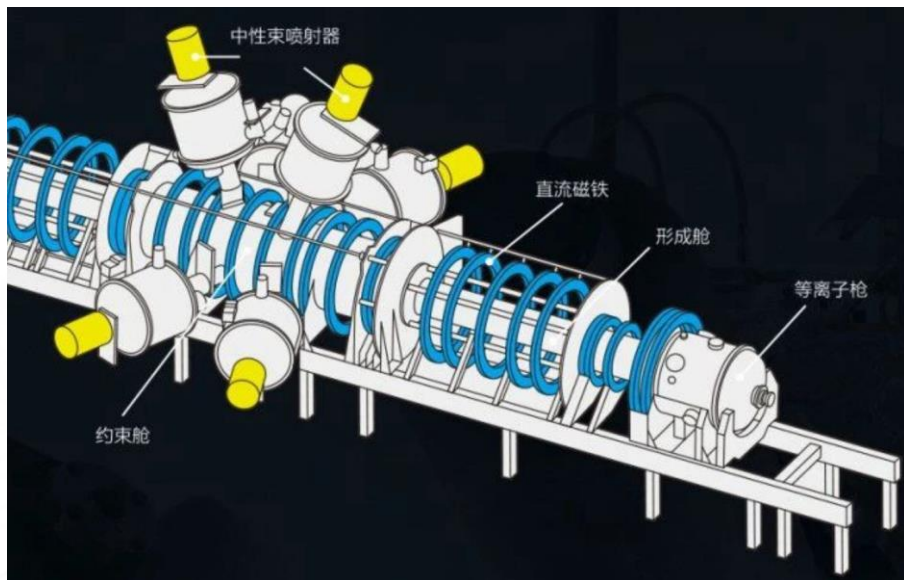


一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

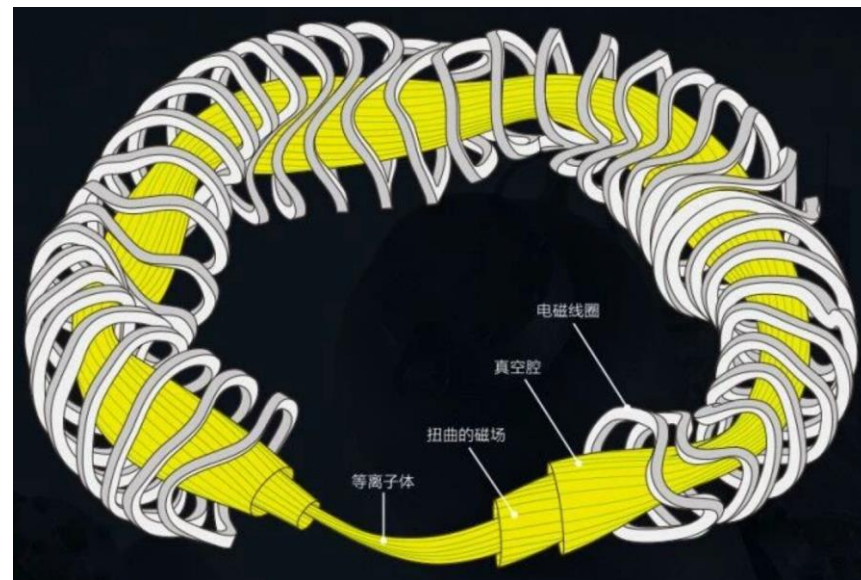
■ 1.1 核聚变：人类终极能源，以托卡马克装置最成熟

- FRC：在圆柱形等离子体内产生环形电流，用等离子体自身的磁场约束等离子体；Stellarator：螺旋带状结构产生高密度等离子体，较托卡马克装置等离子体更为稳定、对称，但几何形状使装置制造非常复杂，对环境条件非常敏感。

图表5：场反向配置(FRC)



图表6：仿星器 (Stellarator)

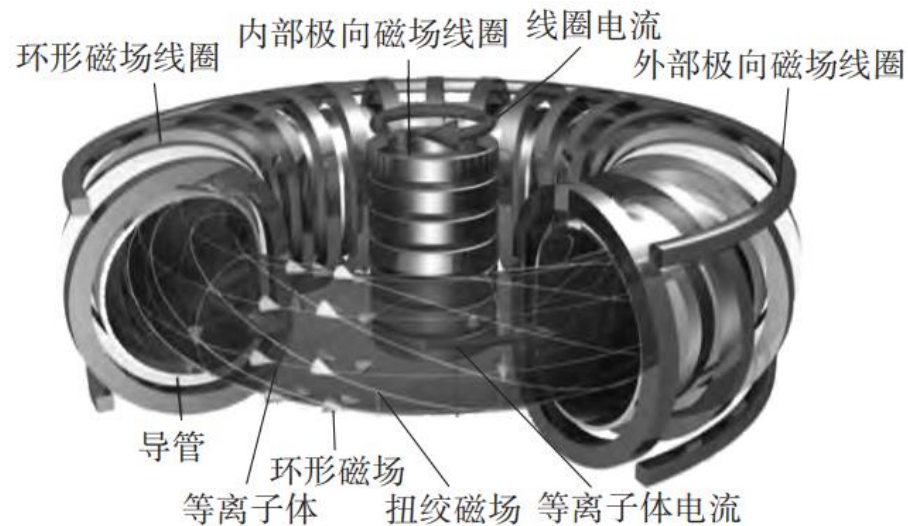


一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

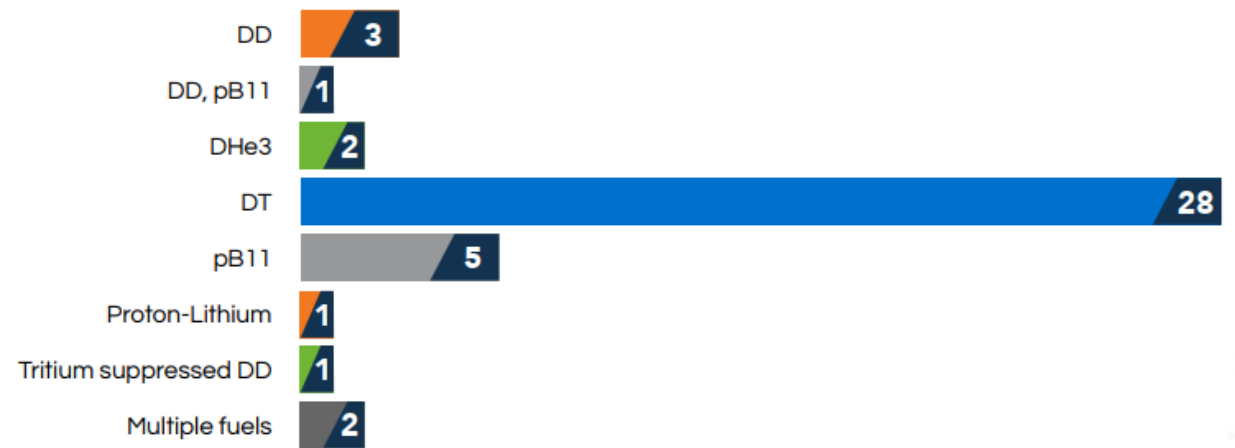
1.1 核聚变：人类终极能源，以托卡马克装置最成熟

- 磁约束核聚变（托卡马克，俄语中“轴向磁场环形室”的缩写）成为可控核聚变的主要途径。根据IAEA数据，截至2022年年底，全世界约有130个国有或私营实验性聚变装置，其中90个正在运行，12个在建，28个计划中。其中约76个托卡马克、13个仿星器、9个激光点火设施以及32个所谓新概念装置。
- 采用氘氚燃料是核聚变发电的主流。根据FIA，43个核聚变装置中，有28个采用DT燃料。

