

特色专题

托卡马克聚变装置的关键突破与展望

武松涛

摘要 综述了国际托卡马克型核聚变装置的发展、现状及未来展望。阐述了聚变能相对其他能源所具有的安全性高、燃料储量丰富、能量密度高、不会产生二氧化碳等温室气体、环境友好等优势;回顾了托卡马克的发展历程,从20世纪50年代托卡马克概念的提出到如今国际热核聚变实验堆的建造,重点介绍在国际上产生过重要影响成果及取得了重要关键技术突破的著名托卡马克装置,如那些验证了可控核聚变的科学可行性,获得了最高聚变能增益,创造了等离子体三乘积世界纪录,获得最高等离子体温度,发现了重要物理现象、机理与机制、发现或提出了新的或先进的运行模式的托卡马克装置;分析了托卡马克聚变堆尚待解决的诸如燃料循环、氚自持、材料等关键科学与技术挑战;最后展望了聚变堆托卡马克的未来发展方向及聚变能商业化前景。旨在为核聚变研究领域提供参考。

关键词 托卡马克;核聚变;聚变能;聚变堆;等离子体;超导

随着人类社会的发展、生活方式的改善、生活水平的提高、科技的进步,全球对能源的需求持续增长。同时化石燃料资源的日益枯竭及其所带来的环境问题日益严峻。能源与环境面临的挑战和实现“双碳”目标是中国在全面建设社会主义现代化国家新征程中必须面对和解决的重大问题。

仅以大型数据中心的电力消耗为例,近年来大规模AI算力(人工智能计算能力)的需求呈井喷式增长。一个大型数据中心的电力消耗通常在几十兆瓦(MW)到上百兆瓦之间。相较2023年,预计2030年全球数据中心及AI(不包括加密货币)的能源需求将增长160%,对电力的需求增加约650万亿瓦时(TW·h),最高可达1000万TW·h,约占全球电力消耗的3%~4%^[1]。寻找清洁、可持续的能源解决方案已成为世界的当务之急。

1 聚变能的重要性

核能作为一种零碳排放的能源形式,在减缓气候变化方面具有巨大潜力,其可以在本质上解决人类社会发展与能源需求的矛盾,推动人类进入下一个技术变革时代。作为低碳能源,核发电量约占发电总量11.5%,在低碳能源发电量中占比高达29%。到目前为止,共有33个国家和地区已有或正在建设自己的核电站。核能因其安全性、经济性且低碳排等优势,将是未来能源可持续战略中不可缺少的组成部分^[2]。目前中国是世界上在建核电站机组最多的国家,截至2024年,商运核电机组数量达到57台,额定装机容量5975万kW^[3]。

相比裂变能,聚变能具有诸多优势。首先,聚变反应的燃料储量丰富,就氘氚聚变反应而言,地球海水氘储量为40万亿t,氚可以通过锂再生;其次,聚变能的安全性高,不存在反应堆的熔毁风险,是最有希望彻底解决能源和环境问题的根本出路之一。聚变能作为一种近乎无限、环境友好的能源形式,近年来

华中科技大学聚变研究中心,武汉 430074

收稿日期:2025-03-11;修回日期:2025-06-12

作者简介:武松涛,教授,研究方向为核聚变工程,电子信箱:songtao_wu@hust.edu.cn

引用格式:武松涛.托卡马克聚变装置的关键突破与展望[J].科技导报,2025,43(12):121-137;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.03.00046

受到广泛关注,被称为人类的“终极能源”。

与可再生能源如风能、太阳能和水力发电相比,聚变能源能量密度高、不受地理条件限制、没有间歇性和不稳定性问题,也不会对环境、自然和生态造成影响。风能和太阳能可与核能耦合,加上1种或多种工业过程,就可形成一个独立的有稳定能源供给和产品输出的生产系统^[4]。

与化石燃料发电相比,聚变能电站不会产生二氧化碳等温室气体。美国麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)团队对核聚变能在2050年后规模化部署的情景开展了模拟。结果显示:若核聚变发电占全球电力10%,每年可减少约10亿~20亿t二氧化碳排放(取决于替代的能源类型)。若核聚变电站的建设成本在2050年为8000美元/kW,并在2100年降至4300美元/kW,则全球脱碳成本可以降低3.6万亿美元^[5]。

聚变能开发是能源研究最前沿的研发领域,也是国家的重大战略规划。核聚变能的广泛应用将改变全球能源格局,减少对化石燃料的依赖,提高能源自给率。作为一种清洁、高效、可持续的能源形式,核聚变能的应用在解决全球能源危机、应对气候变化和推动科技进步方面具有重大意义。

2 常规托卡马克的发展

国际可控核聚变研究最早起源于核武器原料,特别是氢弹所需氘(一种氢的同位素,又称“超重氢”)及原子弹所需铀-233(一种铀的同位素)的生产。早在1950年,苏联科学家伊戈尔·塔姆(Igor Yevgenyevich Tamm, 1958年获诺贝尔物理学奖)与当时他的学生安德烈·德米特里耶维奇·萨哈罗夫(Andrei Dmitriyevich Sakharov, 1975年获诺贝尔和平奖)就提出磁约束概念^[6]。1951年,萨哈罗夫设计了一个圆环外半径12 m,内部小半径2 m,中心磁场5 T,等离子体密度 $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$,温度可达100 keV(约12亿℃),可产生900 MW聚变能的环形热核聚变反应装置MTR。该装置每天可以生产100 g氘或8 kg铀-233。

之后塔姆与萨哈罗夫提出了磁约束聚变托卡马克概念^[7]。而托卡马克名称最早是由塔姆的另一个学生苏联科学家伊戈尔·戈洛温(Igor Nikolaevich

Golovin)提出,其源自俄语环形(тороидальная)、容器(камера)、磁(магнитная)这3个俄语单词的缩写(токамак),可理解为“环形磁容器”装置^[8]。

托卡马克装置是典型的磁约束聚变装置,主要由为等离子体提供清洁环境的真空室及为控制与约束等离子体的磁体系统组成,其主要结构如图1^[9]所示。托卡马克装置磁体系统主要由环向场线圈、中心螺管线圈和极向场线圈3部分组成。其中,中心螺管线圈中电流的变化会在托卡马克装置大环方向感应一个环电压,进而击穿环形真空室腔内的燃料气体,形成等离子体并产生环向等离子体电流。环向等离子体电流产生的沿等离子体截面小环极向磁场与环向场线圈产生的沿着大环方向的磁场共同形成沿大环方向的螺旋形磁场(图1中磁力线所示)。该螺旋场将等离子体约束在环形真空室内(图1中未显示环绕等离子体的真空室)。而极向场线圈产生垂直于环形等离子体的磁场,可以控制环形等离子体的位置和截面形状。

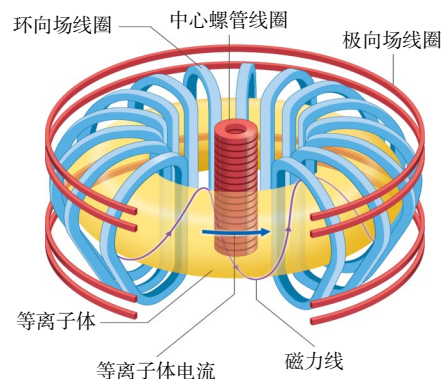


图1 托卡马克装置基本结构

托卡马克装置作为实现可控核聚变最有前景的途径之一,在过去几十年取得了显著进展,特别是全超导托卡马克的出现,为实现长时间乃至稳态高性能等离子体运行提供了可能,为实现稳态可控核聚变带来了希望。

2.1 俄罗斯先驱托卡马克装置

作为托卡马克装置的发源地,从1954—1995年,苏联陆续建造了20多个托卡马克装置,包括由常规导体材料,如铜、铝等制造的磁体系统组成的常规托卡马克装置(以下简称“托卡马克”),以及由超导材料制造的磁体系统组成的托卡马克装置(以下简称“超导托卡马克”)。

1954年,苏联建造了一个早期环形等离子体装

置 TMP。TMP 具备了托卡马克的雏形,如配备了一个瓷质环形腔室,并开展了等离子体放电启动、等离子体稳定性、X 射线与逃逸电子的实验与研究。虽然 TMP 在托卡马克发展历程中有重要地位,为后续托卡马克装置的提出提供了有益经验和借鉴,但它通常不被认为是第一个严格意义上的托卡马克装置。直到 1958 年苏联在库尔恰托夫研究所建成了托卡马克装置 T-1(图 2^[10])。T-1 的成功运行,使其被认为是世界上第一个托卡马克装置。托卡马克装置 T-1 还首创了在环形真空室内使用金属衬套,以保护真空室内壁免受高温等离子体或高能粒子的轰击,通过在等离子体放电前对内衬的加热烘烤可以有效减少等离子体内的杂质,内衬也是目前托卡马克装置普遍采用的真空室内部包层的雏形。T-1 的成功建造并运行标志着托卡马克技术的开端,是国际聚变发展的重要里程碑,极大推动了全球核聚变研究的发展。

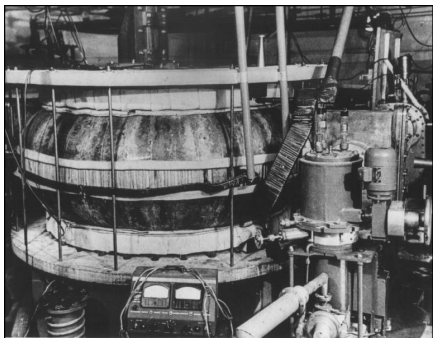


图2 世界首个托卡马克装置 T-1

为改善等离子体性能,苏联于 1959 年又建造了托卡马克系统 T-2。T-1 及 T-2 的实验结果最初于 1965 年公布,但被认为他们测量温度的系统存在潜在问题,被国际聚变界忽略了。随后,苏联在 1968 年建造的托卡马克装置 T-3 中获得等离子体电子温度大于 1 keV,电流脉冲宽度大约为 50 ms,能量约束时间达到 7 ms,10 倍于当时受困于 Bohm 扩散极限的其他类型聚变实验装置,这在当时是历史性的突破。T-3 的实验结果在 1969 年的国际会议上公布后,国际聚变界仍然持怀疑态度。苏联科学家邀请英国卡拉姆聚变能源中心携带测量设备前往 T-3 所在地,也是当时苏联核弹计划的绝密核心库尔恰托夫研究所开展独立测量,这在当时冷战最激烈的时期是难以想象的。通过对 T-3 实验参数的测量,英国科学家的测量结果完全证实了 T-3 的实验参数,结果发表在

