

磁约束聚变能源的发展机遇与挑战

高翔, 万元熙*

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

摘要 磁约束聚变能源具有安全、经济和环境友好的优点, 是未来理想的战略能源, 可为“双碳”目标的实现做出重大贡献。磁约束聚变是利用磁场将氘和氚燃料以等离子体的形式约束并发生聚变反应, 被认为有望彻底解决人类的能源问题, 也是中国核能发展的长远目标。当前中国正在积极参加国际热核聚变实验堆(ITER)的建设, 支持国内ITER专项的物理和工程技术研究, 在吸收和消化ITER经验的基础上, 自主设计以获取聚变能源为目标的中国聚变工程试验堆(CFETR)。聚变能源开发难度很大, 机遇和挑战并存, 需要长期持续攻关。

关键词 磁约束聚变; 中国聚变工程试验堆; 国际热核聚变实验堆

能源短缺和环境污染等问题使得开发清洁能源成为迫切任务。与目前所使用的能源以及正在开发和发展的清洁能源相比, 磁约束聚变能源具有安全、经济和环境友好的优点, 是未来理想战略能源。因此, 中国核能发展路线将发展核聚变技术作为长远目标^[1-2]。

近年来, 磁约束聚变领域取得了重大进展。目前世界各国聚变试验装置的研究结果表明, 基于超导托卡马克的磁约束聚变能开发利用具有充分的科学可行性。当今世界规模最大、影响最深远的国际大科学工程国际热核聚变实验堆(ITER)计划由欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国7个国家和地区合作承担。ITER装置已于2020年7月28日在法国的卡达拉舍启动安装, ITER将集成当今

国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果, 第一次在地球上实现能与未来实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆, 解决通向聚变电站的关键问题, 如集成验证先进托卡马克运行模式等科学问题, 和堆级磁体及其相关的供电与控制等工程技术问题。

当前, 中国正在大力支持磁约束聚变界积极参加ITER的建设和实验, 支持国内配套物理和工程技术研究, 支持在吸收消化ITER经验的基础上, 自主设计以获取聚变能源为目标的中国聚变工程试验堆(CFETR)。目前, 中国聚变工程试验堆的物理和工程概念设计已经基本完成, 将适时启动CFETR的全面建设。

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-08-24

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项课题(2022YFE03050003); 国家自然科学基金面上项目(12175277)

作者简介: 高翔, 研究员, 研究方向为聚变堆物理设计与先进磁约束装置, 电子信箱: xgao@ipp.ac.cn; 万元熙(通信作者), 中国工程院院士, 研究员, 研究方向为磁约束核聚变, 电子信箱: wanyx@ipp.ac.cn

引用格式: 高翔, 万元熙. 磁约束聚变能源的发展机遇与挑战[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 59-65; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.006

1 磁约束聚变领域国内外研究进展

1.1 国际磁约束聚变领域研究进展

磁约束聚变还处于探索阶段,存在很多物理和工程技术方面的问题需要解决。目前,国际磁约束聚变界的主要研究内容是与ITER装置相关的各类物理与技术问题。ITER^[3]计划的科学目标为集成验证先进托卡马克运行模式,验证“稳态燃烧等离子体”物理过程、聚变阿尔法粒子物理、燃烧等离子体控制、新参数范围内的约束定标关系以及加料和排灰技术。ITER计划的工程技术目标有:堆级磁体及其相关的供电与控制技术研究;稳态燃烧等离子体产生、维持与控制技术(即无感应电流驱动技术)、堆级高功率辅助加热技术、堆级等离子体诊断技术、等离子体位形控制技术、加料与除灰技术的研究;初步开展高热负荷材料试验;包层技术、中子能量慢化及能量提取、中子屏蔽及环保技术研究;低活化结构材料试验(TBM),氚增殖剂试验研究,氚再生、防氚渗透实验研究,氚回收及氚纯化技术研究;热室技术,堆芯部件远距离控制、操作、更换及维修技术研究。因此,ITER计划的成功实施,将全面验证聚变能源开发利用的科学可行性和工程可行性,是人类受控热核聚变研究走向实用的关键一步。

