

Z 箍缩聚变裂变混合堆简介

彭先觉^{1,2} 周良骥³ 黄洪文⁴ 师学明¹

1(北京应用物理与计算数学研究所 计算物理全国重点实验室 北京 100088)

2(天府创新能源研究院 成都 610213)

3(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

4(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 Z 箍缩聚变裂变混合堆是我国先进核能领域的一项颠覆性技术,有望率先实现聚变工程能量增益,引领先进核能开发。本文分析了核能发展态势,包括先进裂变堆发展现状和聚变能源开发面临的技术和经济挑战,指出发展潜力最大的一体化钠冷快堆和 Z 箍缩聚变裂变混合堆。概述了 Z 箍缩聚变基本原理、实现条件、技术特点以及中国工程物理研究院在 Z 箍缩驱动器、聚变物理方面的研究进展与成果。比较了 Z 箍缩聚变裂变混合堆与传统混合堆的区别,重点介绍了其设计特点、研究成果、先进性和发展规划。

关键词 Z 箍缩, 聚变裂变混合堆, 先进核能, 聚变工程能量增益

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250100

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250100

Introduction to Z-pinch fusion fission hybrid energy

PENG Xianjue^{1,2} ZHOU Liangji³ HUANG Hongwen⁴ SHI Xueming¹

1(National Key Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

2(Tianfu Innovation Energy Establishment, Chengdu 610213, China)

3(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

4(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract Z-pinch fusion fission hybrid reactor (Z-FFR) is a disruptive technology in China's advanced nuclear energy field, which is expected to be the first to achieve fusion energy break-even in the engineering sense and lead the development of advanced nuclear energy. The development situation of nuclear energy is firstly analyzed in this paper, including the current development status of advanced fission reactors and the technical and economic challenges of fusion energy development, and it is pointed out that integrated sodium-cooled fast reactor and Z-FFR have the greatest potential for development. Then, an overview of the basic principles, realization conditions, technical characteristics of Z-pinch fusion, and the research results of Chinese Academy of Engineering Physics in Z-pinch driver and fusion physics is provided in details. Finally, the differences between Z-FFR and traditional hybrid reactors are compared with emphasis on the Z-FFR design features, research results, advancements, and future development prospective.

国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2022YFE03160001)、中国工程院咨询项目“推动能源强国建设战略研究”(No.2022-PP-03)资助

第一作者: 彭先觉, 男, 1941 年出生, 1964 年毕业于哈尔滨军事工程学院, 中国工程院院士, 研究领域为核物理及先进核能

通信作者: 师学明, E-mail: sxm_shi@iapcm.ac.cn

收稿日期: 2025-03-07, 修回日期: 2025-04-22

Supported by National MCF Energy R&D Program (No.2022YFE03160001), Chinese Academy of Engineering Project "Strategic Research on Strengthening the Energy Sector of China" (No.2022-PP-03)

First author: PENG Xianjue, male, born in 1941, graduated from Harbin Institute of Military Engineering in 1964, an academican of Chinese Academy of Engineering member, focusing on nuclear physics and advanced nuclear energy

Corresponding author: SHI Xueming, E-mail: sxm_shi@iapcm.ac.cn

Received date: 2025-03-07, revised date: 2025-04-22

Key words Z-pinch, Fusion fission hybrid reactor, Advanced nuclear energy, Fusion energy break-even in the engineering sense

我国能源转型面临着非常艰巨的任务。根据国家能源局发布的全国电力工业统计数据^[1],截至2024年12月底,全国累计发电装机容量约 33.5×10^8 kW。能够调度并保障稳定出力的火电、核电装机容量分别为 14.4×10^8 kW、 0.6×10^8 kW,二者之和与2024年全国统调最高用电负荷相当(约 14.5×10^8 kW),这是保障电力安全的根基。核电装机占比仅1.8%,但其发电效率最高,发电量占比达4.7%。可再生能源中,水电、风电、光电装机容量分别为 4.3×10^8 kW、 5.2×10^8 kW、 8.9×10^8 kW。风电和光电装机容量增长迅猛,其总和已经和火电相当,但其发电能力弱,发电占比分别约10.5%和8.8%。风电和光电具有很强的波动性和间歇性,当前主要靠增加灵活性火电和少量抽水蓄能调峰来支撑其运行。在2030年碳达峰之前,随着风光装机大规模增长,火电、核电装机都要相应增加,同时要继续牺牲火电的发电时长来保障风光消纳。2030年后,火电装机要逐步减少,最后维持在一个合理水平上;核电装机则需要大幅增加。为应对未来高比例可再生能源带来的挑战,亟须开发长时(天、周,甚至更长时间)储能,煤炭的清洁利用(含碳捕获和封存)以及先进核能等技术。本文结合研究团队在Z箍缩聚变裂变混合能源领域以及在工程院咨询课题“能源强国目标下核能发展战略研究”的研究成果,对核能发展态势、Z箍缩聚变裂变混合堆(Z-Pinch Fusion Fission Hybrid Reactor, Z-FFR)基本情况及发展规划做一综合介绍,希望通过同行之间的交流、碰撞,推动我国先进核能在2040年形成新质生产力,为能源转型注入更多的确定性,为能源安全和“双碳”目标实现作出更大贡献。

1 核能发展态势

核能具有安全、清洁、低碳、稳定和能量密度极高的优点,是大型电网理想的基荷能源。与其他能源形式相比,核能占用地球资源最少,也是全产业链、全生命周期碳排放和污染物排放最小的发电技术之一。在第28届联合国气候大会上,美国联合22个国家发表《三倍核能宣言》^[2],呼吁到2050年核电规模超过 11×10^8 kW。2024年7月,美国通过《加快部署先进核能法案》^[3],希望重塑在核能领域的领导地位。核能发展前景广阔、潜力巨大,已经成为大国竞争的一个关键领域,将深刻改变未来能源发展格局。

1.1 自主三代先进压水堆进入批量推广阶段

我国自主三代先进压水堆技术成熟、工业体系完善,是2035年前核电发展的绝对主力堆型,届时核电装机有望达到 1.6×10^8 kW,发电量占比达到10%左右,和全球平均水平相当。从长远来看,核能要发展为高比例基荷能源,还面临铀资源利用率偏低、供应趋紧,沿海厂址不足、乏燃料后处理及高放废物处置困难等挑战。2023年,世界查明可开采铀资源为792万吨^[4],预计我国能获取铀资源不超过总量的1/3;结合我国沿海核电厂址资源有限,只能支持约 2×10^8 kW装机规模,估计我国热堆装机最大规模为 $(2\sim 3)\times 10^8$ kW。

为进一步做大、做强核能产业,开发固有安全(可抵近城市建造)、经济灵活(经济性与自主先进三代水堆相当、功率大幅可调)、资源持久(铀、钍资源利用率高)、环境友好(放射性废物产量小)为主要特征的先进核能系统势在必行。

1.2 第四代反应堆研发全面展开,技术有待收敛

第四代反应堆计划提出20余年来,全球先进裂变堆研发取得较大进展,但总体发展不如预期。表1给出了四代堆6种堆型以及加速器驱动次临界系统(Accelerator Driven Subcritical system, ADS)的应用场景和大致技术发展阶段。除气冷快堆外,其他堆型我国都有研究。高温气冷堆示范工程建成,下一步将拓展更高温度工业应用。钠冷快堆示范工程1号机组建成,正在开发增殖能力更强的先进一体化闭式燃料循环快堆(简称一体化快堆)。熔盐堆等其他堆型处于关键技术攻关阶段。