1969 年 11 月的《Nature》上^[11]。此后,世界上掀起了建造托卡马克的热潮。

20 世纪 70 年代中期,世界各地建造了数十台托卡马克装置。到 20 世纪 70 年代末,在这些装置上陆续实现了聚变反应所需的温度、密度条件,尽管不是在同一个托卡马克装置及同时实现的。届时国际聚变界形成一个共识,即只要托卡马克等离子体足够大,就可以提高等离子体能量约束时间,产生足够大的等离子体电流,辅以外部加热,如高能中性束加热,就可将等离子体的参数提高至核聚变反应所需条件。于是当时国际核聚变研究大国纷纷开始设计建造大型托卡马克装置,以期使用最容易产生核聚变反应的氘和氚作为燃料,实现聚变能得失相当(即能量增益 Q =聚变能功率/外部加热功率=1)的目标,如:美国的托卡马克聚变试验堆(Tokamak Fusion Test Reactor, TFTR)、欧盟的欧洲联合环(Joint Europe Torus, JET)、日本的日本环形器-60(Japan Torus-60, JT-60/JT-60U)。

2.2 首个实现显著氘-氚聚变反应功率的托卡马克 TFTR

1975 年,美国能源部批准了在美国普林斯顿等离子体物理国家实验室(Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL)建造大型托卡马克装置 TFTR 项目。TFTR 的主要目标之一就是实现氘-氚聚变反应,开展燃烧等离子体实验研究。PPPL 分别于 1975 及 1976 年开展了 TFTR 的概念设计与工程设计,并于 1982 年建成了 TFTR 托卡马克装置(图 3^[12])。1993 年 TFTR 在世界上率先采用 50% 氘与 50% 氚开展氘-氚聚变反应实验,并在 1994 年产生了超过 10 MW 的聚变功率,创造了 $7.9 \times 10^{20} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 聚变三乘积^[13](即等离子体密度、温度与约束时间的乘积)世界纪

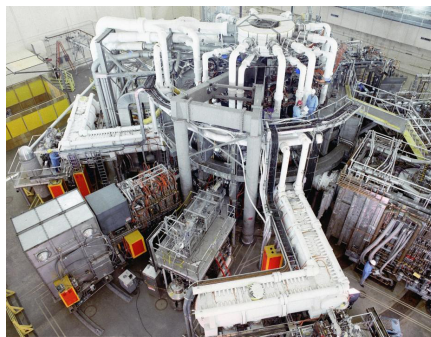


图3 美国 TFTR 托卡马克装置

录,该参数至今仍是在托卡马克上实现的最高聚变三乘积。虽然欧洲 JET 装置在 1991 年就尝试加入极少量氘燃料,开展了氘-氘聚变反应实验,但直到 1997 年才获得 16 MW 聚变反应功率(见 2.3 小节),一举超过 TFTR。但 TFTR 是全球首个实现显著氘-氘聚变反应功率的托卡马克装置。

TFTR 在国际托卡马克实验研究领域发现了诸多重要现象,并持续性开展研究。TFTR 发现了氘氘聚变反应中的阿尔法粒子自加热现象,并对阿尔法粒子自加热开展了测量。阿尔法粒子加热是未来聚变堆自持燃烧不可或缺的。1986 年在 TFTR 实验中发现了靴带电流又称自举电流现象。合适的自举电流分布可以改善等离子体的约束特性,提高等离子体的比压值,有利于实现高约束模式运行。靴带电流降低了对外部电流驱动系统的要求,提高了装置的整体能量效率,可大大降低聚变堆运行成本。首次发现了气球模,理解气球模的非线性行为和控制气球模,对于实现高效的等离子体约束及未来聚变堆的建设有重要意义。1995 年,在 TFTR 上发现了一种新的称为增强反剪切托卡马克等离子体约束机制,极大降低了等离子体的扰动,提高了等离子体稳定性。在同一年里,TFTR 实现了 5.1 亿 $^{\circ}\text{C}$ 高温等离子体运行,创造了当时的世界纪录,但在第二年被日本 JT-60U 托卡马克的 5.2 亿 $^{\circ}\text{C}$ 打破(见 2.4 小节)。TFTR 在等离子体约束和加热,实现高 β (等离子体压力与磁压之比)运行等技术上的重要突破。在等离子体诊断技术的发展上起到了重要推动作用,提升了等离子体参数的测量精度,为聚变研究提供了关键数据,特别是 TFTR 托卡马克的实验数据较好地验证了其发展的等离子体理论和模拟模型,将国际聚变界对高温等离子体机理的理解推进了一大步。其后期在材料和工程方面的研究,特别是面对高能中子辐照、高热负荷材料性能研究及托卡马克退役除氚技术研究等方面为国际聚变界提供了宝贵经验。TFTR 在 1997 年退役。

2.3 实现最高核聚变反应功率与聚变能的托卡马克装置 JET

1971 年,欧洲原子能委员会提出建造可实现聚变能增益 $Q \geq 1$ 的大型托卡马克装置的动议,并于 1977 年选址在英国牛津郡的卡拉姆聚变能源中心。1978 年,该项目获得正式批复,并于同年开工建造,取

名为欧洲联合环(Joint Europe Torus, JET)。

JET 于 1983 年建成,并获得第一次等离子体放电,是当时世界上最大的托卡马克装置(图 4^[14])。1991 年 11 月 9 日,JET 在世界上率先尝试使用氘和少量氚作为燃料开展了聚变实验。在 1997 年,JET 开展了具有里程碑意义的氘-氘聚变实验,产生了 16 MW 的聚变功率,这也是迄今为止世界上托卡马克装置实现的最高聚变功率输出,聚变能增益 Q 值达到 0.67^[15],与美国 TFTR 托卡马克装置(见 2.2 小节)共同验证了可控核聚变的科学可行性。2021—2023 年底,JET 又进行了数次氘-氘聚变实验,并屡次创造了世界纪录。2021 年,JET 实现 59 MJ 氘-氘聚变反应能量^[16],2023 年,实现了 69 MJ 的氘-氘聚变反应(图 5^[17]),至今仍保持世界托卡马克系统获得的最高聚变能输出。JET 与 TFTR 的氘-氘实验,验证了在托卡马克装置上实现氘-氘聚变反应的科学可行性。

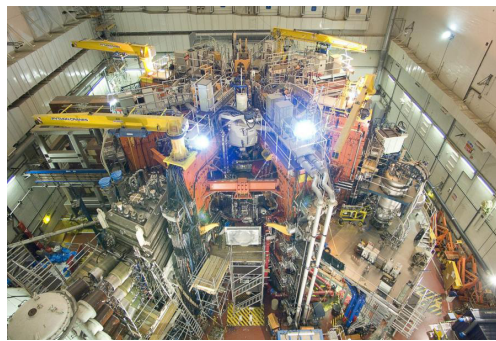


图 4 JET 托卡马克装置

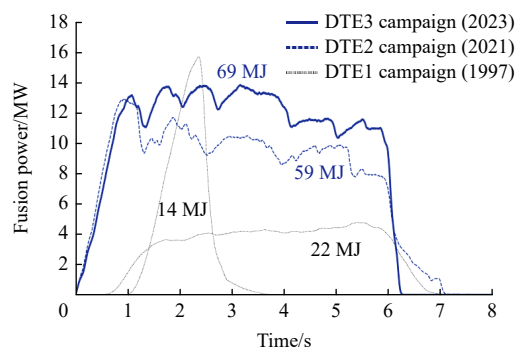


图 5 JET 4 次典型氘氘聚变反应功率及能量

JET 托卡马克装置的高温等离子体可达 100 m^3 ,直到 2022 年日本 JT-60SA 建成(见 4.3 小节),JET 一直是世界上等离子体体积最大的托卡马克装置。JET 是世界上最早采用非圆截面等离子体燃烧室设计的托卡马克装置之一,可有效改善等离子体的参数

及运行。JET 也是国际上首次成功验证采用遥操作系统维护与维修托卡马克内部部件的技术及验证了氚回收和安全管理, JET 的实验研究不仅推动了聚变科学的发展, 也为国际热核聚变实验堆(International Thermal-nuclear Experimental Reactor, ITER)项目的成功实施奠定了坚实的基础, 其设计和运行经验为 ITER 的建设提供了重要参考, 被称为 ITER 的前期实验装置。在完成了 40 多年的运行之后, JET 于 2023 年 12 月正式退役。

2.4 首个实现聚变能等效增益大于 1 的托卡马克 JT-60U

1985 年日本原子能研究开发机构(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)在茨城县那珂市的核融合科学研究所建成 JT-60 大型托卡马克装置(图 6^[18])。JT-60 托卡马克于 1991 年升级为 JT-60U, 集中于开展非感应加热与燃烧等离子体实验研究。1996 年, JT-60U 在世界上首次实现了聚变能等效增益 Q 值达到 1.05, 并于 1998 年实现了等效聚变能增益超过 1.25 的新世界纪录, 这是迄今世界上在托卡马克系统上实现的最高聚变增益。

