



IAEA

国际原子能机构

国际原子能机构 2024年 世界聚变展望

第二版

国际原子能机构
2024年
世界聚变展望

“聚变能的 历程见证 人类智慧和 毅力。”

原子能机构总干事

拉斐尔·马里亚诺·格罗西

今天，聚变能的发展势头已不可否认。受这一进展的启发，我去年推出了国际原子能机构《世界聚变展望》，作为跟踪聚变能最新发展的全球综合参考。这份出版物得到了积极反馈，我很欣慰。

聚变能的历程见证人类智慧和毅力。为了更好地支持这一历程，我设立了世界聚变能小组，作为专门促进跨领域协作的一项全球倡议。我们这个工作组不仅抱负远大，而且目标清晰，就是要加快聚变能的研究、发展、示范和应用。我们正通过汇聚工业界、政府、学术界和监管机构，团结一致追求共同目标，为一个有凝聚力的聚变能社区奠定基础。

在这项事业中，各国政府发挥着关键作用。战略性公共投资、强有力的政策支持和国际合作对于聚变能从实验室到电网的过渡至关重要。全球聚变社区的成功取决于这些坚持不懈的努力。我鼓励建立与风险相称的监管框架，务必清晰明确，以加快聚变能的发展并吸引对该部门的投资。

今年，我还邀请了一批国际专家来确定了一系列聚变关键要素，为全世界的科学家、工程师、管理者、企业家、政策制定者和利益相关者提供中短期的全面路线图和宝贵的指导。

随着聚变能进入关键阶段，我们必须加强所有部门的努力：开发赋能技术和材料，加强公私合作模式，利用私营资本实现商业可行性，以及培养一支全球性职工队伍。聚变能不仅需要系列广泛的专门知识，还需要从技术工人到法律、政策和沟通方面的专业人员，他们都将为全球经济做出贡献。

投资聚变能研究及其商业化有望带来巨大的经济效益，远远超过脱碳的潜力。聚变衍生技术可应用于医疗保健、空间推进、工业成像、地热钻探和核废物管理等领域，开辟能源生产以外的新商机。

随着我们对这项突破性技术错综复杂的各个方面的探索，我们坚定不移地决心：利用聚变能电力，建设一个可持续发展、繁荣与和平的世界。聚变时代不再只是一个愿望，而已成为我们触手可及的现实，我们将共同实现梦想。

今年的国际原子能机构《世界聚变展望》不仅仅是跟踪发展情况和主要成就，还重点介绍了新兴电厂概念、预计发展时间表、政策框架以及公共和私人投资趋势。报告还涵盖了研究成果指标，并提供了地区和部门展望。我相信，国际原子能机构《世界聚变展望》将继续成为能源、政策和研究部门利益相关方努力推动聚变能发展的宝贵导则。■



▲
原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西
2024年3月在比利时演讲。



“从长远来看，聚变能的发展是一个潜在的转折点，也是实现和平与安全的可持续未来的重要手段。”

意大利副总理兼外交与国际合作部部长
安东尼奥·塔亚尼

聚变能：史无前例的挑战、未来的机遇

我们很荣幸能够共同组织和主办世界聚变能小组首届部长级会议。这次活动体现了意大利政府对国际合作的支持，以及我们对技术进步的长期承诺：技术进步是发展、福祉和繁荣的关键推动力。

在当前地缘政治日益动荡的情况下，能源安全是优先事项。从政治角度看，聚变能具有应对这些挑战和确保能源独立的巨大潜力，同时还能缓解与化石燃料开采相关的地缘政治紧张局势。

▲
意大利副总理兼外交与国际合作部部长安东尼奥·塔亚尼
(图片来源：意大利政府)。

我想，世界上仍然缺乏高效电力基础设施的广大地区由此可以更好地使用电力。

核部门开发新技术可能是能源转型和应对气候变化道路上的重要一步。核能已作为一种清洁能源纳入了欧洲联盟的分类法，我认为我们不能错过新一届欧洲立法机构启动带来的机会。为了减少对化石燃料的依赖，我们必须考虑多样化的能源结构，其中聚变电力与可再生能源、氢和小型模块堆等新兴核技术共存。这也将对能源费用产生积极影响，提高我们的企业竞争力，促进经济增长。

换言之，从长远来看，聚变能的发展是一个潜在的转折点，也是实现和平与安全的可持续未来的重要手段。

对创新的推动和投资的增加将使聚变能成为现实。意大利希望凭借众多公共和私营实体的专门技术，继续走在这一领域的前列。

其关键是在技术、科学和资金方面的努力。促进国际合作和公私合作模式至关重要，目的是汇集急需的巨额投资，并将先进的基础设施和高度专业化的专门知识投入共同使用。这也是世界聚变能小组的目标，该小组将在防止这项科学工作变成新的地缘政治竞技场方面发挥至关重要的作用。

意大利一直处于核能领域技术研究和创新的前沿，开发了首座核反应堆，意大利物理学家恩里科·费米由此奠定了现代核物理学的基础。

“对创新的推动和投资的增加将使聚变能成为现实。”

如今，我们的国家新技术、能源和可持续经济发展局（新技术、能源和可持续经济发展局）是聚变能领域的牵头研究机构，其位于弗拉斯卡蒂的研究中心是公共、私营和学术部门之间良性合作的一个明显范例。

我还想到了我们的领先能源公司，是它们使我们的创新努力超越了国界，参与了许多革新型项目。

意大利愿意分享其专门知识，为大幅缩小工业化国家与发展中国家之间的知识差距做出贡献。

学术合作、教育和职业培训是核心，加上私营部门的参与，共同构成了我们对发展伙伴特别是非洲发展伙伴的新方案。这一立场也是意大利担任七国集团主席国和我们在欧洲层面的行动的核心。

这一点非常重要，因为核能和聚变能的新时代有赖于年轻的科学家和工程师尽其所能地努力奋斗。

前路漫漫，错综复杂，而且风险很大。我们必须意识到，我们今天的选择将决定未来世界的社会、经济和地缘政治格局。

让我们共同努力，为后代创造美好未来。 ■



我们都认识到，需要为气候变化和能源安全等全球挑战找到永久解决方案。为了实现这一目标，我们必须铺就一条坚实的脱碳道路，考虑我们在气候、能源和环境政策方面的现有承诺。这包括到2050年实现温室气体净零排放，将全球温升幅度限制在1.5摄氏度以内。与此同时，我们需要以侧重于净零排放、循环经济和气候适应能力的方式实现经济和社会体系转型，同时确保可持续的包容性增长，强化经济并加快能源转型。

在应对全球气候和环境危机的政策制定过程中，值得重申科学驱动方案的重要性。这就需要采用中立的技术方案，探索各种解决办法，以满足全球日益增长的能源需求，促进可持续发展。

聚变能有可能为这一挑战提供永久解决方案。

成功的聚变能生产可带来巨大的社会、环境和经济效益，是一种潜在的零排放、安全可靠且几乎无限的清洁能源。未来聚变电厂的商业化前景促使各国政府、欧洲联盟和世界各地公司资助的大型研究计划在未來十年内开发示范设施。国际合作将加速聚变技术的开发和验证，更加需要全球参与解决研究挑战，开发国际供应链和职工队伍。

全球聚变能部门正在大踏步加速发展，越来越多的私营公司从事磁约束和惯性约束聚变开发或者混合方案的制订，吸引了来自私营实体和政府的大量投资。一些公司计划在2040年至2050年间建造能够发电的聚变电厂，早于公共研究计划设想的本世纪中叶。未来几年，国际热核实验堆将在调试、等离子体假想方案、氦管理和核问题、电厂安全和利用率、远程操作、动力排气和放射性废物管理等方面提供宝贵

“我们都认识到， 需要为气候变化 和能源安全等全 球挑战找到永久 解决方案。”

意大利环境与能源安全部部长
吉尔伯托·皮切托·弗拉廷

的见解。国际热核实验堆项目已提供了聚变电力生产电厂部件和子系统的诸多建造技术相关信息。最近，国际热核实验堆宣布计划扩大其公私合作模式的方案，让私营部门公司参加聚变倡议，让积极参与聚变电厂开发的公司、最终用户、供应链、大学和研究中心参与进来。国际热核实验堆项目以及新装置的开发突出表明，从设计过程一开始就需要供应链参与进来，方能优化经验和技能。

在意大利担任主席国的七国集团峰会期间，七个成员国的领导人回顾了《七国集团气候、能源和环境部长会议公报》（都灵公报）中的承诺，将聚变能列入应对全球挑战的合作领域，并承诺建立七国集团聚变能工作组。这进一步表明，人们日益认识到聚变能在实现长期能源安全和气候目标方面的重要作用。

2023年9月21日，我建立了国家可持续核能平台，让核领域的主要科学组织和公司承担起制定可能路线图的任务，重新考虑将核电生产作为意大利能源结构中一种可交付的脱碳能源。这个平台评定了将促成意大利自2035年起启用核能的公用事业和可行性，目标是支持可再生能源的全面部署，同时重点关注聚变能的研究与发展及中长期部署。

结果，意大利国家能源和气候计划根据国家可持续核能平台的核数据和分析，重新考虑将核能作为意大利能源结构的一部分，其中纳入可持续的裂变技术（如小型模块堆、先进模块堆和微型反应堆），同时包括聚变能从2050年左右开始可能做出的贡献。

虽然意大利在近40年前就停止了核能生产，但公共研究实体和相关行业仍在继续投资和发展核技术研究，包括聚变能。因此，意大利现在可以利用其研究组织、学术界、公司和成熟产业现有的技术专门知识和能力，打造一个强大的聚变产业，作为有紧密协调的国家框架的一部分。

意大利政府致力于发展聚变能科学技术。在环境与能源安全部的指导下，意大利国家新技术、能源和可持续经济发展局（新技术、能源和可持续经济发展局）已为促进聚变技术进步协调了21个国家合作伙伴，包括研究实体、大学和龙头企业。意大利公司经确定的国际热核实验堆系统和部件开发合同超过15亿欧元，包括筹备国际热核实验堆的运行及其下一步工作。

最近，国有企业RSE也开始从事惯性约束聚变材料开发；凭借这项专门知识，RSE正在成为聚变能开发领域的重要国际合作伙伴。

意大利拥有多座聚变实验研究设施，包括罗马附近弗拉斯卡蒂和亚平宁山脉北部布拉西莫尼的新技术、能源和可持续经济发展局研究中心、帕多瓦的RFX联合体以及米兰的国家研究委员会等离子体科学技术研究所。这些设施都极大地促进了聚变能领

域的科学进步。新的偏滤器托卡马克试验研究设施正在弗拉斯卡蒂的新技术、能源和可持续经济发展局研究中心建造，这是新技术、能源和可持续经济发展局、能源公司—埃尼公司以及意大利各研究所和大学组成的公私联合体的一部分，目的是为未来的聚变设施验证偏滤器技术。

埃尼公司是第一批投资聚变技术的能源公司之一，早在2018年便成为联邦聚变系统公司的战略股东，旨在加速聚变产业化。

为了找到验证聚变能可行性方面的其余挑战的解决方案，我们必须通过寻找加强研究与发展的新伙伴关系，鼓励公私合作模式，推动聚变发展创新和资源共享，来拓展国际合作的范围。

随着聚变从一项科学事业走向产业现实，但同时还有技术空白需努力填补，我们必须继续支持全球聚变事业迄今为止特有的协作和基础设施共享这一积极氛围。为了促成有效的技术转让并支持聚变市场的全球增长，需要具备针对聚变电厂工艺和产品的明晰的知识产权框架。

同时，我想强调制定新监管方案的重要性，目的是确保与聚变非常有限的危害成比例的高水平安全。这些方案应考虑到这项新兴技术的创新性，以便能够安全部署和运行聚变电厂。各国政府、原子能机构和各安全主管部门之间的国际协作对于聚变前沿国家之间的监管协调方案至关重要，将为聚变部门提供其所需的可预测性和信心。

意大利的地理位置使其未来可以成为地中海聚变能中心，作为“马太计划”的一部分，它将自己定位为应对地区能源安全和可持续性挑战以及促进能力建设的领导者。意大利愿意为支持阿尔及利亚、埃及、摩洛哥和突尼斯等国推进聚变技术而分享其广博的知识和专业技能。有针对性的职工队伍发展和教育计划可以为发展随后能扩展到聚变应用的技能提供切入点。

意大利拥有几乎独一无二的科学、技术、工程和工业技能组合，这使其能够在意大利和欧洲聚变设施的开发和建造中发挥领导作用。

为此，意大利很荣幸能够共同主办世界聚变能小组首届部长级会议。该小组将在这一关键时刻发挥催化剂的作用，这一时刻的团结一致努力对于快速推动聚变能的发展至关重要。随着全球追求聚变能的势头日盛，这项技术为未来提供丰富、清洁和可持续能源解决方案的潜力也日益明显，七国集团认识到了这一点。聚变领域最近的突破引发了各利益相关方的极大兴趣和投资。

“气候公约”缔约方大会第29届会议前夕在意大利举行的世界聚变能小组成立会议是全球寻求先进能源解决方案的关键时刻。会议旨在最大限度地扩大聚变能讨论在更广泛国际气候谈判框架内的影响力和知名度。世界聚变能小组不仅将强调聚变能科学进步的重要性，还将促进这一变革性技术的国际合作与投资，目标是在塑造能源未来、确保实现全球气候目标、确保长期可持续能源生产方面发挥关键作用。

意大利期待在全球范围内推进聚变能，并致力于支持和资助该领域的研究和创新。意大利朝气蓬勃的聚变能计划将涉及意大利的众多研究组织、学术界及相关产业，并将与原子能机构开展国际合作。

意大利欢迎并将继续大力推动原子能机构及其成员国在聚变能领域的工作。■

致谢

国际原子能机构《2024 年世界聚变展望》由Sayed Ashraf负责协调。
本出版物由Matteo Barbarino主持编写。

参与起草和审查的人员

A. Anikeev	国家原子能公司（俄罗斯联邦）
V. Artisiuk	国际原子能机构
M. Ascic	国际原子能机构
S. Ashraf	国际原子能机构
M. Barbarino	国际原子能机构
J. Barton	Helion能源公司（美利坚合众国）
C. Bellehumeur	Stellarex公司（美利坚合众国）
G. Catena	高斯聚变公司（德国）
W. Chae Kim	韩国聚变能研究所（大韩民国）
C. Cheong	英国原子能管理局（英国）
J. Donovan	国际原子能机构
G. Federici	欧洲聚变联盟（德国）
M. Finnerty	国际原子能机构
N. Ganzarski	nT-Tao（以色列）
A. Goodman	TAE科技公司（美利坚合众国）
A. Jasper	Zap能源公司（美利坚合众国）
D. Johnson	通用聚变公司（加拿大）
T. Kaneko	国际原子能机构
T. Ma	劳伦斯·利弗莫尔国家实验室（美利坚合众国）
P. Obeng Oforiwaa	国际原子能机构
T. Paluska	联邦聚变系统公司（美利坚合众国）
F. Sciortino	比邻星聚变公司（德国）
W. Solomon	通用原子公司（美利坚合众国）
L. Strömstedt	诺瓦特伦聚变集团（瑞典）
I. Subbiah	联邦聚变系统公司（美利坚合众国）
J. Surrell	朗维尤聚变能源系统公司（美利坚合众国）
R. Wagner	国际原子能机构
S. White	托卡马克能源公司（英国）
S. Wurzel	聚变能基地（美利坚合众国）
N. Yoshimura	Helical聚变株式会社（日本）
S. Yoshiteru	量子科学技术研究开发机构（日本）
G. Zhang	中国科学技术大学（中国）

本出版物得到了日本政府的宝贵支持。

聚变 进展¹

17 聚变 电厂

背景与 方案²⁹

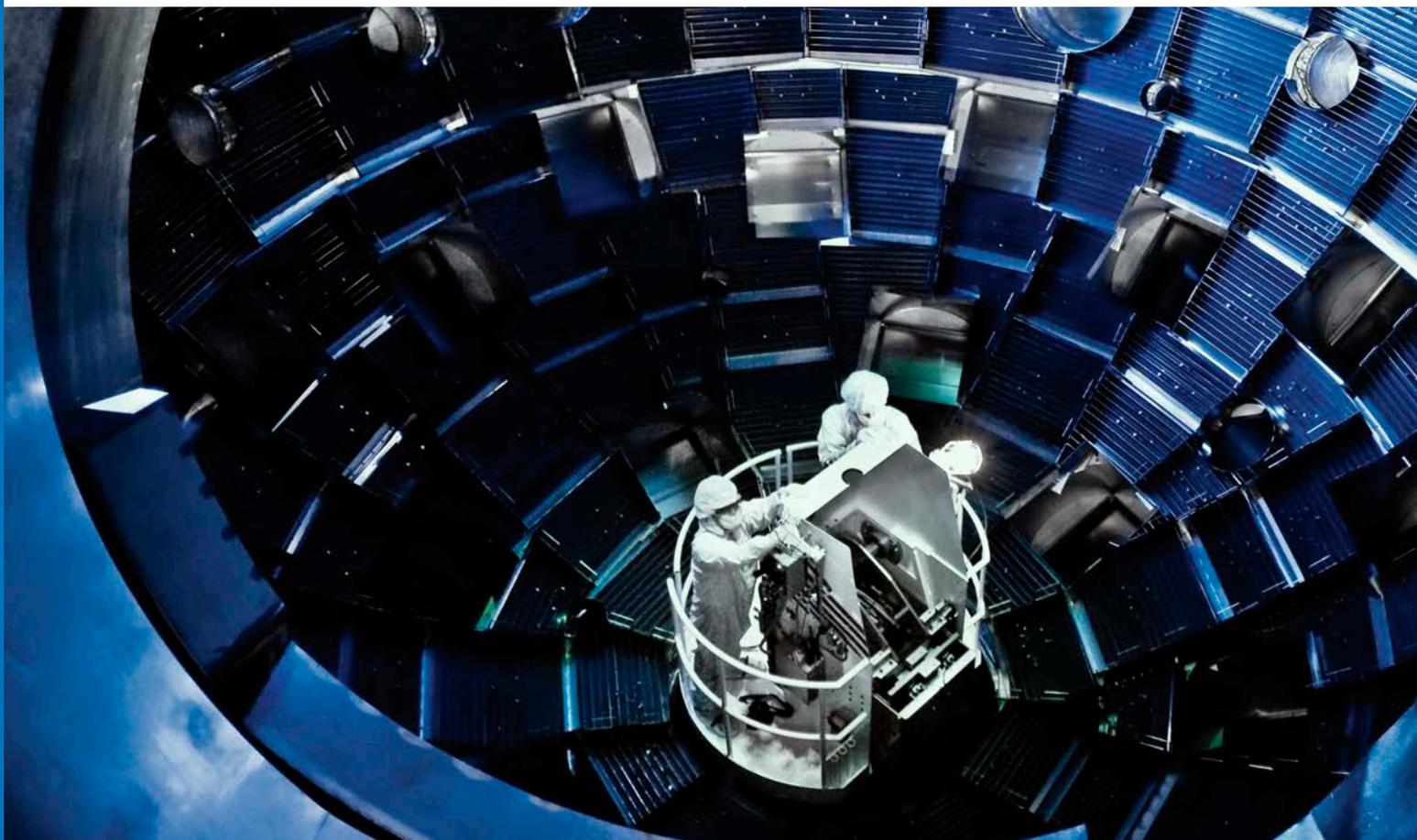
45 展望

聚变
数据 63

聚变

进展

最新进展和突破



首个惯性约束
聚变概念

1960

激光的发明

1970

Janus激光器

开创性论文发表

Argus

Shiva

1980

Nova (30 kJ)

1990

国家点火装置的关键决定

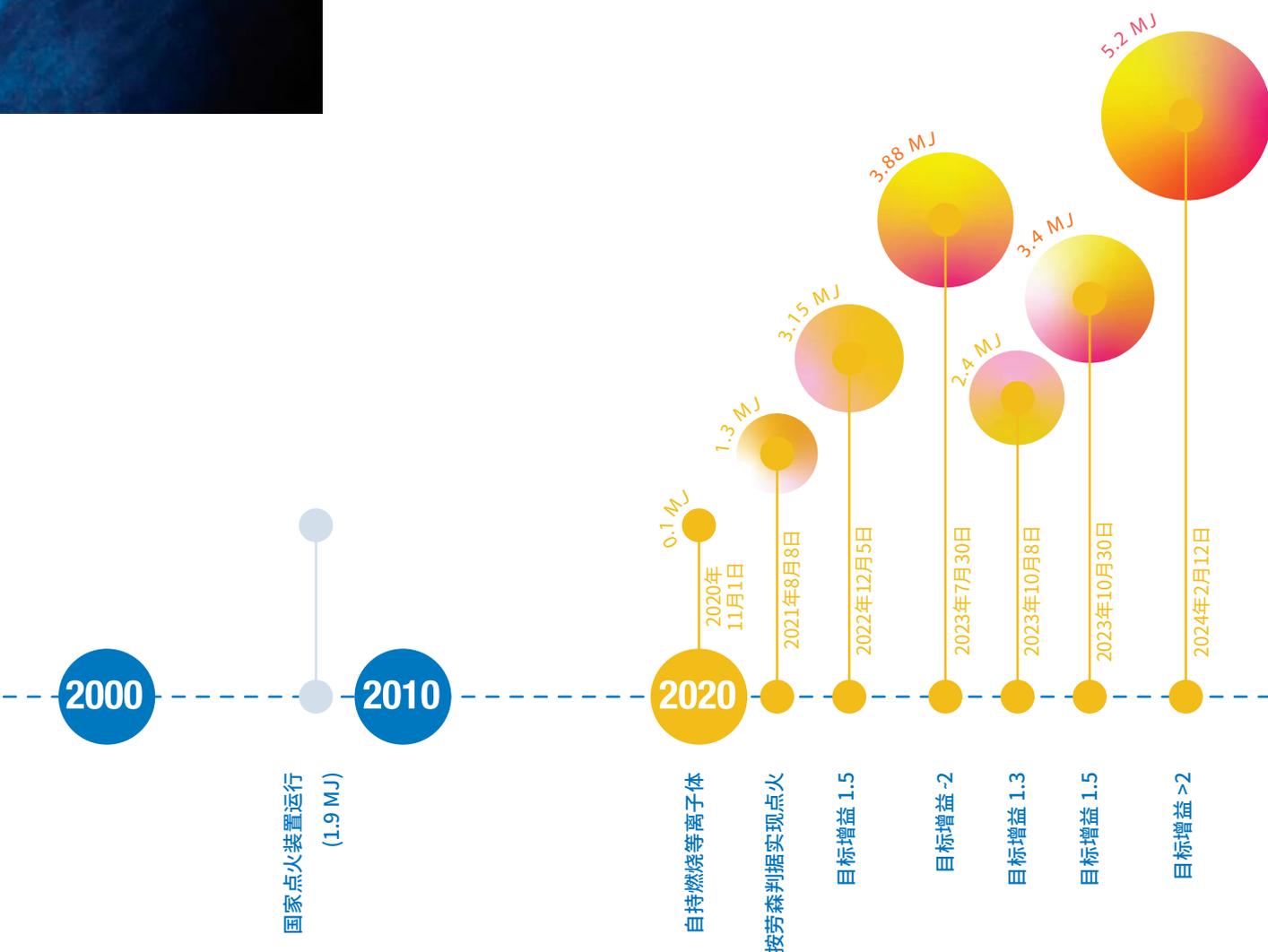


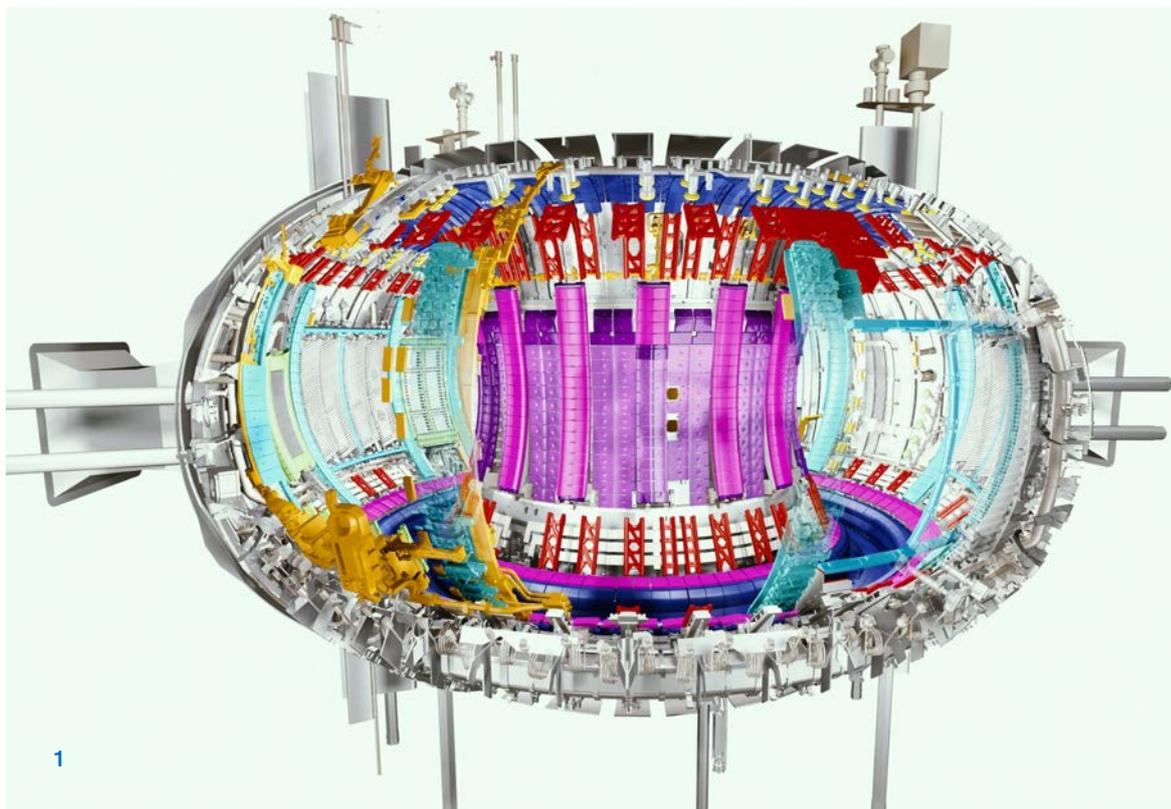
国家点火装置重复点火四次

国家点火装置（NIF）继续取得进展

自2022年12月聚变能点火取得突破[1]以来，美利坚合众国（美国）劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的研究人员已将这一成果成功复制了至少四次。2023年和2024年初的四次后续实验实现了重复点火。最近一次点火还产生了创纪录的5.2兆焦耳能量输出，能量增益超过2。■