俄罗斯BN800钠冷快堆2016年投运,大致相当于三代半的水平,该堆2022年实现全球首次全堆芯装填铀钚混合氧化物(Mixed Oxide Fuel, MOX)燃料^[5]。TerraPower的钠冷快堆正在接受美国核管理委员会的施工许可审查^[6]。俄罗斯Brest-300铅冷快堆已于2021年开工,预计2028年建成^[7]。总的来说,满足四代堆标准的先进反应堆,尤其是闭式燃料循环快堆有望于21世纪30年代投入市场。需要指出的是,出于防扩散和经济性的考虑,国际上对于发展高增殖比快堆还是嬗变高放废物快堆一直有争议。总的来说,四代堆几种堆型处于不同的发展阶段,今后将通过横向对比和工程实践逐渐收敛,最终形成有市场竞争力的产品。

表1 先进裂变堆发展现状
Table 1 Status of advanced fission reactors

堆型 Reactor type	主要应用场景 Main application scenarios	技术发展阶段 Technology development stage
钠冷快堆 Sodium cooled fast reactor	闭式燃料循环 Closed the fuel cycle	俄罗斯商业示范堆 BN800 建成, 中国示范快堆 1 号机组建成 Russian BN800 and Chinese demonstration fast reactor Unit 1 are in operation
铅冷快堆 Lead cooled fast reactor	闭式燃料循环/小型化多用途 Closed fuel cycle/multipurpose SMR	俄罗斯 Brest-300 于 2021 年开工, 关键工艺技术研究 Russia Brest-300 begins construction in 2021, research on key process technologies underway
气冷快堆 Gas cooled fast reactor	闭式燃料循环 Closed the fuel cycle	目前有关关键技术难以克服 Facing key technology obstacles to overcome
超临界水堆 Supercritical water reactors	在压水堆的基础上提高经济性 与安全性 Improvement of the economy and safety based on pressurized water reactors	关键技术和可行性研究 Key technology research and feasibility studies
超高温气冷堆 Ultrahigh temperature gas-cooled reactor	核能的高温利用 High temperature utilization	高温气冷堆示范工程建成 China 20 MW HTGR demonstration project in operation
熔盐堆 Molten salt reactor	熔盐堆 Thorium resource utilization	2 MW 液态燃料钍基熔盐堆建成, 关键工艺技术研究 China 2 MW liquid fuel thorium-based molten salt reactor in operation, research on key process technologies underway
加速器驱动次临界系统 Accelerator Driven Subcritical system (ADS)	嬗变 Transmutation	关键工艺技术研究 Research on key process technologies underway

1.3 聚变技术正在从原理验证向工程实践迈进

1952 年, 美国首次氢弹原理试验成功, 标志着人类在地球上首次实现规模化的聚变放能。此后, 各国开始积极探索在实验室条件下实现可控热核聚变。聚变能源开发需要经历科学可行性、工程可行性、商业可行性三个阶段。经过 70 余年探索, 聚变的科学可行性得到了有力证明, 目前正处于从原理验证到工程实践的转折。

磁约束聚变方面, 20 世纪末, 在日本大型托卡马克装置 JT60 上开展氘氘实验, 等效为氘氘反应后, 聚变放能和输入能量相等^[8], 即实现了所谓的科学意义上能量“得失相当”条件($Q_{\text{Sci}}=1$), 这可以被视作迈过了聚变科学可行性的门槛。2023 年底, 欧洲大型托卡马克装置欧洲联合环 (Joint European Torus, JET) 退役前的最后一次实验使用 0.2 mg 氘燃料在约 5 s 的时间里, 通过核聚变反应持续产生了 69 MJ 的能量, $Q_{\text{Sci}} \sim 0.6$, 创造了实验室聚变放能和能量增益的最高纪录^[9]。尽管托卡马克装置在物理研究上取得了重要进展, 但 $Q_{\text{Sci}}=1$ 的条件迄今仍未得到直接证明。

惯性约束聚变方面, 2022 年底, 美国国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 利用 2.05 MJ 的激光能量实现 3.15 MJ 的氘氘聚变放能, 聚变增益 (G) (等价于磁约束聚变领域使用的科学聚变增益

因子 Q_{Sci}) 超过 1.5^[10], 首次以实验室手段证实了惯性约束聚变技术路线的可行性。2025 年 5 月的一次实验用 2.08 MJ 激光实现了 8.6 MJ 聚变放能, G 超过 4.1。目前正在尝试增强激光能量, 实现更高的 G 值。Z 箍缩聚变是惯性约束聚变的一种, 它可以比较经济地在实验室产生 10 MJ 级别的 X 光, 为惯性约束聚变创造更好的条件。

国际聚变界下一步的任务是实现工程意义上的能量得失相当, 即所谓的 $Q_{\text{Eng}}=1$, 要求输出电能大于等于输入电能, 这可视为聚变工程可行性的门槛。对于磁约束聚变, 国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 最早可在 2039 年开展氘氘实验^[11], 21 世纪 40 年代验证 $Q_{\text{Eng}}=1$ 。对于激光惯性约束聚变, 由于电能转换为激光的效率不足 1%, 实现 $Q_{\text{Eng}}=1$ 的目标需要为 $Q_{\text{Sci}}=300$, 因而发展为能源的可能性很低, 后文将不再赘述。对于 Z 箍缩聚变, 由于输入的是电能, 实现 $Q_{\text{Eng}}=1$ 的目标需要 $Q_{\text{Sci}}=3$ 。我国电磁驱动大科学装置的目标为 2030 年前实现数百兆焦聚变放能并验证 $Q_{\text{Eng}}=1$ 。

1.4 纯聚变能源开发面临严峻挑战

纯聚变能源面临 4 大技术挑战和经济可行性挑战, 可概括为“技术极难”“造价极贵”, 距离发展为有竞争力的能源还有很大的鸿沟。

1.4.1 实现高增益聚变燃烧难

对于商业发电,磁约束聚变要达到稳态运行且达到 $Q_{\text{Eng}}=5$,这是具备商业开发可行性的门槛。惯性约束聚变是脉冲式运行的,其重复运行频率为 f ,则要求 $f \cdot Q_{\text{Eng}}=5$ 。如果发展为混合堆,记裂变包层二次能量放大倍数为 M ,则仅要求 $M \cdot f \cdot Q_{\text{Eng}}=5$,聚变功率需求降低 M 倍,显著改善能量平衡。

1.4.2 能否实现氦自持尚无定论

热功率为3 GW的聚变堆每年需要消耗165 kg 氦,而世界上现存的氦总量不足30 kg,仅够ITER开展实验使用。显然,聚变堆在消耗氦的同时,必须通过高能中子和 ^6Li 反应生产出足够的氦来补充燃料。受造氦能力、氦/氦等离子体燃耗、氦循环处理能力等方面的限制,磁约束聚变堆能否实现氦自持尚无定论^[12],ITER科学目标也不涉及氦自持验证。启动聚变堆所需的氦储备量也是一个巨大挑战,预计热功率为3 GW的磁约束聚变堆氦储备量至少在10 kg量级,主要原因是氦氦等离子体燃耗太低,目前仅0.3%~0.5%,乐观估计未来也不会超过5%。惯性约束聚变等离子体燃耗可达30%,氦氦储备量可降至1 kg量级,氦自持理论上也更容易实现。如果最终证实聚变堆无法达到氦自持,就需要专门配备裂变堆来生产氦。假设氦的缺口为1%,则1个聚变堆每年需要补充1.65 kg 氦,可以通过在裂变堆中布置产氦靶件来实现,代价是牺牲裂变堆的经济性,这实际上就是一个聚变裂变共生系统!如果采用聚变裂变混合堆,则裂变包层可以增殖更多的富裕中子来产氦,提高氦自持的裕量;同时由于聚变规模降低 M 倍,初始投氦量也降低 M 倍。