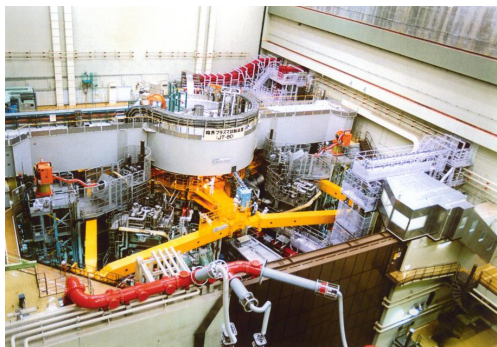


图 6 JT-60/JT-60U 托卡马克装置

JT-60U 自 1991 年运行以来, 在等离子体物理研究和聚变技术开发方面取得了多项重要成果。JT-60U 在长脉冲等离子体运行方面, 能够维持高温等离子体超过 100 s, 这对于非超导大型托卡马克系统来说无疑是最高水平。JT-60U 至今还保持的另一项世界纪录是其获得了 5.2 亿 °C 等离子体离子温度^[19]。JT-60U 托卡马克于 2010 年退役。退役后, 日本启动了大型全超导托卡马克 JT-60SA 项目(JT-60 Super Advanced, 也称超级先进托卡马克), 作为 ITER 的补充实验装置, 旨在进一步推动核聚变研究。

2.5 首次发现托卡马克运行 H-模的装置 ASDEX

欧洲除了 JET 托卡马克装置外, 还有 1980 年在德国马普等离子体物理研究所建成的轴对称偏滤器实验装置(Axially Symmetric Divertor Experiment, ASDEX)托卡马克装置和 1991 年建成的托卡马克装置 ASDEX-U(图 7^[20])。



图 7 德国托卡马克装置 ASDEX-U

ASDEX 及 ASDEX-U(ASDEX-Upgrade)2 个托卡马克装置在国际聚变界享有盛誉, 做出了多个开创性的贡献。1982 年, ASDEX 在国际上首次发现了一种新型托卡马克的运行模式 H-模(High-Mode, 高约束模式)^[21]。相较于 L-模(Low-Mode, 低约束模式)运行模式, H-模使得粒子和能量约束时间显著提高, 显著改善了托卡马克等离子体的能量约束性能, 成为现代托卡马克装置的标准运行模式。在 H-模运行模式被发现前, 国际聚变界普遍认为: 增加托卡马克装置的尺寸, 也就是增加托卡马克等离子体的体积, 是提高托卡马克等离子体能量约束时间最有效的途径。而一味地扩大托卡马克装置的规模势必带来建造与运行维护成本的提高, 给托卡马克型聚变反应堆的经济性带来质疑。H-模为提高托卡马克聚变反应堆的经济性带来希望, 并极大推动了核聚变研究的发展。

ASDEX 是世界上最早成功采用轴对称偏滤器设计的托卡马克之一, 成功验证了偏滤器在核聚变装置中的重要作用, 深入开展了等离子体杂质排出、辐射损耗控制、等离子体与壁相互作用影响的研究。证明偏滤器能显著降低高 Z 杂质积累, 延长放电时间, 提高等离子体纯净度, 提升等离子体性能^[22]。偏滤器系统已成为托卡马克, 特别是长脉冲托卡马克必备的系统, 更是未来聚变堆不可或缺的。

ASDEX-U 创造性地采用了钨作为面向高温等离子体的第一壁材料, 是全球首个运行于钨金属壁环

境下的托卡马克,并开展了卓有成效的实验研究,如:对钨在高热流、等离子体粒子轰击下的行为(溅射、重沉积、侵蚀等),钨杂质(高 Z)在等离子体中的积累与输运等研究。开发了杂质控制技术(如氩气吹扫、磁扰动),探索钨壁条件下维持稳态H-模、避免杂质冷却堆芯,为ITER运行策略(特别是初始全金属壁阶段)提供了实验验证支持。钨作为面向高温等离子体的第一壁材料被国际托卡马克聚变堆设计广泛采用。

ASDEX-U首次验证了共振磁扰动(resonant magnetic perturbation, RMP)技术可以有效抑制或缓解边缘局域模(edge localized mode, ELM),为ITER实施ELM控制提供技术基础及实验方案。

2.6 保持2项世界纪录的托卡马克 Alcator C-Mod

1970年,美国原子能委员会批准了美国麻省理工学院等离子体科学与聚变中心(Plasma Science and Fusion Center, PSFC)建造一个等离子体中心磁场可达10 T的名为Alcator(Alto Campo Toro,意大利语,意为强场环)的强场托卡马克装置计划。Alcator于1972年建成,这是世界上第一个强场、紧凑型托卡马克装置,是全球最先进的高场聚变实验装置之一。Alcator也是第一个开创性地取消了托卡马克变压器铁芯结构的托卡马克装置,简化了托卡马克装置结构,改善了托卡马克装置的可接近性。在这之后,国际上的托卡马克装置设计都采取空心变压器结构。在1973—1974年,PSFC对Alcator真空室做了改造,并加强了环向场磁体结构。Alcator后改名为Alcator A。1978年Alcator A在8.7 T等离子体中心场运行条件下获得了 $2.4 \times 10^{19} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 当时世界最高记录聚变三乘积^[23]。

Alcator C于1976年建成,其设计的最高中心场可达13 T,是至今最高中心场强托卡马克装置,并在1984年获得 $1.2 \times 10^{20} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 聚变三乘积,打破了Alcator A创造的世界纪录^[24]。1987年,美国能源部批准了Alcator C的改造计划,即Alcator C-Mod托卡马克。Alcator C-Mod托卡马克于1991年建成,秉承了紧凑型强场托卡马克装置的特点(图8^[25])。其最高等离子体环向中心场可达8 T(设计值为9 T),等离子体密度可达到 $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$,是目前世界上等离子体密度最高的托卡马克,可以在高磁场条件下开展高密度的实验研究。在Alcator C-Mod托卡马克上首次发现

了被称为改善的高约束运行模式I-模(Improved Mode),并开展了系统研究。该运行模式的能量约束性能接近H-模,却无ELM(edge localized mode, ELM)爆发的问题,现已成为多个国际装置的研究热点^[26]。

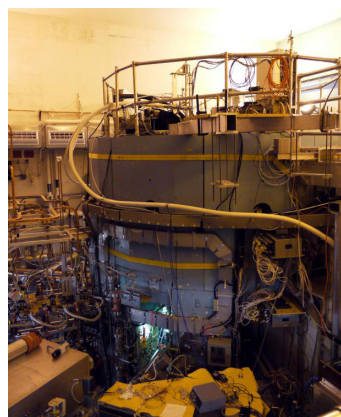


图8 强场托卡马克 Alcator C-Mod

PFSC在Alcator C-Mod托卡马克上还开展了大量等离子体加热与电流驱动实验研究,为国际聚变界积累了大量珍贵的高场下等离子体运行经验与数据,为核聚变研究领域做出了重要贡献,为聚变科学和未来聚变反应堆设计提供了关键数据。

2016年,Alcator C-Mod创造了相当于2大气压的高温等离子体压力世界纪录^[27],并保持至今。同年,Alcator C-Mod正式退役。Alcator C-Mod退役后,MIT等离子体科学与聚变中心团队中部分人员于2017年创建了联邦核聚变系统公司(Commonwealth Fusion Systems),专注于高温超导强场托卡马克聚变能开发(见4.5小节)。

2.7 常规托卡马克对聚变的发展发挥了重要作用

国际上曾建造过大小不同的100多个托卡马克装置,为国际聚变界提供了海量实验数据,这些宝贵的实验数据对建立可预测等离子体行为的数学模型的定标律具有重要意义。托卡马克定标律是通过分析大量不同托卡马克装置,特别是大型托卡马克装置的实验数据,并采用统计拟合方法得出的一系列经验公式,是目前设计和预测未来大型聚变反应堆(如ITER和聚变示范堆DEMO)性能的最重要工具之一。

在常规托卡马克发展过程中,等离子体聚变三重积指标从70年代的约 $10^{16} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$ 跃升至20世纪90年代的 $10^{21} \text{ keV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}$,实现了5个数量级的跨越式提升,极大推动了托卡马克聚变科学技术的进步。

上述在国际上具有重要影响的托卡马克系统的建造及成功运行,特别是其实验结果证明了磁约束受控核聚变作为人类理想能源的科学可行性,标志着国际可控核聚变领域进入了一个新阶段。这些具有重要里程碑的托卡马克的退役及后续新建的超导托卡马克的建造与成功运行,也标志着常规托卡马克正逐渐退出历史舞台。以下介绍对国际聚变界产生重要影响的超导托卡马克装置。

3 超导托卡马克的发展

提高托卡马克环向场线圈的电流,可以提高等离子体中心的磁场,从而可以有效提高等离子体的参数。为解决托卡马克采用常规导体制造的线圈在大电流运行时过热,从而只能短脉冲运行的缺点,苏联科学家创新地提出采用超导材料制造托卡马克磁体系统。

3.1 首个超导托卡马克 T-7 及首个大型超导托卡马克 T-15

20 世纪 70 年代,苏联科学家就预言未来托卡马克聚变电站将很有可能采用超导材料。1978 年,苏联科学家设计建造了世界首个环向场磁体采用超导材料制造的超导托卡马克装置 T-7(图 9^[18])。该装置的主要目的是:获得应用于托卡马克的超导磁体研发经验,提高托卡马克的运行效率。

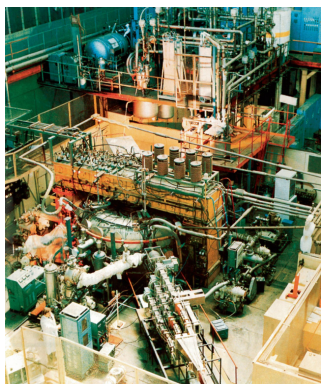


图 9 世界首个超导托卡马克装置 T-7

T-7 超导环向场磁体采用能够在 4.5 K(约为 -269°C)温度下稳态运行的铌钛(NbTi)超导材料^[28],可以实现长时间的等离子体约束,超导磁体的使用可显著降低托卡马克装置的能耗。T-7 的建造还推动