ITER计划将托卡马克装置的研究推向了高潮。国际上,美国、日本、欧盟、韩国等主要国家和地区都制定了详细的聚变能源发展路线,一方面积极参与ITER计划的建造和实验,吸收ITER技术和经验;另一方面,在各国建设和发展自己的下一代聚变商业示范堆(Demonstration power plant, DEMO)装置并开展与ITER配套的相关研究。例如欧盟的聚变发展路线分为近期、中期和长期3个阶段。近期,将在欧洲联合环(JET)^[4]等现有装置上开展研究,包括参与建设ITER、支撑ITER的配套研究、概念设计DEMO装置^[5]、在JET装置上开展氘氚实验等。中期,将参与ITER实验、开展EU-DEMO装置的工程设计、开展未来反应堆材料和关键技术研究等。长期来看,计划从ITER装置获得高性能等离子体和先进技术的经验、建造EU-DEMO装置、验

证聚变电站的可行性,探索聚变商业化的路径。目前规模最大的托卡马克装置欧洲联合环于2021年12月21日通过氘氚聚变反应产生了脉冲宽度5 s、能量输出59 MJ的等离子体。ITER预计会从2035年开始使用这样的聚变燃料,而JET的最新实验是向ITER最终目标迈出的重要一步。

1.2 国内磁约束聚变领域研究进展

中国自20世纪90年代开始托卡马克研究,先后建成运行合肥超环(HT-7)^[6]、中国环流器二号(HL-2A)^[7]及东方超环(EAST)^[8-9]等装置。2006年中国正式加入ITER项目,负责完成了ITER装置多个重要部件的设计、制造与装配任务。中国根据自己的国情,制定了中国磁约束聚变能发展路线图(图1)。中国磁约束聚变能的开发将分为3个阶段:第一阶段,力争在2025年推动中国聚变工程试验堆立项并开始装置建设;第二阶段,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;第三阶段,到2050年开始建设商业聚变示范电站。CFETR将着力解决一系列存在于ITER和DEMO之间的科学与技术挑战,包括实现氘氚聚变等离子体稳态运行,公斤级氚的增殖、循环与自持技术,可长时间承受高热符合、高中子辐照的第一壁和先进偏滤器材料技术等。合肥综合性国家科学中心的“十三五”重大科技基础设施“聚变堆主机关键系统综合研究设施”项目正在建设中,将瞄准聚变堆主机关键系统设计研制,建设国际一流开放性综合测试和研究设施,这为中国掌握未来聚变堆必备的关键工程技术创造了有利条件。

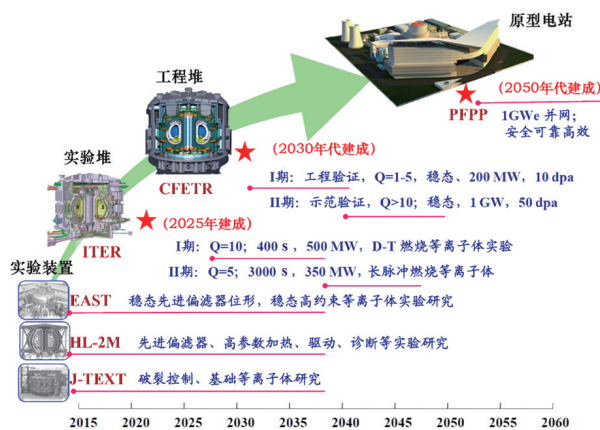


图1 中国磁约束聚变能发展技术路线图

目前,国内在积极参与 ITER 计划的建造和实验,消化和吸收 ITER 技术和经验,努力缩短与发达国家的技术差距。表 1 是中国 EAST、CFETR 装置与 ITER、韩国 DEMO(K-DEMO)、日本 DEMO(JA-DEMO)、欧盟 DEMO(EU-DEMO)之间的关键参数对比^[10-11]。磁约束核聚变距离聚变能源的商业应用还比较远。对磁约束聚变而言,实现大量聚变反

应所需的关键技术是加热、约束(实现聚变)和“维持”(长时间或平均长时间的聚变反应)。未来的磁约束聚变装置必须以长脉冲或者连续方式运行,以便获得可控的聚变能量并稳定输出,这具有相当大的挑战。此外,聚变能源商业应用前还面临研制能耐高能中子辐照的材料,建立能够实现氦自持的燃料循环等诸多工程技术挑战。