1.4.3 实现高可利用率难度极高

可利用率反映按名义功率运行的放能时间占比,直接影响未来聚变能源的经济性。由于系统结构复杂和等离子体控制困难,ITER期望的最高可利用率仅25%,作为对比,当前的裂变堆可用率高达90%以上。可利用率取决于各子系统的平均无故障工作时间、平均维护时间等。Z箍缩聚变堆的驱动器和包层在空间上是分离的,有利于模块的更换和维护并提高系统可靠性。

1.4.4 耐辐照材料开发进展缓慢

聚变产生的是高能中子(14.1 MeV),其能量远高于裂变堆中子。由于缺少合适的聚变中子源,材料在高温下的耐辐照能力无法通过实验来直接考核。ITER装置的氦/氦运行总时间有限,全寿命周期内材料辐照损伤只有3~5 dpa(原子平均离位数, Displacement per atom)。磁约束聚变能源应用需要开发至少能耐受200 dpa辐照的第一壁材料,相关工

作极具挑战性。Z箍缩驱动器和包层是分离的,可以比较方便地定期替换第一壁,在开发出高性能耐辐照材料之前就可以提前实现聚变能源应用。

1.4.5 第一代聚变堆经济性普遍较差

按照国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)计划的初期设计成本测算,电功率为1 GW的磁约束聚变堆,建造成本至少为1 000亿元。作为中子倍增剂的铍,资源比较稀缺,加工成小球后价格进一步提高(约10万元/kg);中国聚变工程实验堆(Chinese Fusion Engineering Testing Reactor, CFETR)设计方案中的铍球用量大于300 t,未来如果采用铍来增殖中子,将面临铍资源短缺的问题。Z箍缩如果走纯聚变的路线,经济性和磁约束聚变堆相当,也不具备经济竞争力。

1.5 Z箍缩聚变裂变混合能源是距离商业化最近的技术路线

Z箍缩聚变裂变混合能源是我国先进核能领域原创的颠覆性技术。它巧妙利用裂变技术克服聚变瓶颈,利用聚变技术破解裂变难题,克服了纯聚变能源“技术极难”且“造价极贵”的困境,又为压水堆乏燃料和贫铀的直接利用创造了条件,在工程可行性和商业可行性方面具有显著优势,有望在2040年实现商业应用^[13]。

Z箍缩聚变裂变混合堆包括局部体点火靶、深次临界裂变包层、重频长寿命驱动器三项原创重大关键技术。局部体点火靶能够很好地匹配Z箍缩驱动条件,60 MA量级的驱动器就可以实现高增益燃烧和2~3 GJ级聚变放能,是破解聚变困局的关键。使用天然铀或乏燃料的深次临界裂变包层可将聚变能量二次放大10倍以上,显著降低聚变规模、并提供富裕中子,解决聚变氦自持、耐受高能中子辐照以及裂变燃料增殖、高放射性废物嬗变问题。重频驱动器为大规模聚变创造条件,10 s运行一次,解决准连续运行问题。这样,一个功率为200~300 MW的聚变单元驱动一个深度次临界裂变包层就可以稳定实现1 GW以上的电功率输出,使得Z-FFR成为极具竞争力的聚变能源系统。

1.6 快堆和Z箍缩聚变裂变混合能源是核能发展的“双保险”

目前来看,核能领域发展潜力最大的是一体化钠冷快堆技术和Z箍缩聚变裂变混合堆技术。一体化钠冷快堆力争2035年建成,在2040年前后具备大规模建设条件;Z箍缩聚变裂变混合堆瞄准2040年实现商业化。裂变和聚变技术协同发展,可以逐步

将核能发展为基荷能源主力,实现化石能源规模化替代,并与可再生能源形成智慧能源系统,为实现“双碳”目标作出更大贡献。预计 2060 年核电装机达 $(4\sim 5)\times 10^8$ kW,发电量占比达到 20%,和全球发达国家平均水平相当。

2 Z 箍缩聚变

2.1 基本原理

Z 箍缩聚变是指利用脉冲功率技术产生快速上升(100~500 ns)的大电流(数十 MA),将电流馈入同轴柱形负载,使柱形负载在轴向电流洛伦兹力作用下发生高速向心内爆后与聚变靶的泡沫转换层作用产生 X 射线,进而压缩并加热聚变燃料,在内爆运动惯性约束下实现热核点火和燃烧的过程。考虑能源应用,负载拟采用很薄的轻质金属套筒,厚度约 2 μm ,半径约 6 cm。

如图 1 所示,Z 箍缩聚变主要分三个阶段。电磁

内爆阶段主要是磁流体力学过程,金属套筒碰靶动能计算采用“0”维模型就有很高置信度。研究团队建立了全电路模型,研究驱动器内的电磁能量传输和功率压缩过程,并与磁流体力学(Magneto Hydro Dynamics, MHD)程序耦合,研究了驱动器与负载的能量耦合过程,可以模拟给出驱动器不同位置的电流、电压波形以及负载等离子体电流和 X 射线辐射产额及功率等^[14-15]。辐射压缩阶段主要是辐射流体力学过程。在套筒负载条件下,其数值模拟获得的套筒动能接近零维结果,计算可靠性非常高,而且完全可以通过与实验的比较来验证。聚变放能阶段主要是带核反应的非平衡辐射流体力学过程,关键的辐射参数都是针对低 Z(原子序数)介质的,理论计算精度较高。后两个阶段的基本物理在武器物理研究中已经得到检验。总之,上述各阶段的描述都基于成熟的物理,这也是目前不同聚变方式中物理理论描述最完备的,因此现有理论及数值模拟结果有很高的置信度。

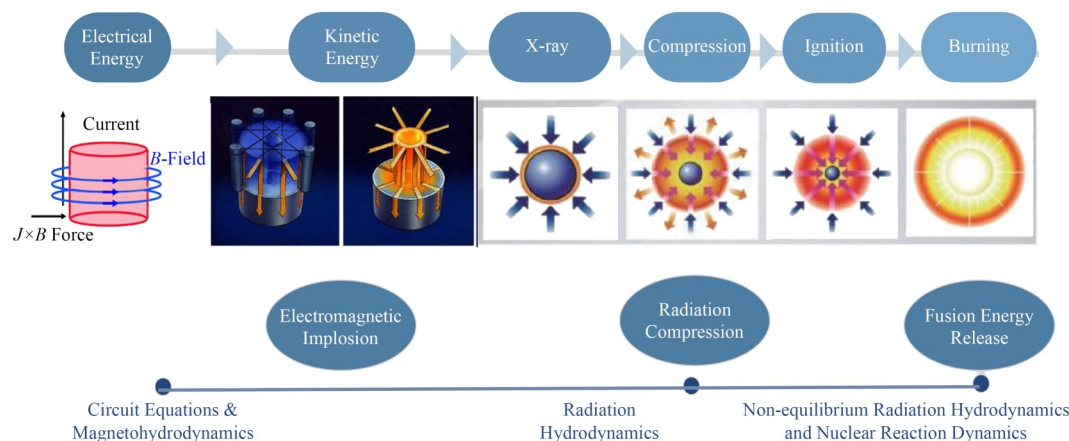


图1 Z 箍缩聚变基本过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of basic processes of Z-pinch fusion