图表7：托卡马克结构



图表8：聚变燃料类型



资料来源：《可控核聚变——未来世界的炽热之心-王怀君等》，《The global fusion industry in 2023-FIA》，中邮证券研究所

一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

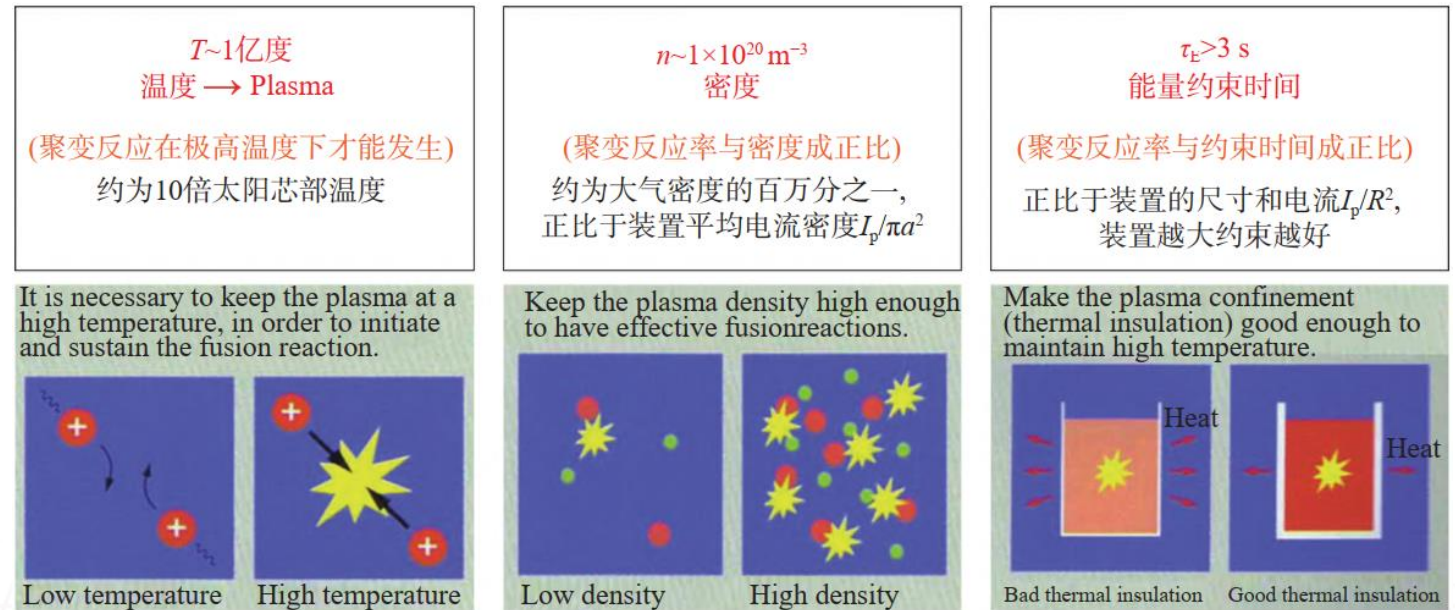
1.2 产生有效聚变功率输出有较高反应条件要求，目前面临三大技术挑战

- 实现核聚变反应，需要同时满足三个条件：足够高的温度、一定的密度和一定的能量约束时间，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 ($5 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$)，才能产生有效的聚变功率输出。

三大技术挑战：

- 燃烧等离子体物理问题；
- 抗中子辐照的材料问题；
- 燃料氙的自持问题。

图表9：核聚变反应三要素



资料来源：《超导磁体技术与磁约束核聚变-王腾》，中邮证券研究所

一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

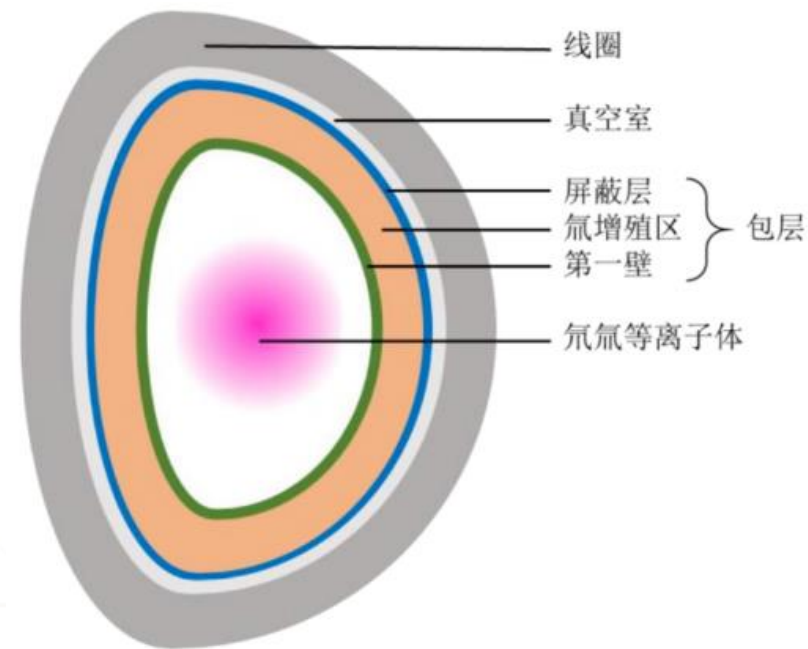
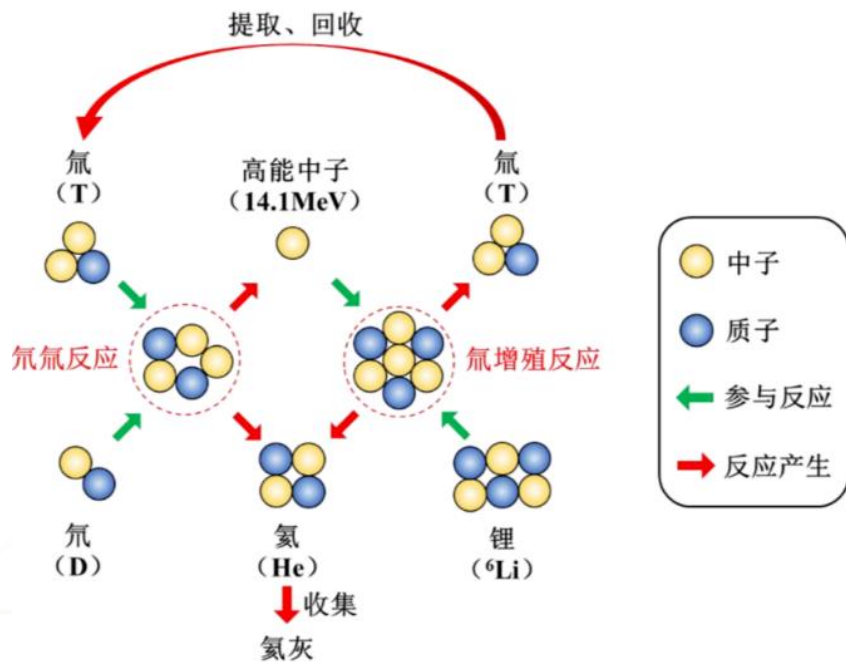
1.2 产生有效聚变功率输出有较高反应条件要求，目前面临三大技术挑战