了大规模低温超导技术的应用,包括液氮冷却系统和低温绝缘技术的发展。

T-7 首次验证了超导磁体在托卡马克装置中运行的可行性,为托卡马克长脉冲或稳态聚变等离子体的研究创造了条件,推动了等离子体物理和核聚变工程技术的发展。T-7 的成功运行为托卡马克技术的发展做出了具有开创性的贡献,为后续超导托卡马克装置的设计和建造提供了重要参考。因此,T-7 是核聚变研究史上的一个重要里程碑,具有重要的科学和工程意义。T-7 的成功运行标志着核聚变研究进入了一个新的时代,对全球核聚变能源研究产生了深远的影响。

T-7 于 1988 年退役。T-7 的设计理念和技术成果对中国的 HT-7 超导托卡马克项目产生了直接影响。中国科学院等离子体物理研究所基于 T-7 于 1994 年建造了中国第一个,也是世界第四个超导托卡马克 HT-7。

为改善超导托卡马克的性能,苏联科学家于 1988 年建造了一个大型超导托卡马克装置 T-15(图 10^[18]),T-15 超导环向场磁体采用先进超导材料铌三锡(Nb_3Sn)制造,其等离子体大半径达到了 2.43 m,小半径 0.78 m,是当时最大的超导托卡马克装置^[29]。T-15 的成功建造标志着核聚变研究领域的又一个重要里程碑,充分展示了超导技术在大型托卡马克装置中的潜力,为大型超导托卡马克的设计、制造和调试积累了宝贵经验。1995 年,由于经费短缺等原因,T-15 停止运行。2006 年,俄罗斯宣布在原 T-15 超导托卡马克的基础上,建造 T-15U(T-15 Upgrade, T-15 升级),计划目标是获得 1000 s 运行时长,1 亿 $^{\circ}\text{C}$ 的高温等离子体。然而,俄罗斯于 2020 年宣布建造一个规模较 T-15 小一号的 T-15MD 常规导体的托卡马克^[30]。

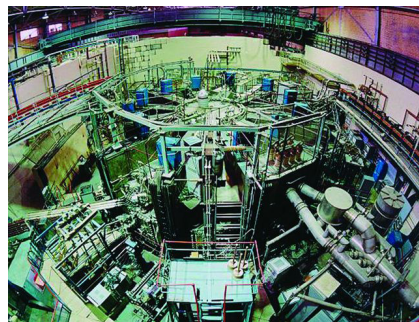


图 10 大型超导托卡马克装置 T-15

3.2 首个等离子体运行时长超过 1 万 s 的超导托卡马克 TRIAM-1M

1979 年,日本九州大学建成了采用超导环向场磁体的超导托卡马克 TRIAM(Tokamak of Research Institute for Applied Mechanics),1986 年升级为 TRIAM-1M(图 11)。TRIAM-1M 是世界上首次采用先进超导材料 Nb_3Sn 制造超导磁体的托卡马克装置,其等离子体中心环向场可高达 8 T 的强磁场,这是当时少数超过 8 T 的强场托卡马克装置之一。1995 年,TRIAM-1M 在 20 kA 等离子体电流下维持了 120 min (2 h) 的稳态运行,2001 年在同样等离子体电流下维持了 190 min (3 h 10 min) 的稳态运行^[31]及 15 kA 等离子体电流下维持超过 5 h 16 min^[32]的超长时间稳态运行世界纪录,并保持至今。

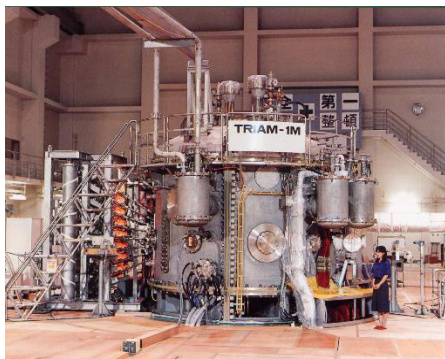


图 11 超导托卡马克装置 TRIAM-1M

TRIAM-1M 的成功运行证明了超导托卡马克装置在长时间稳态模式下运行的可行性,是核聚变研究史上的又一个重要里程碑。TRIAM-1M 在长时间运行方面,特别是低混杂波电流驱动(lower hybrid current drive, LHCD)长时间放电条件下的等离子体行为,位置和形状控制的研究做出了重要贡献,为研究等离子体在高磁场下的约束行为和稳定性提供了重要实验数据,为未来聚变反应堆的连续运行提供了重要参考。

3.3 首个采用 1.8 K 超流氦冷却的超导托卡马克 Tore Supra

1988 年,在位于法国南部卡德拉舍(Cadarache)的法国原子能与替代能源委员会(Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, CEA)的核基地建成了超导托卡马克 Tore Supra(图 12^[33])。

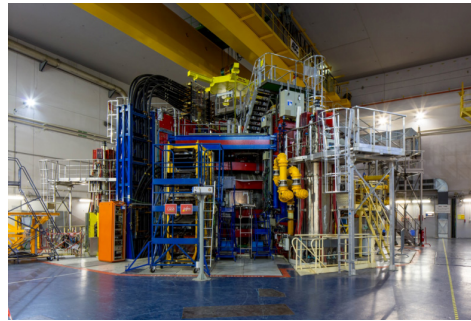


图 12 超导托卡马克 Tore Supra

Tore Supra 是世界上首个采用 1.8 K (约为 -271°C)超流氦低温系统对超导磁体实施冷却的托卡马克装置,也是世界上首次实现超过 6 min 长脉冲高功率等离子体运行的托卡马克装置^[34]。Tore Supra 也是首个设计主动冷却真空室的托卡马克装置,使其具备在高参数等离子体条件下实现长脉冲运行的能力。在等离子体加热和电流驱动,特别是使用低混杂波电流驱动(LHCD)、离子回旋共振加热(ICRH)、稳态高比份自举电流方面开展了大量实验。这些技术不仅提高了等离子体性能,还为未来反应堆的稳态运行提供了关键技术支持。2016 年, Tore Supra 改造为钨环境下稳态托卡马克(Tungsten-W Environment in Steady-state Tokamak, WEST)超导托卡马克装置。2025 年 2 月 CEA 宣布,其 WEST 托卡马克实现了 5000 万 $^{\circ}\text{C}$ 1337 s (约 22 min) 等离子体稳态运行^[35]。Tore Supra 与 WEST 为长脉冲核聚变能研究奠定了重要基础,并直接支持了 ITER 等国际项目的进展。

4 全超导托卡马克的发展

鉴于当时的技术水平, T-7 与 T-15 超导托卡马克装置仅有环向场磁体采用了超导材料,对于需要承受较大磁场变化的中心螺管线圈及极向场线圈仍然采用常规导体,如铜制导体。

为实现托卡马克稳态运行,1992 年美国普林斯顿等离子体物理实验室首次提出将极向场与中心螺管磁体也采用超导技术的全超导托卡马克物理实验(Tokamak Physics Experiment, TPX)项目^[36]。TPX 曾被视为美国在聚变研究领域的旗舰项目,计划建成世界上第一个能够开展长时间稳态运行实验的全超导托卡马克,为未来的聚变反应堆(如 ITER 和 DEMO)

提供技术支持。由于美国政府预算限制和美国聚变能科学计划的调整,TPX项目在1995年被取消。尽管TPX项目最终被取消,但其所开展的物理设计和工程设计对聚变科学的发展产生了重要且深远的影响,为聚变能研究领域留下了宝贵的遗产。

世界上目前建成有3个全超导磁体托卡马克装置,分别是2006年建成的中国EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak,实验先进超导托卡马克,又名东方超环)(原名HT-7U)、2008年建成的韩国KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research,韩国超导托卡马克先进研究)、2023年由日本与欧盟联合建造的JT-60SA(Japan Torus-60 Super Advanced,超级先进日本环),正在建造的全超导托卡马克实验堆有ITER项目及美国的SPARC(Soonest Possible Approach to Realizing Competition,实现竞争目标的最迅速方案)项目。

4.1 首个全超导托卡马克 EAST(原名 HT-7U)

2006年9月,在中国科学院等离子体物理研究所建成了国家九五重大科学工程“HT-7U超导托卡马克核聚变实验装置”,后改名为EAST^[37],这是世界上第一个全超导托卡马克系统(图13)。其设计目标之一是验证托卡马克装置在长脉冲及稳态运行模式下的科学与工程可行性。近年来,EAST系统取得了一系列重大进展。EAST在2021年实现了可重复的1.2亿℃101 s和1.6亿℃20 s等离子体运行^[38],继而又实现了1056 s的长脉冲高参数等离子体运行^[39]。在2025年1月20日,EAST成功实现了上亿度1066 s稳态长脉冲高约束模等离子体运行^[40],创造了托卡马克装置高约束模(H-Mode)运行时长的世界纪录,验证了聚变堆在高约束模下长脉冲运行的可行性,标志着中国在高温等离子体研究领域进入了世界聚变界

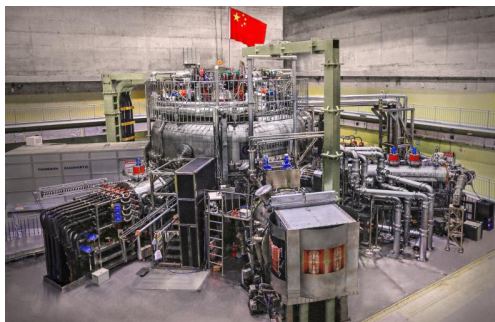


图13 全超导托卡马克 EAST

的领先方阵。

EAST配备了中性束注入和射频加热等多种高功率加热系统,为准稳态乃至稳态等离子体加热和电流驱动提供了重要支持。EAST的超导磁体需要在液氮温度(约4.2 K)下运行,推动了低温技术,包括高效冷却系统和低温绝缘技术的发展。