表 1 中国 EAST、CFETR 装置与 ITER、韩国 DEMO(K-DEMO)、日本 DEMO(JA-DEMO)、欧盟 DEMO(EU-DEMO)之间的关键参数对比

装置名称	大半径 R/m	小半径 a/m	中心磁场 B_c/T	拉长比 k	等离子体电流 I_p/MA	聚变功率/GW
EAST	1.7~1.9	0.4~0.45	3.5	1.5~2.0	1	—
CFETR	7.2	2.2	6.5	2.0	13	1
ITER	6.2	2.0	5.3	1.7	15	0.5
K-DEMO	6.8	2.1	7.4	1.8	>12	~3
JA-DEMO	8.5	2.42	5.94	1.65	12.3	1.46
EU-DEMO	9.1	2.9	5.86	1.65	17.75	2.0

近年来,中国磁约束聚变能技术取得了一系列重要进展。2021年5月28日,EAST装置实现了可重复的1.2亿度101 s等离子体运行和1.6亿度20 s等离子体运行。2021年6月8日,EAST装置总放电实验次数突破10万次。2021年12月30日晚,实现1056 s的长脉冲高参数等离子体运行,这是目前世界上托卡马克装置高温等离子体运行的最长时间^[10]。2023年4月12日,EAST成功实现了403 s可重复的稳态长脉冲高约束模式等离子体运行,创造了托卡马克装置高约束模式运行新的世界纪录。EAST装置创造的多项托卡马克运行的世界纪录,标志着中国在磁约束聚变研究领域引领国际前沿,也为中国自主建造聚变工程实验堆提供了坚实的科学技术基础。

1.3 磁约束聚变领域的新思想、新技术和新途径

近年来,高温超导强场磁体技术的突破形成了新的紧凑型聚变堆技术路线,不仅成本大大降低,更使研发周期大幅缩短。麻省理工学院(MIT)将紧凑型聚变堆评为2022年度十大突破性技术之一。市场资本的快速进入进一步加速了可控核聚变商业化项目进程,也强势带动了高温超导强场磁体的市场需求。国际上代表性的有美国麻省理工

学院的高温超导紧凑型托卡马克 SPARC 装置^[12]和英国卡拉姆聚变能源中心负责的 STEP 装置^[13],目前均处于概念设计阶段。国内多家民营企业,如新奥集团、星环聚能、能量奇点等均开展了相关研究。此外,悬浮偶极场磁约束装置^[14]是磁约束等离子体的另一条新型技术路线,该装置在聚变研究方向同样具有较大的发展潜力。

2 CFETR 物理与工程研究进展

中国聚变工程试验堆是中国自主开发和设计的下一代聚变装置,旨在弥补 ITER 和未来聚变堆之间的差距,已进行了数轮总体工程设计。CFETR 将分 2 个阶段运行:第一阶段的目标是实现 50~200 MW 的聚变功率,聚变增益 $Q=1\sim 5$,氦增值率 $TBR>1.0$,中子辐照效应~10 dpa;第二阶段的目标是聚变功率>1 GW,聚变增益 $Q>10$,在中子辐照效应~50 dpa 的条件下进行托卡马克 DEMO 验证^[15-18]。CFETR 装置大半径 $R=7.2$ m,小半径 $a=2.2$ m,可以兼容第一阶段和第二阶段的目标,最新 CFETR 装置主机设计如图 2 所示。