- 氚的半衰期只有12.43年，因此在地球上并不存在天然氚。这使得保障氚的供应成为实现受控氘氚聚变反应所必须解决的重要挑战之一。1GW聚变电站每年需要消耗56kg氚，目前，氚只能从重水堆中获取，乐观估计重水堆每年产氚量大约3kg，难以维系聚变堆的运行需求。因此，聚变堆在投入首炉氚后，氚必须实现自持。

图表10：氚循环原理

图表11：聚变堆基本结构剖面

- 氚可以由中子与锂原子的相互作用产生。天然锂由两种稳定的同位素组成，Li-6和Li-7，后者更为丰富。



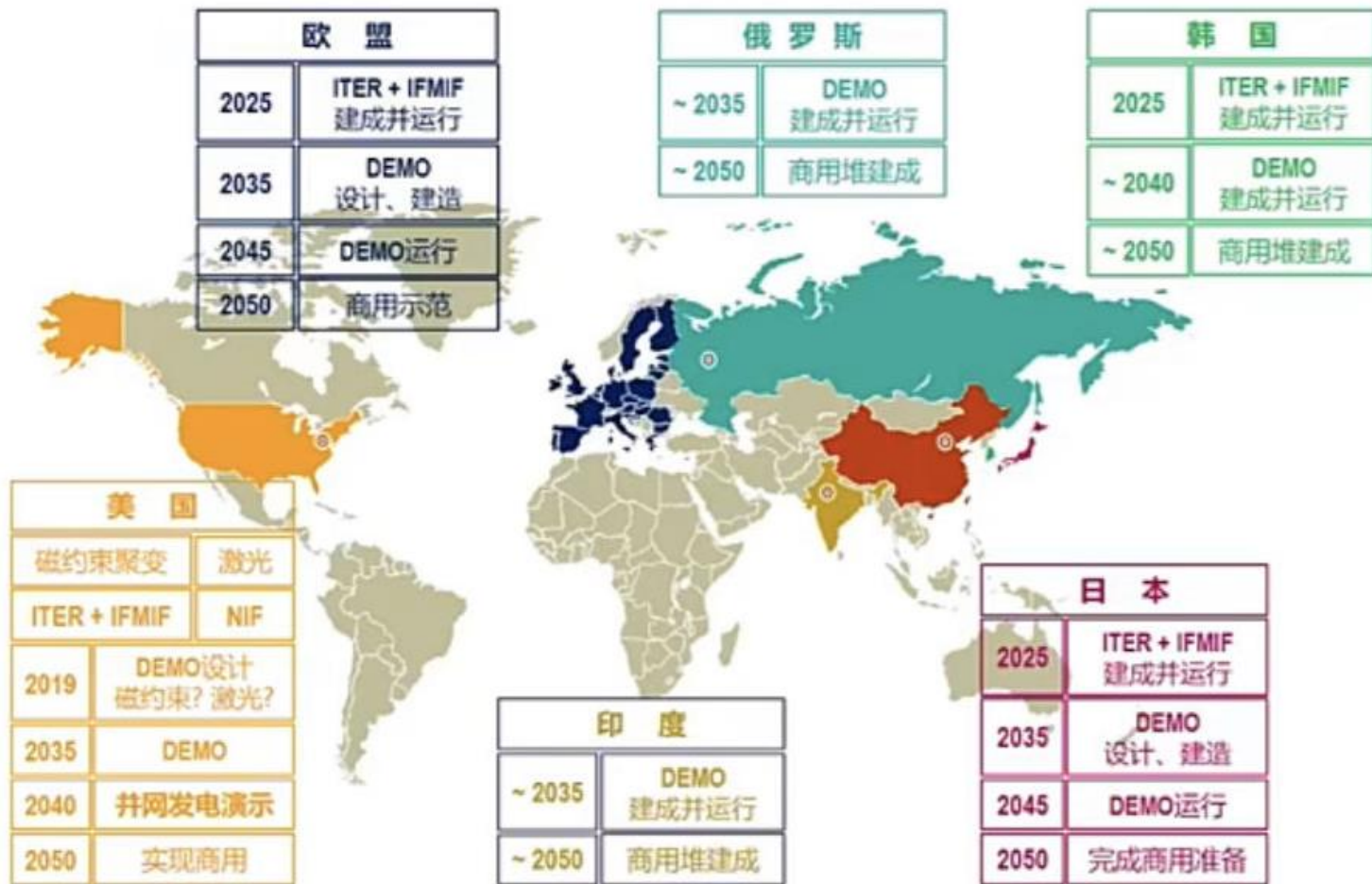
资料来源：激光评论《氘氚燃料可控核聚变的氚增殖-邹晓旭》，中邮证券研究所

一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

1.3 国际聚变能发展规划

- 国际核能大国分别给出了聚变能发展规划，在关键节点DEMO的设计、建造、运行上，美国、欧盟、俄罗斯、日本和印度等分别给出了2035年左右的时间规划。

图表12：国际聚变能发展路线图



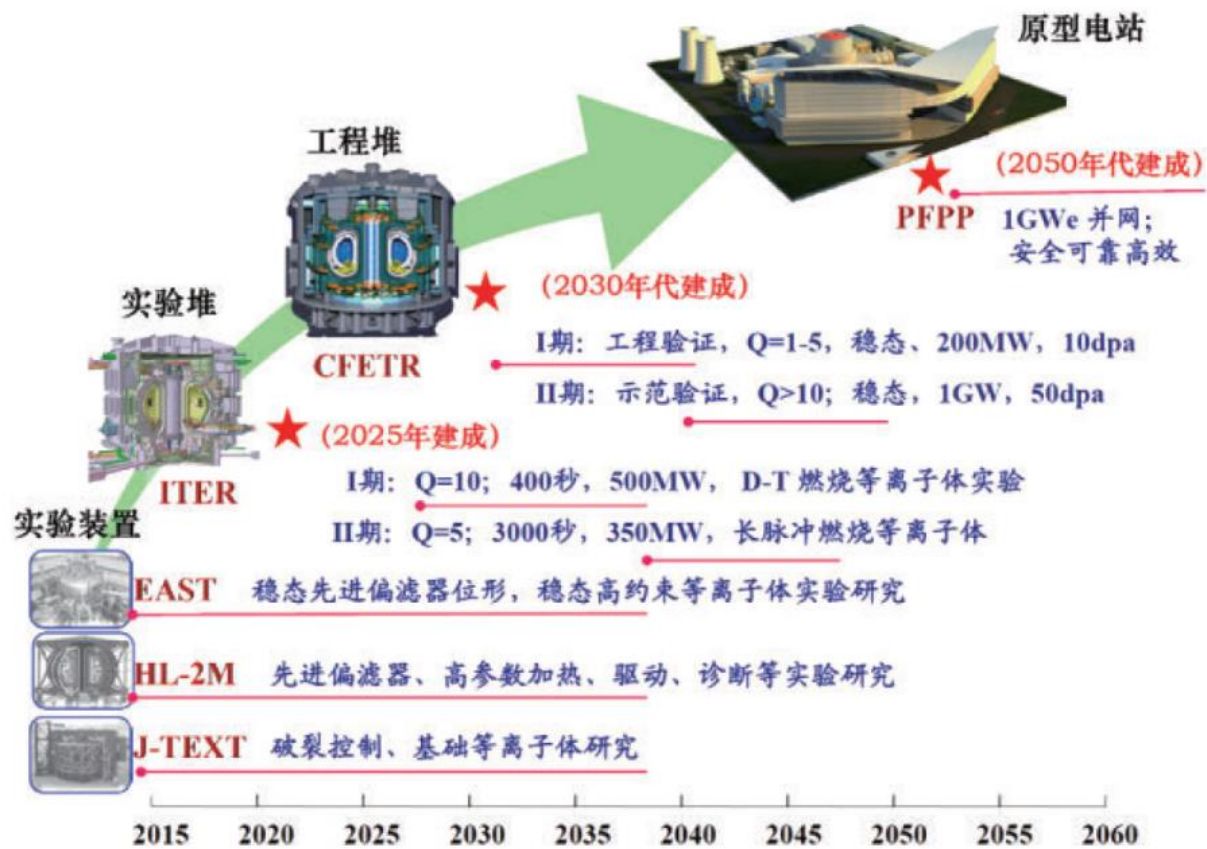
资料来源：《我国磁约束核聚变能研发战略与国际合作情况-钱小勇》中邮证券研究所

一、核聚变：解决人类能源问题的终极方案

1.3 国际聚变能发展规划

- 我国核能发展“热堆—快堆—聚变堆”三步走战略体系，聚变堆是核能发展的终极目标。
- 根据中国磁约束聚变能发展路线图规划，中国磁约束聚变能的开发将分为3个阶段：