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火装置（图片来源：劳伦斯·利弗莫尔国家实验室，美国）。





欧洲联合环 创造世界纪录 并已启动 退役工作

运了40年之后，欧洲联合环（JET）在2023年全年开展了最后的氘-氘实验，然后启动了退役工作，这将持续到2040年左右。欧洲联合环的退役使得可以分析真空室内材料在运行期间随着时间推移而发生的变化，由此将可为聚变社区提供宝贵信息。

在2023年12月的最后实验中，欧洲联合环实现了一个突破性的里程碑[2]。科学家们将自持聚变维持了5秒，以最少的燃料产生了69兆焦耳的能量，创造了世界纪录。他们探索了一些创新技术，如反转等离子体形状以加强对其约束。此外，他们还故意将等离子体破裂时产生的高能电子束射向内壁，以增进对束控制和损伤机理的理解。■

1 欧洲联合环真空室内电缆、部件和系统图
(图片来源：原子能管理局，英国)。

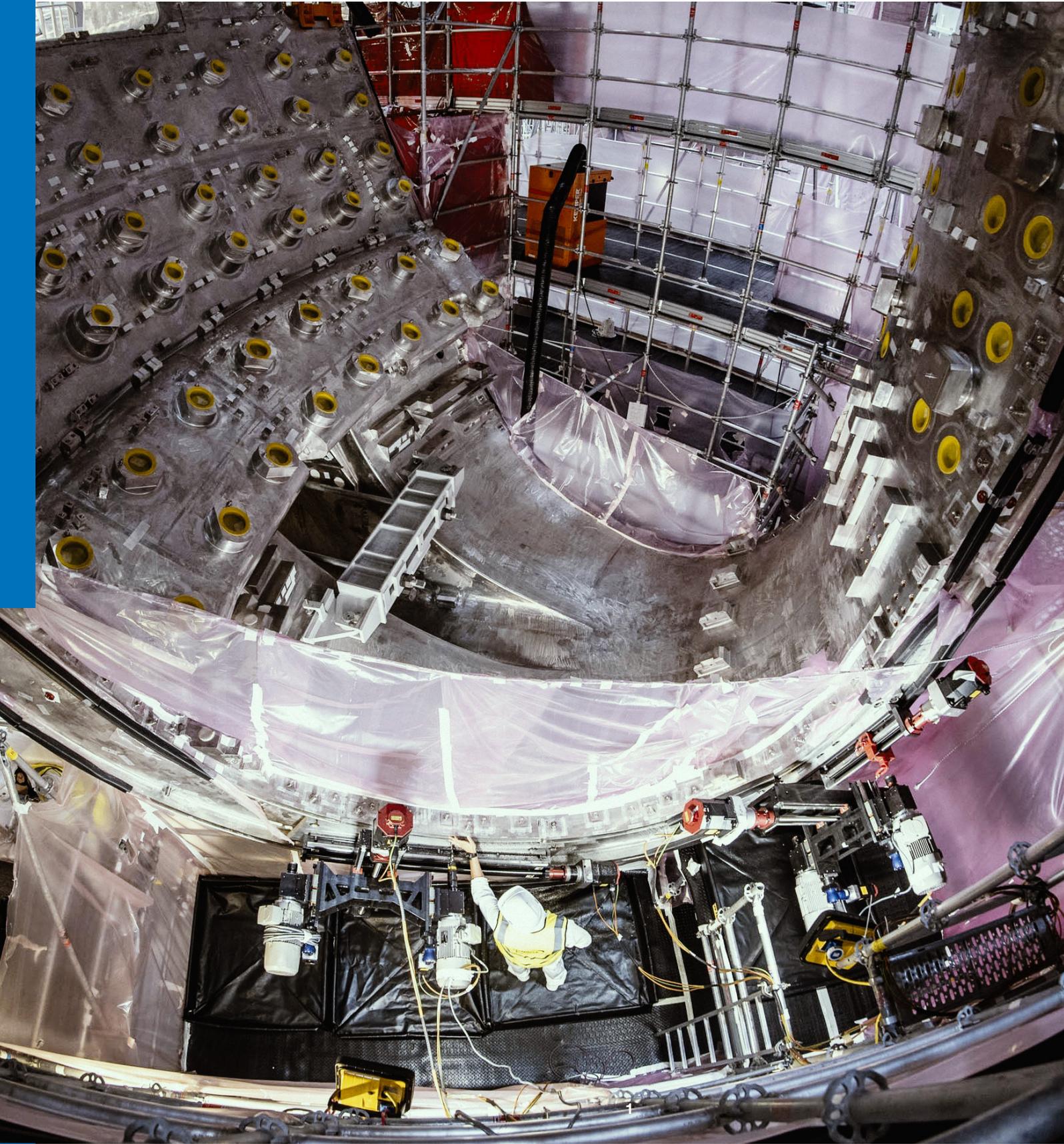
2 2024年7月的国际热核实验堆场址情况鸟瞰图
(图片来源：国际热核实验堆，法国)。



国际热核 实验堆 向新基线 迈进

国际热核实验堆（ITER）项目经历了过渡期，现正按照新的项目基线向前推进。关键部件的维修正在按计划进行。建造、制造、组装和系统调试工作继续取得进展。经过一年多的审查，2024年6月，向国际热核实验堆理事会提交了一份新的基线提案，该提案现已成为暂定参考时间表。

发现若干真空室扇段斜削接头的几何尺寸不符合标准而且热屏蔽层冷却管上有氯化物腐蚀裂纹，并进行了分析，同时展开了维修，这使得国际热核实验堆托卡马克的组装工作放缓。与此同时，对根本原因进行了评定，包括对项目质量文化的自查，从而进行了重组，以便为未来挑战做好准备。与法国核安全管理局进行了广泛讨论，以加强与国际热核实验堆许可证审批工作同时进行的安全验证。同时，供电系统、低温设备和冷却水系统均已安装并基本完成调试。所有极向场和环向场线圈以及大部分的■中心螺线管模块和其他主要部件均已交付。





过去一年的最大任务就是将这些要素整合到一个实际可行的最新项目基线当中。

由此产生的提案合并了先前设想的组装和运行阶段。通过在初步运行前将偏滤器、屏蔽块、牺牲性第一壁和其他降低风险的部件整合到一个更完整的装置当中，并在安装前对一些环向场和极向场线圈进行充分测试，可降低技术和运行风险。

2034年开始研究运行后，也将开启大量有关氢和氘-氚等离子体的实验，为期27个月，以期在2036年最终实现以全磁能和等离子体电流（15兆安）长脉冲运行托卡马克。

研究运行阶段的开始将在很大程度上验证工业规模的聚变运行所需各种系统的集成情况。氘-氚运行阶段的开始时间将比之前的基线推迟四年，即从2035年推迟至2039年。■

◀ 计量学在维修国际热核实验堆真空室扇段（包括负责削去多余材料并使部件恢复到额定状态的铣床以微米精度进行定位）的过程中发挥着至关重要的作用（图片来源：国际热核实验堆，法国）。



2034年开始对氢和氘-氚等离子体进行实验



2036年开始以全磁能和等离子体电流长脉冲运行



2039年开始氘-氚运行

首次发布国际原子能机构《世界聚变展望》以来取得的更多进展

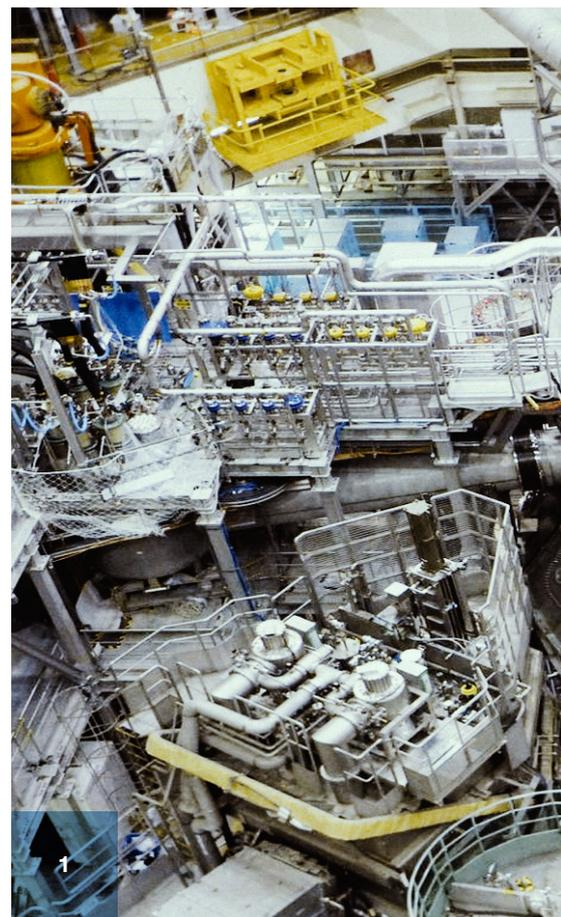
JT-60SA托卡马克产生了第一等离子体[3]。这台四层楼高的装置可将等离子体加热到两亿摄氏度并维持约100秒，远远超过了以前的大型托卡马克。JT-60SA中的等离子体与计划用于国际热核实验堆的等离子体非常相似，物理学家可以利用它来研究等离子体稳定性及其如何在长时间尺度上影响聚变功率输出，从而提供可适用于未来托卡马克的经验教训。同样在日本，日本六所村安装了国际聚变材料辐照设施（IFMIF）线性原型加速器。■

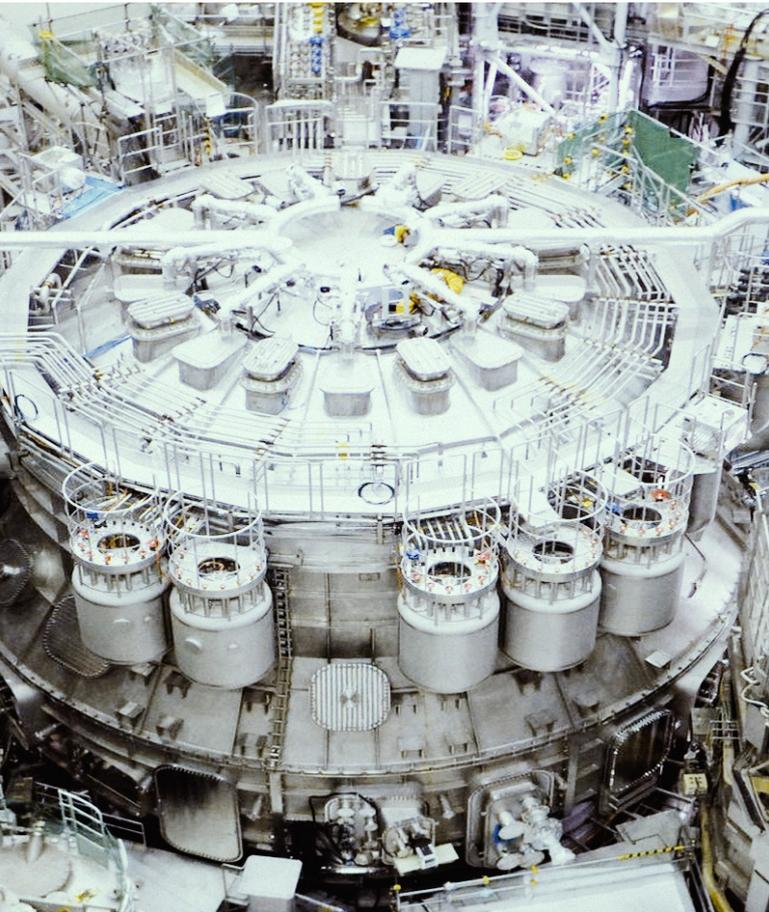
中国的先进超导托卡马克实验装置（EAST）实现了403秒的

稳态高约束长脉冲等离子体运行[4]。这一成就提高了先进超导托卡马克实验装置在2017年创造的101秒的原始记录。在高约束等离子体运行期间，粒子的温度和密度大大提高，这将提高未来聚变电厂的发电效率。同样在中国，由于加热、运行、控制、诊断和供电系统的升级，环流三号（HL-3）托卡马克首次在高约束模式下运行，等离子体电流达到100万安培。■

韩国聚变能研究所的研究人员在努力改进韩国超导托卡马克先进研究装置（KSTAR）创造了48秒达到一亿摄氏度高温的

纪录，并将等离子体高约束模式维持了100多秒。这一成就是继2021年将等离子体高约束模式维持30秒之后的又一里程碑，标志着聚变能研究取得了重大进展。韩国超导托卡马克先进研究装置的目标是到2026年实现将一亿度高温等离子体维持300秒钟。根据国际热核实验堆用钨偏滤器取代铍偏滤器的决定，韩国超导托卡马克先进研究装置现在运行时便采用了钨偏滤器。■





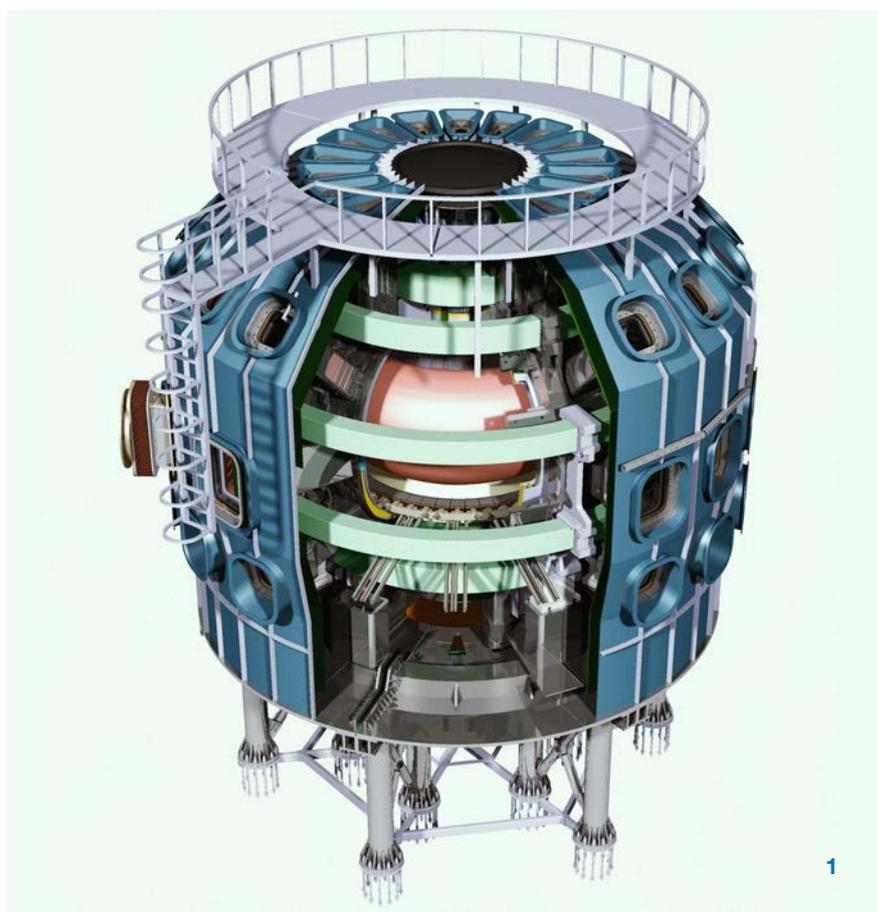
1 最大在运托卡马克JT-60SA由日本和欧洲联盟（欧盟）共同设计和建造（图片来源：量子科学技术研究开发机构，日本）。

2 位于韩国聚变能研究所的韩国超导托卡马克先进研究装置（图片来源：韩国聚变能研究所，大韩民国）。

3 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西访问日本期间参观六所村核聚变研究所的国际聚变材料辐照设施线性原型加速器（图片来源：量子科学技术研究开发机构，日本）。

4 先进超导托卡马克实验装置内部（图片来源：中国科学院等离子体物理研究所，中国）。

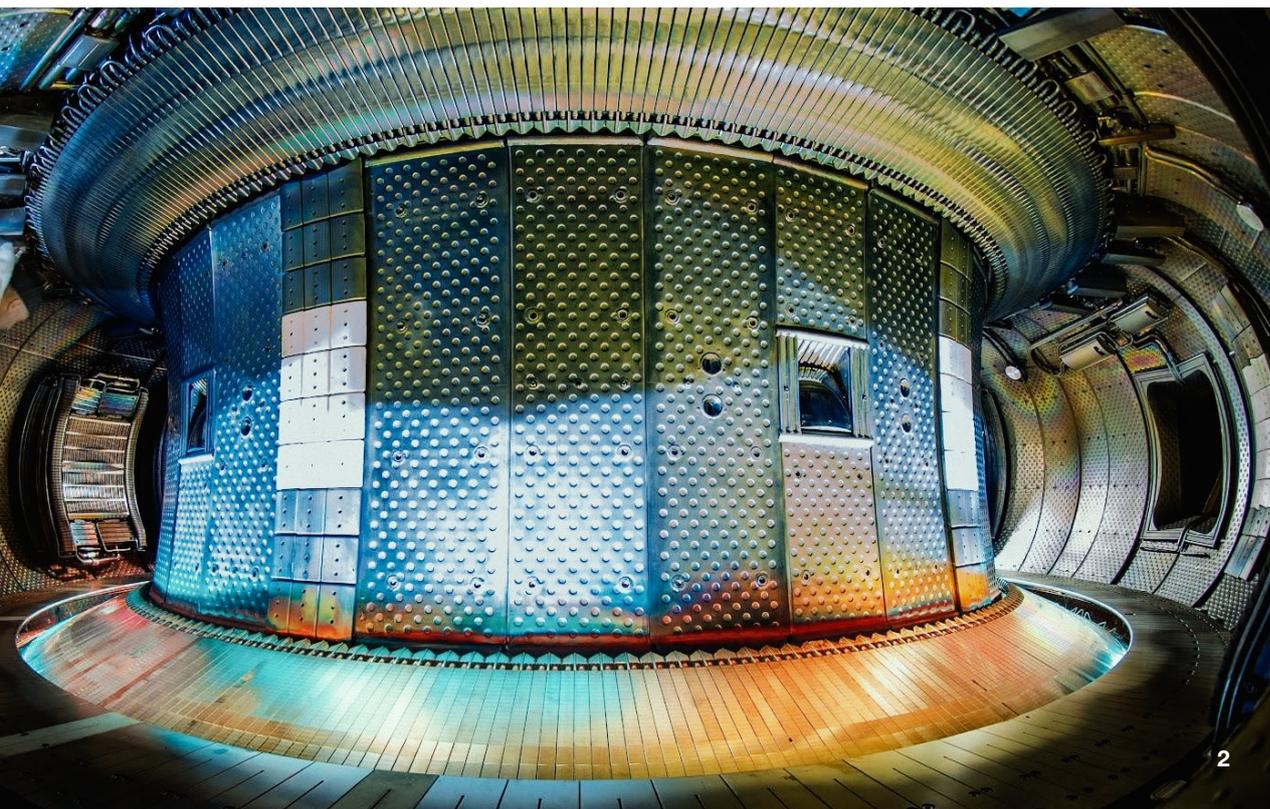




意大利偏滤器托卡马克试验（DTT）设施的建造继续取得进展，这是一个新的超导托卡马克，专门用于研究聚变电厂的先进偏滤器解决方案。实施该项目的偏滤器托卡马克试验联合体由许多意大利研究机构和国际伙伴（包括世界上最大的能源公司之一）组成，已为建造该设施筹集了近五亿欧元。偏滤器托卡马克试验的主要使命是探索和试验可用于欧洲示范聚变电厂的等离子体动力排气概念的物理学和技术。■

与韩国超导托卡马克先进研究装置类似，法国钨环境稳态托卡马克（WEST）位于法国可替代能源和原子能委员会的卡达拉奇场址，采用钨偏滤器，也已成功开始运行。在最初的实验活动中，通过一系列各持续约一分钟的等离子体脉冲产生了高中子通量，证明了这一新部件的耐久性和性能。此外，在一次协作努力中，法国可替代能源和原子能委员会与美国普林斯顿等离子体物理实验室的研究人员实现了一个

重要的里程碑，将约5000万摄氏度的聚变等离子体维持了创纪录的六分钟[5]。与之前的尝试相比，此次突破与多注入15%的能量和将等离子体的密度增加了一倍有关，并突显了钨包壳聚变装置在未来商业聚变电厂中的潜能。■



▲
1 偏滤器托卡马克试验设施的可视化
(图片来源: 偏滤器托卡马克试验联合体, 意大利)。

2 装有主动冷却钨偏滤器的钨环境稳态托卡马克 (图片来源: 法国可替代能源和原子能委员会, 法国)。

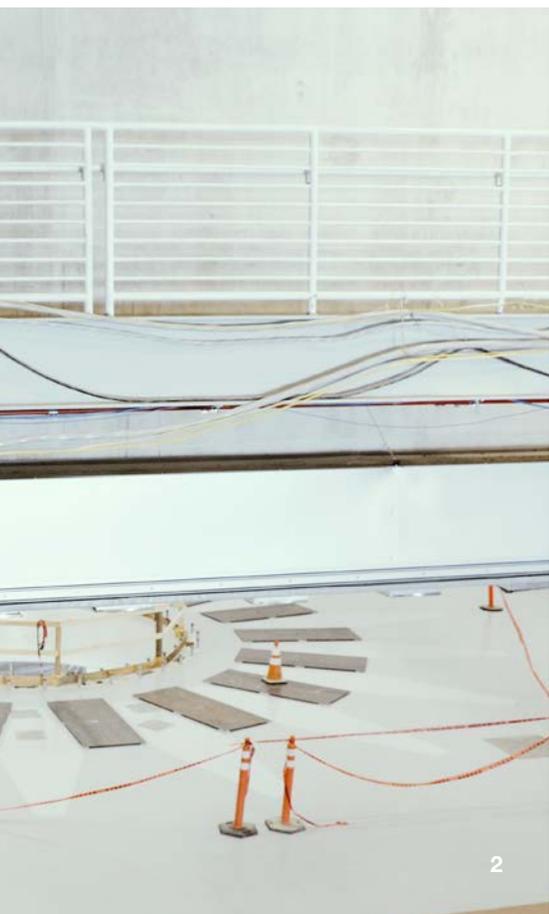


1 2024年运抵的SPARC钢制真空室
(图片来源：联邦聚变系统公司，美国)。



2 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观准备进行装置组装的SPARC托卡马克大厅。

由通用原子公司为美国能源部运营的美国国家聚变设施DIII-D已完成重大升级，包括新的等离子体控制系统、先进的诊断工具、改进了加热和电流驱动系统并增强了偏滤器系统。这些升级为DIII-D配备了多种先进工具，使其能够以符合聚变电厂需求的方式运行。就在此次升级之前，DIII-D的实验实现了此前从未曾同时实现过的燃料高密度和



2



3

高约束模式相结合[6]。这种运行机制满足了全球许多聚变电厂设计中的关键要求，并为生产在经济上具有吸引力的聚变能开辟了一条潜在道路。此外，在DIII-D的实验中，普林斯顿等离子体物理实验室的研究人员证实，他们的人工智能模型经过仅就以往实验数据进行的训练后，可以最多提前300毫秒预测潜在的等离子体不稳定性（亦即“撕裂模式不