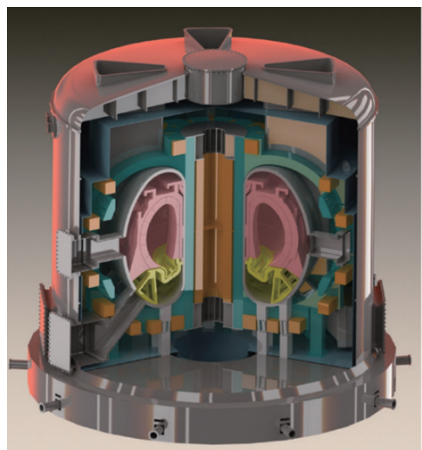


图2 CFETR装置主机

2.1 CFETR物理研究进展

CFETR物理设计主要关注运行模式的开发及其在物理和工程约束下的优化,通过一系列的计算机和模拟开发的运行模式将用于预测聚变性能,探索和确定具有良好约束和磁流体动力学(magnetohydrodynamic, MHD)稳定性的运行空间。在接近理想聚变性能的同时,评估和限制氦和其他杂质粒子的比例,评估功率和粒子排出与所选偏滤器配置的兼容性,评估和控制第一壁和偏滤器的过渡和稳定热负荷,以保证装置的安全。围绕科学目标所进行的物理设计在集成模拟平台OMFIT(One Modeling Framework for Integrated Tasks)上使用输运、辅助加热、平衡以及台基计算等相关程序,进行自洽的边界-芯部耦合的集成模拟,给出CFETR上自洽的等离子体运行方案^[19-20]。在这个过程中,可提取出关于CFETR聚变性能的预测信息,工作流程如图3所示。采用OMFIT集成模拟平台设计出了混合运

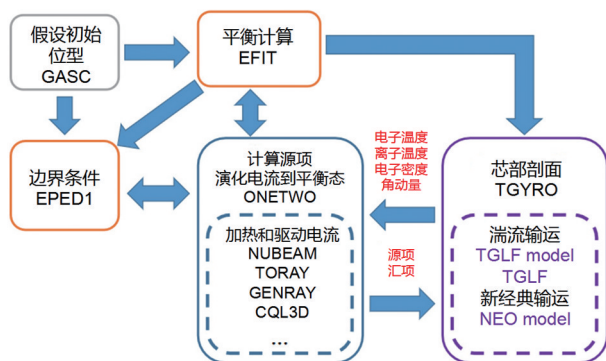


图3 OMFIT集成模拟流程中工作流程

行模式与完全非感应稳态运行两种长脉冲运行模式,以及相应的统一的电流驱动功率配比方案。

稳态运行模式,即完全非感应运行模式。在完全非感应运行模式中所有的等离子体电流(100%)都通过非感应方法提供。这个运行模式的设计中,通常要求有较高的自举电流份额,这有利于降低对外部驱动电流的需求,并在装置参数确定的情况下,通过优化运行模式来获得较高的聚变增益。在CFETR的完全非感应模式的设计中,通过使用有限的外部电流驱动,控制电流剖面在径向上的分布,获得具有局部反剪切的安全因子剖面,改善芯部的粒子约束能力,从而形成了约束增强型内部输运垒。表2是CFETR开发的完全非感应稳态运行模式的0维关键参数,聚变功率范围从100 MW到大于1 GW的DEMO水平^[18]。

ITER物理设计中,采用感应电流(50%)和非感应电流(50%)的混杂运行方案,也是CFETR的选项之一。值得注意的是,在2种先进运行模式下,选择较低的等离子体电流,可以使边界安全系数更高,从而有利于避免长脉冲运行过程中发生等离子体破裂,同时,辅助加热功率和电流驱动功率也不用过大。

2.2 CFETR工程研究进展

CFETR设计主要包括13个方面^[21-24]:装置布局与系统集成、等离子体物理集成设计、超导磁体与低温系统、真空室与真空系统、装置内部部件(包层、偏滤器等)、等离子体加热与电流驱动系统、诊断系统与CODAC(控制、数据存取和通信系统)、电源系统与工程、燃料循环与废物处理、辐射防护安全与RAMI(Reliability, Availability, Maintainability, Inspectability)、遥操作与维护系统、以及辅助系统及项目管理。目前“CFETR集成工程设计研究”项目(2017—2020)已经结题,基本完成了全面详细的工程设计^[2]。

“聚变堆主机关键系统综合研究设施”(CRAFT)于2019年正式立项^[25]。CRAFT主体工程由聚变堆主机最具挑战性的2大系统组成,分别为大型复杂的超导磁体系统和极端工况下偏滤器系统。超导磁体研究系统包括材料综合性能研究平

表2 CFETR 稳态运行模式关键参数($R=7.2\text{m}$, $a=2.2\text{m}$, $k=2$)