EAST长脉冲运行实验为未来聚变反应堆的连续运行提供了重要数据。EAST在等离子体位置、形状和稳定性控制方面,特别是在长脉冲运行条件下的控制技术取得了重要进展。EAST是核聚变研究史上的一个重要里程碑,它验证了全超导托卡马克的可行性,推动了等离子体物理和核聚变工程技术的发展,并为ITER和未来聚变能源的研究提供了重要支持。EAST的研究成果不仅提升了中国在国际核聚变领域的地位,也为全球核聚变能源研究做出了重要贡献。

4.2 韩国全超导托卡马克 KSTAR

韩国国家聚变研究所(National Fusion Research Institute, NFRI)于2008年6月成功建造了全超导托卡马克KSTAR(图14),并于2010年实现了高性能约束(H-Mode)的等离子体运行^[41]。2018年,KSTAR首次实现了等离子体离子温度超过1亿℃的等离子体运行,并在2020年将这一高温等离子体维持了20 s,创造了当时的世界纪录。KSTAR在2021年将1亿℃的高温等离子体维持时间延长至30 s^[42],展示了其在高温等离子体控制方面的技术能力。

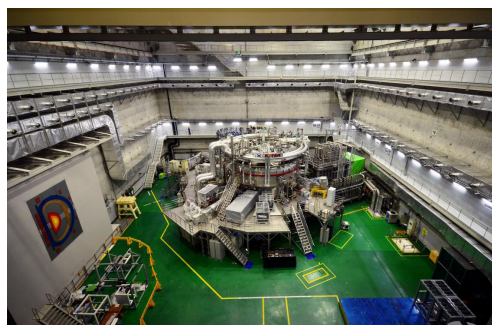


图14 全超导托卡马克 KSTAR

KSTAR采用类似ITER超导体设计,并采用先进的Nb₃Sn超导材料制造导体与磁体。KSTAR的成功建造是韩国聚变领域的一次飞跃,该研究成果提升了韩国在国际核聚变领域的地位。

4.3 目前世界最大的全超导托卡马克 JT-60SA

JT-60SA是JT-60的升级版本,是目前全球最大

的全超导托卡马克^[43], 2018 年, 日本发布了由日本与欧盟联合制定的“JT-60SA 研究计划”。JT-60SA 的目标是解决 ITER 和 DEMO 的关键物理问题, 探索和验证未来聚变电站的关键技术, 如等离子体加热、约束、控制等技术, 为国际热核聚变实验堆和未来聚变反应堆的设计和稳态运行提供实验数据和验证, 并提供关键技术支持。

2020 年, 由日本原子能研究开发机构(JAEA)和欧洲聚变能源组织共同合作建造的 JT-60SA 全超导托卡马克装置完成总装(图 15^[43])。JT-60SA 由日本及欧洲 29 个国家参与设计、建造与调试, 而且是在他们参与 ITER 建造, 为 ITER 提供总造价约 55% 的关键系统同时, 完成的世界最大全超导托卡马克系统, 是聚变界国际合作的典范。

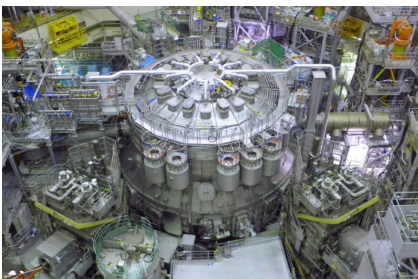


图 15 世界最大的全超导托卡马克 JT-60SA

2023 年 10 月, 经过修整的 JT-60SA 实现了第一次等离子体运行。在 2023 年 12 月 1 日举行的建成仪式上, JT-60SA 实现了 1 MA 偏滤器位形等离子体运行。在 2024 年 11 月召开的亚太等离子体物理大会上, JT-60SA 团队报告了成功将等离子体电流提升到 1.2 MA 的成果, 这是目前在超导托卡马克上实现的最高等离子体电流, 并获得了 160 m³ 的等离子体体积, 2024 年被收录吉尼斯世界纪录, 打破了 JET 保持近 40 年的 100 m³ 等离子体体积的世界纪录。JT-60SA 可实现 5.5 MA 等离子体电流, 其强大的实验能力使其能够开展更高等离子体参数的核聚变实验, 可将等离子体加热至 2 亿℃, 并可实现在聚变能量得失相当条件下维持不小于 100 s^[44]。JT-60SA 的投入使用标志着日本核聚变的一个重要的里程碑。

4.4 世界首个全超导托卡马克核聚变实验堆 ITER

ITER 是目前全球规模最大、影响最深远的核聚变研究项目计划(图 16^[45])。ITER 项目最早是在

1985 年 11 月 21 日的苏美日内瓦峰会上由时任美国总统里根与前苏共中央总书记戈尔巴乔夫共同提出。之后的两年里, 在国际原子能机构 IAEA 的组织下, 由美国、苏联、欧洲和日本组成的四方经讨论确定了合作机制, 1988—1991 年开展了 ITER 概念设计, 1992—1998 年完成了工程设计及关键技术预研, 1999—2001 年完成了修改完善设计 ITER-FEAT (Fusion Energy Advanced Tokamak, 聚变能先进托卡马克)。2006 年 11 月 21 日, 中国、欧盟、美国、日本、俄罗斯、印度及韩国七方政府代表在巴黎签署了《建立 ITER 国际聚变能组织联合实施国际热核聚变实验堆计划协定》(Agreement on the Establishment of ITER International Fusion Energy Organization for the Joint Implementation of the ITER Project), 并经七方政府批准后, 2007 年 10 月 24 日, ITER 国际组织(ITER Organization)正式成立, 共计 35 个国家参与。

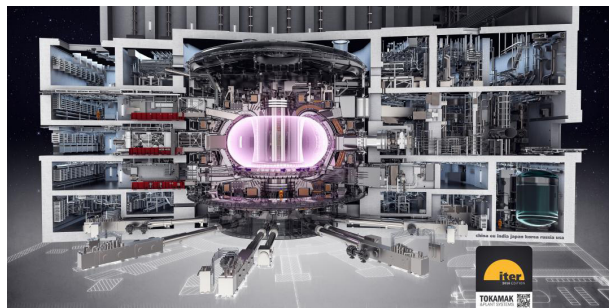


图 16 全超导托卡马克核聚变实验堆 ITER
(图片来源: ITER Organization)

ITER 托卡马克装置系统位于法国南部一个占地 180 hm² 的区域, 比邻 Cadarache 的 CEA 核技术研发基地, 这个基地也是欧洲最大的核能研究中心之一。

ITER 的目标是通过建造和运行一个大型托卡马克装置, 验证核聚变能源的科学和工程技术可行性, 为未来商业化聚变反应堆奠定基础。ITER 是按 50~70 万 kW 聚变反应堆的规模开展设计的, 其可实现在 500 MW 聚变能的输出条件下运行时间大于 400 s, 增益 Q 大于 10, 或 250 MW 聚变能的输出条件下运行时间大于 3000 s, 聚变能增益 Q 大于 5, 并探索聚变能增益 Q 大于 30 的聚变点火实验^[46]。ITER 的设计体现了当前世界最先进的托卡马克技术, 拥有多项世界之最, 包括但不限于:

— 将是世界上最大规模氘-氚核聚变反应实验

堆,聚变能可达 700 MW;

- 可实现最大聚变能增益 Q 大于 10;
- 将产生世界上最大的等离子体体积 840 m^3 ;
- 等离子体温度将达到 2 亿 $^{\circ}\text{C}$;
- 可实现最高 17 MA 等离子体电流;
- 可维持核聚变反应时长达 6000 s;
- 是世界上最大的氚处理系统,最高在线氚的存量可达 4 kg,为维持 ITER 的 20 年氚-氚运行,总计需要约 25 kg 氚;
- 将首次验证氚增殖技术,即通过锂再生氚,确保聚变反应堆的燃料可持续性;
- 世界上最大规模的托卡马克聚变堆远程遥操作系统;
- 最高可达 70 MW 辅助加热系统;
- 迄今为止世界上最大规模的 Nb_3Sn 和 铌钛 (NbTi) 超导磁体系统,其超导磁储能可达 52 GJ。

ITER 的建设自 2006 年启动以来,已完成了大部分关键部件的制造和安装。截至 2023 年,ITER 主机大厅的主体结构已经完成,目前设备制造与安装工作量已完成 80%,预计在 2033 年完成各系统的集成调试,2034 年开始运行实验研究^[47]。

ITER 项目是全球核聚变研究的核心工程,通过国际合作促进了聚变科学和技术的全球共享与发展,ITER 的成功建设和运行将为未来商用聚变堆的建造奠定基础,推动聚变能从实验室走向实际应用,还将推动多个领域的科技进步,为解决全球能源危机、环境污染问题以及实现碳中和目标提供重要解决方案。

4.5 世界首个高温超导托卡马克实验堆 SPARC

美国 CFS(Commonwealth Fusion Systems, 联邦聚变系统)公司是 2017 年脱胎于麻省理工学院的一家专注于采用高温超导强场磁体技术实现紧凑、经济、可靠核聚变能源的私营商业公司。

CFS 正在建造 SPARC 全高温超导托卡马克,其采用最先进的二代高温超导材料稀土钡铜氧化物(Rare Earth Barium Copper Oxide, REBCO)制造磁体系统,等离子体中心场强可达 12.2 T,其仅用 ITER 的 $\frac{1}{3}$ 的等离子体大半径,ITER 2% 的等离子体体积,即可实现 140 MW 的聚变功率,且实现聚变能增益 Q 大于 10,与 ITER 相当,但其造价仅约为 ITER 的 $\frac{1}{10}$ 。