稳定性”）[7]。人工智能控制器能够在不稳定性出现之前进行预测并加以避免，为能够在聚变电厂实时支持稳定、高功率等离子体机制的控制器铺平了道路。■

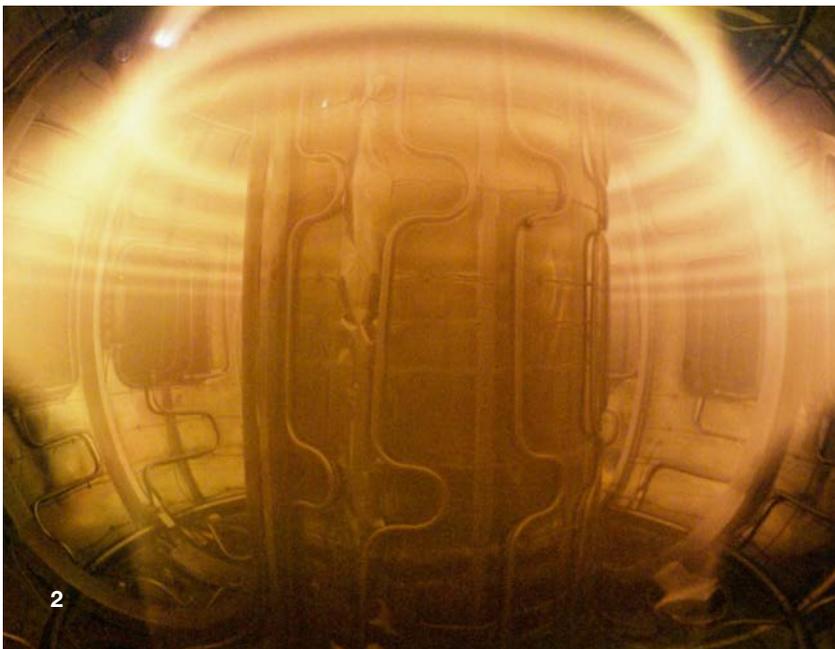
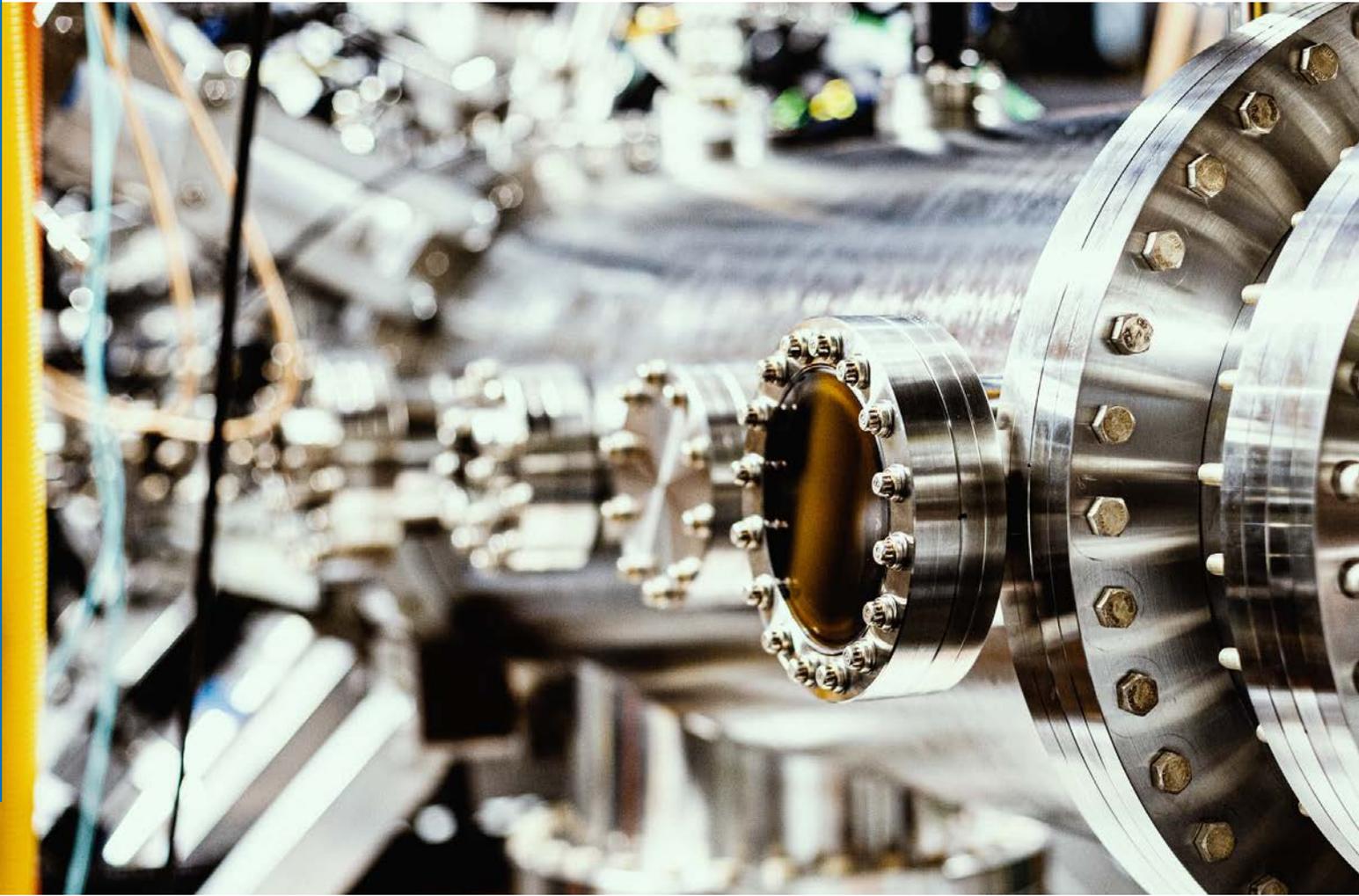
联邦聚变系统公司（CFS）为产生净科学能量增益而规划的托卡马克 — SPARC的建造场址已稳步取得进展。随着真空室运抵，该项目达成了重要的里

程碑。SPARC预计将于2025年投入运行，验证净科学能量增益。继SPARC之后，后续项目ARC预计将于21世纪30年代中期完工，以验证电力生产。■

3 一名工程师正在DIII-D内部安装新的诊断设备（图片来源：通用原子公司，美国）。



人工智能造福人类的
人工智能用于聚变能
等离子体控制



2

▲ 1 Zap能源公司的Z箍缩实验 — FuZE (图片来源: Zap能源公司, 美国)。

◀ 2 2024年6月开始运行的洪荒70托卡马克装置内部 (图片来源: 能量奇点, 中国)。



Zap能源公司的Z箍缩实验(FuZE)实现了1-3千电子伏[8]的等离子体电子温度,即超过了1000万摄氏度。该装置的性能已达到可与世界领先的聚变实验装置相媲美的水平。与此同时,基于相同技术的聚变电厂的开发也在进行中。■

能量奇点开发的开创性高温超导(HTS)托卡马克装置—洪荒70(HH70)已获得其第一等离子体。该装置环向磁场的场强为0.6特斯拉,大半径为0.75米,磁体系统由26个高温超导磁体构成。展望未来,能量奇点正在规划其下一代强磁场高温超导托卡马克装置洪荒170(HH170),其目标是实现氘-氚等效能量增益大于10。■

取亦 聚变 电厂

在加拿大、中国、德国、以色列、日本、大韩民国、俄罗斯联邦、瑞典、英国和美国，至少有20个聚变电厂概念处于不同的开发阶段，目标完成日期都在21世纪20年代末至50年代中期之间。

各国政府、私营公司和一些公私合资企业正在开发这些概念。

聚变中试厂成功指标[9、10]

类别	指标
聚变和电力性能	1. 100-500兆瓦聚变时间平均净热功率
	2. ≥ 50 兆瓦(电)峰值发电量
	3. $Q_e > 1$
	4. 多环境周期运行 ^a
部件	5. 作为设计特点拆除和更换降质部件的策略、成本和时间范围
	6. 除灰概念可升级用于同类首座聚变电厂
燃料和灰烬	7. 面向等离子体部件在同类首座聚变电厂典型环境中可抵御氦灰所造成的损坏
	8. 氦增殖比 > 0.9
	9. 氦库存 ≤ 1 千克
	10. 边界等离子体科学、加料技术和气体处理创新
	11. 明确界定的氦问责制以及能够满足问责制要求的分析方法
可靠性和可用性	12. 实施远程维护和更换
	13. 模块化、可更换部件
环境和安全考虑因素	14. 减少氦释放
	15. 最大限度减少废物量和总体危害，在可行范围内尽量避免产生C级以上废物
	16. 活化废物的退役
经济性	17. 隔夜建造费用低于50-60亿美元

^a 聚变电厂环境周期包括安装核心部件、电厂运行至这些部件降质，然后实施维护以继续运行。虽然这个周期的持续时间并未精确界定，而且可能因设计而异，但在同类首座聚变电厂需要维护或维修之前，这个周期通常约为全功率运行一年。

说明：指标列灰色部分针对氦-氦聚变电厂。

通用聚变电厂

(通用聚变公司，加拿大)

通用聚变公司的目标是在21世纪30年代早中期建成世界上第一座磁化靶聚变电厂。由于聚变装置中的液态金属衬里由活塞阵列进行机械压缩，聚变条件以短脉冲实现，而非形成一个持续的过程。这种独特的设计不需要超导磁体或激光阵列，旨在解决材料降质、燃料生产、能量捕集和商业化的成本障碍等问题。按照目前的设计，通用聚变电厂将通过两台150兆瓦的装置串联运行，产生约300兆瓦(电)，从而提供具有成本竞争力的零碳电力。

2024年1月，同行评审的结果证实，通用聚变公司可以实现商业电厂所需的平稳、快速和对称

+ 1

2025

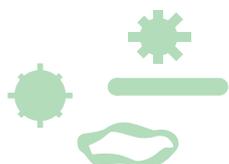
聚变电力系统



+ 9

2030

雪崩能源公司、蓝色激光聚变公司、Helion能源公司、京都聚变工程公司、劳伦斯维尔等离子物理公司聚变项目、磁惯性聚变技术公司、nT-Tao、Openstar技术公司、普林斯顿聚变系统公司



+ 27

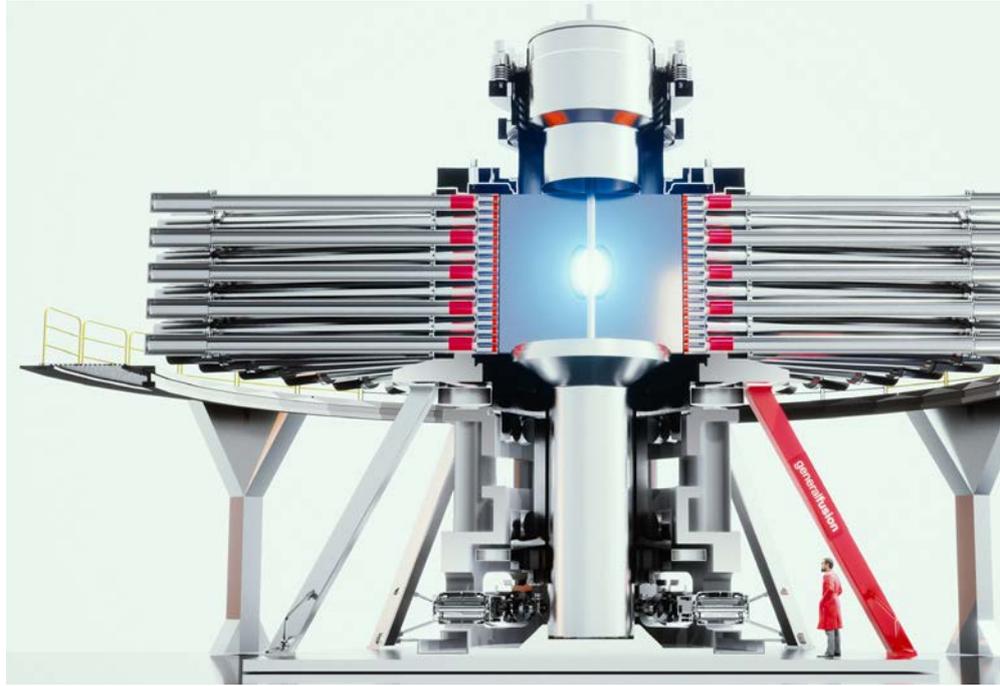
2035

Accelaron聚变公司、联邦聚变系统公司、Deuterio公司、Ex-Fusion公司、第一光聚变公司、Fuse公司、通用原子公司、通用聚变公司、HB11能源公司、Helical聚变株式会社、朗维尤聚变能源系统公司、Marvel聚变公司、Nearstar聚变公司、NK实验室、诺瓦特伦聚变集团、Openstar技术公司、比邻星聚变电厂、Realta聚变公司、复兴聚变公司、Stellarex公司、TAE科技公司、泰拉聚变能源公司、Thea能源公司、托卡马克能源公司、Type One能源集团、Xcimer能源公司、Zap能源公司

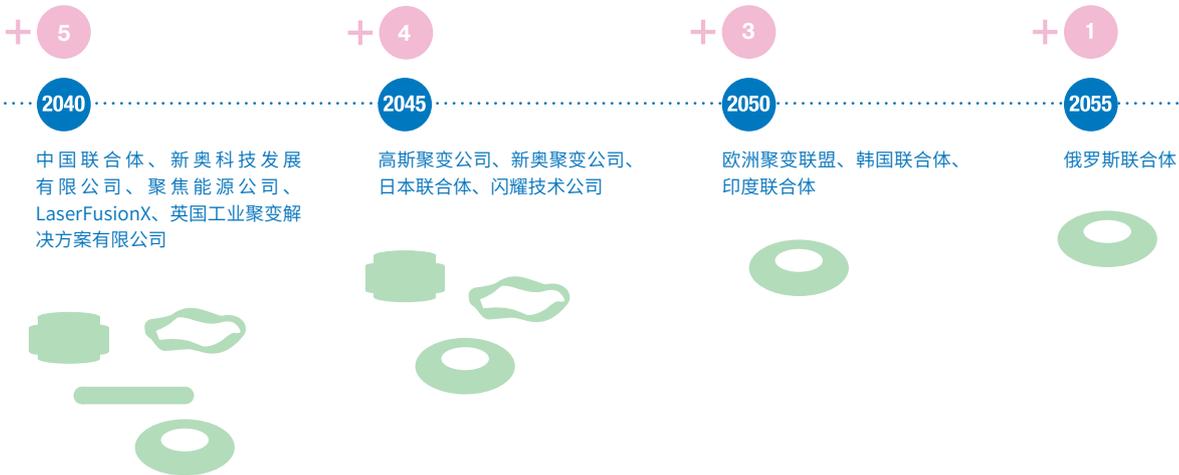


的液腔压缩。2024年3月，该公司还通过开发专有代码，在商用装置的液态金属衬里建模方面取得了突破，从而能够对电厂的各种设计和配置进行测试。

通用聚变公司正在建造一台名为“劳森机器26”（LM26）的实验聚变装置，以实现技术突破，进而降低风险，快速推动电厂建设。LM26的设计目标是到2025年实现超过一亿摄氏度的聚变条件，到2026年实现科学净能量。在设计该公司规划中的商业规模装置时，将纳入从LM26中收集到的数据。■



“劳森机器26”概念图
(图片来源：通用聚变公司，加拿大)。





1 欧盟示范聚变电厂可能的布局图
(图片来源: 欧洲聚变联盟, 德国)。

2 中国聚变工程实验堆效果图
(图片来源: 中国科学技术大学, 中国)。

3 Gauss GIGA渲染图
(图片来源: 高斯聚变公司, 德国)。



中国聚变工程实验堆（中国联合体，中国）

中国聚变工程实验堆（CFETR）是一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念，目前正由一个国家联合体在中国开发。中国聚变工程实验堆是中国实现聚变能路线图中的下一代装置。建造工作预计将于2040年完工。中国聚变工程实验堆预计将弥补国际热核实验堆与聚变电厂之间的差距，并验证净电力增益和0.5的占空比。中国聚变工程实验堆的研究和开发计划将分为两个阶段。在第一阶段，工作重点将是实现稳态运行和验证氦自给自足，聚变功率达到200兆瓦。这一阶段将解决与自持燃烧等离子体物理研究与发展有关的问题，以确定先进稳态运行的可行性。第二阶段将重点验证聚变功率超过1吉瓦后的电厂相关技术。第二阶段的关键成果就是为设计商业发电厂搭建一个RAMI¹数据库。中国聚变工程实验堆的一些概念设计参数包括：大半径=7.2米，小半径=2.2米，等离子体拉长比 $k_{95}=2$ ，等离子体电流=14兆安，轴磁场强度=6.5特斯拉，归一化贝塔值 $\beta_N=2.3$ ，预计科学能量增益 $Q_{sci}=20$ 。■

欧盟示范聚变电厂（欧洲聚变联盟，欧盟）

欧盟示范聚变电厂（EU-DEMO）是欧洲聚变能发展联盟（欧洲聚变联盟）正在开发的一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念。在欧洲聚变发电路线图中，欧盟示范聚变电厂是继国际热核实验堆之后的又一座设施。该项目目前正处于概念设计阶段，预计将于2050年之前开始运行。欧盟示范聚变电厂的目标是通过产生约500兆瓦（电）的净电力来验证聚变能在技术和经济上的可行性，并实现氦自给自足。目前正在围绕几种设计方案展开研究。这些方案将对电厂的若干项技术产生影响，其中包括偏滤器配置和增殖包层解决方案等。欧盟示范聚变电厂的预先概念设计预计该设施的大半径约为9米，聚变功率约为2吉瓦。目前关注的重点是要最大限度地缩小装置尺寸和降低技术风险，以便及早部署。■

Gauss GIGA（高斯聚变公司，德国）

高斯聚变公司的目标是到2045年，以仿星器设计为基础设计并开发出一座吉瓦级聚变电厂Gauss GIGA。该项目将通过与一些国家和欧洲研究机构的公私合作模式来实施。目前的基础设计具有相对较高的长宽比，截面与国际热核实验堆类似，允许使用各种磁体和真空室，而这些都在该行业的生产、运输和安装能力范围内。

高斯聚变公司计划绕过对中间实验或示范装置的需求，加快部署。将利用同类首座聚变电厂的多阶段调试过程来实现这一目标。调试工作预计将分阶段进行，每个阶段都旨在收集最大量的数据，并促成持续的业务扩展和升级。该过程将从初始等离子体装置开始，随后是示范远程维护系统，再过渡到具有氦处理能力的装置，最后便是完全连续的燃料循环和发电。

预计这种分阶段办法将有利于实现技术开发时间表的解耦，以及参数、诊断系统和控制系统的微调。此外，它还有助于收集关键材料数据。■

比邻星聚变电厂（比邻星聚变公司，德国）

比邻星聚变公司专注于使用高温超导磁体技术，开发强磁场准等动力仿星器。该公司的聚变电厂概念是对德国开创性仿星器Wendelstein 7-X（W7-X）的继承，那一仿星器首先开发了准等动力优化原理和磁岛偏滤器方案。比邻星聚变公司的电厂设计依靠高温超导技术来达到传统（低温）超导磁体所无法获得的磁场振幅，并采用了综合计算设计来克服以往支撑结构方面的工程限制。比邻星聚变公司的准等动力仿星器设计依靠的是高频电子回旋共振加热和水冷锂铅增殖包层。■

Tao装置（nT-Tao，以色列）

nT-Tao是一家以色列初创公司，正在设计一座大概集装箱大小的聚变电厂。该系统可为现有电网提供10到20兆瓦的电力，也可作为独立且可扩展的远程能源解决方案。nT-Tao计划在这个十年结束前

¹ RAMI 代表可靠性、可用性、可维护性和可检查性，描述的是一个过程，其主要目的是确保在运行阶段，聚变电厂的所有系统都是可靠的，并可在运行条件下保持其性能和最佳可用性。

完成商业原型设计。nT-Tao的解决方案依靠的是基于专有脉冲的等离子体加热方法和基于动态稳定环的磁室拓扑结构。nT-Tao的方案旨在缩小装置的尺寸，以便能够快速地进行迭代、降低成本和减少设计的复杂性。■

Helical聚变电厂（Helical聚变株式会社，日本）

Helical聚变株式会社的目标是在2034年之前开发出稳态聚变装置，并计划在21世纪40年代实现商业化。该电厂采用以两个螺旋线圈为特征的螺旋器配置，并结合了高温超导体和液态金属包层技术。这种柔韧、高电流密度的高温超导体可用于制造紧凑型螺旋线圈。液态金属包层可保护面向等离子体的各壁，实现高效发电。此外，与其他仿星器相比，螺旋器的设计更便于进行结构维护，因此特别适合商业化。这些创新技术有助于建造电力输出为50-100兆瓦（电）的紧凑型聚变电厂。■

日本示范聚变电厂（日本联合体，日本）

日本示范聚变电厂（JA DEMO）是日本正在开发的一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念。日本示范聚变电厂的目标是实现超过数百兆瓦（电）的稳定电力输出，实现氦自给自足，并且电厂可利用率能弥合聚变商业化的差距。日本示范聚变电厂的核心原则包括验证基于国际热核实验堆部件设计的技术可行性，并确保从脉冲运行（约2小时）到稳态运行的运行灵活性。日本示范聚变电厂的建造工作预计将于2045年之前完工，并计划在此后不久，通过脉冲运行验证电力生产。第二阶段的目标是到2055年实现稳态运行。日本示范聚变电厂的一些概念设计参数包括：聚变功率=1.5吉瓦，大半径=8.5米，小半径=2.42米，等离子体拉长比 $\kappa_{95}=1.65$ ，等离子体电流=12.3兆安，轴磁场强度=5.94特斯拉，归一化贝塔值 $\beta_N=3.4$ ，电流驱动功率=83.7兆瓦，预计科学能量增益 $Q_{sci}=17.5$ 。■

韩国示范聚变电厂（韩国联合体，大韩民国）

韩国示范聚变电厂（K-DEMO）是大韩民国正在开发的一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概

念。韩国示范聚变电厂的概念设计参数包括：大半径为6.8米，小半径为2.1米，环向磁场强度约为7特斯拉（使用低温超导体），等离子体电流大于12兆安。韩国示范聚变电厂的工程设计预定于2035年完成。近期的一个重点是设计空间，已利用超级计算资源进行了探究，以研究全局参数。除基本概念外，还在研究第二种路径，即利用高温超导磁体做出更小、更先进的设计。■

俄罗斯示范聚变电厂 （俄罗斯联合体，俄罗斯联邦）

俄罗斯示范聚变电厂（DEMO-RF）是一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念，正由一个国家联合体在俄罗斯联邦开发。俄罗斯示范聚变电厂的建造工作预计将于2055年之前完工，其后目标是验证净电力增益。俄罗斯示范聚变电厂的各项功能正在开发当中。按照目前的概念设计，预计可将该设施用作一个单纯的聚变能电厂，或是一座聚变-裂变混合反应堆，配有高温超导磁体，总磁场强度大于8特斯拉，等离子体电流约为5兆安。关于第一壁和偏滤器，正在考虑采用液态金属的面向等离子体部件。此外，俄罗斯联邦计划开发一座名为示范聚变电厂聚变中子源的聚变-裂变混合反应堆。该反应堆不仅要通过聚变产生能量，还要利用聚变产生的中子将非裂变铀转化为易裂变核材料或是对长寿命放射性废物进行嬗变。示范聚变电厂聚变中子源计划于2033年之前完工，是俄罗斯联邦到2050年实现聚变能的快车道战略的一个关键组成部分。■

N4（诺瓦特伦聚变集团，瑞典）

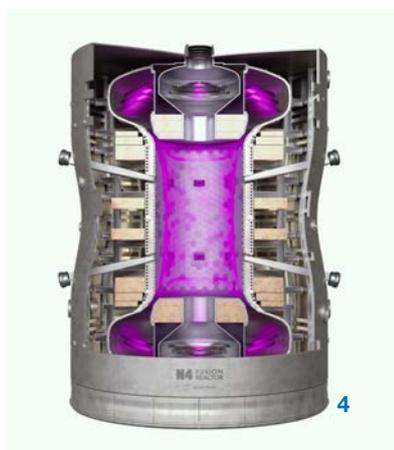
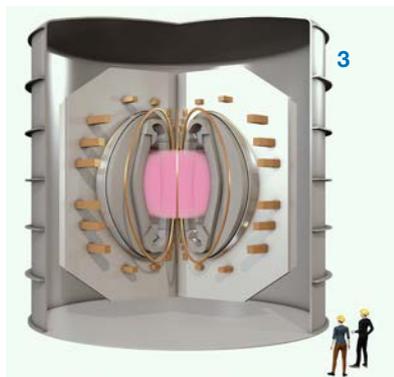
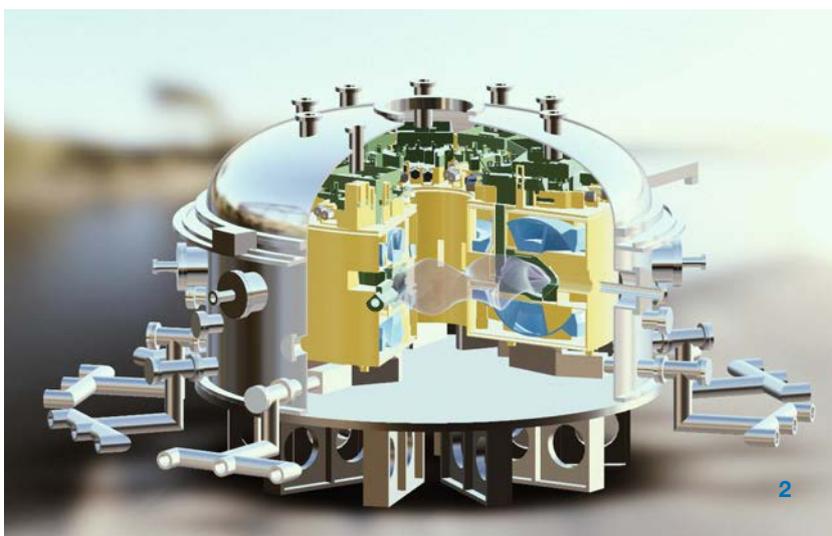
诺瓦特伦聚变集团正在开发一个基于传统磁镜设计的聚变电厂概念。该公司的路线图包括开发两台实验装置（N1和N2）、一座商业化前的示范厂（N3）和首座此类聚变电厂N4。目前，他们正在推进对N1的概念验证，目标是在21世纪30年代末之前使N4实现1.5吉瓦（电）的发电量。按照设计，N4将以稳态模式运行，有持续的燃料供应并可抽取废气，从而可以将电离粒子直接转化为电力。此外，N4还可采用高温超导磁体技术，进一步提高其性能和效率。■