参数	聚变功率 P_f/MW	聚变电站的 运行功率 $P_{\text{internal}}/\text{MW}$	聚变电站 的聚变 增益 Q_{plant}	聚变功率/ 辅助加热 功率 Q_{plasma}	电站净输出 功率 $P_{\text{netelec}}/\text{MW}$	包层中子功 率 $P_n/A_{\text{wall}}/$ ($\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$)	环向比压 β_T	归一化 比压 β_N
A.1 100 MW	120	199	0.46	1.56	-107	0.12	0.006	1
A.2 200 MW	229	196	0.7	3.06	-58	0.23	0.009	1.2
A.2 500 MW	482	223	1.14	5.87	30	0.49	0.014	1.5
A.3 1 GW	974	238	1.98	11.89	232	0.99	0.019	2
A.4 DEMO level	2192	265	3.79	28.17	738	2.23	0.029	3

参数	自举电流 份额 f_{bs}	欧姆电流 份额 f_{ohm}	等离子体 电流 I_p/MA	电子密度 $n(0)/10^{20}\cdot\text{m}^{-3}$	电流驱动 功率 P_{cd}/MW	有效 Z Z_{eff}	单位距离的能 量传输功 $P_{\text{SOL/R}}/$ ($\text{MW}\cdot\text{m}^{-1}$)	边界安全 因子 q_{95} q_{95_iter}
A.1 100 MW	0.4	0	8.61	0.48	77	2.45	8.52	8.87
A.2 200 MW	0.4	0	10.34	0.52	75	2.45	9.42	7.39
A.2 500 MW	0.4	0	12.92	0.61	82	2.45	11.66	5.91
A.3 1 GW	0.5	0	13.78	0.78	82	2.45	15.69	5.54
A.4 DEMO level	0.75	0	13.78	1.31	78	2.45	30.7	5.54

台、导体性能研究平台、磁体性能测试平台、环向场磁体、高温超导磁体、中心螺管模型线圈磁体、低温系统以及电源系统。偏滤器研究系统包括偏滤器等离子体与材料相互作用研究平台、偏滤器部件工程测试平台、偏滤器原型部件、全超导托卡马克核聚变实验装置下偏滤器、1/8真空室及总体安装系统、负离子源中性束注入系统、电子共振加热系统、高场低杂波电流驱动系统、离子回旋加热系统、遥操作系统以及总控系统。CRAFT项目瞄准聚变堆主机关键系统设计研制,目标是建设国际一流开放性综合测试和研究设施。目前CRAFT项目总体进展顺利,正按照既定计划稳步推进,已全面进入关键部件研制阶段,部分已开展安装调试,取得了一批阶段性亮点成果。除此之外,其他一些关键技术

也在ITER专项的支持下得到了发展。

3 结论

近年来,中国的磁约束聚变研究取得了突飞猛进的发展,物理实验成果和工程技术能力引领国际前沿。EAST装置创造了多项托卡马克运行的世界纪录;CFETR的物理和工程概念设计基本完成,将着力解决一系列存在于ITER和DEMO之间的科学与技术挑战;深度参与ITER计划,中方承担的ITER采购包质量和进度位居合作七方之首。此外,高温超导材料的快速发展也为磁约束聚变的发展带来了机遇。

总体而言,磁约束聚变能源开发难度很大,国

家需要长期持续支持聚变领域的发展。建议中国继续深入 ITER 国际合作计划, 全面掌握未来聚变堆必备的关键物理与工程技术; 积极推进 CFETR 主机关键部件研发, 适时启动 CFETR 全面建设。同时, 继续关注国际聚变能研究的新思想、新技术和新途径, 助力能源强国目标的早日实现。

参考文献(References)