 - 在2021年推动中国聚变工程试验堆（CFETR）立项并开始装置建设；
 - 到2035年建成中国聚变工程试验堆，调试运行并开展物理实验；
 - 到2050年开始建设商业聚变示范电站。

图表13：中国磁约束聚变能发展路线图



资料来源：《CFETR物理与工程研究进展-高翔等》，中邮证券研究所

二

发展现状：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

2.1 ITER：35个国家合作，将建成世界最大托卡马克装置

2.2 美国：NSTX-U在升级中，NIF实现能量净增益

2.3 欧洲：JET氘氘聚变实验产生能量输出59MJ等离子体

2.4 日本：JT-60SA成功点火

2.5 中国：西南物理研究院和等离子体物理研究所牵头，民企积极参与

二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

2 国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

- 托卡马克装置是核聚变主要装置类型，目前，世界上主要的托卡马克装置包括35个国家合作建造的ITER，日本和欧盟合作建造的JT-60SA，我国的EAST，美国的TFTR，欧洲的JET，韩国的KSTAR，法国WEST等。

图14：各聚变装置的参数

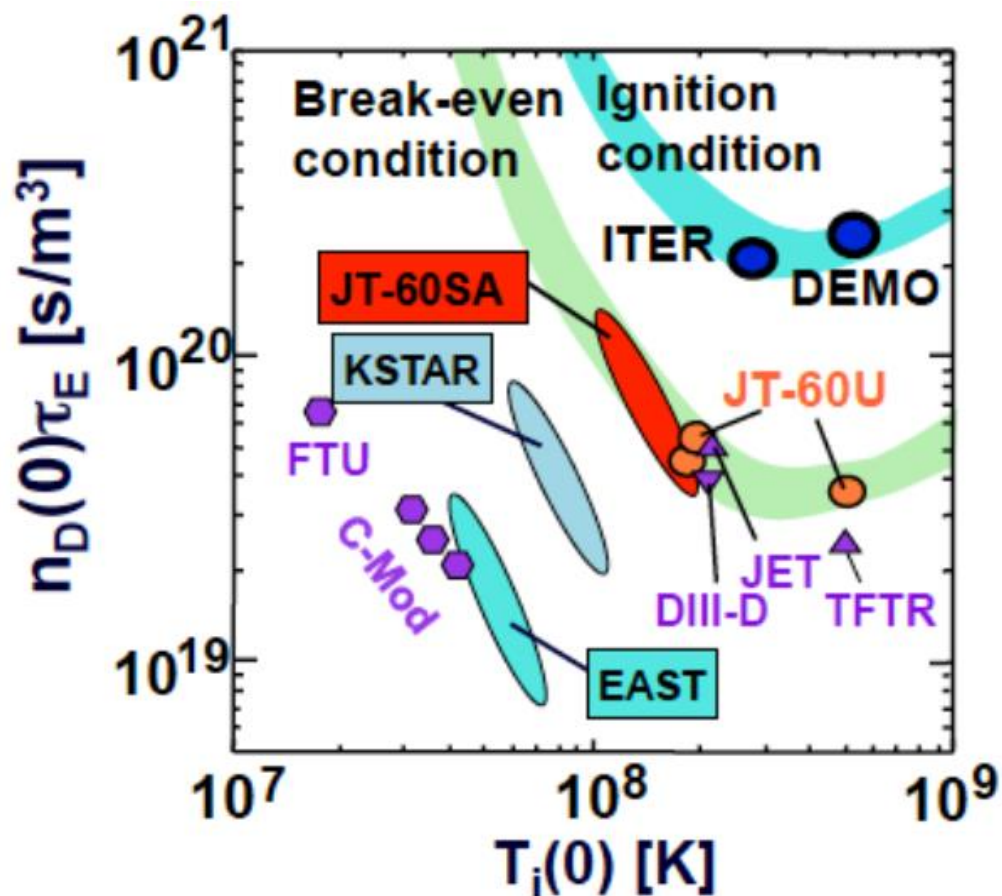
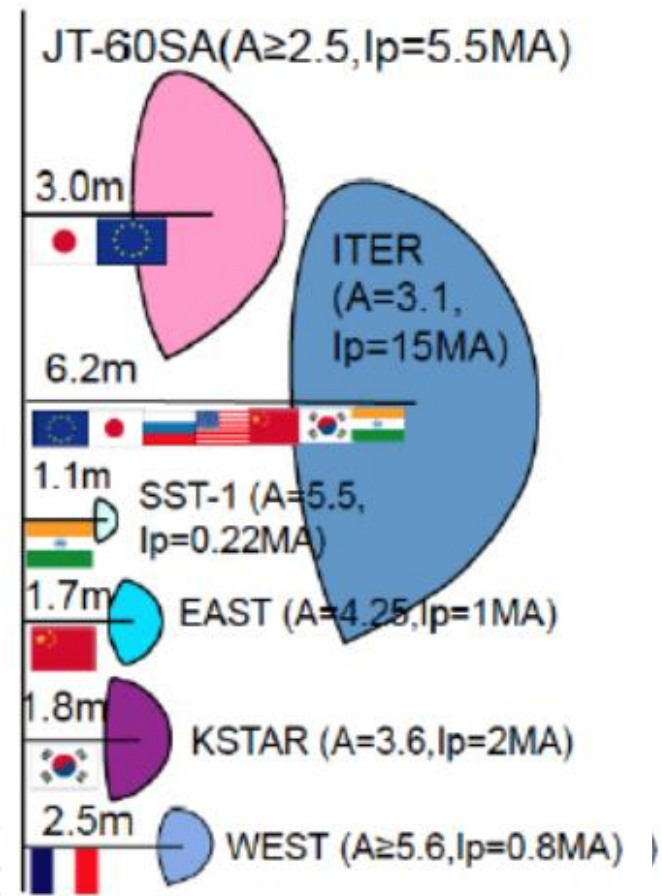