1 紧凑型聚变电力解决方案模型—Tao装置
（图片来源：nT-Tao，以色列）。

2 Helical聚变装置渲染图
（图片来源：Helical聚变株式会社，日本）。

托卡马克能源公司聚变中试厂 (托卡马克能源公司, 英国)

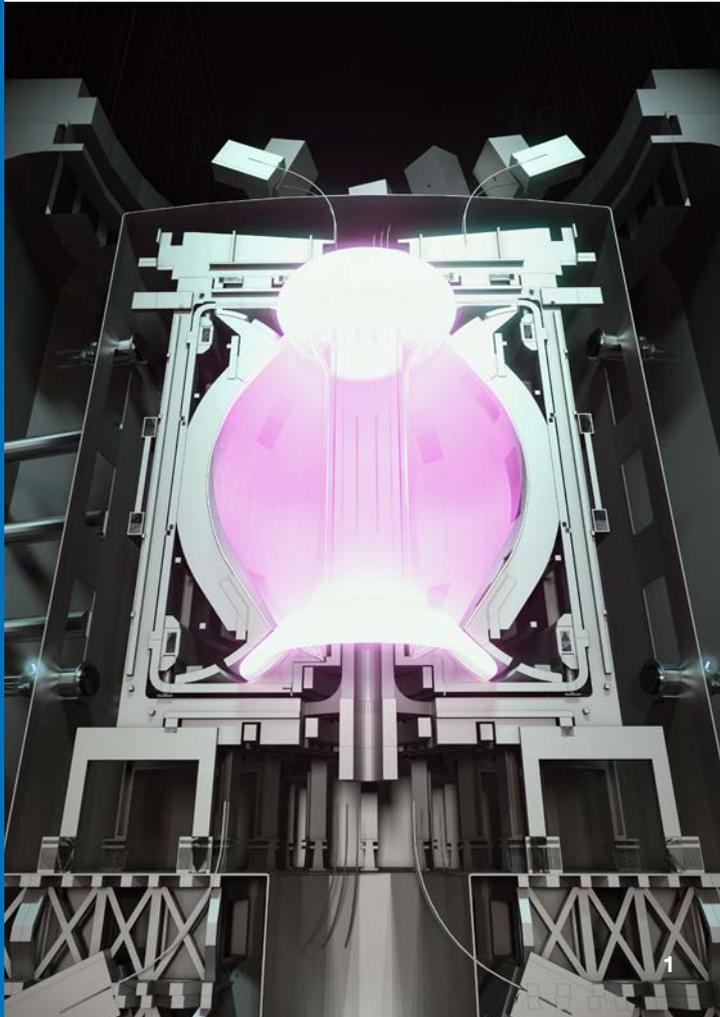
托卡马克能源公司的聚变中试厂旨在集成、测试和验证后续商业聚变电厂所需的所有系统。其设计是一个长宽比较低的托卡马克, 采用高温超导(稀土钡铜氧化物)环向场磁体, 并旨在验证可产生净能量输出的燃烧等离子体的持续脉冲。该项目正由一个来自美国和英国的国际团队在美国能源部“基于里程碑的聚变发展计划”下合作设计和开发。■



3 托卡马克能源公司聚变中试厂概念图 (图片来源: 托卡马克能源公司, 英国)。

4 诺瓦特伦的N4聚变电厂概念图 (图片来源: 诺瓦特伦, 瑞典)。

5 日本示范聚变电厂概念图 (图片来源: 量子科学技术研究开发机构, 日本)。



能源生产用球形托卡马克 (英国工业聚变解决方案有限公司，英国)

能源生产用球形托卡马克 (STEP) 原型聚变电厂旨在验证净能量、燃料自给自足和通向商业聚变电力的路径，目标是在2040年实现首次运行[11]。能源生产用球形托卡马克的团队采用了一种基于数字集的设计方法，该方法已接受过多次概念成熟度审查和若干次独立技术咨询组评估。概念设计会审慎地平衡性能、成本、大小和风险，并将于2025年开始进行详细的工程设计。英国工业聚变解决方案有限公司是英国原子能管理局集团的一家全资附属公司，将负责交付能源生产用球形托卡马克，并带领一个公私联盟，设计和建造这座将坐落于西伯顿的电厂，那里曾是英格兰北部一个燃煤发电站的场址。除电厂外，能源生产用球形托卡马克的任务还包括开发世界领先的聚变供应链，以支持聚变能的

商业化。能源生产用球形托卡马克将建立新的供应商基础结构，其中包括全厂集成商和系统制造商，它们可在世界各地设计和交付未来的聚变电厂。■

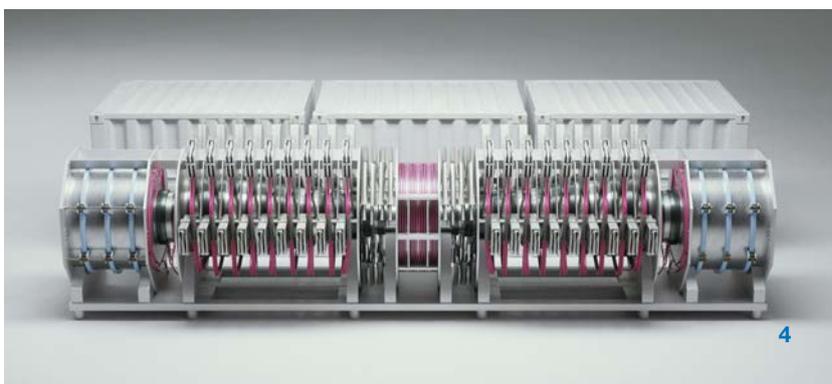
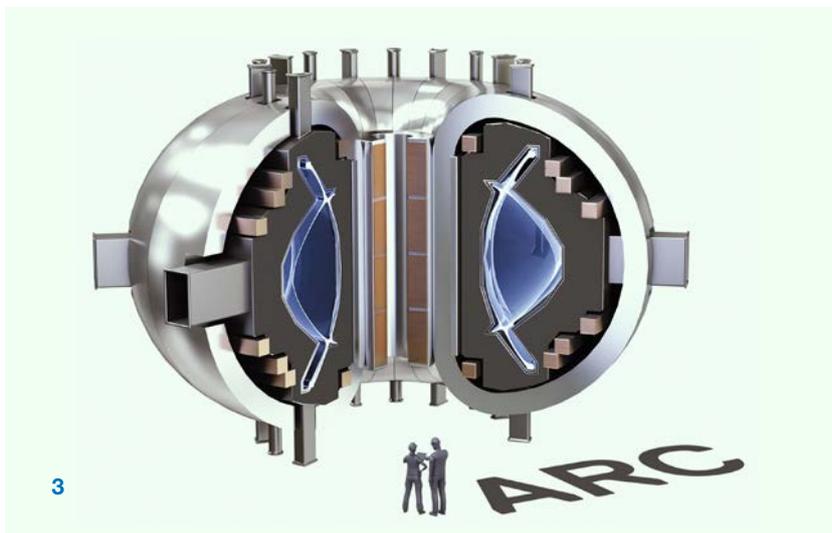
ARC (联邦聚变系统公司，美国)

ARC是联邦聚变系统公司 (CFS) 正在开发的一个基于传统托卡马克设计的聚变电厂概念。ARC的目的是利用高温超导磁体技术，验证聚变能的商业可行性。ARC将是紧凑型传统托卡马克，配备的高温超导磁体能够产生约400兆瓦(电)，大半径约为4米，小半径约为1.2米，轴磁场强度约为11特斯拉。ARC将采用高温超导环向场、极向场和中心螺线管磁线圈。其中部分线圈将带有接头，以便于拆卸和快速更换真空室，从而减轻第一壁寿命问题，并使得有可能在单个托卡马克中更改真空室设计和更换偏滤器材料。

1 能源生产用球形托卡马克的目标是在2040年实现首次运行 (图片来源：英国原子能管理局，英国)。

2 通用原子公司聚变中试厂将依靠先进的传感器、控制算法和高性能计算机 (图片来源：通用原子公司，美国)。

3 ARC将利用高温超导磁体技术 (图片来源：联邦聚变系统公司，美国)。



ARC将得益于从SPARC托卡马克中获得的信息和经验教训，后者目前正在开发当中（2023年2月开始建造），预计将于2025年完成建造，于2026年投入运行，并产生净科学能量增益。SPARC托卡马克大厅的建造已接近尾声，设备部件已运抵并于今年开始组装。联邦聚变系统公司披露已筹集了约21亿美元的资金，现有全职员工800多名，致力于支持SPARC的建造、联邦聚变系统公司磁体工厂中高温超导磁体的制造和促进ARC的研究与发展。■

通用原子公司聚变中试厂（通用原子公司，美国）

通用原子公司聚变中试厂（GA-FPP）是通用原子公司正在开发的一个基于稳态紧凑型先进托卡马克设计的聚变电厂概念。这种设计方案将依靠先进的传感器、控制算法和高性能计算机来控制等离子体、产生氙的碳化硅增殖包层以及为聚变等离子体提供动力所需的微波加热。■

4 北极星的目标是成为聚变发电的第一台装置（图片来源：Helion能源公司，美国）。

北极星（Helion能源公司，美国）

Helion能源公司已经建造了六台聚变原型机，目前正在建造第七台，取名“北极星”。北极星标志着商业聚变能领域的一次重大飞跃，其目标是成为聚变发电的第一台装置。北极星所在的设施有半个足球场大小，可被视为Helion能源公司的预生产聚变装置，为首座商业聚变电厂铺平了道路。北极星总长19米，按照设计，可使用的燃料类型包括氘-氘、氘-氦-3和氘-氘。

它将以0.1赫兹或更快的重复率运行，电容器组的容量超过50兆焦耳。场强峰值可达到15特斯拉以上，相当于约1000个大气压。北极星将配备3800个诊断系统和气体过滤系统，以测量其性能并过滤其产生的产品。■



朗维尤电厂（朗维尤聚变能源系统公司，美国）

朗维尤聚变能源系统公司的目标是开发一座基于激光驱动惯性约束设计的聚变电厂，并将与福陆（Fluor）公司共同进行设计。该电厂将成为供国家和国际部署的未来商业电厂示范。■

SX0（Stellarex公司，美国）

Stellarex公司成立于2022年，是根据仿星器设计开发聚变电厂的先驱。Stellarex公司与安大略电力公司、行业伙伴和学术机构合作，致力于在加拿大安大略省建立一个仿星器聚变能杰出中心。该公司的目标是建造一台仿星器聚变装置SX0，在2030年实现净能量增益，再完成Stellarex聚变电厂SX1的建造，能够生产600兆瓦（热）和250兆瓦（电）。■

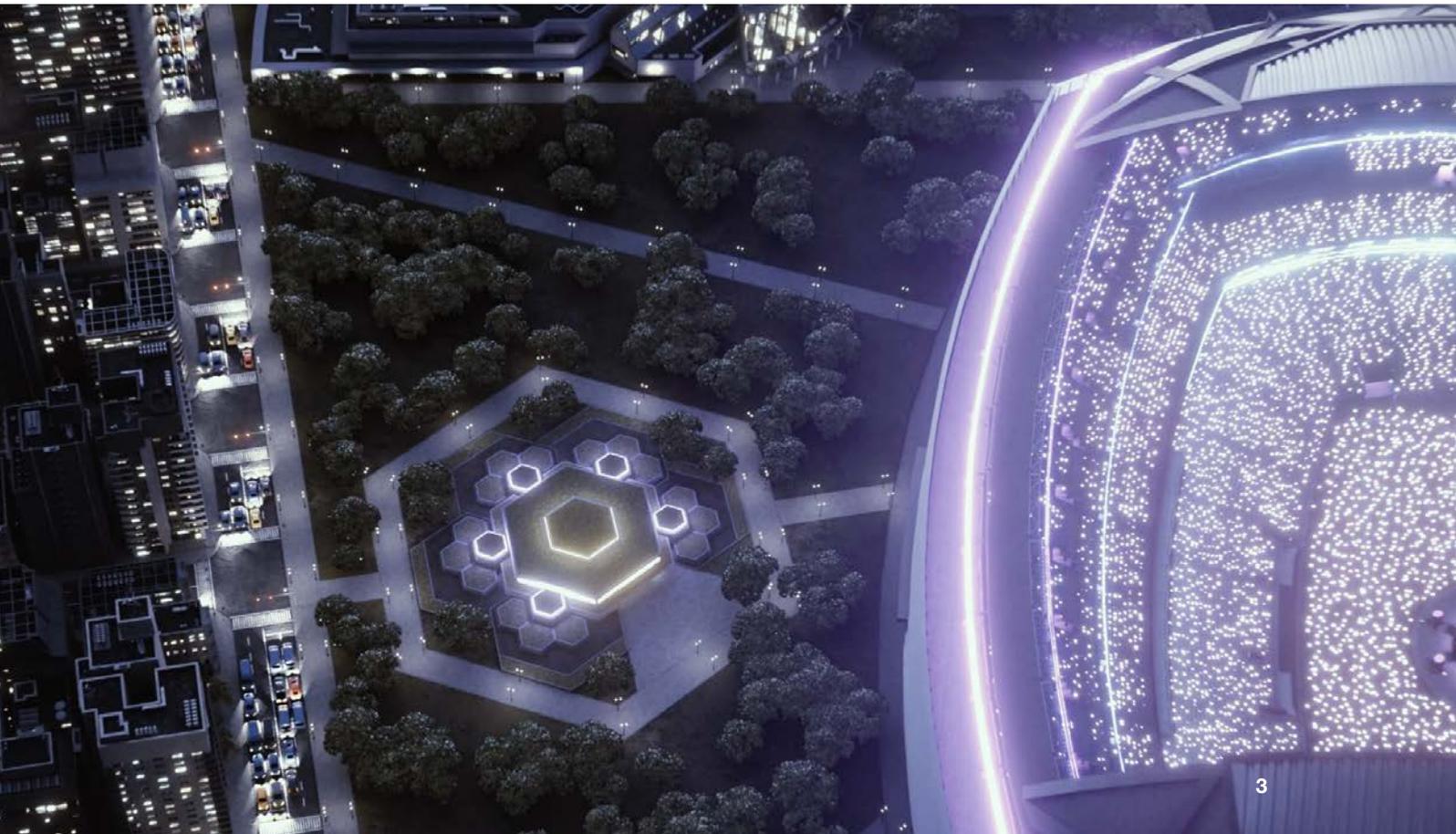
达芬奇（TAE科技公司，美国）

TAE科技公司自成立伊始，便一直致力于使用氢-硼进行聚变。这种燃料安全且资源丰富，可供应超过10万年，而且世界各地均可获得；不过，它需要保持较高温度才能形成一个可产生能量的聚变等离子体。为达到这样的性能水平，TAE科技公司开发了一个被称为“先进束流驱动场反向位形”的专有平台。这一方案结合了等离子体物理学和加速器物理学的最深奥原理，用于加热和稳定等离子体。此外，这种紧凑的线性位形有利于缩小装置的物理尺寸，从而使其更具可扩展性和成本效益。TAE科技公司的第七代装置达芬奇预计将成为世界上第一座氢-硼原型聚变电厂，于21世纪30年代初向电网提供净电力。■

1 TAE科技公司的第七代装置达芬奇预计将成为世界上第一座氢-硼原型聚变电厂（图片来源：TAE科技公司，美国）。

2 朗维尤电厂将基于激光驱动惯性约束设计（图片来源：朗维尤聚变能源系统公司，美国）。

3 Zap电厂的剪切流稳定Z设计（图片来源：Zap能源公司，美国）。



3

Zap电厂（Zap能源公司，美国）

Zap能源公司正在开发一座基于剪切流稳定 Z 设计的聚变电厂。这项技术无需超导磁线圈或强大的激光器就能约束和压缩等离子体，有利于快速向商业能源迭代。在一个正在工作的聚变装置内部，每次 Z 箍缩都是从电容器组所释放的强电脉冲开始的。这股脉冲会将气团冲击成一个扁平的热等离子体环。该盘状物朝着装置的内阴极（或带负电的一端）向下运动。通过阴极的鼻锥后，等离子体盘就会凝聚成一个紧密的剪切流柱，不同层以不同速度流动。流动的液态金属壁能够承受各种极端条件，并从聚变等离子体中俘获能量。金属壁中的铅锂混合物将产生氦，这些氦则将被送回聚变装置，用作燃料。这种紧凑设计意味着单个聚变装置可能仅3米宽，但可产生约50兆瓦（电），足以为一座小城市供电，而Zap能源公司的每座电厂或许都可以安装多台装置。■

聚变能在电力系统脱碳中的作用

在脱碳世界中，聚变具有数万亿美元的潜在社会价值。部署规模和时间以及聚变电厂的运行，在很大程度上取决于：

- 聚变费用（聚变电厂的主要成本动因包括设备费用、监管考虑因素和运营和维护费用）；
- 各地区替代低碳技术的费用和可用性；
- 碳排放限制；
- 经济和电力需求增长；
- 市场设计。

要实现聚变规模化，就必须开发材料并发展利基元件的制造能力，而原材料情况则又不同[12]。■



聚变能在脱碳系统中的作用

背景

与

方案

突出强调公共和私
营部门在聚变能发
展计划方面的努力

对聚变公司的私人投资激增

这一激增使得有必要促进全球参与，以加快科技发展，建立供应链和制定监管框架。

全球各国政府已开始认识到聚变能的潜力，正在大力投资研究与发展工作，以推动进展。各国正在起草国家战略，包括制定初步监管框架和加强与供应链的接触，同时，还拨出大量资金，支持公共和私营部门的各项举措。协作努力也在不断增加，各国签订了共享知识、资源和基础设施的协议，以加快实现聚变能商业化生产的步伐。科学突破与支持性政策框架协同作用，正在打造一个健全的生态系统，目标是在不久的将来，使聚变能成为现实。

聚变能正在引起大量利益相关方日益浓厚的兴趣。在该行业，聚变技术开发商已与各种各样寻求在未来获得一种清洁可靠能源的最终用户达成一系列协议。最终用户从包括亚马逊、谷歌和微软等公司在内的技术行业（随着其人工智能系统的发展，这些公司的电力需求将飞速增长），到化石燃料能源公司、公用事业公司、供应链公司、电动汽车领域，甚至是在净零之路上开发直接空气捕集技术以去除大气中的二氧化碳的初创公司，不一而足。■

协调公共和私营部门的努力，制定一项由行业主导的聚变能开发计划

可将规模化的商业聚变作为未来应对气候、经济和能源安全挑战的解决方案的一部分。由于聚变能不会向大气中排放二氧化碳或其他温室气体，这种潜在的清洁能源正在引起浓厚的市场兴趣和大量行业投资，其中一部分是通过公私合作模式实现的[13]。

近年来，聚变科学技术的进步和重大进展激发了私营部门推动聚变能发展的热情，对聚变项目的公共、私人 and 权益投资持续增长[14、15]。一些公司的目标是在未来几年或几十年内实现商业应用。

这些努力符合向可持续能源过渡并在全球范围内将聚变作为一种安全、清洁的丰富能源解决方案进行部署的全球目标。



原子能机构
《聚变关键要素》

鉴于开发可行的聚变电厂需要大量资金和技术，公私合作模式正日益成为聚变能开发领域的一个重要机制。公共资源需要私人投资者的参与，他们可以提供额外的资本和行业专门知识。全球对聚变技术的私人投资相当可观，现已超过73亿美元[15]，这表明了投资者对在未来几年开发可行的聚变电厂的关注。私营项目需要获得政府支持，以增强投资者的信心，并利用公共部门多年研发活动积累的专门知识。然而，资源仍然有限，必须有效分配这些资源，这一点至关重要。公私合作模式可确保公共和私营部门共担风险，分享回报，从而帮助缓解这一挑战。政府的资助和支持可为私人投资者提供必要的稳定性和信心，从而使聚变公司能够开展雄心勃勃的项目，同时分散各种金融风险[16]。■

公共机构与私营公司之间的合作有利于以更多样化的方式进行研发，同时促进创新，通过并行推进和更快的时间表，加快进展[17]。在公私合作模式中，私营部门和政府通常会分担项目责任：政府往往会提供有保障的现金流，私营部门则管理项目发展，从而分担风险。

如果管理得当，公私合作模式可成为应对长期资本和政治稳定性挑战的有力工具[18]。能源部门已经成功利用了公私合作模式的优势，也可将其作为一种手段，用以帮助减缓气候变化[19、20]。更重要的是，由于多年来其他部门也已广泛采用这种模式，公私合作模式的框架已然成型[21]。

建设聚变电厂不会遵循“一款通用”模式。因此，很显然，公私合作模式本质上是灵活的，政府和投资者可以根据国家、地区或者在某些情况下，根据特定项目的具体情况，调整这一举措。■

2023-2024年报道的资金投入

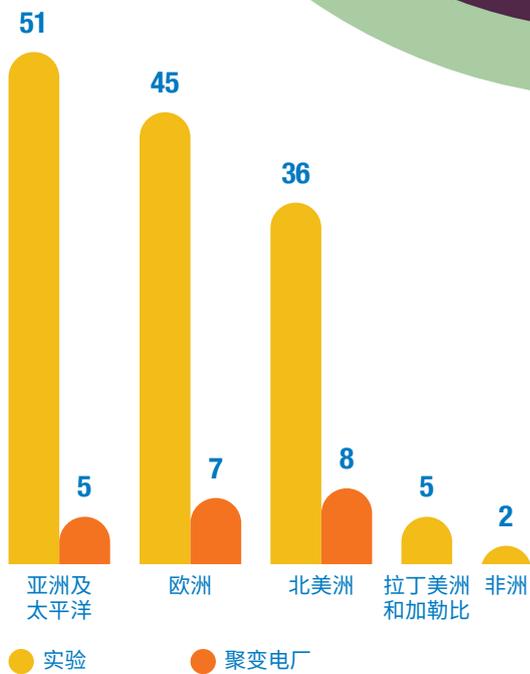
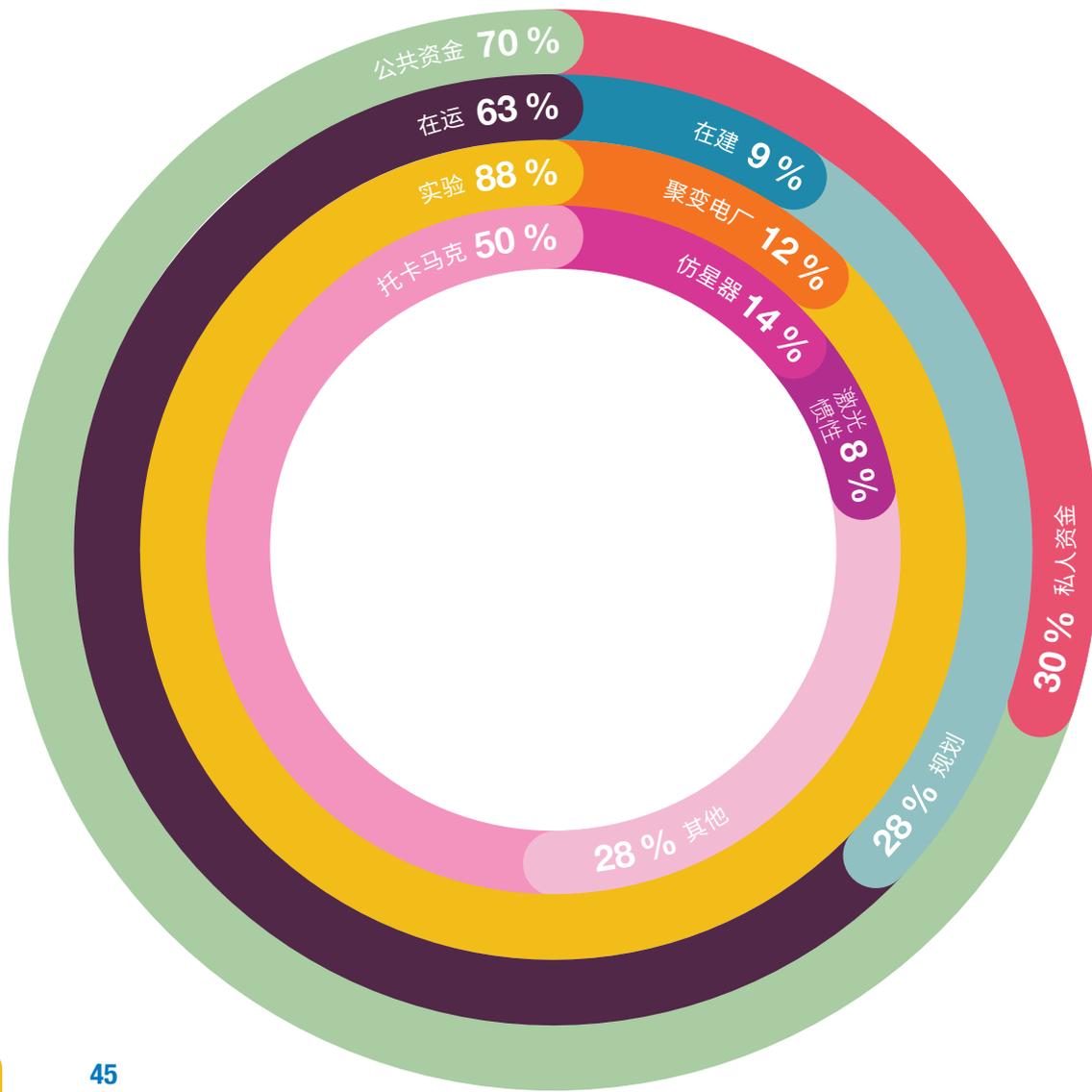
成员国	资金投入 (十亿美元)	时间框架
德国	~1.4	5年以上
大韩民国	~0.9	10年以上
英国	~0.8	5年以上
美国	~1.5 ^a	每年