2.2 实现 Z 箍缩聚变的条件

惯性约束聚变只有通过快速压缩才能创造出大规模放能条件。具体而言,驱动器在 10 ns 左右的时间内向氘氘聚变靶丸输送 10 MJ 级的辐射能量,可以释放出 GJ 级聚变能量,靶丸从获得能量到聚变放能的总时长小于 100 ns。目前能创造这种条件的技术,只有 Z 箍缩和激光。

美国曾在 20 世纪 70 年代末至 80 年代中后期进行了以“百人队长”命名的多次地下核试验,得到的结论是:10 MJ 左右 X 光能量可以实现惯性约束核聚变!我们研究认为,这种条件下只能采用整体点火靶,且聚变放能小于 100 MJ;在实验室条件下完全可以创造出更好的条件并采用更好的靶设计方

案,实现更大规模放能。

20 世纪末,美国圣地亚国家实验室(Sandia National Laboratory, SNL)在 20 MA 的 Z 装置上,采用双层丝阵,产生了峰值功率 280 TW、总能量 1.8 MJ 的 X 射线辐射脉冲,获得了实验室等离子体中最强的 X 射线辐射源,电能到 X 射线的转换效率高达 15%^[16]。2022 年,美国 NIF 装置利用 2.05 MJ 激光实现 3.15 MJ 聚变放能。相比而言,Z 箍缩驱动器物理简明,运行可靠性高,造价低廉,预计一台 60~70 MA 电流的驱动器,造价在 10 亿美元以下;提供给聚变靶丸的能量充足,60~70 MA 条件下,提供的碰靶动能可远大于 10 MJ;提供能量的时间短至 2~3 ns, X 光品质优于激光器。

SNL 一直对 Z 箍缩聚变能源抱有浓厚的兴趣和

信心。2007年,他们将Z装置升级到26 MA,之后提出了磁化靶设计,最高获得超过 10^{13} 的热核聚变氘氚中子产额^[17-18]。SNL还开展了动态黑腔高产额靶设计,在不考虑二维效应情况下,预估在峰值电流54 MA时,靶丸可以释放527 MJ聚变放能。我们研究后认为,在Z箍缩的真实条件下,这种中心点火模型是难以成功的,更无法用于能源,随后提出了自己的局部体点火靶和能源靶设计。

2.3 局部体点火靶和能源靶

局部体点火靶设计灵感来自武器物理实践和长期理论探索。与完全体点火相比,它巧妙地解决了点火和大规模聚变放能难题,并大幅降低了对驱动器提供能量的要求。图2给出了Z箍缩负载和靶的示意图,右边是放大的局部体点火靶。

局部体点火靶的基本要求是聚变放能数百MJ、 $Q_{\text{Eng}}=1$ 。能源靶则要求聚变放能2~3 GJ、 $Q_{\text{Eng}}=7\sim 10$,可以认为是点火靶的放大版。设计中需要考虑点火区 α 粒子的漏失、界面不稳定性发展等物理因素,要求在中心点火区不能太小、重介质物质区不能太薄的情况下,找出满足聚变放能要求的最小点火区质量和驱动能量。理论分析表明,点火区质量仅占总

氘氚质量的极少部分。

点火靶物理过程数值模拟大致分三个部分。首先直接把内爆等离子体套筒的质量和动能置于靶的外层,采用三温辐射流体程序可得出套筒动能与聚变放能的对应关系;其次采用零维模型程序和二维磁辐射流体力学程序相互印证的方法,研究不同电流驱动条件下一维柱对称内爆等离子体与泡沫转换层碰撞时的动能;最后,使用二维磁辐射流体力学程序计算出碰靶时内爆等离子体套筒的物理状态,然后用单温辐射流体力学程序计算靶的压缩过程。综合上述计算结果可得如下基本结论:40 MA电流可以驱动点火靶,50 MA点火裕量更大;60 MA以上电流原则上可以驱动能源靶聚变,70 MA有更大把握实现3 GJ的聚变放能。

通过巧妙设计,可以使靶球压缩过程中处于非常好的黑腔均匀辐射场环境,此时计算结果与一维球形计算相近。由于电磁内爆和靶丸压缩过程的收缩比都小于10,可以比较容易地控制其中的不稳定性发展及其影响。总体来说,局部整体点火靶与激光驱动的“中心点火”靶相比,物理因素相对简单,也容易控制。

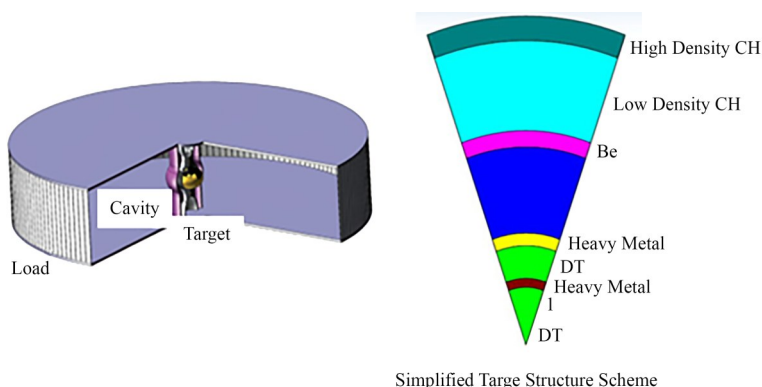


图2 Z箍缩负载和靶示意图(彩图见网络版)
Fig.2 Schematic diagram of Z-pinch load and target (color online)

2.4 电磁驱动大科学装置与局部体点火靶路线验证

国内的大型Z箍缩驱动器研究开始于20世纪90年代,中国工程物理研究院和西北核技术研究院分别从俄罗斯引进了“阳”加速器(1 MA)和“强光一号”装置(1.5 MA)。由于两个装置的输出电流水平均较低,只能开展一些Z箍缩基础物理实验。直到2012年中国工程物理研究院建成10 MA的“聚龙一号”装置^[19],驱动能力才有了大幅度的提升,达到与美国Saturn装置相当水平,仅次于美国的Z装置。

针对在下一代超高功率驱动器中有望成为主流

技术路线的快脉冲直线变压驱动器(Linear Transformer Driver, LTD),中国工程物理研究院在国家“863”计划的支持下,启动了快脉冲LTD关键技术研究,并于2005年成功研制了国内第一个快脉冲LTD原理模块。从2009年开始,在重大专项的支持下,相继完成了输出参数为1 MV/100 kA的10级LTD模块串联装置以及1 MA快脉冲LTD模块的设计和研制,分别从多模块高电压和单模块大电流两个方面进行了有效的技术验证,为LTD工程应用和创新探索提供了重要的实践经验。LTD技术的研究历程如图3所示。在上述工作基础上,研制了面向