图15：各托卡马克装置等离子体截面



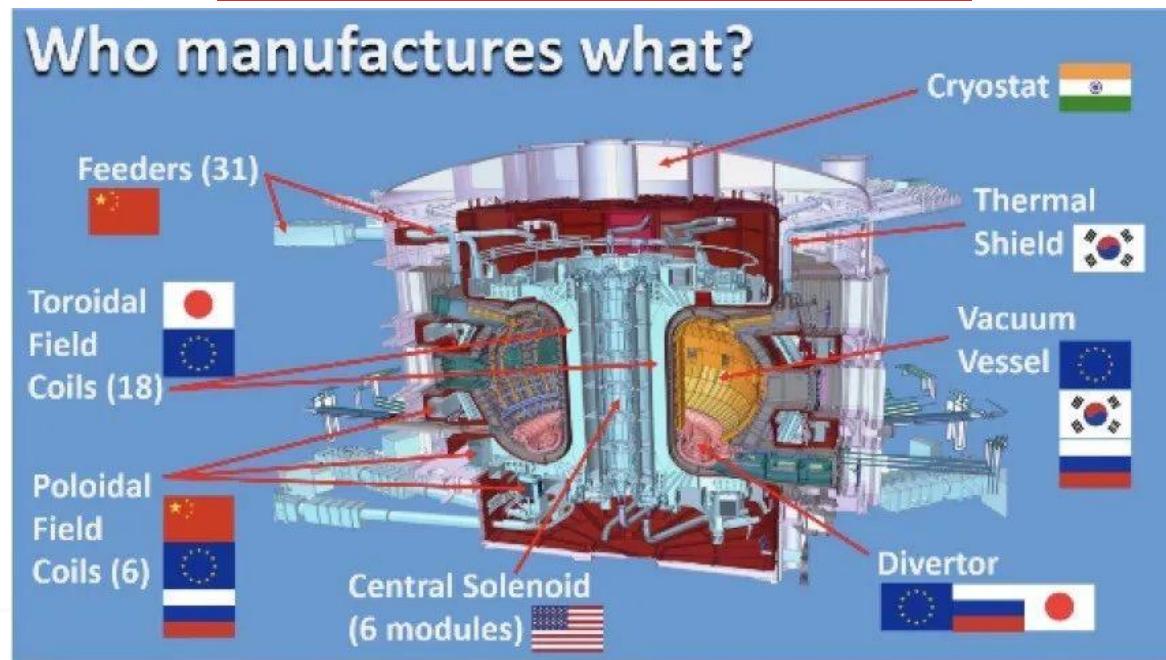
资料来源：JT-60SA《JT-60SA Research Plan》，中邮证券研究所

二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

■ 2.1 ITER：35个国家合作，将建成世界最大托卡马克装置

- 国际热核聚变实验反应堆（ITER）诞生于2006年，将建成全世界最大的托卡马克装置，整体重23000吨，环形空腔内的等离子体温度将达1.5亿℃，外部的超导磁体则需要接近-270℃（液氮温度）的极低温度运行。ITER项目的核电站将产生大约500MW热能，如果持续运行并接入电网，将转化为约200MW的电能。
- ITER项目35个合作国家中，欧盟（加上英国和瑞士）贡献45%，中国、印度、日本、俄罗斯、韩国和美国各贡献9%。ITER成员国的贡献约90%以实物形式提供，完成后的托卡马克将由100多万个部件组成。
- 欧盟估计，到2035年，仅欧盟在该项目中付出的成本就将达到181亿欧元（约合196亿美元）。据此推算，如果整个项目都在欧盟内进行，那么在此期间ITER的总成本将为410亿欧元。