^a 其中包括美国能源部国家核安全管理局提供的6.9亿美元，用于支持国家核安全管理局的惯性约束聚变任务，而不是用于聚变能开发。

实施行业主导的聚变发展模式的主要计划

世界上的一些龙头聚变企业正在落实自己的模式，以让行业参与进来，推动聚变能的发展：

- **中国聚变联合体**：由中央企业和研究机构组成，其中包括了中国的一些龙头能源和钢铁企业。
- **德国的筹资倡议**：企业、大学和研究机构共同努力，于2040年之前在德国建造一座聚变电厂。
- **意大利偏滤器托卡马克试验联合体**：由许多意大利研究机构、政府和地区伙伴以及国际利益相关方组成。
- **日本的登月研发计划**：鼓励私营企业、大学和各种组织参与，以采用多种方案，研究聚变能。
- **大韩民国的新倡议**：旨在通过公私合作模式推进聚变电厂技术，并建立一个由私营部门主导的工业聚变能生态系统。
- **英国的聚变未来计划**：旨在通过国际合作和未来聚变电厂的开发，促进创新和刺激总体产业能力，同时，为私营聚变能公司提供额外资金，用以发展基础结构。
- **美国“基于里程碑的聚变发展计划”和公私联合体框架**：根据预先确定的商业化里程碑的实现情况和核实结果提供资金，为各公司提供支持。美国能源部还开始收集有关拟建立的聚变能公私联合体的信息。■



2024年聚变装置及其运行状况和供资的分布[22]。

每个地区在运、在建或规划中的聚变装置数量。



聚变装置
信息系统

实现行业主导的聚变能生态系统道路上的关键推动因素

聚变公司需要在能源市场的政治经济中获得同等支持，以推动商业化并有效扩大规模。其他商业化能源得益于政府伙伴关系、稳定的监管和为公共产品设计的战略性财政激励措施[23]。为聚变能开发提供类似支持可为商业化聚变开辟一条综合性路径。有了扶持政策，政府就能加快将清洁、丰富、高效和安全的聚变能引入市场。

例如，在美国，税收政策为各种清洁能源技术提供了激励。2022年的《通货膨胀削减法案》将其中的多项抵免政策扩展到了聚变能领域[24]，而且，自2025年开始，新的“技术中立”[25]税收抵免政策将把商业聚变能生产列为合格项。在英国，政府开始修订条例，将聚变电厂列为英格兰和威尔士的国家重大基础设施项目。这一改动把侧重点放在了当地的具体问题而非技术的必要性上，由此加快了规划申请的速度[26]。欧盟的《净零工业法案》也将聚变列为一项“战略技术”[27]。

除税收激励措施外，各国政府还制定了支持清洁能源技术的计划，如可再生能源组合标准和碳捕集技术授权。聚变能具有排放效益和其他优势，一旦投入使用，即可被纳入这些“清洁”或“零排放”能源的定义当中。如果要成功地大规模部署聚变，有韧性的供应链、有效的监管框架和稳定的长期投资至关重要。发展强大的聚变产业需要政府、研究与发展组织和私营公司展开协作。■

世界聚变能小组

为加强整个聚变领域的合作，原子能机构宣布成立世界聚变能小组[28]。世界聚变能小组旨在联合科学家、工程师、政策制定者、金融家、监管者和私营公司，加速聚变能的商业化[13]。国际合作与协调在聚变能的商业推广过程中发挥着至关重要的作用。

世界聚变能小组旨在将公共和私营部门、工业界、学术界和民间社会联合起来，形成一个有凝聚力的全球聚变社区。通过促进统一的协作方案，世界聚变能小组力求加快聚变能从开发阶段向商业可行性的过渡，以确保聚变成为世界未来清洁能源的基石。

世界聚变能小组将在这一关键时刻发挥催化剂的作用，这一时刻的团结一致努力对于快速推动聚变能的发展至关重要，主要在于：

- 加强全球合作，特别是进行协调并提供空间和经常性机会，促进工业界、政府、学术界、监管机构 and 公众等利益相关方之间的互动对话、交流、规划和伙伴关系；
- 帮助确保聚变能研究与发展计划的效力，如在利用现有设施和规划新设施方面；
- 共同确定技术和工程方面的现有差距，并制定策略，促进在国际一级确立解决方案；
- 促进就如何建立有效的聚变监管展开讨论；
- 提高公众在聚变能领域的参与度，加强青年的参与力度并促进性别平等；
- 促进将聚变纳入能源市场；
- 促进将聚变纳入现有能源系统，包括辅助性基础设施。■



原子能机构将积极支持推进在世界聚变能小组框架内做出的承诺。原子能机构将与其成员国和其他伙伴合作，定期组织该小组召开会议，以审查实现这些成果的进展情况，确保高级别政治参与，并促进围绕聚变能采取进一步的合作行动。原子能机构的目的是通过这些努力，促进全球在追求聚变能发展的过程中不断取得进展和开展合作。

原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西和意大利总理乔治亚·梅洛尼将共同主持世界聚变能小组首届部长级会议（图片来源：意大利政府）。



世界聚变能小组
首届部长级会议

聚变之路

共同推进聚变能商业化的国家战略、国际协定、私人 and 权益投资以及监管程序概述。



国家战略和国际协定

在第二十九届国际原子能机构聚变能会议期间，英国公布其聚变能战略[29]，并推出了新的“聚变未来计划”。该倡议将在五年内追加投资6.5亿英镑（7.93亿美元），用于一揽子研究与发展计划。投资内容包括设立2200个培训名额、新建一座燃料循环测试设施，以及资助私营聚变能公司发展基础结构，特别是在英国原子能管理局的卡勒姆园区。这是在英国决定退出欧洲原子能联营“研究和培训计划”之后宣布的。

2024年早些时候，英国政府宣布举办一场行业竞赛[30]，为英国的原型聚变能电厂能源生产用球星托卡马克寻找工程和建造伙伴。该竞赛旨在建立一个由英国工业聚变解决方案有限公司——英国原子能

管理局的一家附属公司——牵头的公私联盟，以交付能源生产用球星托卡马克原型。该项目位于英格兰北部，力求在21世纪40年代之前验证如何通过聚变获得净能量，预计将在2025年底或2026年初向工程和建造伙伴授予合同。

英国政府还宣布了多项旨在简化未来聚变电厂规划流程的计划。英国能源安全和净零排放部开始修订条例，将聚变电厂列为英格兰和威尔士的国家重大基础设施项目。这一改动把侧重点放在了当地的具体问题而非技术的必要性上，由此加快了规划申请的速度。在将国家政策声明提交议会批准之前，会进行一次磋商[26]，收集各方意见。

此外，英国能源安全和净零排放部与美国能源部宣布建立新的战略伙伴关系[31]，以加速聚变能验证和商业化，重点推进两国的聚变能战略。此后，



英国《2023年
迈向聚变能》



美国《2024年
聚变能战略》



1



2

白宫在“气候公约”缔约方大会第28届会议上发布了“聚变能发展新时代的伙伴关系”战略[32]，标志着其加快聚变能示范和商业化的愿景得到了扩展，而美国和日本在2024年4月宣布的另一项伙伴关系[33]则进一步推进了这一愿景。■

美国能源部宣布了其《2024年聚变能战略》[34]，该战略旨在：
(1) 缩小与商业相关聚变中试厂的科学和技术差距；(2) 为可持续、公平地部署商业聚变铺平道路；(3) 建立和利用外部伙伴关系。美国能源部还与该战略密切协调，宣布为聚变创新研究引擎协作组织提供1.8亿美元的资助机会，并发布了题为“架设桥梁”的聚变能科学计划的新愿景，其中，该计划侧重于积极缩小与商业相关聚变中试厂的科学和技术差距，同时，支持在聚变能科学和促成技术领域开展基础研究。

1 伦敦第二十九届国际原子能机构聚变能会议开幕式。从左至右：英国议会负责核与网络的副国务大臣A.鲍伊、原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西和英国原子能管理局首席执行官I.查普曼。

2 2023年12月，原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西在阿拉伯联合酋长国迪拜举行的“气候公约”缔约方大会第28届会议上。



原子能机构在“气候公约”缔约方大会第28届会议上的聚变能讨论

2024年，美国政府大幅增加了对聚变能研究的资助，向美国能源部聚变能科学办公室拨款7.9亿美元。此外，惯性约束聚变通过国家核安全管理局的预算获得了6.9亿美元。作为补充，还有一项4200万美元的计划，旨在推进基础性的惯性聚变能科学和技术，亦称“惯性聚变能科学和技术加速研究”。总计15.8亿美元[35]的资金创下了美国政府在聚变能和惯性约束聚变领域的投资纪录。此外，政府提议扩大税收减免范围，以支持更广泛的清洁能源技术，包括2022年《通货膨胀削减法案》[36]中的聚变能。

在动态的聚变能环境中，公私合作模式正日渐成形。美国能源部宣布作为其“基于里程碑的聚变能发展计划”的一部分，已签署多项协议，向八家公司提供4600万美元的资金，用于在前18个月推进聚变电厂的设计和研发。这些公司是从众多申请者中挑选出来的，均提交了计划书，概述了其将商业聚变能推向市场的计划。将根据美国能源部预先确定的商业化里程碑的实现情况和核实结果拨付这笔资金。展望未来，美国能源部也已开始收集有关拟建立的聚变能公私联合体的信息[37]。该联合体旨在通过整合各州和地方政府的捐款、私营部门投资和慈善资源，扩大联邦资金的规模。■

日本遵循着类似的轨迹。2023年，日本通过了其首个国家聚变能战略[38]，强调要建立国内聚变能产业，同时，让私营部门更广泛地参与研发。该战略包括成立日本聚变能产业委员会，以促进相关产业的发展，并制定聚变能技术监管准则。此外，还成立了一个专门的聚变监管工作组。2024年，作为其“登月研发计划”的一部分，日本政府宣布了一项新的聚变研发计划[39]，进一步加强了其推进聚变技术的承诺。政府还计划在学术机构中重点开展聚变能源教育，确保下一代科学家和工程师做好充分准备，为该领域做出贡献。这些努力和与美国的战略伙伴关系相辅相成，均旨在加快聚变能的开发。■

中国正在迅速扩大其聚变能计划，每年投资不断增长[40]。中国核工业集团公司牵头成立了一个专门进行聚变能开发的联合体，更是突显了这一点。这个项目侧重于高温超导体、大容量储能和氦生产。该联合体由25家中央企业和研究机构组成，其中包括一些中国最大的能源和钢铁企业。政府宣布成立一家新的国营公司，引领该行业的发展[41]。■

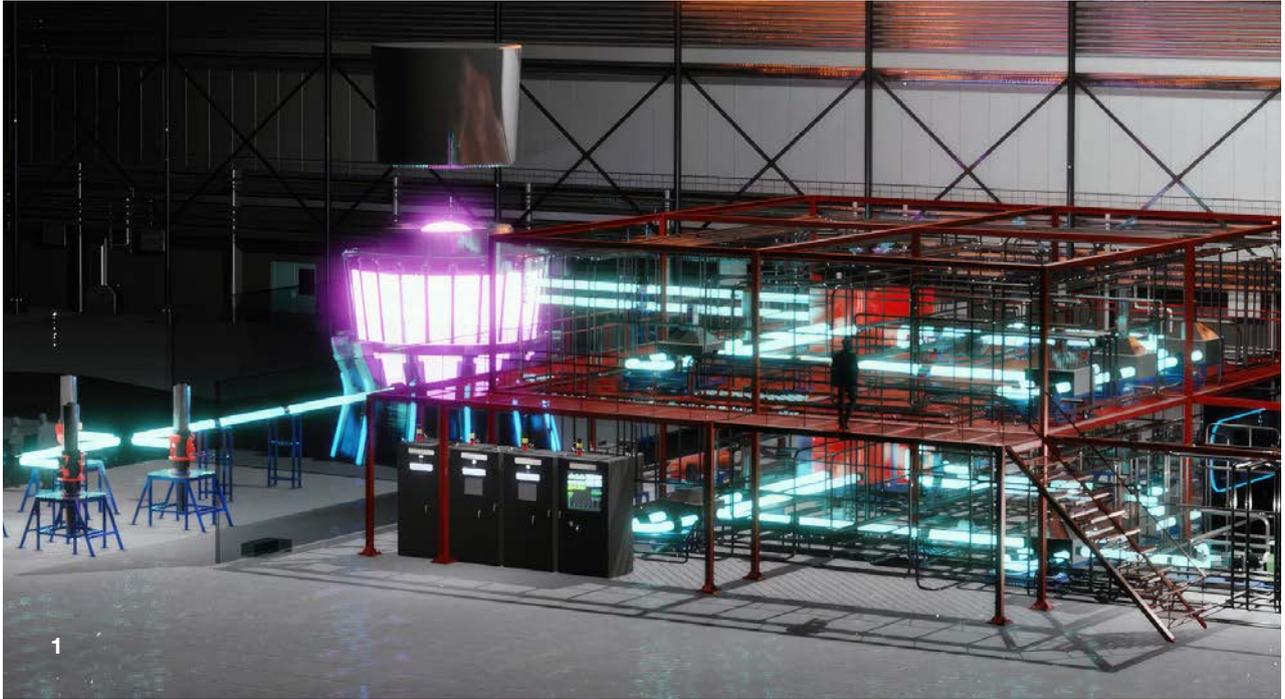
2024年7月，大韩民国政府宣布在聚变能开发方面投入1.2万亿韩元（约合九亿美元）的巨额资金。这项举措计划于2026年开始，持续十年，旨在通过公私合作模式推进聚变电厂技术。该计划包括在21世纪30年代建造一座发电容量为100兆瓦的中试厂，预计将于21世纪40年代投入运行。总体目标是建立一个由私营部门主导的产业化聚变能生态系统[42]。■

为采取步骤制定全面的欧盟聚变战略，欧盟委员会组织了欧盟聚变能蓝图会议[43]。会议强调了欧盟的几个关键优先事项：需要加强合作、增加融资、提升监管确定性以及培养一支熟练的工作人员队伍。

作为欧盟内的主要聚变推动者，德国联邦教育和研究部宣布，除了向研究机构拨款3.7亿欧元（3.96亿美元）外，2028年之前还将为聚变研究提供超过10亿欧元的资金。

名为“聚变 2024”[44]的新项目供资计划进一步加强了这种机构资助。该计划旨在推进聚变电厂所需的技术、部件和材料，并重点关注磁约束和激光聚变。“聚变 2024”的第一阶段定于21世纪30年代初完成，以实现技术进步为目标，第二阶段则将侧重于把这些技术纳入到电厂的功能设计当中。该计划强调以应用为导向的协作研究，以此作为公私合作模式的一种形式，以加快实现商业聚变能。





1 UNITY-1示意图，这是一个位于日本京都聚变工程公司京都研究中心的非放射性包层部件及热循环测试和用户设施。早期运行已经开始，大规模的测试活动预计将于2026年开始（图片来源：京都聚变工程公司，日本）。

2 美国能源部副部长戴维·M.特克和日本文部科学大臣盛山正仁宣布结成战略伙伴关系，共同推进聚变能开发（图片来源：美国能源部，美国）。



在意大利，环境部建立了国家可持续核能平台[45]，其主要目标是制定导则和路线图，以跟踪和协调新核技术中长期的发展。这包括探究聚变能的潜力，以支持到2050年实现完全脱碳的目标。该平台将使广泛的利益相关方都参与进来，其中包括公共管理部门、企业、行业协会、大学、研究机构和民间社会。

在意大利担任七国集团主席国期间，聚变能受到高度重视，七国集团呼吁开展国际合作，加快聚变技术的开发和商业化。这项努力强调有必要制定健全的安全条例、建立国际供应链并发展工作人员队伍。七国集团致力于促进合作、鼓励投资和建立工作组以分享最佳实践，并欢迎原子能机构及其成员国参与进来[46]。■

2024年，加拿大和英国签署了一项协定[47]，将在聚变能开发方面开展更密切的合作，合作领域则包括研究、监管协调和提高工作人员队伍的技能。两国将合作支持在世界范围内部署聚变。尽管2024年加拿大尚未宣布正式的国家聚变计划，但加拿大核实验室发布了一份题为“加拿大聚变能”的报告[48]，以此作为初步战略和路线图。该报告呼吁加拿大政府通过明确的政策和授权，迅速动员聚变生态系统。其目标是使加拿大成为聚变技术和服务领域的国际领导者，以期在21世纪30年代和40年代验证和采用聚变能，并在2050年之前，在加拿大部署商业聚变能。■

根据这一愿景，加拿大核实验室与英国原子能管理局签署了一项合作协议，以开发氙处理技术

▲
2024年七国集团峰会
(图片来源：欧洲联盟)。



聚变行业协会：
《聚变能的商业化》

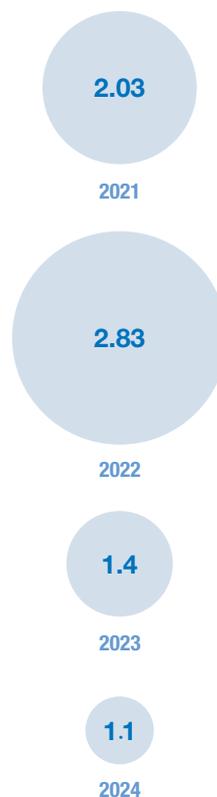
[49]。加拿大核实验室还与Stellarex公司[50]和通用聚变公司[51]签署了多项协议和项目，包括与京都聚变工程公司[52]合作成立聚变燃料循环公司，以建设和运营氦燃料循环测试和用户设施UNITY-2。UNITY-2计划于2025年底之前完成调试，并于2026年中全面投入运行，旨在支持从燃料卸载到净化和供应的氦燃料循环的综合开发，同时，验证在相关条件下以相关速率进行高效氦处理的技术。■

私人和权益投资增长

聚变能行业的投资连续逐年增长。虽然大部分投资（约70%）历来都是投向美国的聚变公司，但2023年，针对聚变公司的权益投资明显有所扩大，涵盖了更广范围的国家[53]。这些国家包括加拿大、中国、法国、德国、以色列、日本和瑞典，反映出对聚变能开发的兴趣和为其提供的资金正在全球范围内激增。

聚变行业协会发布的题为《2024年全球聚变行业》[15]的年度聚变行业报告已是此类报告的第四份，该报告显示，聚变能产业现已吸引了共计73亿美元的投资（超过了2023年的62亿美元）。该报告调查了45家私营聚变能公司，既有老牌公司，也有初创公司。尽管美国在这一领域仍处于领先地位，有25家运营中的聚变能公司（包括许多行业翘楚），但该行业的地域分布正越来越多样化，每13个国家至少有一家聚变能公司，中国、德国、日本和英国则各有三家公司。■

聚变行业协会 公布的资金 (10亿美元)

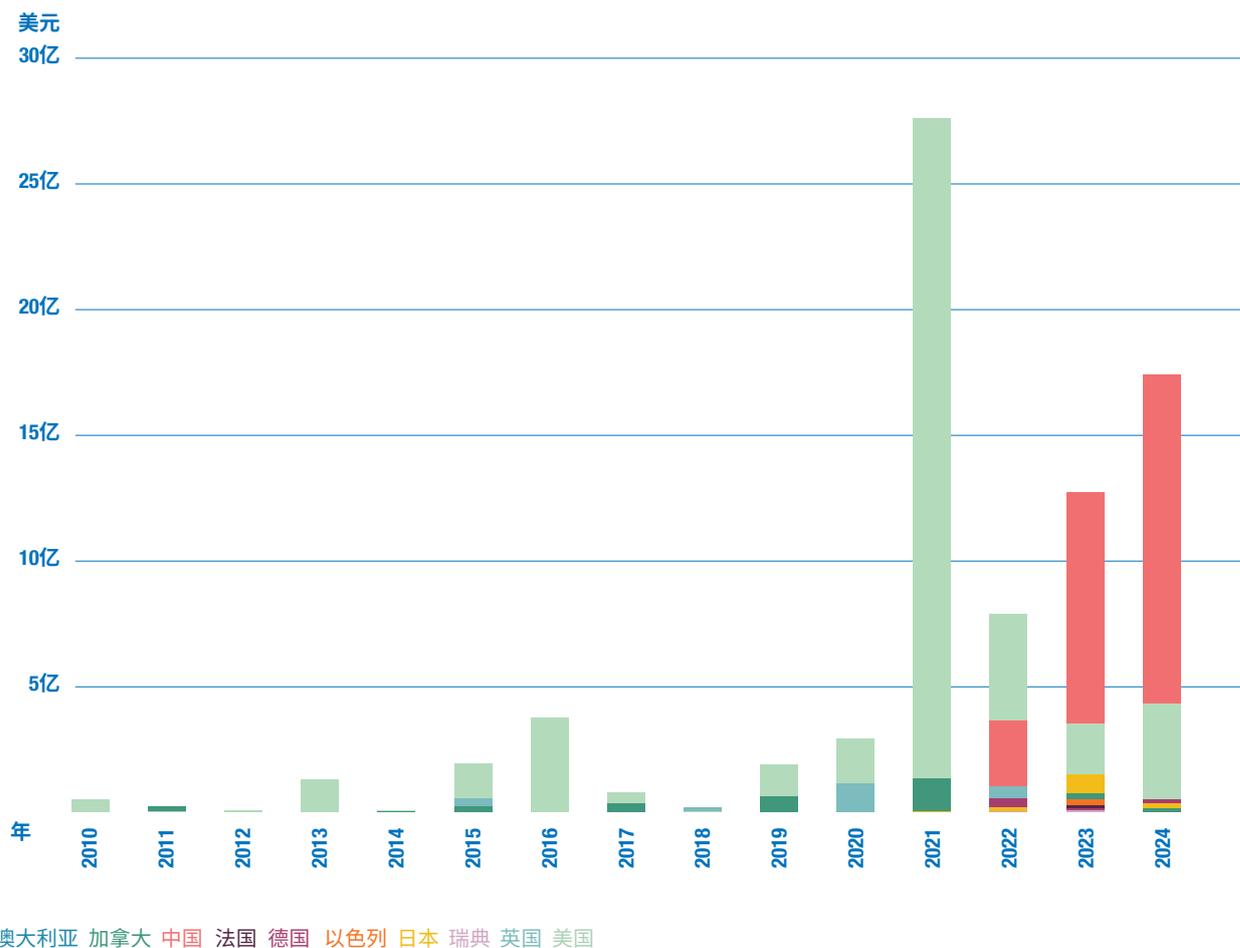


聚变行业协会：
《2024年全球
聚变行业》



七国集团领导人
阿普利亚公报

2010-2024年按成员国分列的 对聚变能公司的权益投资^[54]