50 MA 超高功率强流驱动器的 LTD 单路样机, 2021 年已经完成项目验收, 装置输出指标达到 3.6 MV/880 kA/120 ns, 是目前世界上输出能力最强的 LTD 驱动器。

西安交通大学和西北核技术研究院也致力于下一代大型脉冲功率装置研究, 在 LTD 技术研究方面, 研制了性能指标达到 5.8 GW 快放电支路、低抖动低阈值触发气体开关; 在 LTD 模块和组件方面, 建成了原创的共用腔体结构、内置支路与级联/光电组合触发、气体绝缘的 1 MA 单级 LTD 脉冲源, 四级串联 LTD 脉冲源实验研究平台: 峰值电流约 720 kA, 峰值电压约 260 kV, 峰值功率约 200 GW, 上升时间 76 ns。在 LTD 单路脉冲源方面, 建成采用共用腔体新结构与内置同步触发新触发方式的 12 级串联 LTD 实验平台, 在充电电压 83 kV 和近似匹配负载下, 峰值电流 1.0 MA, 电压 1.1 MV, 上升时间 75 ns。

在上述关键单元技术攻关和集成验证的基础上, 以中国工程物理研究院流体物理研究所作为依托单位, 西安交通大学和天府创新能源研究院作为共建单位, 提出建设 50 MA “电磁驱动大科学装置” 的建议并获得国家立项。50 MA 装置采用 “LTD→

水介质变阻抗传输线→绝缘堆→真空磁绝缘传输线”的技术路线完成了 50 MA “电磁驱动大科学装置” 概念设计(图 4)。LTD 电路结构的特点是“分而治之”, 可以将能量和功率分配到大量的元器件, 降低元器件承受的压力, 从而具备重频长寿命的潜力。50 MA 装置建设目标主要是实现 Z 箍缩驱动的聚变点火, 同时验证大型 LTD 装置的工程可行性。目前, 50 MA 装置即将进入工程实施阶段, 预计 2028 年完成建设。50 MA 装置电储能 65 MJ, 驱动局部体点火靶可以实现 200~300 MJ 聚变放能, 有望在全球率先实现 $Q_{\text{Eng}} > 1$ 的历史突破。

中国工程物理研究院 50 MA 装置概念设计中, 共有 120 个 LTD 支路, 4 层竖直排布。每个支路由 30 级 LTD 模块串联组成, 每级模块由 20 个基本放电支路并联, 每个基本放电支路为两台 100 kV/100 nF 电容器和一只 200 kV 多间隙开关串联组成。同一角度竖直排布的 4 个 LTD 支路输出的电脉冲在输出端汇聚后, 通过竖直三板传输线传输至同一角度的三条独立水平三板径向线, 进而再汇聚到 6 层绝缘堆和圆盘锥磁绝缘传输线, 在六层磁绝缘传输线末端经三柱孔汇流结构汇聚到单层磁绝缘传输线再传递到负载上。

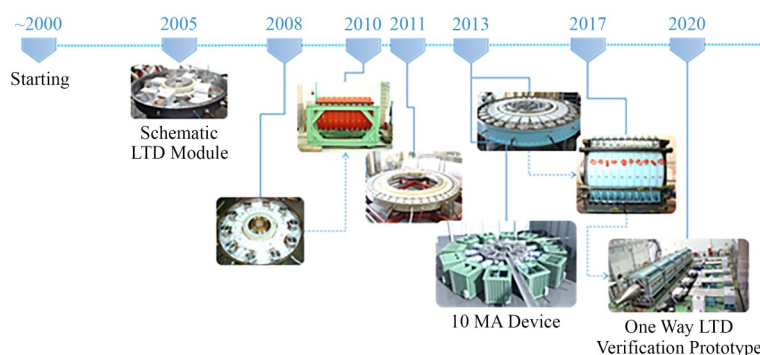


图 3 中国工程物理研究院 LTD 驱动器技术研究历程
Fig.3 Research history of LTD technology in CAEP (China Academy of Engineering Physics)

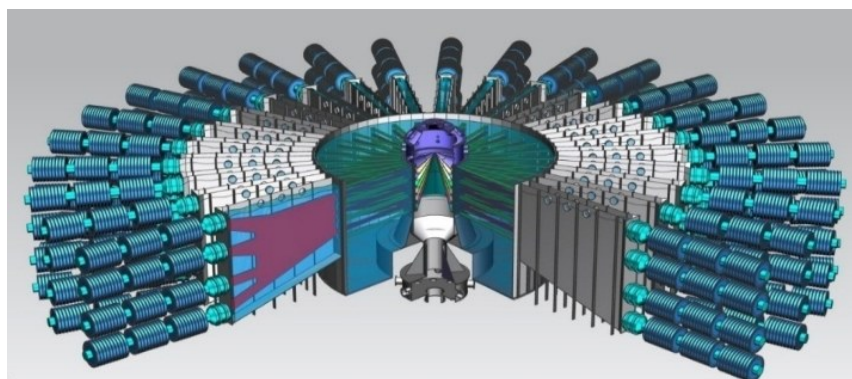


图 4 50 MA 装置概念设计示意图
Fig.4 Conceptual design diagram of the 50 MA Z-pinch device

一旦局部体点火靶技术路线得到验证,聚变能源开发将正式从原理验证阶段进入工程演示阶段。能源应用要求开发 60 MA 以上电流、重复运行频率 0.1 Hz、年运行次数 300 万次,寿命达 10^7 次以上的重频长寿命驱动器。在 LTD 技术框架得到充分验证的基础上,需重点进行重频长寿命元器件的技术攻关和集成验证。基于此思路,我国成功研制了基于气体火花开关的 800 kA 标准化 LTD 模块,以 0.1 Hz 的频率连续运行了 7 000 次,评估了气体火花开关的潜力和用于能源驱动器的可行性;研制的基于超快半导体开关的全固态 LTD 模块已在 0.1 Hz 重频条件下无故障测试超过 100 万次,为驱动器达到最终的产品长寿命需求打下了坚实基础。针对驱动器最终需求,2023 年研制成功了工作参数 30 kV/30 kA 的新型大功率超快半导体开关,可以满足 Z-FFR 驱动器重频长寿命的应用需求。目前正在瞄准能源应用目标,开展更高性能的重频驱动器概念研究和技术攻关。

2.5 Z 箍缩聚变能源

能源靶(单发放能 2~3 GJ)结合 60 MA 重频(0.1 Hz)长寿命驱动器,原则上就可以构成一个 200~300 MW 的聚变单元。10 个这样的聚变单元串联起来,每隔 10 s 依次爆炸,便可形成一个纯聚变能源系统。以美俄为核心的 Z 箍缩聚变能源(Z-Pinch Inertial Fusion Energy, Z-IFE)研究团队也有类似的聚变堆(ZP-3)概念设计^[20],它由 12 个聚变单元组成,每个单元驱动电流高达 86 MA、聚变功率 300 MW。考虑到一台 60 MA 驱动器造价约 10 亿美元,一个聚变单元造价约 20 亿美元,Z 箍缩聚变堆总造价将超 200 亿美元,是三代压水堆的 6 倍,和磁约束聚变堆相当,均不具备市场竞争力。

3 Z 箍缩聚变裂变混合能源

SNL 注意到 Z 箍缩纯聚变能源结构庞大且经济性太差,于是在 2006 提出了以嬗变超铀元素为目的的聚变裂变混合堆(In-Zinerater)^[21]概念设计。In-Zinerater 每 10 s 打靶一次,释放 200 MJ 聚变能量,等效聚变功率 20 MW。由于聚变功率太低,要求包层能量放大倍数高达 150,系统非常接近临界状态,每年可嬗变超铀核素约 1 150 kg。该设计的最大缺点是超铀元素装量超过 40 t。如此巨量的超铀元素完全可以启动 10 个同等功率的嬗变专用快堆,其发电和嬗变能力均显著优于 In-Zinerater。同时,由于 In-Zinerater 爆室半径只有 2 m,脉冲爆炸带来裂变燃料的剧烈温升效应高达上千度,同时第一壁材料每年