- [1] 杜祥琬, 叶奇蓁, 徐銖, 等. 核能技术方向研究及发展路线图[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 17-24.
- [2] 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): 045202.
- [3] Shimomura Y, Spears W. Review of the ITER Project[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(2): 1369-1375.
- [4] Keilhacker M, Watkins M L, JET Team. D-T experiments in the JET Tokamak[J]. Journal of Nuclear Materials, 1999, 266: 1-13.
- [5] Federici G, Biel W, Gilbert M R, et al. European DEMO design strategy and consequences for materials[J]. Nuclear Fusion, 2017, 57(9): 092002.
- [6] Gao X, Li J, Yang Y, et al. Long-pulse discharges by synergy of LHW and IBW heating in the HT-7 Tokamak[J]. Journal of Nuclear Materials, 2005, 337: 835-838.
- [7] Liu Y, Ding X T, Yang Q W, et al. Recent advances in the HL-2A Tokamak experiments[J]. Nuclear Fusion, 2005, 45(10): 239-244.
- [8] Wu S, EAST team. An overview of the EAST Project[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5-14): 463-471.
- [9] Li J G, Wan Y X, EAST team. The experimental advanced superconducting Tokamak[J]. Engineering, 2021, 7: 1523-1528.
- [10] Song Y T, Zou X L, Gong X Z, et al. Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in Tokamak EAST[J]. Science Advance, 2023, 9: eabq5273.
- [11] Song Y T, Li J G, Wan Y X, et al. Engineering design of the CFETR machine[J]. Fusion Engineering and Design, 2022, 183: 113247.
- [12] Creely A J, Greenwald M J, Ballinger S B, et al. Overview of the SPARC Tokamak[J]. Journal of Plasma Physics, 2020, 86(5): 865860502.
- [13] Anand H, Bardsley O, Humphreys D, et al. Modelling, design and simulation of plasma magnetic control for the Spherical Tokamak for Energy Production (STEP)[J]. Fusion Engineering and Design, 2023, 194: 113724.
- [14] Hasegawa A. A dipole field fusion reactor[J]. Comments on Plasma Physics and Controlled Fusion, 1987, 11(3): 147-151.
- [15] Li J G, Wan Y X. Present state of Chinese magnetic fusion development and future plans[J]. Journal of Fusion Energy, 2019, 38: 113-124.
- [16] Wan Y X, Li J G, Yong L, et al. Overview of the present progress and activities on the Chinese Fusion Engineering Test Reactor[J]. Nuclear Fusion, 2017, 57: 102009.
- [17] Song Y T, Wu S T, Li J G, et al. Concept design of CFETR Tokamak machines[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42 : 503-509
- [18] Zhuang G, Li G, Li J, et al. Progress of the CFETR design[J]. Nuclear Fusion, 2019, 59: 112010.
- [19] Meneghini O, Smith S P, Lao L L, et al. Integrated modeling applications for Tokamak experiments with OMFIT[J]. Nuclear Fusion, 2015, 55(8): 083008.
- [20] Meneghini O, Lao L. Integrated modeling of Tokamak experiments with OMFIT[J]. Plasma and Fusion Research, 2013, 8: 2403009-2403009.
- [21] Liu X, Qiu L, Li J, et al. Conceptual design of the cryogenic system and estimation of the recirculated power for CFETR[J]. Nuclear Fusion, 2016, 57: 016037.
- [22] Liu C, Qiu Y, Zhang J, et al. Study on the temperature control mechanism of the tritium breeding blanket for CFETR[J]. Nuclear Fusion, 2017, 57: 124003.
- [23] Li G S, Yang Y, Wang Y M, et al. Preliminary consideration of CFETR ITER-like case diagnostic system[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87: 11D401.
- [24] 李建刚, 宋云涛, 刘永. 聚变工程实验堆装置主机设计[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [25] Wu Y, Li J, Shen G, et al. Preliminary design of CFETR TF prototype coil[J]. Journal of Fusion Energy, 2021, 40 (1): 5.

Opportunities and challenges for the development of magnetic confinement fusion energy

GAO Xiang, WAN Yuanxi*

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract With the advantages of safety, economy and environmental friendliness, magnetic confinement fusion energy is an ideal strategic energy for the future and can make a significant contribution to the realization of the "double carbon" goal. Magnetic confinement fusion uses magnetic field to confine and fuse deuterium and tritium fuels in the form of plasma, which is considered to be a promising solution to the energy problem of mankind and a long-term goal for the development of nuclear energy in China. At present, China is actively participating in the construction of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), supporting domestic physics and engineering research, and designing the Chinese Fusion Engineering Testing Reactor (CFETR), with the goal of obtaining fusion energy on the basis of absorbing and digesting ITER experience. This article addresses both opportunities and challenges for fusion energy development which is very difficult and requires long-term sustained research.

Keywords magnetic confinement fusion energy; CFETR; ITER ●



(责任编辑 祝叶华)