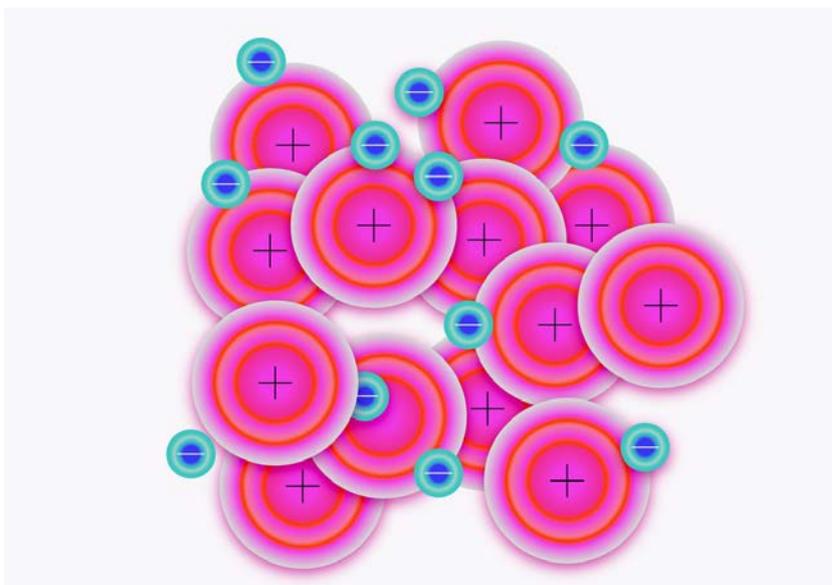
聚变能
基地

制定监管方案

监管机构和立法机关正在越来越多地应对聚变能带来的挑战和机遇。2024年7月，美国总统拜登签署了《2023年加速部署清洁能源所需的多功能先进核能法案》（或称“2023年ADVANCE法案”）[55]，使之成为法律，其中纳入了两党的《聚变能法案》[56]的一些条款。该立法旨在通过提供明确的监管权力和投资激励措施，促进商业聚变能的开发。这些条款支持核管理委员会早先做出的一项决定，即把聚变能监管与裂变能监管分开，在副产品材料框架下对近期聚变能系统（类似于粒子加速器）进行监管。2023年，加利福尼亚州成为美国将聚变能作为有别于裂变能的独立技术的第一个州。核管理委员会正在起草聚变系统的许可证审批导则[57]。

英国政府确认，英国所有已规划原型聚变能设施将继续由环境机构及健康和安全局监管，这与核电厂不同，后者由核监管办公室监管。

此外，由加拿大、日本和英国作为成员、巴林和新加坡作为观察员组成的“敏捷国家”聚变



能工作组提出了联合建议[58]，承认聚变能可以为应对气候变化和能源安全等全球挑战做出重要贡献。该政策文件还强调了若干国家正在采用的聚变能监管统一方案的益处；并主张明确一个监管框架，对独立于聚变技术的聚变能设施适用，保持对人类和环境的适当保护，且与聚变能的危害相称，同时保持透明并支持创新。

德国所走的道路也差不多。教育、研究和技术评估委员会2024年举行的一次公众听证会强调，有必要为聚变能制定一个务实、独立且有利于创新的法律框架[59]。此框架旨在鼓励私人投资，并支持聚变技术的市场开发。■



展望

各部门趋势分析
以及世界各地
聚变能发展细分

部门展望

聚变开发商和最终用户共同推进聚变能商业化的主要实例概述

石油和天然气行业

石油和天然气行业一直在大量投资聚变能公司，认为在全球努力逐步淘汰持续不减的化石燃料以在2050年前实现净零排放的背景下，有必要使其投资组合多样化。除了雪佛龙和壳牌公司，投资聚变能公司的化石燃料巨头还包括西方石油公司、埃尼公司和挪威炼油公司 — 挪威国家石油公司[60]。

TAE科技公司是一家位于加利福尼亚州的初创公司，正在探索利用其聚变能技术，为西方石油公司的子公司Oxy低碳风险投资有限责任公司正在开发的直接空气捕集设施提供动力。两家公司于2024年6月签署了一份谅解备忘录，以寻求将TAE科技公司的聚变技术商业化的机会，为直接空气捕集装置提供无排放的电力和热能。TAE科技公司创建于1998年，吸收了科技巨头谷歌、投资银行高盛及石油公司壳牌和雪佛龙等公司12亿美元的投资[61]。该公司的目标是在21世纪30年代初建成一座并网聚变电厂。

一些专家认为，直接空气捕集虽然尚未得到证实，但它可以去除空气中的二氧化碳，消除几十年来对大气层造成的破坏，对实现净零排放至关重要。但是，直接空气捕集要在技术和经济上可行，就需要一种持续不断且经济实惠的零排放能源，那就是聚

变能提供的能源。

除投资TAE科技公司外，壳牌、雪佛龙和挪威国家石油公司还投资了Zap能源公司。Zap能源公司位于美国西雅图，其目标是在十年内部署第一座并网聚变电厂。

埃尼公司、挪威国家石油公司和壳牌公司都投资了联邦聚变系统公司。2023年，埃尼公司和联邦聚变系统公司签署了一项合作协议，以支持联邦聚变系统公司技术的产业化。预计联邦聚变系统公司的聚变电厂将于21世纪30年代初投入运行。到目前为止，联邦聚变系统公司已获得20亿美元的投资。埃尼公司还持有罗马附近正在开发的意大利偏滤器托卡马克试验设施25%的股份，该设施专注于研究工作，包括提取聚变过程所产生热量的解决方案[62]。■

技术部门

全球科技公司已公开表示，希望利用聚变能来满足支持其快速开发人工智能系统的数据中心急剧增长的电力需求。2024年1月，有人引述开放人工智能研究中心（OpenAI）首席执行官萨姆·奥特曼的话说，未来人工智能的发展将需要的无异于聚变能所能提供的那种重大“突破”[63]。

据报道，奥特曼自己对美国一家聚变技术开发商Helion能源公司的投资超过了3.75亿美元，



这家公司的投资人还包括领英 (LinkedIn) 联合创始人里德·霍夫曼、易贝 (eBay) 创始人彼得·蒂尔和脸书 (Facebook) 联合创始人达斯廷·莫斯科维茨等。作为开放人工智能研究中心投资方之一的微软公司正在研究聚变等其他清洁能源，力争到2030年实现二氧化碳排放量为负的目标。

微软于2023年3月签署了一项协议，从Helion能源公司目前计划于2028年投产、输出功率为50兆瓦（电）的首座聚变发电厂购买电力。据报道，总投资六亿美元的Helion能源公司正在研发

第七台原型机，该公司表示，这台原型机将验证能够利用聚变发电 [64]。

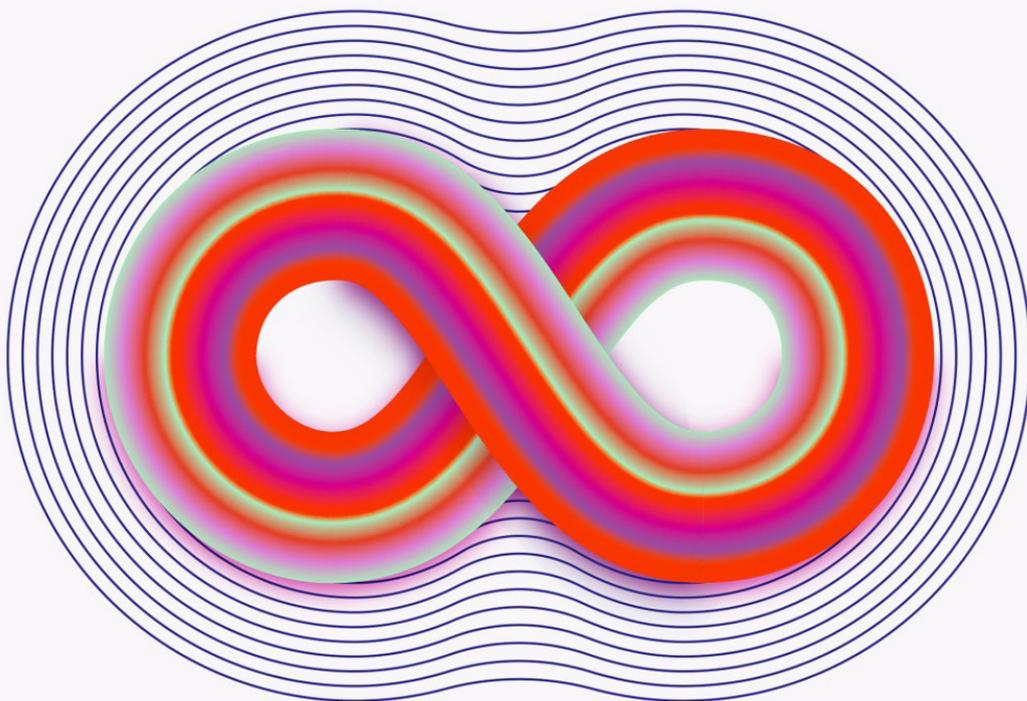
微软公司联合创始人比尔·盖茨和在线零售商亚马逊 (Amazon) 创始人杰夫·贝索斯一直是聚变能源初创企业的主要投资人，包括通过盖茨的突破能源风险投资基金，该基金还吸收了英国商人理查德·布兰森、媒体大亨迈克尔·布隆伯格和中国在线零售商阿里巴巴 (Alibaba) 联合创始人马云的投资。2019年，该基金与其他投资方一起对联邦聚变系统公司 [65] 进行了1.15亿美元的初始投资。贝索斯对聚变的商

业兴趣至少可以追溯到2011年，当时他加入了一个向加拿大聚变初创公司 — 通用聚变公司投资约2000万美元的小组。通用聚变公司现已获得三亿美元的投资，正在开发磁化靶聚变。■

电动汽车工业

由日本本田汽车公司支持的以色列聚变初创公司nT-Tao于2024年1月表示，它计划开发微型聚变电厂，用作电动汽车充电站，目标是在21世纪30年代实现该技术的商业化。

▲
图片来源：Ana Kova，美国。



据该公司称，每个充电站的输出功率为10 000至20 000千瓦，体积小大到可以装进一个货运集装箱。到目前为止，该公司已从日本三井住友海上保险公司和本田汽车公司[66]等投资方那里筹集到2800万美元资金。那家汽车制造商认为聚变能有可能改变电动汽车的游戏规则[67]。

在中国，电动汽车制造商尼奥收购了聚变技术初创企业 — 新奥聚变公司20%的股份，该公司50%股份由安徽省政府所有企业和投资机构持有。这家注册资金超过七亿美元的初创公司将开展

研究与发展，目标是20年内在全球实现聚变技术的商业化[68]。■

供应链

国际热核实验堆项目为建立全球聚变能供应链奠定了坚实的基础。国际热核实验堆成员各自的机构都与公司和研究与发展组织签订了自己的合同，通过各种采购安排提供实物捐助。这些机构提供从真空室扇段到回旋振荡管和高压电源的所有产品，形成了一个新兴私营聚变部门现在可以利用的供应链。

聚变行业协会[69]资料显示，2023年，聚变能公司在供应链费用上的支出超过了6.12亿美元，而2022年的这一支出约为4.89亿美元。

这些数字基于对各公司的调查，可能比较保守，因为并非所有公司都做出了回复。支出最多的是真空泵等非聚变专用物项，以及原材料、承包工程和燃料。与2023年相比，各公司预计2024年在供应链方面的支出将增加24%，其中77%的公司将投资于扩大产能，以支持聚变产业。

供应链活动不断增加的一个例子是，总部位于英国的聚变公司 — 托卡马克能源公司和日本住友商事株式会社于2023年7月达成协议，在日本和全球合作扩大商业聚变能。根据该协议，住友商事株式会社将为旨在加强全球聚变供应链的与托卡马克能源公司的联合项目投入专门知识和资金。住友商事株式会社的目标是成为全球聚变电厂融资、建造和运营的领导者，而托卡马克能源公司则力图加速其球形托卡马克装置在21世纪30年代末商业化和工业化[70]。到目前为止，托卡马克能源公司已获得三亿美元的投资。

这家总部位于英国的公司也在开发用于聚变能以外应用的高温超导（HTS）磁体技术。2023年1月，该公司表示已与日本古河电气工业株式会社签署协议，为其聚变装置原型提供数百公里长的高温超导磁带。这种高温超导磁带由古河电气工业株式会社开发和提供，目前正在美国纽约的一个场址进行生产[71]。

2023年，北美最大的钢铁制造商和钢铁回收商纽柯钢铁公司与Helion能源公司签署了一项协议，在美国纽柯钢铁制造厂建造一座500兆瓦（电）的聚变电厂。据该公司称，这是首个如此规模的聚变能协议，有望为全球工业制造领域的脱碳铺平道路[72]。

朗维尤聚变能源系统公司的目标是将基于激光的惯性约束聚变用于商业发电。2024年4月，该公司与福陆公司签订合同，利用先进、高效的激光和人工智能优化，设计并建造一座模块化电厂。电厂初始设计供电1-1.6吉瓦，初始440兆瓦（电）电厂将于2027年设计完成，并于2032年投入运营。主要挑战包括管理放射性氙和使聚变产生的蒸汽适应电网。朗维尤聚变能源系统公司正在考虑各种选址，包括重新利用燃煤电厂，以保留工作岗位和基础设施。

与此同时，英国原子能管理局和捷克研究组织 — 雷兹研究中心于2024年5月签署了一项多年期协议，为英国能源生产用球形托卡马克原型聚变厂测试高温超导磁带。将开发一个独特的试验装置，用于研究聚变相关中子能谱对在高达1.5亿摄氏度的温度下约束等离子体的高温超导磁带的影 响。这一装置预计将于2026年投入使用，届时将提供有关高温超导磁带耐久性的数据，从而有助于能源生产用球形托卡马克高温超导磁体的设计和寿命。■

公用事业

美国公用事业公司 — 康斯特雷逊能源公司已在全国运行21座核反应堆，计划到2030年实现二氧化碳中和。该公司将负责Helion能源公司计划于2028年投

运、为微软公司供电的首座聚变电厂[73]的电力营销和传输。

加拿大最大的电力公司之一 — 安大略电力公司也希望为聚变电厂的部署做出贡献。2024年6月，该公司宣布与美国聚变公司Stellarex[74]签署了一份谅解备忘录，探索在安大略省开发和部署聚变能。安大略电力公司和Stellarex公司表示，它们将探索建立一个聚变能杰出中心，并确定未来在安大略省选址和部署仿星器聚变电厂的可能性。

另一家加拿大公用事业公司 — 布鲁斯电力公司于2022年宣布与通用聚变公司和加拿大核创新研究所签署了一项协议，将合作促进在安大略省部署聚变电力。由于核能已经提供了该省近三分之二的电力生产，这三个组织表示，它们将以该地区现有的清洁能源技术、技能和专门知识为基础寻求发展，侧重于利益相关方参与，努力提升居民、企业和行业对聚变能改变安大略省清洁能源生产的潜力的认识[75]。

据报道，中国的一家大型公用事业公司 — 安徽省能源集团有限公司投资了聚变公司聚变新能[76]。■



聚变行业协会：
《2024年聚变
行业供应链》

地区展望

非洲

阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥和突尼斯

在非洲，目前专门针对聚变能的研究与发展还很有限。但该地区有聚变各相关领域的专门知识和技能娴熟的专业人员。聚变相关的等离子体科学研究由多国科学家个人和团体开展。例如，阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥和突尼斯正在为等离子体科学领域教育采取步骤。这些国家的大学积极开展研究，重点领域包括射频等离子体及其应用、材料科学、等离子体化学、等离子体理论和建模等。此外，埃及和利比亚还拥有两个托卡马克，进一步强化了它们对全球科学界的贡献。这些举措凸显了非洲对等离子体科学和聚变科学教育与研究的参与越来越多。■

亚洲及太平洋

澳大利亚和新西兰

在澳大利亚，聚变研究由澳大利亚国际热核实验堆论坛协调，该论坛是一个由来自不同学科的科学家和工程师组成的网络。研究工作主要集中在等离子体诊断学、等离子体理论和建模以及聚变应用材料研究方面。澳大利亚还拥有HB11能源公司，这是一家专注于激光驱动聚变的私营聚变公司。

在新西兰，私营公司 — Openstar技术公司已筹集到1200万美元，用于开发基于悬浮偶极方案的聚变技术。■

中国

中国有十多座聚变实验装置，有的已投入运行，有的还在建设中，有的完成了规划。这些项目都有国有工业企业、大学和研究机构支持。先进超导托卡马克实验装置和环流三号等主要聚变装置已取得了卓越的实验成果，中国在这些成功的基础上再接再厉，投资于后续聚变项目，包括紧凑型聚变

能实验装置（BEST）和中国聚变工程实验堆，为聚变电厂的部署铺平道路。此外，中国正在重点培养一支专门从事聚变工作的队伍，目标是培训1000名新的等离子体物理学家。中国还在建设一座名为“聚变堆主机关键系统综合研究设施”（CRAFT）的研究设施，作为开发和测试聚变能电厂组件的平台，有望2025年完工[77]。

一些公司也在大量投资于聚变研究，规划项目众多[78]。2024年，中国政府宣布成立一家新的国营公司[79]，其宏伟计划是建造一座工程研究中试厂，目前正处于概念设计阶段。该中试厂的目标是实现稳态运行聚变功率300兆瓦、脉冲运行聚变功率600兆瓦，并在设计阶段实现灵活，以供调整。计划于2030年开始施工，预计到2035年完成所有硬件建设。为了支持这项工作，正在对环流三号托卡马克进行升级，以便能够进行氘-氘实验。氘-氘升级预计将于2027年完成，但氘-氘投运将取决于该装置的许可证审批和调试情况。■

印度

印度在聚变和等离子体研究、开发、筹资和捐款方面的主要重点是围绕国际热核实验堆项目。印度运行着若干实验研究装置，目前正在制定未来25年的聚变路线图，其中包括在21世纪40年代末启动印度示范聚变电厂之前建造两台新装置的计划。第一台装置将是一个基于球形托卡马克的聚变中子源，而第二台装置将是一个为稳态运行设计的传统托卡马克，大小约为国际热核实验堆的三分之二。■

伊朗伊斯兰共和国

伊朗伊斯兰共和国目前运行着三台托卡马克：Alvand、Damavand和IR-T15，专门用于研究不同实验条件下的等离子体。■

以色列

自2019年以来，以色列一直是私营聚变公司nT-Tao的总部所在国。该公司披露已筹资3200万美元，正积极开发用于能源生产的仿星器技术。■

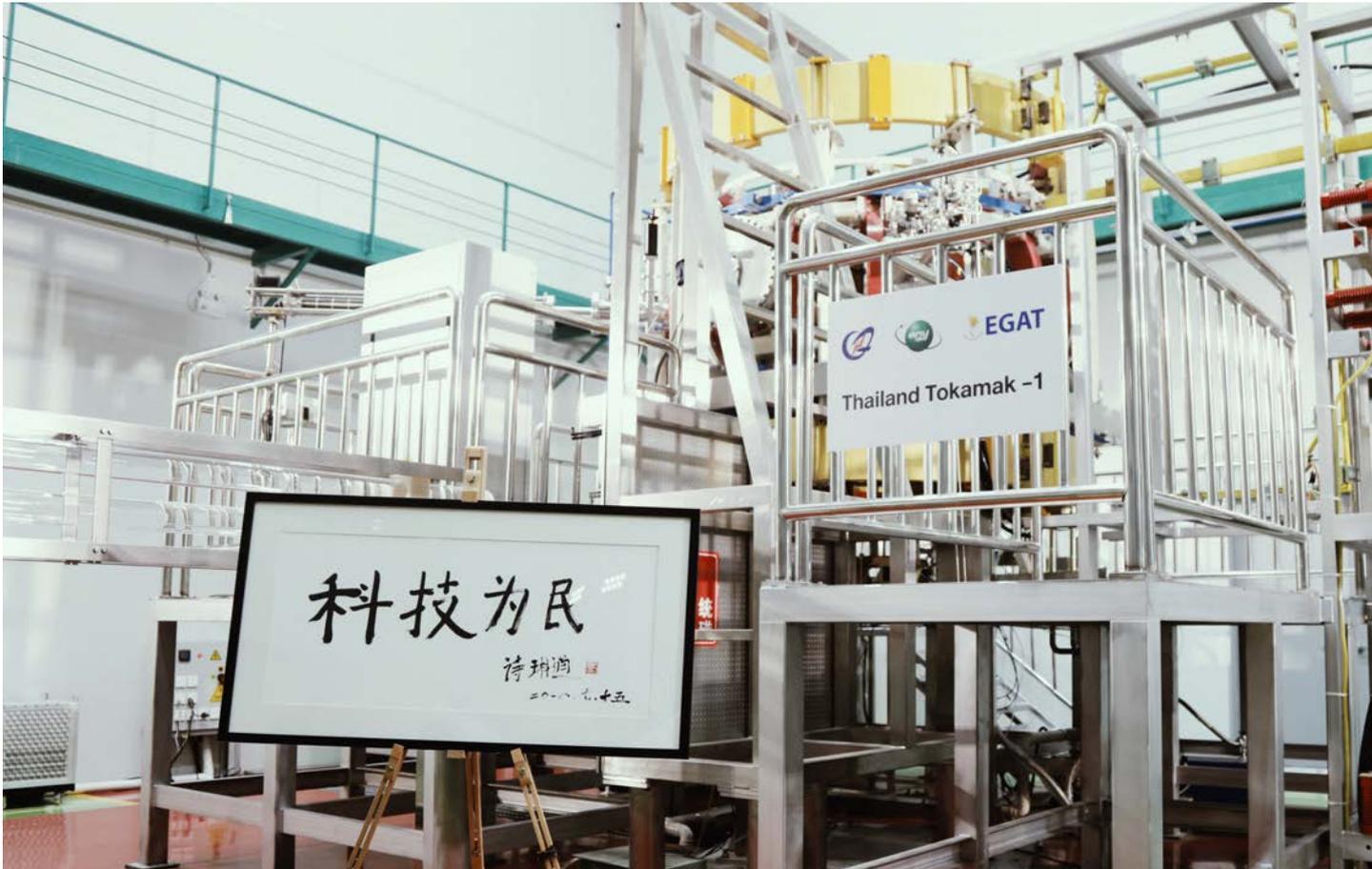


日本

日本运行着20多座聚变实验装置，处于推进聚变研究与发展的前沿。日本的聚变战略设想分阶段实现聚变能的实际应用。这些阶段包括2025年之前的日本示范聚变电厂的概念设计和基本技术开发、2025年至2035年的工程设计和全面技术开发，以及2035年之后根据国际热核实验堆项目的进展情况决定是否过渡到日本示范聚变电厂的建造。

此外，日本和欧盟通过“扩大方案协定”开展的双边协作侧重于：(1) 电厂设计及研究与发展；(2) 聚变材料辐照设施的工程验证和设计项目；(3) 2023年底开始运行的JT-60SA的开发利用。各大学和专业机构也在利用研究装置和高功率激光设施开展各种学术研究工作。■

² 该项目也称为国际聚变材料辐照设施工程验证和工程设计活动（IFMIF/EVEDA），其目标是为正在西班牙建造的国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源（IFMIF-DONES）提供概念验证。作为IFMIF/EVEDA活动的一部分，建造了三座原型设施，各验证IFMIF-DONES三个关键组成部分中的一个。位于德国卡尔斯鲁厄的试验设施用于测试IFMIF-DONES高通量试验模块的概念。位于日本大洗的锂靶设施用于测试IFMIF-DONES锂液幕的概念。最后，位于日本六所村的加速器设施测试IFMIF-DONES的氦核束粒子加速器的概念。



黎巴嫩

黎巴嫩的学术研究致力于推进聚变科学的关键方面，包括等离子体湍流、约束、诊断学发展和偏滤器概念。■

巴基斯坦

巴基斯坦目前运营着两台托卡马克：GLAST-III 和 MT-I。其第三台托卡马克 MT-2 正在建设中，第四台托卡马克 PST 正在规划中[80]。这协调统一的努力旨在加强巴基斯坦在聚变能方面的能力。■

大韩民国

大韩民国正在推进聚变路线图，目标是在2050年之前建造示范聚变电厂。大韩民国示范聚变电厂（K-DEMO）路线图包括直到2030年的概念设计活动，然后是2031年至2035年的工程设计。这些努力

得到了韩国超导托卡马克先进研究装置和VEST托卡马克前沿研究与支持，为2035年所需的关键科学和技术奠定了基础。此外，大韩民国正在考虑一个题为“韩国聚变工程先进试验综合设施”的新项目。该设施的设计符合聚变电厂增殖包层性能评价的要求，包括长期连续运行、高聚变中子通量和用于辐照氙增殖装置的大尺寸靶[81]。综合设施的特点是：

- 综合增殖试验设施利用电流最大10毫安、电压40兆电子伏的氙核加速器驱动系统促进产生中子之类的聚变，而中子产生对试验增殖包层部件至关重要；
- 增殖系统试验设施旨在验证包层及其辅助系统的可靠性和安全性；
- 燃料循环试验设施旨在以1:10的试验规模验证使用H2/D2的燃料循环持续运行。■



沙特阿拉伯

沙特阿拉伯正在投资研究与发展先进的能源技术，包括聚变。作为该战略的一部分，JIMCO技术基金对通用聚变公司和联邦聚变系统公司进行了投资。■

新加坡

据报道，新加坡政府拥有的新加坡投资公司淡马锡控股有限公司对联邦聚变系统公司进行了投资[82]。■

泰国

2023年，泰国与中国合作，启动了其第一台托卡马克TT-1[83]。作为东南亚首台托卡马克，TT-1是推动泰国及其邻国聚变研究的基础性设施，有望成为聚变等离子体和工程开发的宝贵学习工具[84]。■