辐照损伤高达数十 dpa,没有材料能够满足这些要求。另外,In-Zinerater 考虑燃耗后包层性能快速下降,无法长时间维持,这也是所有接近临界状态的次临界系统(如 ADS 系统)共同的缺点。

3.1 深次临界能源堆

通过对传统聚变裂变混合堆概念的综合分析,我们在 2008 年提出以能源供应为主要目的聚变裂变混合能源堆概念^[22]。它包括聚变堆芯和深次临界能源堆两个部分。先后开展了磁约束聚变裂变混合能源堆(Fusion Fission Hybrid Reactor for Energy, FFHR-E)和 Z-FFR 概念研究和包层初步工程问题研究。二者包层设计理念相同,包层中子学特性相似,但由于驱动源的不同,包层结构和设计方案有显著区别。

3.2 传统的聚变裂变混合堆

混合堆研究早在 20 世纪 50 年代就开始了,大致可分为增殖堆^[23]、嬗变堆^[24]两个阶段。增殖堆基本出发点是聚变堆太贵,因此考虑用聚变堆把天然铀、钍或者贫化铀转化为易裂变燃料供热堆使用,形成聚变裂变共生系统。增殖堆又分快裂变和抑制裂变两种,前者需要通过频繁的后处理分离出钚供热堆使用,乏燃料后处理达每年几百吨至千吨;后者对聚变功率要求过高(大于 1 GW)且须频繁换料以便于燃料生产。20 世纪 80 年代后期,美国出于不扩散的考虑停止了增殖堆的研究。我国在“863”计划的支持下开展了 20 多年的增殖堆研究,由于种种原因也于 21 世纪初终止了。嬗变堆概念在 20 世纪 90 年代开始流行,主要难点是需提前分离出数十吨超铀元素,且易裂变燃料利用效率太低。截至目前,这两种概念仅限于概念研究,未见针对裂变包层中的实际工程问题开展研究。

针对这些困难,我们认为混合堆应该优先考虑供应能源问题,并把以能源供应为主要目的的混合堆简称能源堆,以区别于传统的增殖堆和嬗变堆。图 5 是 Z 箍缩聚变裂变混合堆的原理图^[25]。

3.3 深次临界能源堆

3.3.1 主要设计思想和特点

考虑到聚变系统本身比较复杂,我们认为深次临界能源堆设计应该力求简明、简便、安全、持久、经济,充分借鉴成熟技术,简化工程设计。

早期 Weale 实验表明,1 个聚变中子(14.1 MeV)在无限大天然铀球中可产生 1 次以上裂变(释放 200 MeV 能量),结合 21 世纪 30 年代有可能开发出 200~300 MW 的聚变单元的基本判断,我们在 2008

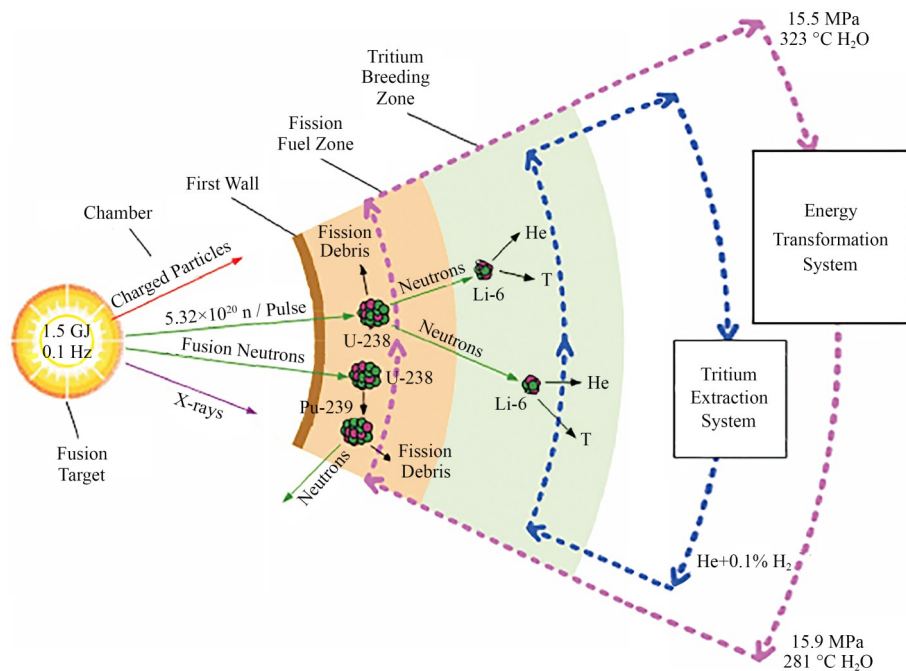


图5 Z 箍缩聚变裂变混合堆原理图(彩图见网络版)

Fig.5 Schematic diagram of the Z-pinch fusion-fission hybrid reactor (color online)

年提出设计能量放大倍数 10 倍以上的次临界能源堆^[18,26]。其主要特点包括:以天然铀金属/压水堆乏燃料的锆合金制作燃料部件,其间布置 Zr 合金冷却水管、轻水冷却;采用合适铀水体积比设计,形成快、热中子耦合能谱,兼顾产氦、能量放大,获得较高的易裂变核素增殖比,包层核性能长期不劣化,为采用“铀和超铀元素不分离,裂变产物部分分离”为主要特征的“简便干法”核燃料循环技术路线创造条件;采用较大爆室尺寸(半径>7 m)和大的裂变燃料装量(>1 000 t),应对脉冲运行带来的热、力冲击,未来材料技术和燃料性能提高后,爆室尺寸可适当缩小(5 m),裂变燃料装量相应显著下降(500 t);按照功能分区,对核放能区和造氦区进行模块化设计,便于安装拆卸;设立专门的厚层水放射性屏蔽区,确保外部环境为极低放射性水平,为堆场址的长期使用创造了条件;创新地设计了高效闭式水汽循环非能动余热排出系统和非能动放射性气体导出系统,彻底地解决了反应堆的余热安全问题。

3.3.2 中子学特性

采用三维蒙特卡罗中子输运燃耗耦合程序 MCORGS^[27],配备多温点连续截面库开展中子学计算。设计半径为 7 m 的球模型,假设每 5 年换 1 次料,卸料采取 2 100 K 简便干法后处理,去除沸点在 2 100 K 以下的裂变碎片;处理后的燃料再加入 5 t 贫化铀,燃料重整后重新入堆。

图 6 给出了长达 200 年时间内,三种场景下的能

量放大倍数和氦增殖比随时间变化情况,分别是天然铀持续运行不换料、天然铀 5 年换料、乏燃料 5 年换料。对于乏燃料换料情况,全寿期平均放大倍数 $M>30$,氦增殖比 TBR (Tritium Breeding Ratio) 大于 1.25。近期三维模型计算结果表明,采用三维模型后,全寿期平均放大倍数 $M>10$,氦增殖比 TBR>1.15,有效增殖系数 <0.7 。