图16：ITER 组件建造分工

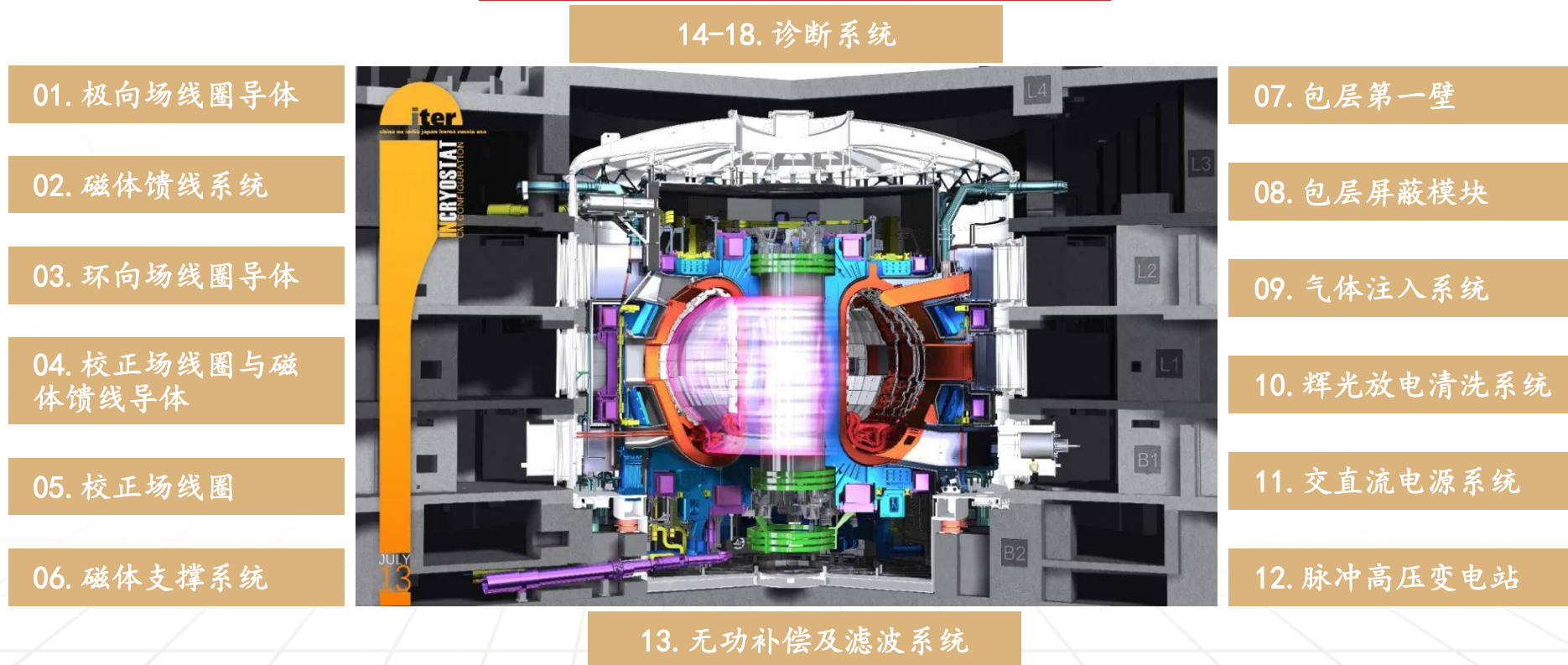


二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

■ 2.1 ITER：35个国家合作，将建成世界最大托卡马克装置

- 2006年，中国正式加入ITER项目，主要参与建造磁体馈线（feeders）和极向场线圈（PF coils）等18个部件研制制造任务。

图17：ITER的中国采购包



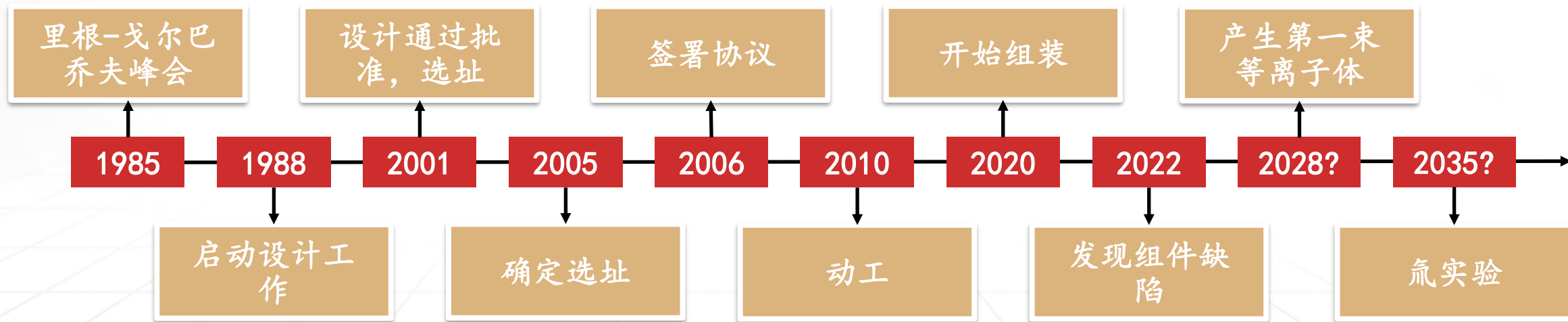
资料来源：《磁约束核聚变能研究进展、挑战与展望-刘永》，悦智网，中邮证券研究所

二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

■ 2.1 ITER：35个国家合作，将建成世界最大托卡马克装置

- 2020年7月28日，ITER在法国南部正式开始组装。ITER计划用4.5年完成安装，到2025年进行第一次等离子体放电，最终验证核聚变商业化应用的可行性。
- ITER项目面临工期推迟和成本超出。在2022年发现组件缺陷前，ITER项目已面临推迟和成本增加。2020年，项目负责人首次警告，2025年的启动日期无法实现。预计2024年底项目才能对推迟时长和额外成本做出估计。

图表18：ITER项目时间表

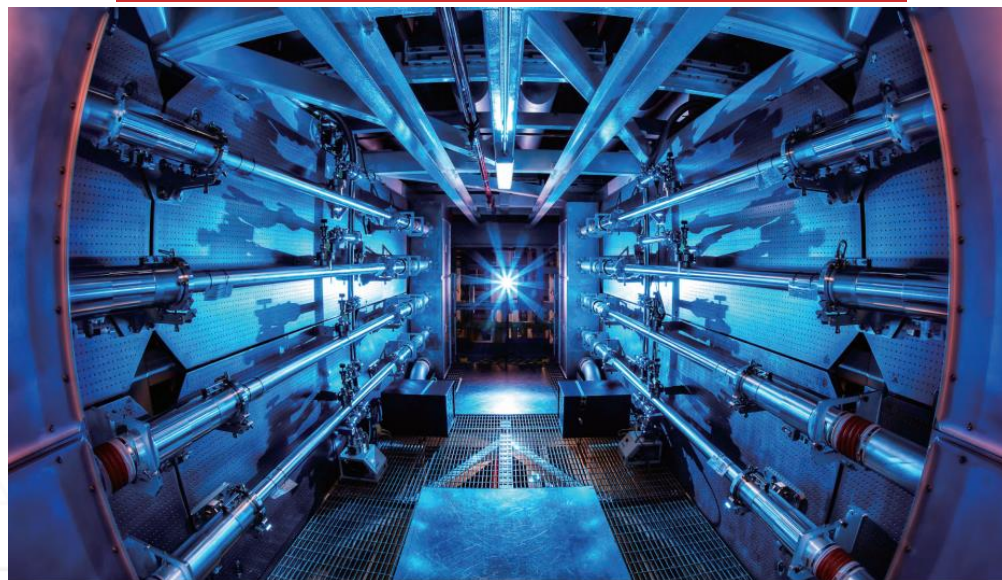


资料来源：《ITER项目依然在稳步推进-苦山》，中邮证券研究所

■ 2.2 美国：NSTX-U在升级中，NIF实现能量净增益

- TFTR：美国普林斯顿等离子体物理实验室（PPPL）在1982年至1997年运行TFTR反应堆，1993年，TFTR成为世界上第一个使用50/50氘氚混合物，并在1994年产生了10.7MW聚变功率。
- NSTX-U：NSTX于1999年首次投入使用，2012年到2015年，该设备耗费了9400万美元进行升级，使主磁场强度达到原来的两倍，并增加了注射中性原子的第二个端口，升级之后该装置命名为NSTX-U。
- NIF：美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火装置是目前世界上最大和最复杂的惯性约束聚变研究装置。耗资35亿美元的NIF旨在通过间接驱动惯性约束聚变来研究核武器中的基本物理过程，同时也肩负着推进惯性约束聚变能源研究的任务。2022年12月，NIF实现了人类历史上第一次核聚变净能量增益。（利用脉冲激光向实验氘氚靶丸输入了2.05兆焦耳的能量，产生了3.15兆焦耳的聚变能量，能量增益达到1.5倍）

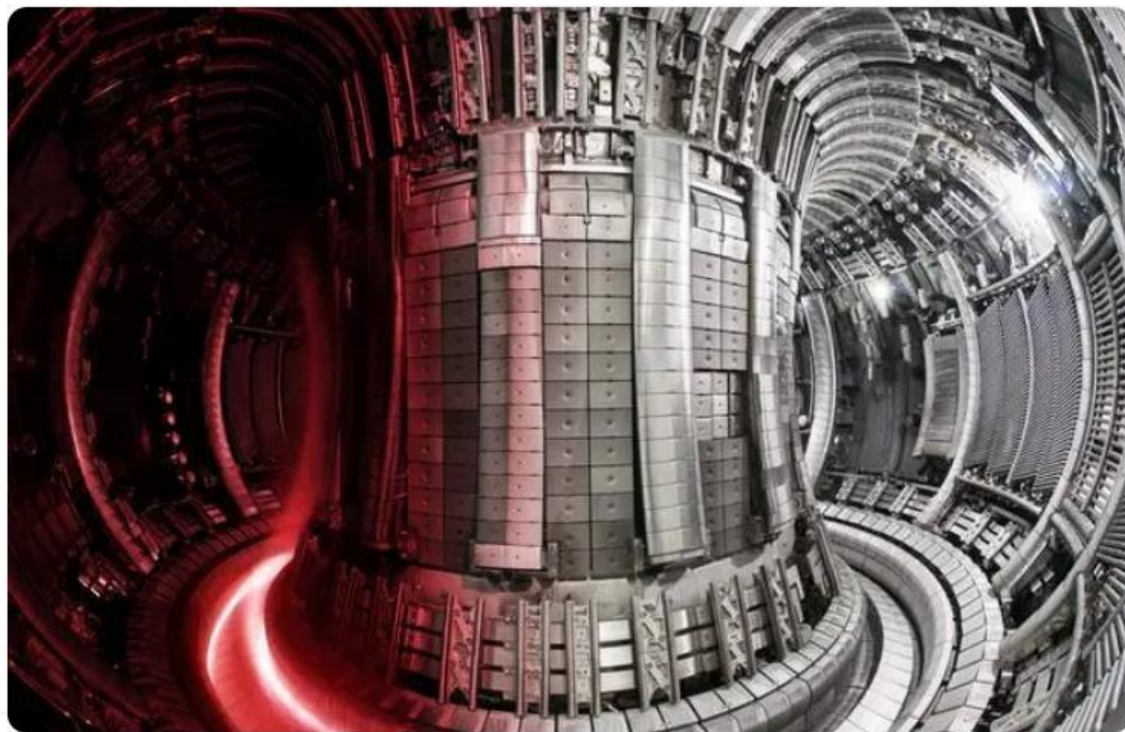
图表19：NIF的激光传输系统



■ 2.3 欧洲：JET氘氘聚变实验产生能量输出59MJ等离子体

- JET（欧洲联合环状反应堆）从1983年开始运行，是在日本JT-60SA前规模最大的托卡马克装置。JET位于卡勒姆聚变能源中心，其科学业务由欧洲聚变能源发展联合会负责运营。
- 1997年，JET产生约22兆焦耳聚变能量的等离子体，创造了当时的世界能源纪录。
- 2022年2月，JET产生了能量输出为59兆焦耳的稳定等离子体。这是自1997年以来，世界首次进行的氘氘核聚变实验。
（JET在5秒内实现了平均超过11兆瓦的功率输出）