若干国家正在带头发起一项倡议，设想建立阿拉伯聚变能机构，作为协调该地区聚变能研究与合作的中心枢纽，为未来的聚变能项目争取资金，并确保这些国家积极参与全球聚变能工作。

1 泰国正式启动TT-1（图片来源：中国科学院合肥物质科学研究院，中国）。

2 拟议的韩国聚变工程先进试验综合设施渲染图（图片来源：韩国聚变能研究所，大韩民国）。



W7-X 等离子体真空室内视图（照片提供：马克斯·普朗克等离子体物理学研究所，德国）。



欧洲

欧洲聚变联盟、FuseNet、欧洲聚变能组织及国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源

欧洲聚变联盟是为协调和资助整个欧洲的聚变研究与发展而成立的欧洲研究与发展联盟³。欧洲聚变联盟路线图采用了里程碑方案，设定了短期、中期和长期目标[85]。最初，路线图侧重于为国际热核实验堆项目做出贡献。随后，注意力转向预计将于2050年开始运行的欧盟示范聚变电厂。

短期目标强调研究、开发和建造国际热核实验堆和材料测试设施，如国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源，同时继续进行欧盟示范聚变电厂的概念设计。从中期来看，重点将转向对国际热核实验堆和国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源的科学和技术利用上，并在工业界的参与下开始欧盟示范聚变电厂的工程设计阶段。长期愿景包括设计、建造和运营欧盟示范聚变电厂，同时加强行业合作。■

FuseNet是欧洲聚变教育网络，通过其教育发展和流动计划成为聚变教育的中心枢纽。作为欧洲聚变联盟的附属组织，FuseNet的任务是推进和协调支持欧洲聚变联盟路线图的教育活动。FuseNet的倡议包括为硕士生提供资助计划、为博士生开展网络活动、编写教材以及为低年级学生组织活动。此外，FuseNet还致力于加强与产业界的关系，确保教育工作与聚变领域的需求和进步保持一致。■

欧洲聚变能组织是欧盟管理欧洲对国际热核实验堆贡献的组织。欧洲负责项目的近一半，其他六个成员（中国、日本、印度、大韩民国、俄罗斯联邦和美国）平均分摊其余部分。欧洲聚变能组织与欧洲工业界和研究组织合作，开发和制造欧洲要为国际热核实验堆提供的高科技组件。■

近年来，法国、德国、意大利和瑞典等国的几家私营公司一直在大力开发聚变技术。为了确保欧洲的长期能源供应，十家欧洲公司于2024年6月商定成立欧洲聚变协会[86]。这个统一的机构将联合聚变产业的各利益相关方和各国政府，加速聚变能的产业化。■

³ 欧洲聚变联盟参与国包括奥地利、比利时、保加利亚、克罗地亚、捷克共和国、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、拉脱维亚、立陶宛、马耳他、荷兰王国、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、乌克兰和英国。



德国

德国在聚变能发展的多个领域处于领先地位，包括仿星器研究、托卡马克物理学、聚变技术和材料以及等离子体与壁相互作用。位于德国的W7-X是世界上最大的仿星器，采用模块化超导线圈，可实现稳态等离子体运行，以探索电厂相关制度。

德国政府一直在加快聚变商业化的步伐，认识到本国私营公司的崛起，并致力于利用它们的贡献和参与。活跃在聚变能部门的德国公司成立了Pro-Fusion工业协会[87]。该协会将作为一个切入点，助力聚变经济生态系统的发展，从长远来看，还将影响公众对聚变能的想法。■

意大利

意大利的聚变计划充满活力。偏滤器托卡马克试验设施是意大利一个新的聚变项目，预计2025年后投入运行。偏滤器托卡马克试验联合体由许多意大利

研究机构、政府和地区伙伴、国际利益相关方和私营公司组成，已筹集了近五亿欧元的资金来建造设施。意大利还拥有若干聚变实验研究设施，并积极参与国际热核实验堆运行的筹备工作和欧盟示范聚变电厂的设计工作。意大利工业已获得超过18亿欧元的聚变技术开发合同。■

法国

法国是国际热核实验堆和其他若干聚变研究装置的东道国，其中包括钨环境稳态托卡马克和各种激光设施。此外，初创公司 — 复兴聚变公司的总部也设在法国，该公司正在开发一种采用高温超导磁体和液体壁的仿星器概念。为了支持这一领域的研发工作，法国政府正在探索建立激励公私合作模式的框架。■

哈萨克斯坦

哈萨克斯坦的聚变研究活动包括一系列举措，从侧重于低温等离子体的小型试验台到哈萨克斯坦托卡



马克材料试验托卡马克等大规模聚变研究实验，以及加速器在聚变研究中的应用。哈萨克斯坦与国际热核实验堆签订了合作协议，研究等离子体诊断的抗辐射能力和结构材料的质量。此外，哈萨克斯坦还与白罗斯、吉尔吉斯斯坦、俄罗斯联邦和塔吉克斯坦合作，共同使用哈萨克斯坦托卡马克材料试验托卡马克，进一步加强了该地区的研发工作。■

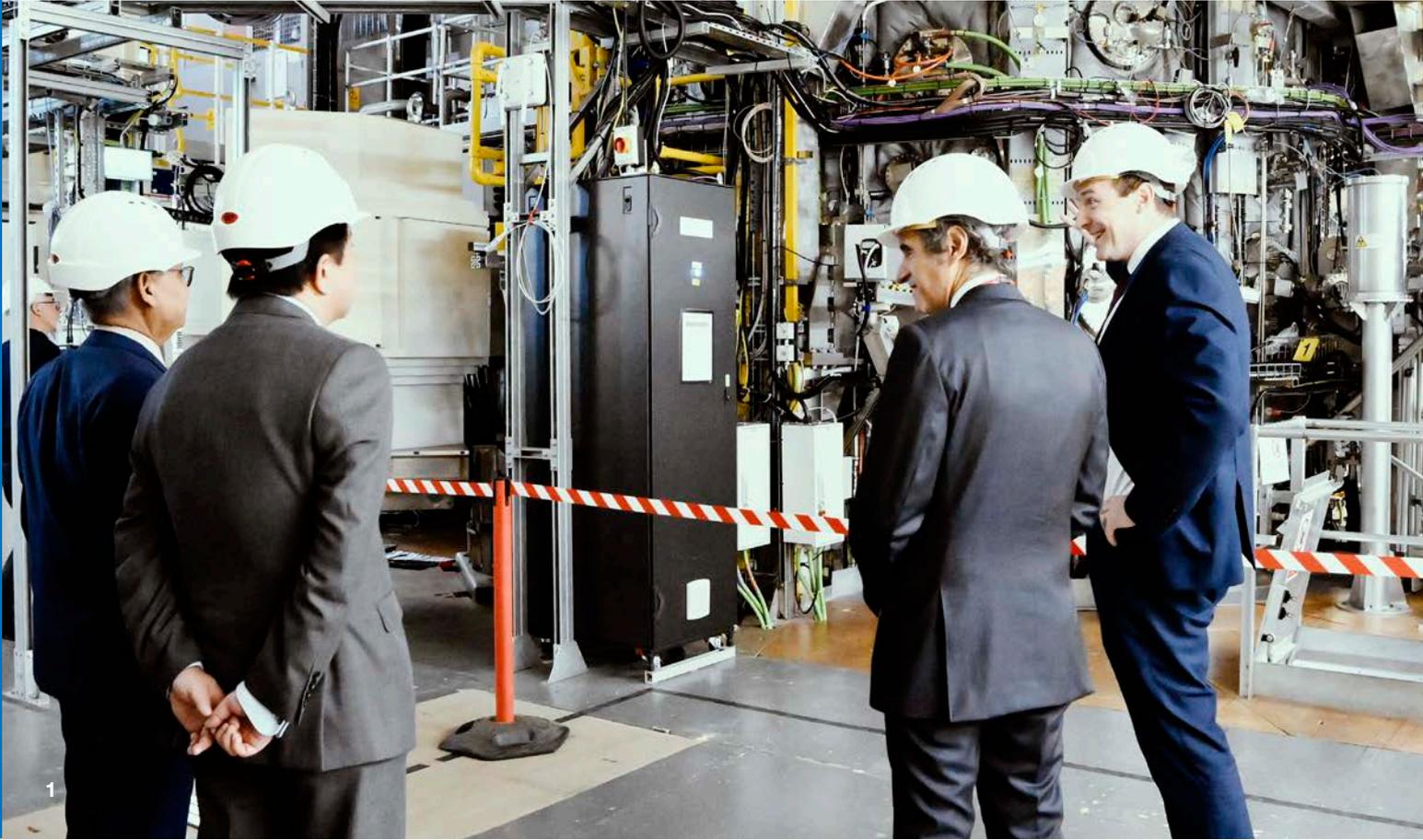
俄罗斯联邦

在俄罗斯联邦，聚变能的发展以《国家原子能战略》为指导，其重点是纯聚变能装置和聚变—裂变混合反应堆。该倡议的主要参与者包括国家原子能公司（Rosatom）、科学和高等教育部（包括俄罗斯科学院）以及国家研究中心库尔恰托夫研究院。研究工作主要集中在托卡马克、激光系统和聚变—裂变混合装置上。后者被认为对俄罗斯联邦未来核反应堆和聚变电厂的运行具有重要战略意义。■



1 国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源是一个正在西班牙格拉纳达建造的材料试验设施。西班牙和克罗地亚是项目牵头国，西班牙提供全部建设费用的50%和运行费用的10%，克罗地亚负责各5%。国际聚变材料辐照设施示范聚变电厂定向中子源将使用粒子加速器产生连续波氦核束，瞄准液态锂幕制成的靶。氦和锂之间的相互作用将产生足够的自由中子来模拟规划中欧盟示范聚变电厂随时间变化的中子通量。锂靶材的正后方是高通量测试模块，该模块将容纳用于中子辐照测试的材料样品胶囊[88]。

2 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观位于英国卡勒姆的远程操作和机器人测试设施。



英国

英国原子能管理局是英国负责研究和交付聚变能的国家组织，主要监督英国工业聚变解决方案有限公司，而后者负责交付能源生产用球形托卡马克原型聚变厂。此外，英国原子能管理局正在实施英国的“聚变未来计划”，以支持英国聚变战略。该计划包括在英国原子能管理局位于英格兰南部的卡勒姆园区建立新设施，以推进新技术的发展并扩大聚变燃料循环能力。“聚变未来计划”旨在通过国际合作和未来聚变电厂的开发，促进世界领先的创新并激发整体工业能力。此外，还将引入一系列聚变技能，以培养所有学科和层次的专业人才。

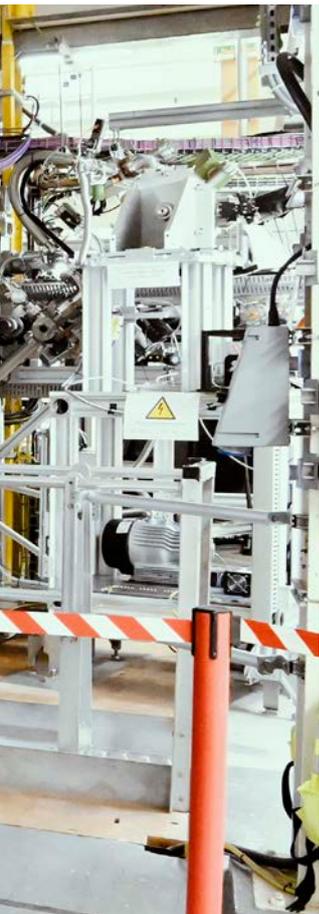
2021年，英国原子能管理局在南约克郡罗瑟勒

姆附近创建了聚变技术设施[89]，为未来聚变电厂开发和测试材料和部件。英国原子能管理局还与学术界、其他研究机构和工业供应链在机器人和材料等多个领域开展合作。

英国原子能管理局的聚变装置包括兆安球形托卡马克（MAST）升级版和欧洲联合环托卡马克。欧洲联合环于2023年12月底完成了等离子体运行。英国原子能管理局目前正在监督欧洲联合环退役和改变用途项目[90]。该项目是一项世界首创的计划，将为未来聚变装置和电厂的开发贡献科学和工程知识。这些活动包括用机器人拆卸欧洲联合环托卡马克、研究回收氙并再次用作聚变燃料以及在英国原子能管理局卡勒姆园区的进一步开发。■

1 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观兆安球形托卡马克升级版。

2 智利核能委员会的L.韦尔塔在智能源部副部长L.F.拉莫斯见证下签署原子能机构与智利政府之间的协议。



拉丁美洲和加勒比

阿根廷、巴西、智利、哥斯达黎加、墨西哥和秘鲁

聚变活动增加的全球趋势也反映在若干拉丁美洲国家，包括阿根廷、巴西、智利、哥斯达黎加、墨西哥和秘鲁。为了加强在聚变和等离子体物理学方面的地区能力，工作重点是推进研究，通过联合实验、研究实习、协调计划和专门针对等离子体物理学和聚变科学技术的夏校建立合作关系。

2024年，原子能机构普林斯顿等离子体物理实验室协作，推出了一系列新的网络研讨会，重点介绍拉丁美洲聚变和等离子体科学活动的当前进展和发展情况。

2024年5月，原子能机构和智利政府签署了一项加强核技术和锂合作的协议[91]。该协议旨在利用核技术加强锂矿开采，并为原子能机构提供更广泛的地区支助铺平道路。锂可应用于聚变和其他能源部门。

2024年6月，原子能机构和秘鲁政府签署了一项关于核技术应用于采矿业的合作联合声明，以帮助秘鲁保护环境，使其能够可持续地进行采矿和锂勘探[92]。■

3 原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西在2024年6月正式访问秘鲁期间与秘鲁外交部长J.冈萨雷斯·奥莱切亚签署协议。



原子能机构关于
拉丁美洲聚变活动的
网研讨会



北美洲

美国

几十年来，美国能源部一直通过科学办公室聚变能源科学计划对聚变研究进行投资。这些工作包括支持国际热核实验堆等国际合作，以及国家核安全管理局的惯性约束聚变计划。最近，能源部高级研究计划局（ARPA-E）将聚变研究和开发的潜在变革领域作为目标，重点强调如何及时实现聚变商业化。美国能源部聚变计划目前的重点是将聚变基础研究与应用研究相结合，以满足美国聚变工业不断发展的需要。美国拥有的聚变能源公司最多（共25家），其中包括许多行业翘楚。此外，美国的在运、在建或开发中的聚变装置数量也最多（超过40台）。在这种情况下，美国能源部目前正在协调一

系列广泛的新活动，以支持聚变最终的商业化。其中包括“基于里程碑的聚变发展计划”[93]、加强能源安全和技术领先地位的国际参与[94]以及各种机构间政府努力[95]，以评定国际竞争格局和市场发展，制定适当的监管框架，建设供应链，确保包容性职工队伍发展，确保能源和环境正义，确保可行的废物处置和回收途径，并确保公众参与。■

加拿大

加拿大在发展成熟的聚变工业所必需的诸如氘和氚生产及处理、机器人技术、远程操作和材料科学等关键领域具有渊博的专门知识。这些能力可用于支持聚变开发，并与聚变技术的需求充分保持一致。尽管有这些优势，但加拿大政府对聚变研究与发展的支持力度不大，目前的活动主要由学术机构和私营公司推动。

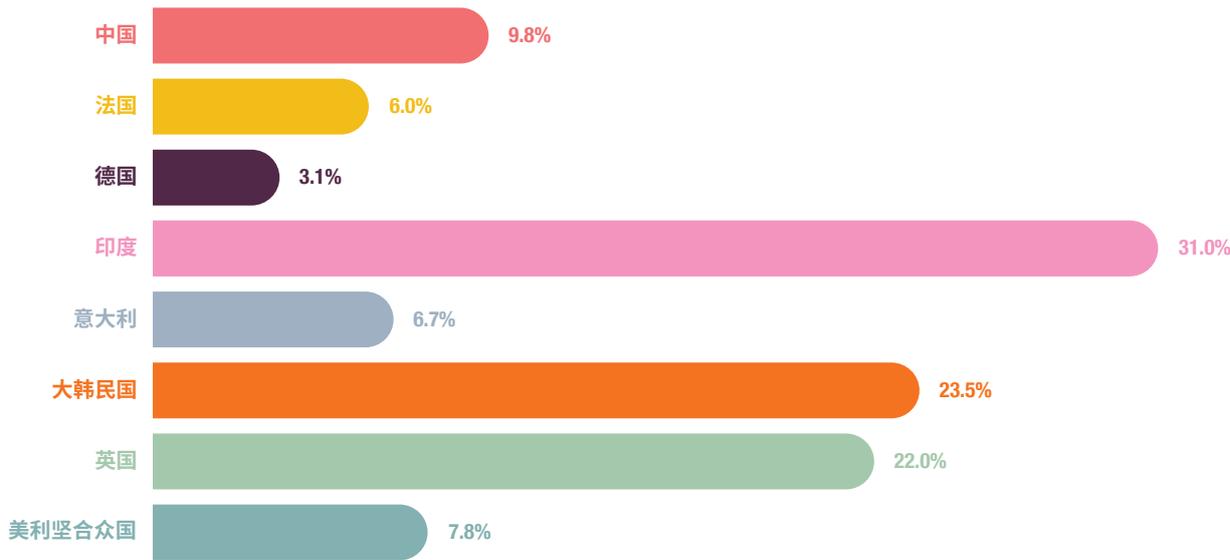


加拿大核实验室牵头发布的“加拿大聚变能”报告[48]敦促加拿大政府制定明确的政策和任务，以动员聚变生态系统。作为回应，加拿大核实验室宣布将开放其小型模块堆邀请程序，将聚变原型厂纳入其中[50]。加拿大核实验室还扩大了其加拿大核研究倡议计划，更加注重基于聚变的研究与发展，促进与先进核反应堆供应商的协作项目。■

▲
2024年9月，原子能机构总干事拉斐尔·马里亚诺·格罗西参观美国普林斯顿等离子体物理实验室。

取亦
聚变

数据



2006-2023年，各国在聚变能会议上发表的第一作者论文的复合增长率为正。在过去这17年中，印度、大韩民国和英国是

第一作者论文总数上升最快的国家，这反映出它们在国际合作中的参与度越来越高。这项贡献的增长凸显了全球协作在加快聚变

能进展方面的重要作用，因为共享专门知识和集体努力推动了创新，促进了科学突破。

2024年 聚变能： 快照

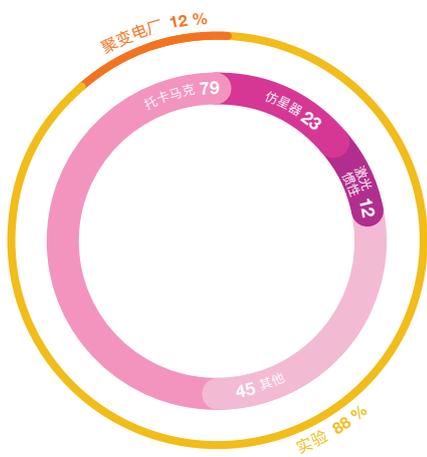
从2021年到2024年，聚变能部门经历了显著的增长和多样化。聚变项目总数激增，替代性惯性约束设计和仿星器设计显著增加，凸显出转向探索传统托卡马克之外的各种技术。

2024年，实验项目和聚变电厂的分布更加合理，表明该领域已趋于成熟。该部门的规划项目也大幅增加，反映出战略性的长期规划。此外，私营部门的参与几乎翻了一番，证明了商业兴趣和投资的增加，这是对公共部门持续大力支持的补充。2024年标

志着聚变能进入了一个充满活力的阶段，其特点是技术多样性、战略性规划和更强的公私合作驱动力。■

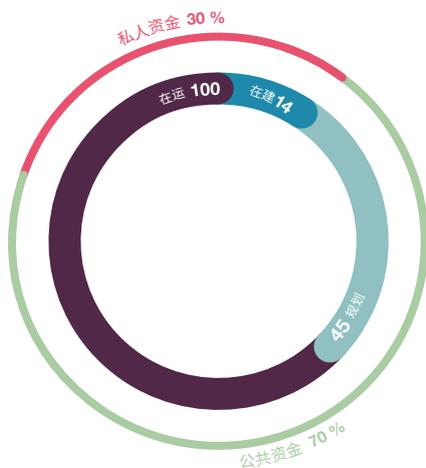
投资增长与各种各样的技术方案

聚变能部门的最新趋势表明，其未来前景广阔，特点是技术进步加快、投资增长和采用范围扩大。替代性聚变设计多样化，激光和仿星器项目显著增加，这表明人们正在探索各种技术途径来实现可持续的聚变能。

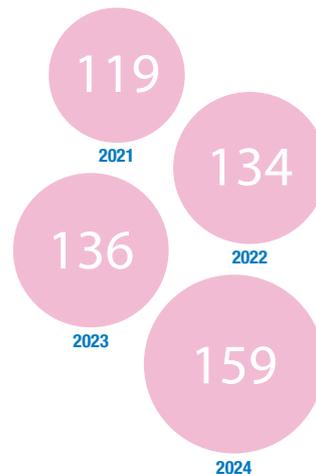


2024年，大多数聚变装置都是实验性设计（139台装置）。虽然托卡马克在2024年仍然占了主流，但其他装置设计近年来也越来越受欢迎。

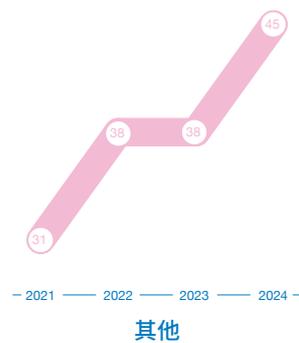
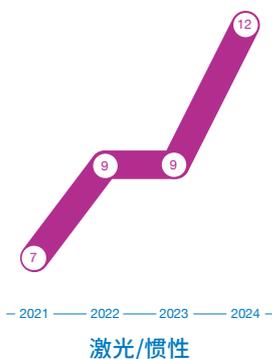
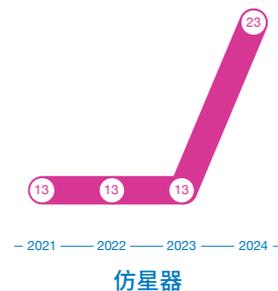
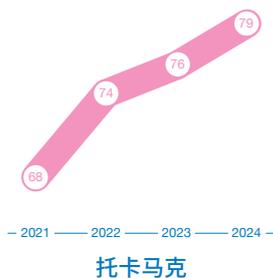
这种多样化方案可能大幅增强实现突破的潜力。公共部门和私营部门之间的持续合作对于加快技术开发和将成功的实验模型扩展为在运聚变电厂至关重要。■



2024年，用于聚变装置的公共资金保持稳定，而用于聚变项目的私人资金自2021年以来不止翻了一番。2024年的在运聚变装置数量历史空前，比2023年增加了5台，还有许多装置处于规划中。



随着聚变能项目数量逐年增加，公共和私营实体对聚变能部门的兴趣和投资也在不断拓展。



各年度聚合装置数量。

聚变能研究趋势 (2014-2023年)

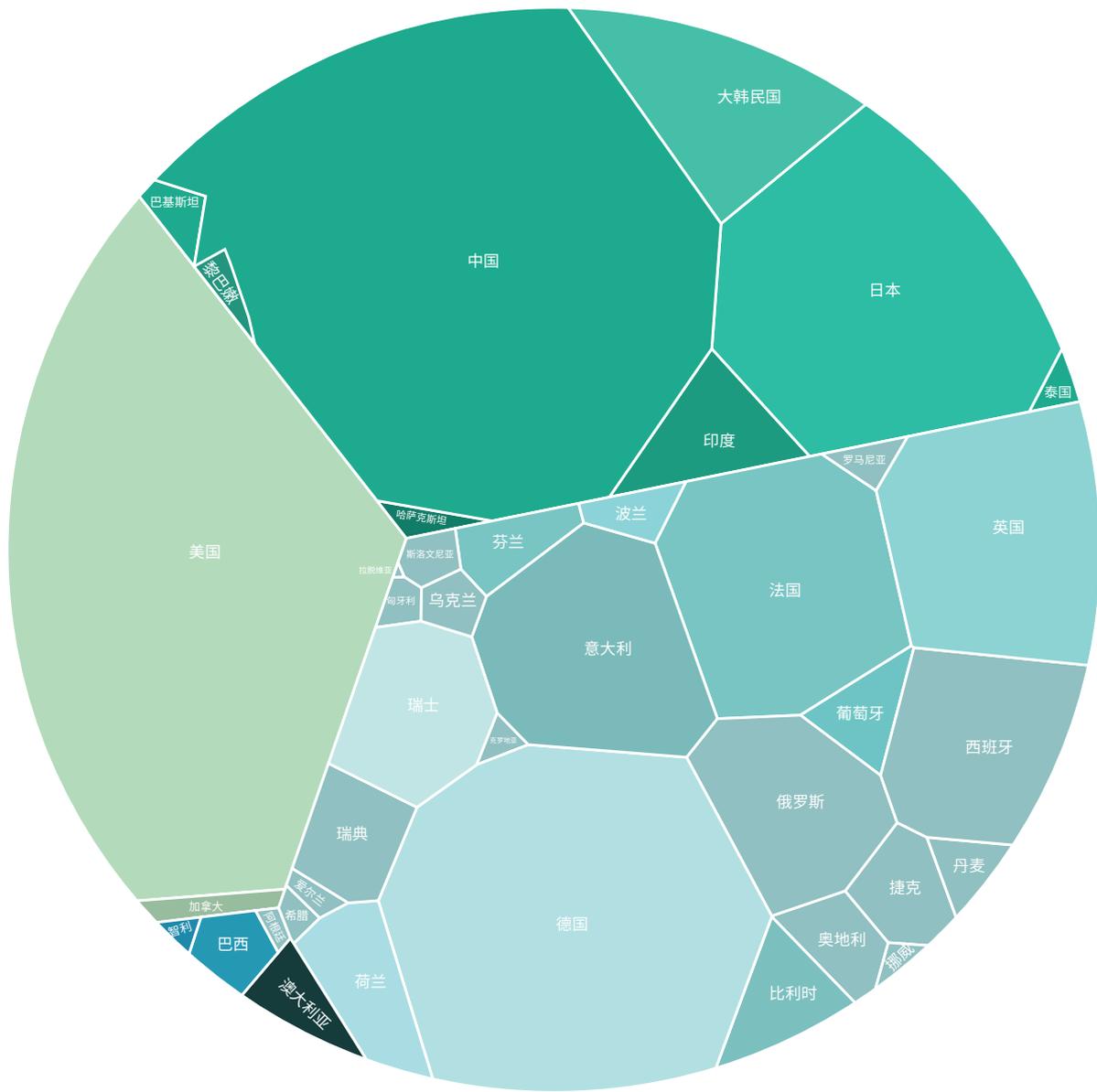
过去十年，世界各国都为聚变能研究做出了重大贡献。2014年至2023年期间，《核聚变》期刊累计录用的文章数量突显了这一领域的进步，以及对其兴趣的日益增加。