SPARC 高温超导托卡马克系统计划 2026 年建成。2021 年 CFS 成功研发了高温超导环向场模型磁体,其尺寸为 $2.9 \text{ m} \times 1.9 \text{ m}$,在 20 K 运行温度下实现了 20 T,这是迄今为止在 20 K 运行温度下大型超导磁体的世界最高磁场^[48]。CFS 的下一步目标是建造 200~250 MWe 发电功率的聚变反应堆 ARC(Affordable, Robust, Compact reactor, 紧凑型经济适用反应堆),图 17 是 ARC 聚变电站示意^[49]。图 18 是托卡马克聚变能增益 Q 与等离子体中心环向场(B_0)、等离子体大半径(R_0)及等离子体体积(V_p)的关系曲线^[50]。由图 18 可见:随着等离子体中心场强(B_0)的增加,为实现相同的聚变能增益 Q 值,等离子体大半径(R_0)及等离子体体积(V_p)都大幅下降,也就是说可以通过建造较小的托卡马克装置主机实现高的聚变能增益 Q 值。

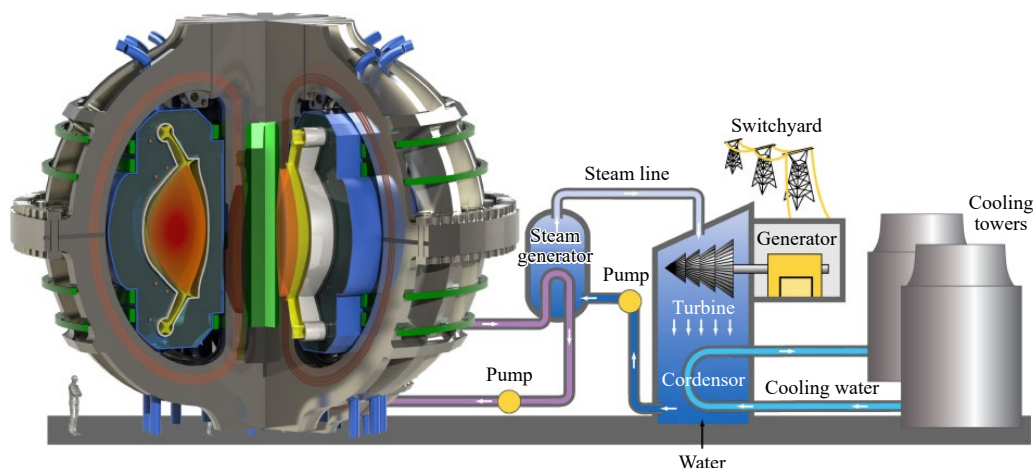


图 17 ARC 聚变电站示意

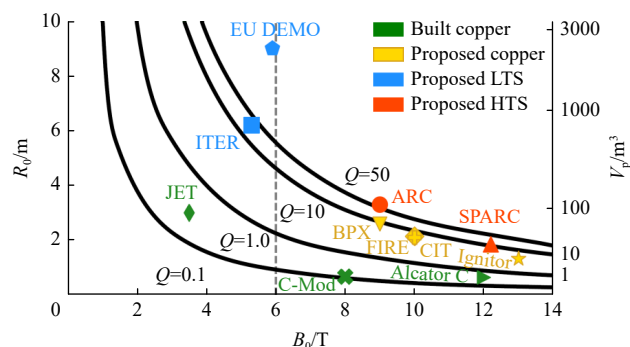


图 18 托卡马克聚变能增益 Q 与等离子体中心环向场 (B_0)、等离子体大半径 (R_p) 及等离子体体积 (V_p) 关系曲线

5 聚变堆托卡马克的关键技术挑战

虽然托卡马克技术在过去几十年里取得了显著进展,但实现托卡马克聚变堆的商业化应用仍面临着诸多技术挑战。

5.1 聚变堆燃烧等离子体机理研究

托卡马克装置利用其自身的强大等离子体电流及外部磁体线圈产生的强磁场将高温等离子体约束在环形真空室内,这种形态高能等离子体会产生各种磁流体不稳定性。目前聚变堆燃烧等离子体 ($Q > 5$) 的稳定性机理,仍然是没有彻底解决的问题,严重影响等离子体的约束和整体性能。这些问题的解决有利于预测及抑制等离子体瞬变事件,如等离子体的大破裂,是建造高效、稳定、安全的聚变反应堆的重要基础。

国际上尚没有能够开展燃烧等离子体 ($Q > 5$) 实验研究的托卡马克装置,目前国际聚变界对高温等离子体的理解都基于非燃烧等离子体。而在氦氘燃烧等离子体状态下,特别是在达到点火条件下阿尔法粒子对等离子体性能的影响,只能通过现有实验结果的分析模拟预测外推。未来的聚变反应堆,特别是在未来商用堆 $Q > 20$ 的情况下,阿尔法粒子 (He^{4+}) 携带的能量约为总聚变能量的 20%,而阿尔法粒子加热所占的份额将超过 80%,其可能引起的非线性不稳定性机理尚不清楚。ITER 实验堆将提供高 Q 值实验条件,可以开展高能粒子对等离子体的约束、输运以及加热机理研究。

5.2 聚变堆燃料的高效循环

未来聚变堆燃料循环处理系统的一个关键技术

与安全挑战是如何保证燃料循环处理系统可以安全、可靠、稳定及高效地处理数千克的氦氘燃料。

进入聚变堆燃料循环处理系统的成分非常复杂,其包括但不限于:未参与聚变反应的燃料(氘和氦)、聚变反应的生成物(如:氦)、为控制等离子体而注入的杂质(如:氮 N_2 、氖 Ne 、氩 Ar 或氪 Kr 等)、燃烧室内部件受到高温等离子体侵蚀或溅射出的杂质及由冷却系统排出的含氦冷却介质(冷却水、氦、液态金属)等物质。

聚变等离子体氦的燃烧率对燃料循环处理系统中的氦储量及对氦循环处理能力的要求有重要影响。ITER 的燃烧率仅为 0.3%,提高聚变反应的燃烧率涉及燃料优化、等离子体约束的提高、加热效率的提升、燃料优化管理、反应物及杂质有效控制、先进诊断、耐辐照材料等关键技术。提高聚变反应的燃烧率将有助于显著降低氦储量及氦处理能力的要求,从而减小燃料循环处理系统的规模,降低工程难度、造价和运行成本,增强系统的安全性。

由于氦的放射性、稀有、昂贵等属性,在聚变堆燃料的循环处理系统中氦的处理及收集是重中之重,必须做到“应收尽收”。氦循环处理技术主要包括:氦增殖、在线提取、回收、分离、纯化、存储、注入等,与聚变电站加料及等离子体运行的粒子循环密切相关。

5.3 氦自持技术及防护安全

氦(超重氦)的半衰期是 12.43 a,自然界几乎不存在氦。而一个典型的 1000 MW 电功率的聚变堆发电站所需的聚变功率约为 3000 MW,其满功率年运行将需要消耗约 150 kg 氦^[51]。未来氦氘聚变电站反应堆所需的第一炉氦必须由外源氦提供,而维持聚变堆核反应的氦燃料必须通过聚变反应所生成的中子与锂反应生成氦,从而实现聚变堆氦燃料的自持。聚变堆的氦增殖是依靠设置在燃烧室内的氦增殖包层实现的。氦增殖包层技术、氦的提取及纯化技术、氦燃料的循环处理技术都有待进一步研发与验证。

由于氦是放射性物质,其对人类的主要安全影响在于进入人体内可能造成的危害。氦的放射性是电离辐射,进入人体后会提高罹患恶性肿瘤的风险,所以要避免氦经吸入、摄入或由伤口进入人体。从聚变堆氦的安全性问题来说,氦的防护重点不在于辐射屏蔽问题,而是保证氦的密闭,严防氦的泄漏。

在聚变堆项目设计的初期,如在概念设计阶段,就必须将其安全防护及对环境影响的要求纳入项目的总体要求中,并贯穿设计、制造、安装、调试、运行、维护、退役等项目全过程。安全要求必须根据项目的进展及国家的法规及时更新。

5.4 托卡马克聚变堆材料

面临挑战的托卡马克聚变堆材料主要是堆内结构材料、面向等离子体的材料、中子倍增材料、氦增殖材料、防氦渗透材料等。

基于氘氘聚变反应的托卡马克装置所产生的 14.1 MeV 高能聚变中子对材料的辐照损伤问题是聚变能研发中尚未攻克的关键问题之一。高能中子穿透性强,对聚变堆材料造成辐照损伤及材料的活化效应,对于 2~4 GW 聚变能及中子壁负荷 2~3 MW/m² 的托卡马克聚变堆来说,其面向等离子体材料所受到的中子辐照损伤达 30 dpa/a。而聚变中子与聚变堆内等离子体高达 20 MW/m² 的准稳态高热负荷,边缘局域模爆发期间 GW/m² 量级的瞬态极端热负荷及高能粒子流的协同辐照效应将进一步加剧材料微观结构的改变与机械、热学等性能的退化,包括辐照硬化、辐照脆化、辐照肿胀及辐照引起的热蠕变等,严重影响聚变堆的安全、运行寿命及运行成本。

5.5 其他关键技术

托卡马克聚变堆稳态运行下具有热耗散问题,装置主机燃烧室内部部件与冷却回路设计的关键参数,是保证聚变堆运行占空比、运行寿命与运行安全的重要因素。目前,对托卡马克聚变堆燃烧等离子体运行的热耗散机理尚处在理论模拟阶段。无论从其能流还是杂质输运的重要性,刮削层的实验及模拟研究都是国际聚变界重点关注的课题。

近年来,人工智能技术突飞猛进,并成功应用于各科学研究领域。人工智能在等离子体状态预测和等离子体控制方面展现出巨大潜力,开发先进的有效控制算法和实时反馈系统为聚变能研究提供了有效的控制手段。先进算法控制理论与高性能反馈控制的集成应用可预测、控制及抑制等离子体的瞬变事件,可使聚变堆运行在优化的安全运行区域内,极大改善聚变堆的可靠运行状况,未来有望在等离子体运行控制中完全取代人工干预。