图20：JET内部



二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

■ 2.4 日本：JT-60SA成功点火

- JT-60SA，由日本和欧洲提供资金，利用日本Torus-60升级实验(JT-60U)的大部分现有站点基础设施开发，大多数主要部件都经过了重新设计和制造。JT-60SA于2020年竣工，中央装置高约16米，直径约13米，是世界第二大等离子体研究设施，仅次于正在建设的ITER。JT-60SA开展的工作将为ITER提供支持。
- 据中国科学报2023年11月2日报道，世界上最新、规模最大的核聚变反应堆——JT-60SA成功点火。预计在两年内达到满功率，即将等离子体加热到2亿度，约束时间100秒。

图21：JT-60SA将为ITER和DEMO奠定基础



二、国际重要核聚变装置：ITER项目稳步推进，各国装置取得快速进步

■ 2.5 中国：西南物理研究院和等离子体物理研究所牵头，民企积极参与

图22：国内核聚变实验装置

单位	聚变试验堆简介
西南物理研究院	HL-2M：HL-2A的改造升级装置，用于研究高比压、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。
中科院等离子体物理研究所	EAST：先进实验超导托卡马克，是我国自行设计研制的国际首个全超导托卡马克装置，针对近堆芯等离子体稳态先进运行模式的科学和工程问题，将能产生 ≥ 100 万安培的等离子体电流；持续时间将达到1000秒，在高功率加热下温度将超过一亿度。 CRAFT：聚变堆主机关键系统综合研究设施，是国际聚变领域参数最高、功能最完备的综合性研究平台，2019年开建。 CFETR：中国聚变工程试验堆，填补ITER和DEMO之间的空白，主要目标包括：实现200-1500MW聚变功率输出；实现稳态或长脉冲等离子体运行，运行因子达到0.3-0.5；实现氦燃料自持，氦增殖比（TBR）大于1.0。
新奥集团	玄龙-50：2019年8月，新奥集团自主设计建成的中国首座中等规模球形托卡马克聚变实验装置——新奥“玄龙-50”，在河北廊坊建成，并实现第一次等离子体放电。
能量奇点	洪荒70：全高温超导托卡马克装置，计划于2023年底建成运行，将成为全球首台建成运行的全高温超导托卡马克装置。
星环聚能	SUNIST-2：球形托卡马克，验证重复重联原理和1T磁场球形托卡马克的约束性能。2023年6月建成，并获得第一等离子体。 CTRFR-1：等离子体参数接近聚变堆要求的中型高温超导球形托卡马克，星环聚能正在完成CTRFR-1的设计。

资料来源：西南物理研究院官网，中科院等离子体物理研究所官网，中科院官网，新奥集团官方微信公众号，能量奇点官网，星环聚能官网，《CFETR氦自持分析评估与验证策略_冉光明等》，中邮证券研究所



聚变-裂变混合堆：千年能源方案，实验堆即将建设

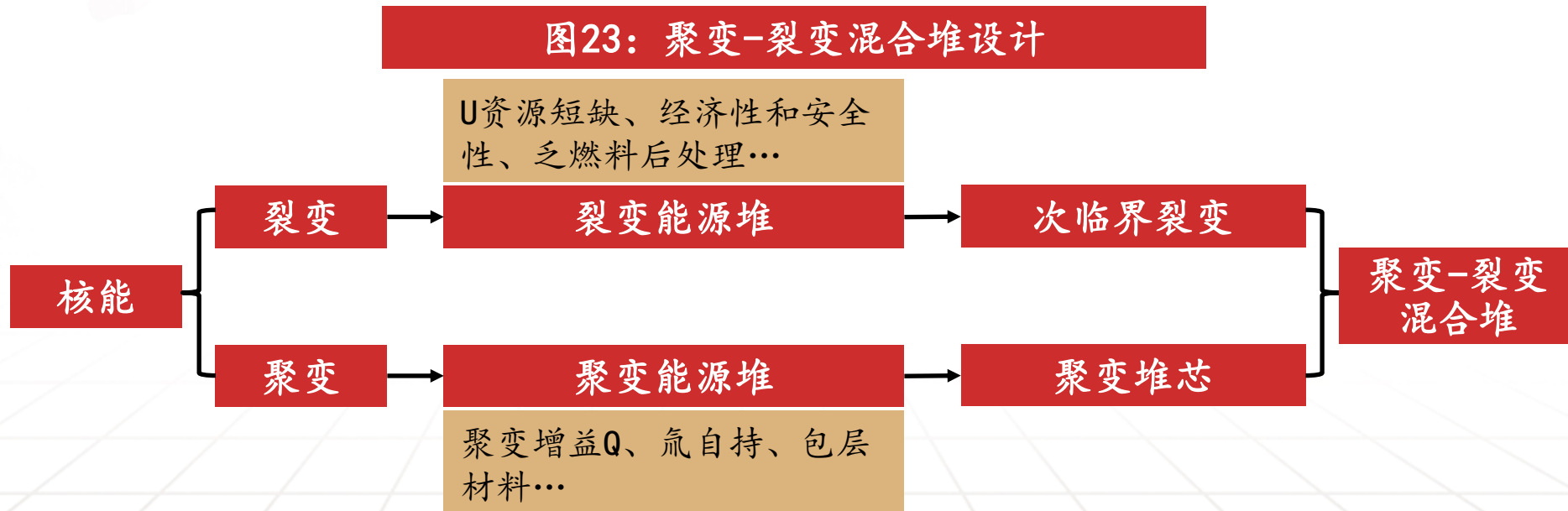
3.1 铀资源有限推动混合堆发展，安全性和高放核废料处理优势显著

3.2 我国混合堆研究以三大院所为主，实验堆即将进入建设

■ 3.1 铀资源有限推动混合堆发展，安全性和高放核废料处理优势显著

- **核资源：**U-235资源有限，快堆燃料增殖能力有限，难以满足迅速增长的核能需求，需要依赖混合堆高效燃料转换效率来解决；
- **核安全：**包层为 k_{eff} 小于1的次临界系统；
- **高放核废料处理：**核电站乏燃料具有放射性强、毒性大、寿命长等问题，混合堆中子通量密度高、能谱硬，是处理锕系核裂变产物的理想装置。

图23：聚变-裂变混合堆设计



资料来源：《中物院Z箍缩驱动聚变裂变混合堆研发进展-谢卫平》，中邮证券研究所

三、聚变-裂变混合堆：千年能源方案，实验堆即将建设

3.1 铀资源有限推动混合堆发展，安全性和高放核废料处理优势显著

- 聚变-裂变混合堆=热核聚变中子源+次临界裂变堆。
- 聚变-裂变混合堆基本原理：利用氘氘聚变中子与Li反应生产氚以满足内部聚变反应所需，剩余中子将可转换材料（U-238和Th-232）转变为可裂变材料Pu-239和U-233，直接裂变产生能量。