这里观察到的趋势所反映的是与《核聚变》内容直接相关的数据，并不一定反映聚变研究与发展的全球趋势。

多年来，投稿数量最多的国家是中国（录用858篇文章）。这凸显了中国过去十年对聚变的广泛关注。包括美国（762篇文

章）和德国（447篇文章）在内的其他国家在大量科技投资的推动下，也有不少有分量的投稿。此外，日本（346篇文章）、法国（200篇文章）、英国（196篇文章）、意大利（174篇文章）和西班牙（129篇文章）等国家也有长期的研究计划，是国际研究的重要参与者。亚洲除中国和日本之外的另一个主要贡献者是大韩民国（129篇文章），这进一步突出了该地区在聚变研究中日益重要的作用。印度（57篇文章）在这一领域也取得了显著进展。俄罗斯联邦（115篇文章）

在聚变研究领域保持着显著的存在。荷兰（47篇文章）、瑞典（43篇文章）、比利时（38篇文章）、捷克共和国（36篇文章）和澳大利亚（13篇文章）等国家一直保持稳定的投稿量，特别是通过国际伙伴关系和在聚变能专业研究领域。■



2014年以来发表的被引用次数最多的文章



2024年发表的下载次数最多的文章



2014年以来发表的下下载次数最多的文章

▲ 聚变能研究全球趋势，如《核聚变》期刊录用的文章数量（2014-2023年录用的文章）所示。国际热核实验堆和欧洲联合环的投稿分别计入法国和英国。

参考文献

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition (2022), <https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition>
- [2] EUROFUSION, Breaking New Ground: JET Tokamak's Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes (2024), <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>
- [3] NORMILE, D., First Plasma Fired Up at World's Largest Fusion Reactor (2023), <https://www.science.org/content/article/first-plasma-fired-worlds-largest-fusion-reactor3>
- [4] INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Reliable 403 Seconds Stationary H-mode Plasmas Demonstrated on EAST (2023), english.ipp.cas.cn/sywx/202304/t20230417_329393.html
- [5] KREMEN, R., Fusion Record Set for Tungsten Tokamak WEST (2024), <https://phys.org/news/2024-05-fusion-tungsten-tokamak-west.html>
- [6] DING, S., et al., A high-density and high-confinement tokamak plasma regime for fusion energy, *Nature* **629** (2024) 555–560, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07313-3>
- [7] SEO, J., et al., Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning, *Nature* **626** (2024) 746–751, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07024-9>
- [8] LEVITT, B. et al., Elevated Electron Temperature Coincident with Observed Fusion Reactions in a Sheared-Flow-Stabilized Z Pinch, *Phys. Rev. Lett.* **132** (2024), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.155101>
- [9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: Insights and Collaboration Opportunities (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/06/26/2421>
- [10] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, ENGINEERING, AND MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, The National Academies Press, Washington, D.C. (2021), <https://doi.org/10.17226/25991>
- [11] CHAPMAN, I., COWLEY, S., WILSON, H., Delivering fusion energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP), *Phil. Trans. R. Soc. A* **382** (2024), <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0416>
- [12] MIT ENERGY INITIATIVE, The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System (2024), https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2024/09/MITEI_FusionReport_091124_final_COMPLETE-REPORT_fordistribution.pdf
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Opens Fusion Energy Discussion at COP28 as Momentum Keeps Growing (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-opens-fusion-energy-discussion-at-cop28-as-momentum-keeps-growing>
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA World Fusion Outlook 2023, Outlooks, IAEA, Vienna (2023), <https://doi.org/10.61092/iaea.ehyw-jq1g>
- [15] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Global Fusion Industry in 2024 (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [16] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Fusion Industry Supply Chain: Opportunities and Challenges (2023), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/08/FIA-Supply-Chain-2023-FINAL.pdf>
- [17] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, The European High-level Roundtable on Fusion Energy Calls for Closer Collaboration Between the Public and the Private Sector (2024), https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/european-high-level-roundtable-fusion-energy-calls-closer-collaboration-between-public-and-private-2024-03-14_en
- [18] WORLD BANK, How Can Public-Private Partnerships (PPPs) be Successful? (2023), <https://www.worldbank.org/en/region/mena/brief/how-can-public-private-partnerships-ppps-be-successful>
- [19] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/energy-and-power/climate-smart-ppps-1>
- [20] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs: Further Reading and Resources (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/climate-smart-ppps-further-reading-and-resources>
- [21] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches Commercializing Fusion Energy Paper (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-commercializing-fusion-energy-paper/>
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Device Information System (2024), <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>
- [23] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN COMMISSION), et al., Analysis on a Strategic Public-Private Partnership Approach to Foster Innovation in Fusion Energy, European Union, Luxembourg (2024), <https://data.europa.eu/doi/10.2833/323326>
- [24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: Inflation Reduction Act Supporting the Future of DOE Science (2022), <https://www.energy.gov/science/articles/fact-sheet-inflation-reduction-act-supporting-future-doe-science>
- [25] US DEPARTMENT OF THE TREASURY, U.S. Department of the Treasury, IRS Release Proposed Guidance to Continue

- Investment Boom in Clean Energy Production (2024), <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2376>
- [26] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Consultation on a New National Policy Statement for Fusion Energy (2024), <https://www.gov.uk/government/consultations/fusion-energy-facilities-new-national-policy-statement-and-proposals-on-siting>
- [27] EUROPEAN COMMISSION, Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on Establishing a Framework of Measures for Strengthening Europe's Net-Zero Technology Products Manufacturing Ecosystem (Net Zero Industry Act), COM/2023/161 final (2023), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex-:52023PC0161>
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, New IAEA Initiative to Enhance Fusion Energy Collaboration (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-initiative-to-enhance-fusion-energy-collaboration>
- [29] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Towards Fusion Energy: The UK Fusion Strategy: The Next Stage of the UK's Fusion Energy Strategy (2023), <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf>
- [30] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UK Launches Search for Industry Partners to Develop Fusion Plant (2024), <https://www.gov.uk/government/news/uk-launches-search-for-industry-partners-to-develop-fusion-plant>
- [31] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the UK Department for Energy Security and Net Zero Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion (2023), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-uk-department-energy-security-and-net-zero-concerning>
- [32] THE WHITE HOUSE, International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development (2023), <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/02/international-partnerships-in-a-new-era-of-fusion-energy-development/>
- [33] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization (2024), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-japan-ministry-education-sports-science-and-technology>
- [34] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fusion Energy Strategy 2024 (2024), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf>
- [35] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/congress-increases-u-s-funding-for-fusion-energy-sciences-research/>
- [36] REUTERS, Biden Administration Expands Tax Credits Beyond Wind, Solar (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/biden-administration-expands-tax-credits-beyond-wind-solar-2024-05-29/>
- [37] FEDERAL REGISTER, Department of Energy, Fusion Energy Public-Private Consortium Framework, 2024-12539 (2024).
- [38] COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION JAPAN, Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional translation) (2024), https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf
- [39] MOONSHOT RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, Announcing Call for Proposals for Project Managers in Moonshot Goal 10 (2024), <https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202403/index.html>
- [40] THE WALL STREET JOURNAL, China Outspends the U.S. on Fusion in the Race for Energy's Holy Grail (2024), <https://www.wsj.com/world/china/china-us-fusion-race-4452d3be>
- [41] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [42] KOREA JOONGANG DAILY, Gov't to Chase 'Artificial Sun' with \$866 Million Investment in Nuclear Fusion Reactor Development (2024), <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2024-07-24/business/economy/Govt-to-chase-artificial-sun-with-866-million-investment-in-nuclear-fusion-reactor-development/2097463>
- [43] FUSION FOR ENERGY, Discussing the European Fusion Strategy (2024), <https://fusionforenergy.europa.eu/news/discussing-the-european-fusion-strategy/>
- [44] GERMAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, Förderprogramm Fusion 2040, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn (2024).
- [45] ITALIAN MINISTRY OF ENVIRONMENT, AI MASE la prima riunione della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (2023), <https://www.mase.gov.it/comunicati/al-mase-la-prima-riunione-della-piattaforma-nazionale-un-nucleare-sostenibile>
- [46] G7 ITALIA 2024, Apulia G7 Leaders' Communiqué (2024), <https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/Apulia-G7-Leaders-Communique.pdf>
- [47] REUTERS, Britain, Canada Sign Deal to Collaborate on Fusion Energy (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/britain-canada-sign-deal-collaborate-fusion-energy-2024-02-14/>
- [48] CANADIAN NUCLEAR LABORATORIES, It's Time for a Canadian Fusion Strategy (2024), <https://www.cnl.ca/clean-energy/hydrogen-research/fusion-day-2024/>
- [49] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UKAEA and CNL Partner to Accelerate Fusion Energy Development (2024), <https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-cnl-partner-to-accelerate-fusion-energy-development>

- [50] WORLD NUCLEAR NEWS, CNL Announces Programmes to Speed Fusion Deployment (2024), <https://world-nuclear-news.org/Articles/CNL-announces-programmes-to-speed-fusion-deploymen>
- [51] GENERAL FUSION, General Fusion Partners with Canadian Nuclear Laboratories to Advance Commercial Power Plant Design (2024), <https://generalfusion.com/post/general-fusion-partners-with-canadian-nuclear-laboratories-to-advance-commercial-power-plant-design/>
- [52] KYOTO FUSIONEERING, Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories Launch Joint Venture, Fusion Fuel Cycles Inc. (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/05/22/2337>
- [53] FUSION ENERGY BASE, Equity Investments to Fusion Energy Companies 2010-2023 by Country (2024), <https://www.fusionenergybase.com/article/equity-investments-to-fusion-energy-companies-2010-2023-by-country>
- [54] FUSION ENERGY BASE, Fusion Energy Base (2024), <https://www.fusionenergybase.com/>
- [55] US CONGRESS, S.870 - A Bill to Authorize Appropriations for the United States Fire Administration and Firefighter Assistance Grant Programs, to Advance the Benefits of Nuclear Energy, and for Other Purposes, <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870/all-info>
- [56] PADILLA, A. The Fusion Energy Act of 2024, One pager (2024), <https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/One-Pager-Fusion-Act.pdf>
- [57] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Consolidated Guidance About Materials Licenses, Preliminary Draft Report, Rep. NUREG-1556, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2024).
- [58] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Agile Nations Working Group on Fusion Energy Regulation: Initial Recommendations, Policy Paper (2023), <https://www.gov.uk/government/publications/agile-nations-uk-japan-and-canada-joint-recommendations-on-fusion-energy/agile-nations-working-group-on-fusion-energy-regulation-initial-recommendations>
- [59] DEUTSCHER BUNDESTAG, Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa (2024), https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504
- [60] MEXICO BUSINESS NEWS, Oil Industry Explores Viability of Nuclear Fusion (2023), <https://mexicobusiness.news/oilandgas/news/oil-industry-explores-viability-nuclear-fusion>
- [61] RECHARGE, Can a fusion energy pioneer backed by Google and Goldman Sachs help oil giant Occidental suck carbon from the air? (2024), <https://www.rechargenews.com/energy-transition/can-a-fusion-energy-pioneer-backed-by-google-and-goldman-sachs-help-oil-giant-occidental-suck-carbon-from-the-air-2-1-1661407>
- [62] ENI, Eni Signs a New Collaboration Agreement with CFS to Support Development of Fusion Energy (2023), <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2023/03/eni-signs-new-collaboration-agreement-with-cfs-development-fusion-energy.html>
- [63] REUTERS, OpenAI CEO Altman Says at Davos Future AI Depends on Energy Breakthrough (2024), <https://www.reuters.com/technology/openai-ceo-altman-says-davos-future-ai-depends-energy-breakthrough-2024-01-16/>
- [64] HELION ENERGY, Helion Announces World's First Fusion Energy Purchase Agreement with Microsoft (2024), <https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/>
- [65] COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS, Commonwealth Fusion Systems Raises \$115 Million and Closes Series A Round to Commercialize Fusion Energy (2024), <https://cfs.energy/news-and-media/close-series-a-round>
- [66] NIKKIEI ASIA, Honda-backed Israeli Startup to Use Nuclear Fusion to Power EVs (2024), <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Honda-backed-Israeli-startup-to-use-nuclear-fusion-to-power-EVs>
- [67] PR NEWSWIRE, NT-Tao Raises \$22M Series A to Ensure a Secure, Clean Energy Future with a Compact and Scalable Nuclear Fusion Solution (2023), <https://www.prnewswire.com/il/news-releases/nt-cao-raises-22m-series-a-to-ensure-a-secure-clean-energy-future-with-a-compact-and-scalable-nuclear-fusion-solution-301735890.html>
- [68] REUTERS, Chinese EV Maker Nio Invests in Nuclear Fusion Startup (2023), <https://www.reuters.com/business/energy/chinese-ev-maker-nio-invests-nuclear-fusion-startup-2023-05-19/>
- [69] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches 2024 Supply Chain Report (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-supply-chain-report/>
- [70] WORLD NUCLEAR NEWS, British-Japanese Partnership for Fusion Development (2023), <https://world-nuclear-news.org/Articles/British-Japanese-partnership-for-fusion-developmen>
- [71] TOKAMAK ENERGY, Tokamak Energy and Furukawa Electric Group strengthen relationship to progress commercial fusion energy (2024), <https://tokamakenergy.com/2023/01/11/tokamak-energy-and-furukawa-electric-group-strengthen-relationship-to-progress-commercial-fusion-energy/>
- [72] HELION, Helion and Nucor Announce Collaboration to Deploy 500 Mwe Fusion Power Plant (2023), <https://www.helionenergy.com/articles/helion-nucor-collaboration-to-deploy-500-mw-fusion-power-plant/>

- [73] RECHARGE, 'Fusion in five years' | AI and Facebook billionaire-backed pioneer signs Microsoft up for 'star power' (2023), <https://www.rechargenews.com/energy-transition/fusion-in-five-years-ai-and-facebook-billionaire-backed-pioneer-signs-microsoft-up-for-star-power/2-1-1450880>
- [74] WORLD NUCLEAR NEWS, OPG Investigates Fusion as Future Option For Ontario (2024), <https://world-nuclear-news.org/Articles/OPG-investigates-fusion-as-future-option-for-Ontar>
- [75] BRUCE POWER, Bruce Power, General Fusion, and Nuclear Innovation Institute sign agreement to advance a net-zero future (2022), <https://www.brucepower.com/2022/02/02/bruce-power-general-fusion-and-nuclear-innovation-institute-sign-agreement-to-advance-a-net-zero-future/>
- [76] CHINA DAILY, Controlled Nuclear Fusion Emerges as New Frontier for China's Venture Capitalists (2024), <https://www.chinadaily.com.cn/a/202407/23/WS669f5ca3a31095c51c50f7ad.html>
- [77] CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, China Sets to Build Fusion Energy Research Facility (2023), https://english.cas.cn/newsroom/multimedia_news/202309/t20230918_376979.shtml
- [78] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Chinese Fusion Energy Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion Power (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/chinese-fusion-energy-programs-are-a-growing-competitor-in-the-global-race-to-fusion-power/>
- [79] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Survey of Fusion Devices 2022, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022).
- [81] HONG, S.H., et al., Neutronics analysis for conceptual design of target system based on a deuteron accelerator-driven fusion neutron source, *Fusion Eng. Des.* **199** (2024) 114103, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114103>
- [82] BUSINESS TIMES, Singapore Could Star in the Race Towards Nuclear Fusion Energy (2024), <https://www.businesstimes.com.sg/esg/singapore-could-star-race-towards-nuclear-fusion-energy>
- [83] HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Thailand Tokamak 1 (TT-1) Facility Officially Launched in Thailand (2023), https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202307/t20230728_334143.html
- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Research in Southeast Asia: IAEA and ITER Support School in Thailand (2020), <https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-research-in-south-east-asia-iaea-and-iter-support-school-in-thailand>
- [85] EUROFUSION, The EUROfusion Roadmap (2024), <https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>
- [86] GAUSS FUSION, Establishment of a European Fusion Association (2024), https://cdn.prod.website-files.com/6461f14c58e0282da166d83d/6669502d73c9e85f4d2af3e0_European%20Fusion%20Association_PM_EN%5B86%5D.pdf
- [87] NUCNET, Companies Announce Formation Of Nuclear Fusion Industrial Association (2024), <https://www.nucnet.org/news/companies-announce-formation-of-nuclear-fusion-industrial-association-6-2-2024>
- [88] ITER, Breaking Ground at IFMIF-DONES (2023), <https://www.iter.org/newsline/-/3938>
- [89] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, FTF – Testing Technology for Future Fusion Power Station (2024), https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a820d4040f0b62305b9237d/UKAEA_-_Fusion_Technology_Facilities.pdf
- [90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: A New Chapter at UK Atomic Energy Authority (2024), https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/files/JDR_New_Chapter_UKAEA.pdf
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Visits Chile to Sign Agreements on Plastic Pollution and Lithium Mining (2024), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-visits-chile-to-sign-agreements-on-plastic-pollution-and-lithium-mining>
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Director General Grossi Visits Peru to Sign Agreements on Atoms4Food, Mining and Lithium (2024), <https://www.iaea.org/newscenter/news/director-general-grossi-visits-peru-to-sign-agreements-on-atoms4food-mining-and-lithium>
- [93] US DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Announces \$46 Million for Commercial Fusion Energy Development (2023), <https://www.energy.gov/articles/doe-announces-46-million-commercial-fusion-energy-development>
- [94] OFFICE OF CONGRESSIONAL AND INTERGOVERNMENTAL AFFAIRS, Before the House Committee on Science, Space, and Technology Subcommittee on Energy (2023), <https://www.energy.gov/congressional/articles/house-committee-science-space-and-technology-subcommittee-energy-4>
- [95] THE WHITE HOUSE, Parallel Processing the Path to Commercialization of Fusion Energy (2022), <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/06/03/parallel-processing-the-path-to-commercialization-of-fusion-energy/>

缩略语

AI	人工智能
CFETR	中国聚变工程实验堆
CFS	联邦聚变系统公司
CNL	加拿大核实验室
DONES	示范聚变电厂定向中子源
DTT	偏滤器托卡马克试验
EU	欧洲联盟(欧盟)
EU-DEMO	欧洲示范聚变电厂
EVEDA	工程验证和工程设计活动
HTS	高温超导
IFMIF	国际聚变材料辐照设施
JET	欧洲联合环
KSTAR	韩国超导托卡马克先进研究装置
NIF	国家点火装置
PPP	公私合作模式
UKAEA	英国原子能管理局
W7-X	Wendelstein 7-X
WFEG	世界聚变能小组

编者按

国际原子能机构编辑人员在认为对读者有帮助的必要情况下对本出版物进行了编辑。它并不涉及与任何个人的作为或不作为有关的责任、法律或其他方面的问题。

虽已尽力保持本出版物中所载信息的准确性，但是国际原子能机构及其成员国对使用本出版物可能产生的后果均不承担任何责任。

这里所提供、叙述良好实践的导则系专家意见，而不构成在成员国协商一致基础上提出的建议。

使用某些国家或领土的特定名称并不意味着国际原子能机构作为出版者对这类国家或领土、其当局和机构或其边界划定的法律地位作出任何判断。

提及具体公司或产品的名称（不论表明注册与否）并不意味着国际原子能机构有意侵犯所有权，也不应被解释为国际原子能机构的认可或推介。

国际原子能机构对本出版物中提及的外部或第三方因特网网站的网址继续存在或准确与否不负有责任，而且不保证这类网站上的任何内容现在或将来仍然准确或适当。■

版权声明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受1952年（日内瓦）通过并于1971年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可方能使用原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分内容。详情请见：www.iaea.org/publications/rights-and-permissions。垂询可致函：

国际原子能机构出版处
Vienna International Centre
P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria
电话：+43 1 2600 22529 或 22530
电子信箱：sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/publications

© IAEA, 2024
国际原子能机构在奥地利印制
2024年10月
IAEA/PAT/005

<https://doi.org/10.61092/iaea.es3t-vz6q>

国际原子能机构的成员国：

阿富汗	格鲁吉亚	挪威
阿尔巴尼亚	德国	阿曼
阿尔及利亚	加纳	巴基斯坦
安哥拉	希腊	帕劳
安提瓜和巴布达	格林纳达	巴拿马
阿根廷	危地马拉	巴布亚新几内亚
亚美尼亚	几内亚	巴拉圭
澳大利亚	圭亚那	秘鲁
奥地利	海地	菲律宾
阿塞拜疆	教廷	波兰
巴哈马群岛	洪都拉斯	葡萄牙
巴林	匈牙利	卡塔尔
孟加拉国	冰岛	摩尔多瓦共和国
巴巴多斯	印度	罗马尼亚
白罗斯	印度尼西亚	俄罗斯联邦
比利时	伊朗伊斯兰共和国	卢旺达
伯利兹	伊拉克	圣基茨和尼维斯
贝宁	爱尔兰	圣卢西亚
多民族玻利维亚国	以色列	圣文森特和格林纳丁斯
波斯尼亚和黑塞哥维那	意大利	萨摩亚
博茨瓦纳	牙买加	圣马力诺
巴西	日本	沙特阿拉伯
文莱达鲁萨兰国	约旦	塞内加尔
保加利亚	哈萨克斯坦	塞尔维亚
布基纳法索	肯尼亚	塞舌尔
布隆迪	大韩民国	塞拉利昂
佛得角	科威特	新加坡
柬埔寨	吉尔吉斯斯坦	斯洛伐克
喀麦隆	老挝人民民主共和国	斯洛文尼亚
加拿大	拉脱维亚	南非
中非共和国	黎巴嫩	西班牙
乍得	莱索托	斯里兰卡
智利	利比里亚	苏丹
中国	利比亚	瑞典
哥伦比亚	列支敦士登	瑞士
科摩罗	立陶宛	阿拉伯叙利亚共和国
刚果	卢森堡	塔吉克斯坦
哥斯达黎加	马达加斯加	泰国
科特迪瓦	马拉维	多哥
克罗地亚	马来西亚	汤加
古巴	马里	特立尼达和多巴哥
塞浦路斯	马耳他	突尼斯
捷克共和国	马绍尔群岛	土耳其
刚果民主共和国	毛里塔尼亚	土库曼斯坦
丹麦	毛里求斯	乌干达
吉布提	墨西哥	乌克兰
多米尼克	摩纳哥	阿拉伯联合酋长国
多米尼加共和国	蒙古	大不列颠及北爱尔兰联合王国
厄瓜多尔	黑山	坦桑尼亚联合共和国
埃及	摩洛哥	美利坚合众国
萨尔瓦多	莫桑比克	乌拉圭
厄立特里亚	缅甸	乌兹别克斯坦
爱沙尼亚	纳米比亚	瓦努阿图
科威特	尼泊尔	委内瑞拉玻利瓦尔共和国
埃塞俄比亚	荷兰王国	越南
斐济	新西兰	也门
芬兰	尼加拉瓜	赞比亚
法国	尼日尔	津巴布韦
加蓬	尼日利亚	
冈比亚	北马其顿	

国际原子能机构《规约》于1956年10月23日经在纽约联合国总部举行的国际原子能机构规约大会核准，1957年7月29日生效。

原子能机构总部设在维也纳。原子能机构的主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

“随着我们对这项突破性技术错综复杂的各个方面的探索，我们坚定不移地决心：利用聚变能电力，建设一个可持续发展、繁荣与和平的世界。”

拉斐尔·马利亚诺·格罗西
国际原子能机构总干事