超导磁体技术是实现全超导托卡马克的关键。

聚变堆需要大规模、高性能的超导磁体系统来产生强磁场。目前,高温超导材料 REBCO 是主要研究方向。然而,大型超导磁体的制造工艺、冷却系统和失超保护等方面仍存在诸多挑战。提高超导材料的临界电流密度、降低制造成本、提高系统可靠性是未来研究的重点。强中子辐照可能导致 REBCO 带材临界电流下降,需验证辐照后性能。

国际聚变界仍在探索先进托卡马克概念,如球形托卡马克、紧凑型托卡马克等新型设计。这些概念旨在提高等离子体性能、降低装置规模和成本。未来高效紧凑型聚变堆无疑将采用全超导托卡马克,特别是高温超导技术的应用。

6 聚变堆超导托卡马克展望

为实现聚变商业化,托卡马克聚变反应堆的能量增益必须足够大。1955 年,约翰·D 劳逊通过计算核聚变等离子体中的能量平衡提出了劳逊判据,给出了实现核聚变净能量增益的条件。聚变反应的能量增益与等离子体的温度、密度及其能量约束时间相关,也就是“聚变三乘积”。当核聚变反应完全不需要外部加热就可以自持时,称为聚变点火,即 Q 值为无穷。经国际聚变界几十年的持续努力,“聚变三乘积”有了较大的提高(图 19^[52])。

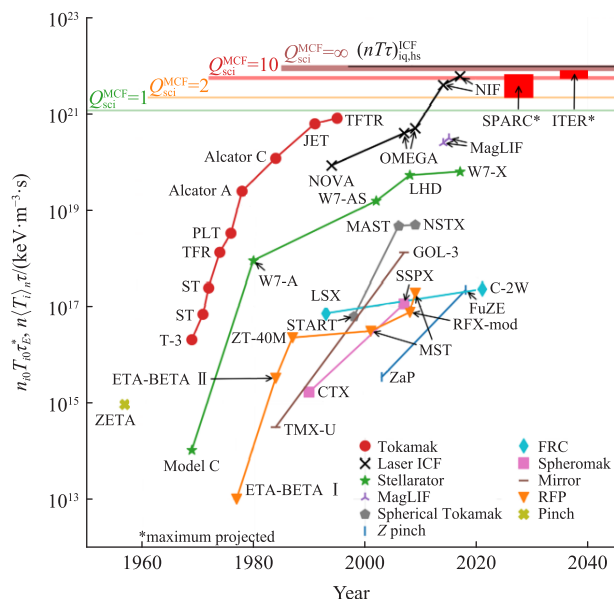


图 19 不同路径聚变技术方案的装置已实现及预期的“聚变三乘积”

聚变堆托卡马克的发展将沿着聚变实验堆(如正在建造的 ITER)、示范发电堆(DEMO)和聚变能商业化应用 3 个阶段推进。示范发电堆建设是连接实验堆和商用堆的关键环节。目前,包括中国在内的多个国家正在规划聚变示范堆,如中国聚变工程示范堆(Chinese Fusion Engineering Demonstration Reactor, CFEDR)、欧盟的 EU-DEMO、日本的 JA-DEMO、美国的 FNSF(Fusion Nuclear Science Facility, 聚变核科学设施)、英国的 STEP(Spherical Tokamak for Energy Production, 球形托卡马克能源生产)、韩国的 K-DEMO 以及俄罗斯的 TRT(Tokamak Thermonuclear Reactor, 托卡马克热核反应堆)等(不包括商业公司)。这些示范堆旨在验证托卡马克聚变能发电的工程可行性,为后续商用堆的设计和建造奠定基础。

表 1 给出了世界主要国家和地区托卡马克型聚变示范堆及商业化发电规划。需要说明的是,表 1 中给出的时间表依据的是各国官方的信息,不包括聚变能商业公司的规划,而各国计划在过去的 5 年中都出现过调整,仍存在进一步调整的可能性。

从表 1 可以看出,各国规划集中在 2030—2050 年实现聚变堆示范发电,且瞄准在 21 世纪 50 年代(2050s)建成托卡马克聚变商业电站的目标。国际聚变示范堆的竞争取决于工程验证的成败,目前超导托卡马克仍是主流技术路线,但技术细节(如磁体类型、包层设计)呈现差异化。若关键技术得以突破,核聚变有望在 21 世纪下半叶成为基荷能源,重塑全球能源格局。

表 1 中国及其他国家和地区托卡马克示范堆与商用堆规划

国家/地区	示范堆名称	目标	预期时间
中国	CFEDR	填补ITER与商业堆之间的技术空白,最高可实现 $Q>20$ 、验证聚变堆超导技术,发电功率百万千瓦级	2050前示范发电 2050s商业发电
欧盟	EU-DEMO	验证聚变电厂的经济性、可靠性和持续性,验证聚变堆超导技术,氚增殖率 >1.1 ,连续发电500 MW	2050前示范发电 2050s商业发电
美国	FNSF	验证氚燃料自持、材料辐照耐受性及聚变系统集成技术	2040前示范发电 2050s商业发电
日本	JA-DEMO	紧凑型托卡马克,验证聚变堆高温超导技术,氚增殖及燃料循环技术,实现500 MW稳态净电力输出	2040前示范发电 2050s商业发电
英国	STEP	全球首个商用球形托卡马克,验证氚燃料自持、验证聚变堆高温超导技术,100 MW电力输出	2040前示范发电 2050s商业发电
韩国	K-DEMO	验证稳态高约束模式(H-Mode)运行,氚自持、验证聚变堆高温超导技术,百万千瓦级发电	2040前示范发电 2050s商业发电
俄罗斯	TRT	发电功率500 MW, $Q>10$	2030前示范发电 2050s商业发电

7 聚变能商业化展望

根据国际能源署发布的《2023 年世界能源展望》报告^[53],即使世界各国能够不折不扣地执行已宣布的能源政策,2050 年化石能源占比仍将达 55%,市场规模约 3 万亿美元/年。若聚变能的开发可在 2040 年代商业化,将有望在 2050 年占据 3 万亿美元/年化石能源的市场。所以聚变能的商业化前景备受关注。

美国的聚变工业协会(Fusion Industry Association, FIA)自 2021 起,每年发布全球聚变能开发商业公司调查报告。其 2024 年发布的全球聚变商业公司

报告再次印证了:全球聚变能开发行业保持持续增长态势,投资者对聚变能的发展潜力充满热情^[54]。

据不完全统计,当前全球范围内有 50 多家商业公司正致力于实现聚变能源商业化。根据 FIA 对 45 家聚变公司的调研信息,行业融资规模持续攀升。仅 2023 年一年新增投资额突破 10 亿美元,各国聚变能商业公司收到的总投资规模已达约 71 亿美元。需要特别注意的是,政府机构通过直接拨款或公私合作机制提供给聚变商业公司的相关资金总额已从 2023 年的 2.71 亿美元攀升至 2024 年的 4.26 亿美元。这不仅预示着各国政府对聚变能开发的关注度

在提升,更昭示着一个关键共识的形成,即:将聚变能源技术路径可行性验证的聚变试验堆工程交由市场主体主导。

从近几年的全球聚变商业公司调查报告可以看出,国际上的聚变商业公司矢志不渝地锚定在 21 世纪 30 年代实现聚变发电的战略目标,其中超半数公司将技术突破窗口锁定在 21 世纪上半叶。调研数据显示,89% 的受访企业确信聚变能将于 21 世纪 30 年代末期接入电网,逾 7 成公司更将这一里程碑提前至 2035 年前。

另外,需要指出的是,目前国际上也在积极探索非托卡马克型的聚变堆技术路线,如仿星器(stellarator)、场反位形(field-reversed configuration)、Z 箍缩(Z-pinch)、磁化靶(magnetized target fusion)、磁镜(magnetic mirror)、悬浮偶极子(levitated dipole)等。特别是国际上兴起的众多聚变商业公司在积极探索非托卡马克型技术路线及无中子聚变,如美国 Helion Energy 公司号称将在 2028 年采用氘-氦-3 为燃料及场反位形聚变堆实现 50 MW 电力输出。

8 结论

聚变能的实现不仅将彻底改变人类的能源格局,还将为人类应对气候变化、实现可持续发展提供重要解决方案。

从早期的小型托卡马克实验装置到当今的大型全超导托卡马克 ITER,这一领域取得了显著进展,高温超导技术的发展为更早实现可控核聚变能源带来了希望。ITER 等国际大科学工程的推进,为聚变能研发提供了重要平台。然而,实现聚变能商业化应用仍面临诸多挑战,需要在等离子体物理、材料科学、工程技术等多个领域取得突破。

未来,随着聚变示范堆的建设、先进概念的探索和新技术的应用,聚变能有望逐步走向实际应用。然而,这一过程需要长期、持续的努力,以及全球范围内的合作与投入。在政府资本与社会资本双重赋能的创新生态中,聚变商业公司正通过持续快速的技术迭代,让清洁能源“终极解决方案”的愿景加速实现。

参考文献(References)