3.3.3 次临界能源堆概念的完善

在磁约束聚变能研究专项的支持下,团队联合国内优势单位开展了磁约束聚变驱动的次临界能源堆三维结构设计、中子学、热工水力、安全分析方面的理论设计和计算分析,表明设计方案可以全面实现次临界能源堆包层的设计指标。同时,也开展了中子学积分实验^[28],燃料部件热工特性,合金燃料材料样品制备、辐照,简便干法后处理等关键技术的实验研究,初步论证了包层部分关键技术的工程可行性。在国防科工局、科技部等数十个项目支持下,开展了试验包层模块 (Test Blanket Modules, TBM) 涉氦系统设计及关键技术研究、固态氦增殖剂堆内辐照性能研究以及 Z-FFR 包层物理、热工、安全、结构等数值模拟研究,逐步完善了 Z-FFR 概念^[29]。值得一提的是,近期团队采用 CMCG (CAD to Monte Carlo Geometry Conversion)^[30]程序实现 CFETR^[31]计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 模型文件到三维蒙特卡罗粒子输运软件 (J-Monte Carlo Transportation code, JMCT) 输入文件的自动转化,并

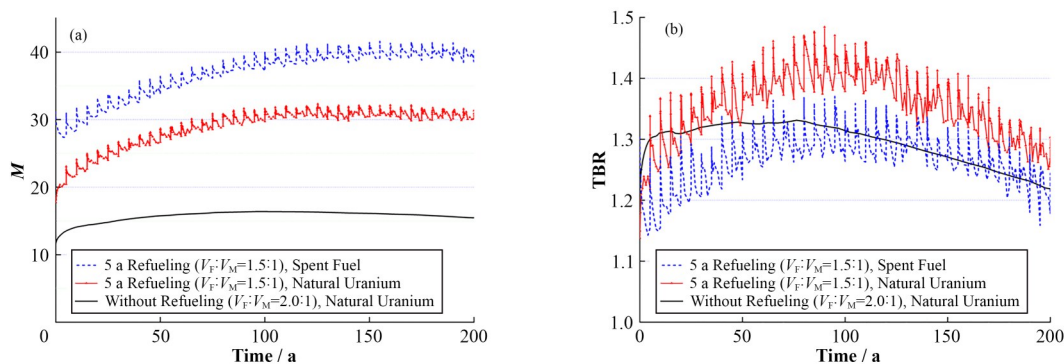


图6 深次临界能源堆长期中子学特性(彩图见网络版)
Fig.6 Long-term neutronics characteristics of the ultradeep subcritical blanket of Z-FFR (color online)

利用JMCT^[32]实现CFETR包层中子学精细计算^[33]。下一阶段将利用这一工具,开展Z-FFR详细工程设计。

3.3.4 Z箍缩聚变裂变混合能源的先进性

1) 固有安全

Z-FFR是深次临界运行的,绝对不会发生超临界事故;非能动余热排出系统等多项措施可确保余热安全;涉及放射性操作部分置于地下,地上地下完全封闭隔离;解除安全顾虑,可以抵近城市建设。

2) 经济高效

Z-FFR建造成本只有30亿美元左右,和三代压水堆相当;它可用压水堆乏燃料作为初装燃料,以贫铀和钍作添加料,解决乏燃料处置和铀资源利用率难题;抵近城市建设可实施热电联供,进一步提升其经济性;反应堆功率大幅可调,方便与可再生能源形成智慧能源系统。

3) 资源持久

Z-FFR可方便地持续烧²³⁸U和²³²Th,铀、钍资源利用率可达90%以上,较热堆提高近两个量级。按目前已探明的铀、钍陆地资源储量,Z-FFR可单独维持人类数千年乃至万年的能源供给。

4) 环境友好

采用“简便干法”后处理过程,可实现对不同放射性核素的分别处理(有的可作医用,有的可工业利用),放射性核素量每年只有约200 kg,半衰期30 a以上的长寿命核素均为 β 衰变,处理方便;堆外可设置厚的水屏蔽层,使环境处于极低放射性水平;三回路水可实现准闭式循环,为电厂选址和长久应用带来极大方便。

3.3.5 Z箍缩聚变裂变混合能源发展规划

瞄准2040年实现Z-FFR商业化目标,提出3个阶段的任务目标。

1) 关键技术攻关阶段(2024—2030年)

针对Z-FFR的3项关键技术同步开展攻关。(1)

建设输出电流为50 MA的Z-箍缩“电磁驱动大科学装置”,验证“局部体点火靶”聚变能源技术路线;(2)建设4路重频长寿命驱动器原型演示装置,功率源充放电大于 3×10^6 次,重复运行频率为0.1 Hz;(3)深度次临界能源包层攻关,形成包层能量放大倍数大于10、氚增殖比大于1.15的设计方案,开展缩比换料机构、裂变燃料“干法”循环等的演示验证。

2) 工程演示阶段(2031—2040年)

2035年建成1 000 MW级热功率的池式综合试验堆,分步集成演示混合堆各项关键技术。(1)建设60 MA级长寿命重频驱动器,重复运行频率为0.1 Hz、运行次数大于 1×10^6 次/年;(2)演示重复频率聚变放能。聚变单发放能为1 GJ, Q_{Sci} 为20~30,验证换靶和余氚回收等技术;(3)在池式综合试验堆上,验证氚自持、包层能量放大功能(能量放大倍数约为10),考核易裂变燃料增殖、超铀元素嬗变功能;开展聚变堆材料辐照试验、医用同位素生产、区域供热等应用探索,推动聚变能源提前应用,初步演示混合堆的经济性。

3) 商业发电推广阶段(2040年以后)

2035年开始建设1 000 MW级电功率Z箍缩聚变裂变混合堆,2040年进行发电演示,之后进入商业推广阶段。(1)在工程演示阶段的基础上,进一步提高混合堆性能,驱动器运行次数大于 3×10^6 次/年,聚变单发放能为2~3 GJ, Q_{Sci} 为20~30,包层能量放大倍数大于15;(2)演示聚变堆发电的经济性;(3)建成裂变燃料重整和“简便干法”后处理工厂;(4)逐步推广应用。

4 结语

核能是未来理想基荷能源,Z箍缩聚变裂变混合能源是未来先进核能重要发展方向。2000年以来,中国工程物理研究院在Z箍缩驱动器、聚变物理、能源包层、氚循环等方面做了大量研究,形成了

完整的 Z-FFR 理论支撑,建成聚龙一号装置,研制了面向 50 MA 超高功率强流驱动器的 LTD 单路样机,完成了聚变靶和深次临界包层部分关键技术工程可行性初步论证,电磁驱动大科学装置获得国家支持,为能源开发奠定基础条件。当前工作重点是开展 Z-箍缩聚变裂变混合能源关键技术攻关及原理演示,并行推进池式综合试验堆和发电示范堆的工程设计工作,接续启动工程示范,力争 2040 年实现商业化应用。

作者贡献声明 彭先觉负责论文撰写思路、结构设计、参考素材及定稿;周良骥提供驱动器相关素材和后续修订;黄洪文提供混合堆基本原理相关素材和后续修订;师学明负责初稿的起草、论文修改,经费支持。