图24：混合堆原理示意图

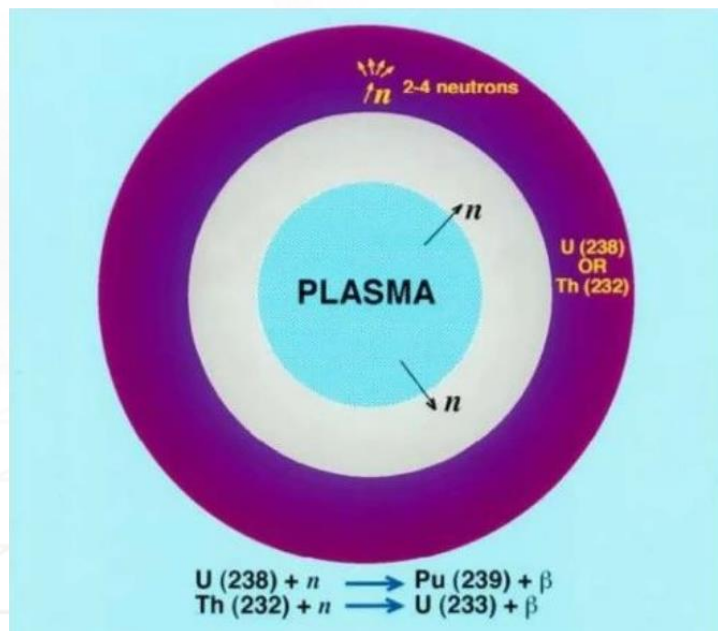


图25：混合堆的类型

堆型	工作方式	特点
抑制裂变型混合堆	在包层中放入大量的铍等慢化材料，使聚变产生的高能快中子很快慢化为热中子。热中子难以使U-238、Th-232裂变，主要使它们变成Pu-239、U-233，并通过频繁后处理提取	不能有效生产核燃料，后处理增加成本。但裂变包层中裂变几率少，简化包层内裂变热的导出问题。
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Pu-239或U-233核燃料。同时，U-238、Pu-239或U-233的大量裂变在裂变包层产生大量裂变热	快裂变型混合堆可以有效地生产核燃料

资料来源：《聚变——裂变混合堆在未来核能系统中作用和发展前景-张国书》，中国科普博览，中邮证券研究所

三、聚变-裂变混合堆：千年能源方案，实验堆即将建设

■ 3.1 铀资源有限推动混合堆发展，安全性和高放核废料处理优势显著

- **混合堆优势1：**大幅降低堆芯等离子体性能及第一壁材料要求；
- **混合堆优势2：**U资源利用率高，相比快堆，不需要U-235或Pu-239的初始装量，燃料增殖能力强；
支持比N：一个混合堆生产的核燃料能支持同等功率裂变堆的数量

图表26：混合堆的类型

堆型	等离子体能量增益因子 Q	中子壁负载 Wn (MW/m ²)
纯聚变堆	15-25	3-5
抑制裂变混合堆	10-15	2-3
快裂变燃料生产堆	5	1-1.5
快裂变能量生产堆	3	1

图表27：混合堆和快堆支持比对比

堆型	支持比N
氧化物快堆	0.25-0.7
碳化物快堆	≤1
金属铀快堆	≤1.25
U/Pu快裂变混合堆	4-6
Th/U快裂变混合堆	8-12
Th/U抑制裂变混合堆	12-25

资料来源：《聚变——裂变混合堆在未来核能系统中作用和发展前景-张国书》，中邮证券研究所

■ 3.1 铀资源有限推动混合堆发展，安全性和高放核废料处理优势显著

- **混合堆优势3：**核废料嬗变，核聚变反应产生的中子可以将长期具有放射性的核反应废物超铀元素分解成寿命较短的元素；
- **混合堆优势4：**建造成本优势，100万千瓦的核电机组，纯聚变堆建堆成本大于100亿美元，快堆为50-60亿美元，热堆为20亿美元左右，而Z箍缩驱动的混合堆在30亿美元左右。

图表28：混合堆对LWR乏燃料的嬗变能力

一、1GWe的LWR，每年裂变消耗：1000kg铀金属，

产生：31吨乏燃料，其中含：300kg Pu
+30kg次锕系核素 (Np, Am, Cm)
+670kg的裂变产物

二、1GWe的嬗变混合堆，每年裂变消耗：1000kg核废料，

(1) 如果Pu和锕系核素不分离后处理，则

31个嬗变混合堆焚烧处理：1个LWRs的核废料

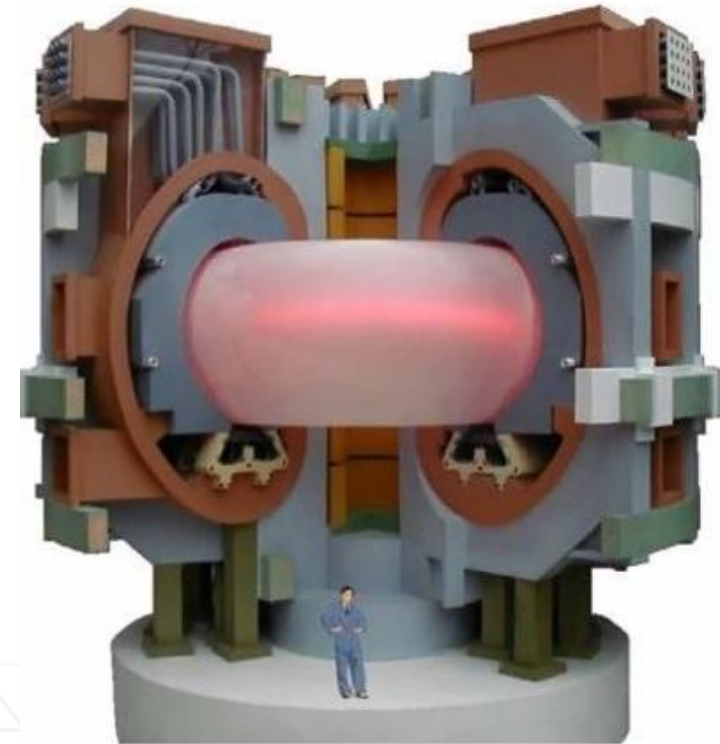
(2) 如果Pu和锕系核素分离后处理，则

1个嬗变混合堆焚烧处理：3个LWRs的锕系废料 (Pu+次锕系核素)
或焚烧处理：33个LWRs的次锕系废料

■ 3.2 我国混合堆研究以三大院所为主，实验堆即将进入建设

- 1983年，中国提出了中国核能发展“三步走”，即“压水堆-快堆-聚变堆”以及“坚持核燃料闭式循环”方针。聚变堆包含聚变-裂变混合堆、聚变驱动嬗变堆及纯聚变堆。
- 西南物理研究院：在国家“863”计划支持下，我院自“七五”期间开展了聚变-裂变混合堆研究，先后完成了试验混合堆、商用混合堆的概念设计以及试验混合堆的联合设计；“九五”期间完成了实验混合堆工程概要设计，开展了包层和偏滤器方面的设计研究，建立了工程材料数据库；在用聚变中子处理长寿命放射性核废料的新堆型设计方面，也取得了重要成果。
- 聚变-裂变混合实验堆即将建设：联创超导和中核聚变（成都）设计研究院有限公司签订协议，采用全新技术路线，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，工程总投资预计超过200亿元。

图表29：聚变-裂变混合堆结构模型



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/707165006146006044>