- [1] Singer B, Bingham D R, Corbett B, et al. AI/data centers' global power surge and the Sustainability impact[R]. Goldman Sachs, 2024.
- [2] 杨军, 张恩昊, 郭志恒, 等. 全球核能科技前沿综述[J]. 科技导报, 2020, 38(20): 35-49.
- [3] 叶奇蓁. 核电高质量创新发展[Z]. 中核工程2025年科学技术委员会全体大会, 2025.
- [4] 杨军, 孙培杰, 彭翠婷, 等. 世界核能科技发展前沿进展[J]. 科技导报, 2024, 42(23): 7-30.
- [5] Armstrong R C, Whyte D G, Field R, et al. The role of fusion power in deep decarbonization scenarios[R]. MIT Energy Initiative (MITEI), MIT Plasma Science and Fusion Center, 2024.
- [6] Shafranov V D, Bondarenko B D, Goncharov G A, et al. On the history of the research into controlled thermonuclear fusion[J]. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 2001, 171(8): 877.
- [7] Sakharov A D, Tamm I E. Possible configuration of a thermonuclear reactor[J]. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1950, 1: 733-734.
- [8] Arnoux Robert. Which was the first "tokamak"—or was it "tokomag"?[EB/OL]. (2008-10-27)[2025-05-12]. <https://www.iter.org/node/20687/which-was-first-tokamak-or-was-it-tokomag>.
- [9] Waldrop M M. Pursuing fusion power[J/OL]. Knowable Magazine, (2023-11-01)[2025-05-12]. <https://knowablemagazine.org/content/article/physical-world/2023/the-challenge-of-fusion-power>.
- [10] Smirnov V P. Tokamak foundation in USSR/Russia 1950-1990[J]. Nuclear Fusion, 2010, 50(1): 014003.
- [11] Peacock N J, Robinson D C, Forrest M J, et al. Measurement of the electron temperature by Thomson scattering in tokamak T3[J]. Nature, 1969, 224(5218): 488-490.
- [12] Hawryluk R J. Preparing for TFTR D-T Experiments[R]. Princeton: Princeton Plasma Physics Laboratory, 2014.
- [13] Hawryluk R J. Results from D-T experiments on TFTR and implications for achieving an ignited plasma[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1999, 357(1752): 443-469.
- [14] Lithuanian Energy Institute. European researches achieve fusion energy record[R]. Kaunas: Lithuanian Energy Institute, 2022.
- [15] EUROfusion. History of Fusion[EB/OL]. (2022-02-10)[2025-05-12]. <https://euro-fusion.org/fusion/history-of-fusion/>.
- [16] Gibney E. Nuclear-fusion reactor smashes energy record[J].

- Nature, 2022, 602(7897): 371.
- [17] Scott-Mearns N, Windridge M. New fusion energy record from JET's final tritium experiments[EB/OL]. (2024-02-09)[2025-05-12]. <https://fusionenergyinsights.com/blog/post/new-fusion-energy-record-from-jet-s-final-tritium-experiments>.
- [18] 万宝年. 人造太阳: EAST全超导托卡马克核聚变实验装置[M]. 杭州: 浙江教育出版社, 2017.
- [19] Fujita T, Kamada Y, Ishida S, et al. High performance experiments in JT-60U high current divertor discharges[R]. Japan Atomic Energy Research Institute.
- [20] EuroFusion. Fusion experiment ASDEX Upgrade in Garching near Munich[EB/OL]. (2024-06-09)[2025-05-12]. <https://euro-fusion.org/ml-content/asdex-upgrade/>.
- [21] Wagner F, Becker G, Behringer K, et al. Regime of improved confinement and high beta in neutral-beam-heated divertor discharges of the ASDEX tokamak[J]. Physical Review Letters, 1982, 49(19): 1408-1412.
- [22] Keilhacker M, Team A. The ASDEX divertor tokamak[J]. Nuclear Fusion, 1985, 25(9): 1045-1054.
- [23] Hellsten T. Plasma physics and controlled nuclear fusion research 1978[J]. Nuclear Instruments and Methods, 1979, 166(3): 591.
- [24] Greenwald M, Gwinn D, Milora S, et al. Energy confinement of high-density pellet-fueled plasmas in the alcator C tokamak[J]. Physical Review Letters, 1984, 53(4): 352-355.
- [25] 可控核聚变. 紧凑高场托卡马克装置: 美国 Alcator C-Mod[EB/OL]. (2025-05-31)[2025-05-31]. <https://www.nuclear-fusion.com.cn/blog/alcator-c-mod>.
- [26] Greenwald M, Bader A, Baek S, et al. 20 years of research on the alcator C-mod tokamak[J]. Physics of Plasma, 2014, 21: 110501.
- [27] Plasma Science and Fusion Center. New record for fusion[EB/OL]. (2016-10-14) [2025-05-12]. <https://energy.mit.edu/news/new-record-fusion/>.
- [28] Haack J. Superconductivity for nuclear fusion: Past, present, and future[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2025, 50: 3233-3237.
- [29] Chernoplekov N A, Kiknadze G I, Nenarochkin P V. On the testing of large superconducting magnet systems[J]. Cryogenics, 1983, 23(3): 168-169.
- [30] Khvostenko P P, Anashkin I O, Bondarchuk E N, et al. Current status of tokamak T-15MD[J]. Fusion Engineering and Design, 2021, 164: 112211.
- [31] Zushi H, Itoh S, Hanada K, et al. Overview of steady state tokamak plasma experiments in TRIAM-1M[J]. Nuclear Fusion, 2003, 43(12): 1600-1609.
- [32] Zushi H, Nakamura K, Hanada K, et al. Overview of steady-state tokamak operation and current drive experiments in TRIAM-1M[C]. 20th IAEA Fusion Energy Conference. Vilamoura, 2004.
- [33] Pamela J. Ten years of operation and developments on tore supra[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 46(2/3/4): 313-322.
- [34] van Houtte D, Martin G, Bécoulet A, et al. Recent fully non-inductive operation results in Tore Supra with 6 min, 1 GJ plasma discharges[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(5): L11-L15.
- [35] CEA. Nuclear fusion: WEST beats the world record for plasma duration![EB/OL]. (2025-02-18) [2025-05-12]. <https://www.cea.fr/english/Pages/News/nuclear-fusion-west-beats-the-world-record-for-plasma-duration.aspx>.
- [36] Schmidt J A, Thomassen K I, Goldston R J, et al. The design of the tokamak physics experiment (TPX)[J]. Journal of Fusion Energy, 1993, 12(3): 221-258.
- [37] Wu S T. An overview of the EAST project[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5/6/7/8/9/10/11/12/13/14): 463-471.
- [38] 中国科学院. 中国“人造太阳”实现1.2亿度101秒等离子体运行[EB/OL]. (2022-01-11) [2025-05-12]. https://www.cas.cn/jh/202201/t20220111_4821653.shtml.
- [39] 中国科学院. EAST装置实现1056秒的长脉冲高参数等离子体运行[EB/OL]. (2021-12-31) [2025-05-12]. https://www.cas.cn/syky/202201/t20220104_4820592.shtml.
- [40] 蔡其敏. 全超导托卡马克EAST装置实现亿度千秒高约束模等离子体运行[EB/OL]. (2025-01-24) [2025-05-12]. http://www.ipp.cas.cn/xwdt/ttxw/202501/t20250120_410191.html.
- [41] Han H, Park S J, Sung C, et al. A sustained high-temperature fusion plasma regime facilitated by fast ions[J]. Nature, 2022, 609(7926): 269-275.
- [42] Ko W H, Yoon S W, Kim W C, et al. Overview of the KSTAR experiments toward fusion reactor[J]. Nuclear Fusion, 2024, 64(11): 112010.
- [43] 可控核聚变. 解锁全球最大在运托卡马克装置-JT-60SA[EB/OL]. (2024-06-13) [2025-05-12]. <https://www.nuclear-fusion.com.cn/blog/jt-60sa>.
- [44] Tomarchio V, Barabaschi P, Pietro E D, et al. Status of the JT-60SA project: An overview on fabrication, assembly and future exploitation[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 123: 3-10.
- [45] Kamada Y. ITER overview[R]. Saint-Paul-lès-Durance: ITER Organization, 2024.
- [46] Alex M. ITER, an introduction[Z]. Saint-Paul-lès-Durance:

- ITER Organization, ITER Lectures, 2018.
- [47] Loarte A, Pitts R A, Wauters T, et al. The new ITER baseline, research plan and open R&D issues[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2025, 67: 065023.
- [48] Golfinopoulos T, Michael P C, Ihloff E, et al. Building the runway: A new superconducting magnet test facility made for the SPARC toroidal field model coil[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 34(2): 1–16.
- [49] MIT, PSFC, CFS. Fusion energy: The high-field path to fusion energy, SPARC[R]. MIT, PSFC, CFS, 2024.
- [50] 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.
- [51] Abdou M. Overview of the tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self-sufficiency and other tritium issues [C]//4th IAEA DEMO Programme Workshop November 15th–18th. Karlsruhe, 2016.
- [52] Wurzel S E, Hsu S C. Progress toward fusion energy breakeven and gain as measured against the Lawson criterion[J]. Physics of Plasmas, 2022, 29(6): 062103.
- [53] International energy agency. World energy outlook 2023[R]. International energy agency, 2023.
- [54] Fusion industry association. The global fusion industry in 2024, Fusion companies survey by the fusion industry association[R]. Fusion industry association, 2024.

Key breakthroughs and prospects of Tokamak fusion devices

WU Songtao

Fusion Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract This paper provides a comprehensive review of the development, current status and future prospects of Tokamak-type nuclear fusion devices in the world. First, it expounds the advantages of fusion energy compared with other energy sources, such as its high safety, abundant fuel reserves, high energy density, no greenhouse gas emissions like carbon dioxide and environmental friendliness. Subsequently, it focuses on reviewing the historical development of the Tokamak, from the concept's inception in the 1950s to the current construction of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER). It highlights the renowned tokamak devices that have made significant influential achievements and critical technological breakthroughs in the world, such as those that have validated the scientific feasibility of controlled nuclear fusion, achieved the highest fusion energy gain (Q), set world records for plasma triple products, reached the highest plasma temperatures, or revealed important physical phenomena, mechanisms, and new or advanced operation modes. Next, the paper also examines the critical scientific and technological challenges yet to be resolved for Tokamak fusion reactors, such as fuel cycles, tritium self-sufficiency, and materials issues. Finally, it offers perspectives on the future development direction of Tokamak fusion reactors and the commercialization prospects of fusion energy. This review aims to serve as a reference for the field of nuclear fusion research.

Keywords tokamak; nuclear fusion; fusion energy; fusion reactor; plasma; superconductivity ●



(责任编辑 赵庆圆)