参考文献

- 国家能源局发布 2024 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- International Atomic Energy Agency. Nuclear energy makes history as final COP28 agreement calls for faster deployment[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.iaea.org/newscenter/news/nuclear-energy-makes-history-as-final-cop28-agreementcalls-for-faster-deployment>.
- ADVANCE act accelerating deployment of versatile, advanced nuclear for clean energy act of 2024[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.congress.gov/118/plaws/publ67/PLAW-118publ67.pdf>.
- Nuclear Energy Agency. Uranium 2022: Resources, production and demand[EB/OL]. 2025-2-20. https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28569/uranium-resources-production-and-demand-red-book.
- Beloyarsk BN-800 fast reactor running on MOX[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Beloyarsk-BN-800-fast-reactor-running-on-MOX>.
- Principal design criteria for the sodium advanced reactor Revision 1[EB/OL]. Submittal of TerraPower Topical Report, 2025-2-20. <https://www.nrc.gov/docs/ML2410/ML24101A362.pdf>.
- First lead-cooled fast neutron reactor's installation under way[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/First-lead-cooled-fast-neutron-reactor-s-installat>.
- Wesson J. Tokamaks[M]. 2nd ed. Oxford: Clarendon Express, 1997.
- Breaking new ground: JET Tokamak's latest fusion energy record shows mastery of fusion processes - EURO fusion [EB/OL]. 2025-2-20. <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>.
- Lawrence Livermore National Laboratory. A shot for the ages: Fusion ignition breakthrough hailed as 'one of the most impressive scientific feats of the 21st century' [EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.llnl.gov/article/49301/shot-ages-fusion-ignition-breakthrough-hailed-one-most-impressive-scientific-feats-21st>.
- ITER delay: what it means for nuclear fusion[EB/OL]. 2025-2-20. <https://www.nature.com/articles/d41586-024-02247-2>.
- Abdou M, Morley N B, Smolentsev S, *et al.* Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO[J]. Fusion Engineering and Design, 2015, **100**: 2 - 43. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.07.021.
- 彭先觉, 高翔, 李建刚, 等. 聚变能源研究态势及展望[J]. 中国工程科学, 2024, **26**(4): 190 - 197. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.04.005.
- PENG Xianjue, GAO Xiang, LI Jiangang, *et al.* Fusion energy research situation and prospect[J]. Strategic Study of CAE, 2024, **26**(4): 190 - 197. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2024.04.005.
- Ding N, Zhang Y, Xiao D L, *et al.* Theoretical and numerical research of wire array Z-pinch and dynamic hohlraum at IAPCM[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2016, **1**(3): 135 - 152. DOI: 10.1016/j.mre.2016.06.001.
- 薛创, 丁宁, 孙顺凯, 等. 脉冲功率驱动器与 Z 箍缩负载耦合的全电路数值模拟[J]. 物理学报, 2014, **63**(12): 219 - 227. DOI: 10.7498/aps.63.125207.
- XUE Chuang, DING Ning, SUN Shunkang, *et al.* Full circuit model for coupling pulsed power driver with Z-pinch load[J]. Acta Physica Sinica, 2014, **63**(12): 219 - 227. DOI: 10.7498/aps.63.125207.
- Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, *et al.* Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ[J]. Physics of Plasmas, 1998, **5**(5): 2105 - 2111. DOI: 10.1063/1.872881.
- Gomez M R, Slutz S A, Jennings C A, *et al.* Performance scaling in magnetized liner inertial fusion experiments[J]. Physical Review Letters, 2020, **125**(15): 155002. DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.155002.
- Yager-Elorriaga D A, Gomez M R, Ruiz D E, *et al.* An overview of magneto-inertial fusion on the Z machine at Sandia National Laboratories[J]. Nuclear Fusion, 2022, **62**

- (4): 042015. DOI: 10.1088/1741-4326/ac2dbe.
- 19 Deng J J, Xie W P, Feng S P, *et al.* Initial performance of the primary test stand[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, **41**(10): 2580 - 2583. DOI: 10.1109/TPS.2013.2274154.
 - 20 Olson C, Rochau G, Slutzetal S. Development path for Z-pinch IFE[J]. Fusion Science and Technology, 2005, **47**: 633-640. DOI: 10.13182/FST05-A757.
 - 21 Durbin S M, Cipiti B, Olson C L, *et al.* Fusion transmutation of waste: design and analysis of the in-zinerator concept[EB/OL]. 2025-7-6. https://www.researchgate.net/publication/236482664_Fusion_transmutation_of_waste_design_and_analysis_of_the_in-zinerator_concept. DOI: 10.2172/895981.
 - 22 师学明. 聚变裂变混合能源堆包层中子学概念研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2010.
SHI Xueming. Study on the concept of neutron science in the cladding of fusion fission hybrid energy reactor[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2010.
 - 23 Bethe H A. The fusion hybrid[J]. Physics Today, 1979, **32** (5): 44 - 51. DOI: 10.1063/1.2995553.
 - 24 Wu Y C. Progress in fusion-driven hybrid system studies in China[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, **63**: 73 - 80. DOI: 10.1016/S0920-3796(02)00239-9.
 - 25 李正宏, 黄洪文, 王真, 等. Z 箍缩驱动聚变-裂变混合堆总体概念研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2014, **26**(10): 100202. DOI: 10.11884/HPLPB201426.100202.
LI Zhenghong, HUANG Hongwen, WANG Zhen, *et al.* Conceptual design of Z-pinch driven fusion-fission hybrid power reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, **26**(10): 100202. DOI: 10.11884/HPLPB201426.100202.
 - 26 师学明, 彭先觉. 混合能源堆包层中子学初步概念设计[J]. 核动力工程, 2010, **31**(4): 5-7, 20.
SHI Xueming, PENG Xianjue. Preliminary concept design on blanket neutronics of a fusion-fission hybrid reactor for energy production[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, **31**(4): 5-7, 20.
 - 27 师学明, 张本爱. 输运与燃料耦合程序 MCORGS 的开发[J]. 核动力工程, 2010, **31**(3): 1-4.
SHI Xueming, ZHANG Ben'ai. Development of transport burnup code MCORGS[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, **31**(3): 1-4.
 - 28 王新华, 郑普, 刘荣, 等. 贫化铀、贫化铀/氢化锂组合装置的泄漏中子能谱[J]. 核技术, 2011, **34**(10): 750-754.
WANG Xinhua, ZHENG Pu, LIU Rong, *et al.* Measurement of leakage neutron spectra from spherical assemblies of DU and DU/LiH with 14 MeV neutrons[J]. Nuclear Techniques, 2011, **34**(10): 750-754.
 - 29 彭先觉, 刘成安, 师学明. 核能未来与 Z 箍缩驱动聚变裂变混合堆[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
PENG Xianjue, LIU Cheng'an, SHI Xueming. Nuclear energy future and Z-pinch driven fusion fission hybrid reactor[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
 - 30 Wang X, Li J L, Wu Z, *et al.* CMGC: a CAD to Monte Carlo geometry conversion code[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(8): 82. DOI: 10.1007/s41365-020-00793-8.
 - 31 高翔, 万宝年, 宋云涛, 等. CFETR 物理与工程研究进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, **49**(4): 7-14. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00235.
GAO Xiang, WAN Baonian, SONG Yuntao, *et al.* Progress on CFETR physics and engineering [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2019, **49**(4): 7-14. DOI: 10.1360/SSPMA2018-00235.
 - 32 Deng L, Li G, Zhang B Y, *et al.* A high fidelity general purpose 3-D Monte Carlo particle transport program JMCT3.0[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33** (8): 108. DOI: 10.1007/s41365-022-01092-0.
 - 33 Shi X M, Wang X, Qin G M, *et al.* Neutronics conceptual research on a hybrid blanket of China fusion engineering test reactor[J]. Fusion Engineering and Design, 2020, **156**: 111715. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2020.111715.34.