

ITER 十年：为“人造太阳”贡献中国智慧

■文 / 本刊记者 李浩 综合报道

国际热核聚变实验堆（ITER）

计划是当今世界最大的多边国际科技合作项目之一，是目前世界上仅次于国际空间站的国际大科学工程计划。其目的是通过建造反应堆级核聚变装置，验证和平利用核聚变发电的科学和工程技术可行性。其研究的受控核聚变获得能量原理与太阳释放光热相同，故也称为“人造太阳”，ITER 计划对从根本上解决人类共同面临的能源问题、环境问题和社会可持续发展问题具有重大意义，在多边国际合作中占据重要地位，由中国、欧盟、俄罗斯、美国、日本、韩国和印度七方 30 多个国家共同合作。

2017 年 11 月 28 日—29 日，由科技部基础司、合作司、资管司、核聚变中心共同主办的“ITER 十年——回顾与展望”会议在中国科技馆隆重召开。全国政协副主席、科技部部长万钢在会上表示，中国加入 ITER 计划十年来，认真履行承诺和义务，承担的 ITER 采购包制造任务按照时间进度和标准，高质量地交付了有关制造设备和部件，受到 ITER 参与各方的充分肯定。通过参与 ITER 计划，我国科技创新能力、国际项目管理能力和专业技术人才培养能力也得到了有效提升。



2017 年 11 月 28 日，全国政协副主席、科技部部长万钢在“ITER 十年——回顾与展望”会议开幕式上致辞

万钢指出，党中央、国务院高度重视 ITER 计划和核聚变能源研发。2016 年全国科技创新大会期间，习近平总书记等中央领导同志参观了“十二五”科技成就展 ITER 装置模型。2017 年阿斯塔纳世博会期间，习近平总书记再次莅临中国馆观看 ITER 模型。十年来，有关部门、科研院所、企业和高校共同推动 ITER 计划的组织实施，集众智、汇众力，在各自领域为 ITER 计划作出了贡献。

从 ITER 谈判起参与国际规则的制定

按照党中央、国务院的要求，科技部、外交部、财政部、教育部、中科院、国家自然科学基金委、中核集团公司等部委和单位历经多次论证，2003 年中国正式以“平等伙伴”身份加入了 ITER 计划谈判。

据中国国际核聚变能源计划执行中心研究员潘传红回忆说，当时的美、俄、日、欧四方，在十几年时间内投

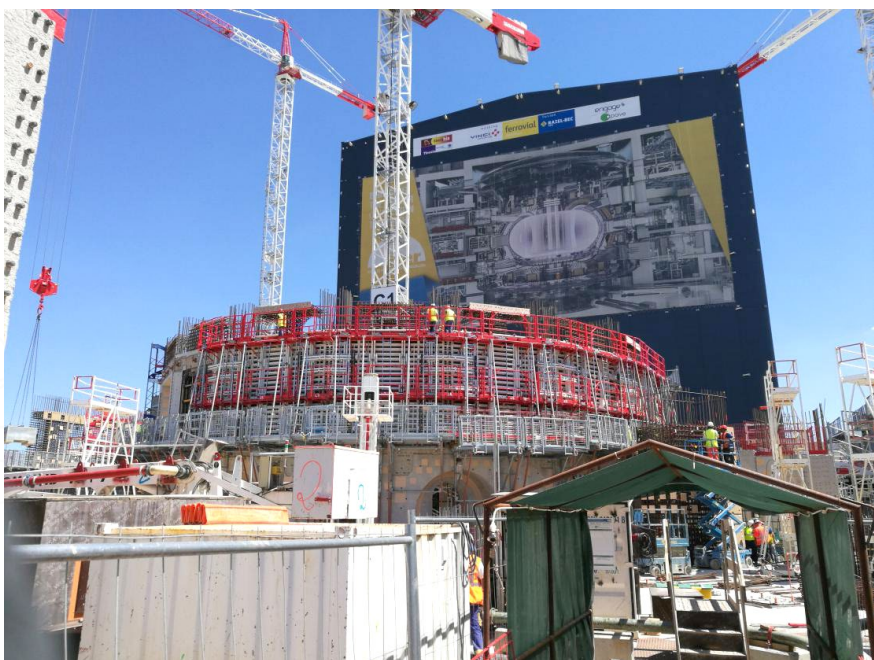
入15亿美元进行设计,2001年正好完成了工程设计,中国加入ITER计划,实际上包含了对它的设计技术的解读与消化,对它前期投入的部件运营之前的经验的解读吸收,以便用于我们国家未来的聚变能源的发展规划。他表示,鉴于这是个非常好的时机,就鼓起勇气给江泽民同志写了封信,提出了加入ITER计划的建议,没想到百忙当中的国家领导人能够及时回信,后来在国防科工委和国家科技部、自然科学基金委组织的研讨会上,有个结论意见,由国家科技部牵头做这个事情。

2006年11月,时任科技部部长徐冠华同志代表中方在法国爱丽舍宫共同签署ITER计划《联合实施协定》和《特权与豁免协定》。2007年2月经财政部审核国务院批准设立“ITER计划专项”。2007年8月,万钢部长向十届全国人大常委会第二十九次会议汇报,全国人大正式审议通过该协定文件。2007年9月时任国家主席胡锦涛同志正式签发协定批准书。2007年10月ITER国际聚变能组织正式成立。2008年10月,科技部核聚变中心挂牌成立。

国际核聚变研究发展情况

欧盟为加强欧洲聚变一体化成立了欧盟聚变联盟(EUROFUSION),制定了未来欧洲聚变发展的战略路线图,开展了未来DEMO的物理设计和一些关键技术和部件研发,并将重启JET氘氚实验,为未来ITER氘氚反应实验的成功提供更多的技术和实验积累。

美国能源部制定了聚变能科学计划,全面支撑其国内聚变能设施建设与科学研究,并将制定一项致力于在



ITER 场址建设现场

未来35年内建成聚变发电示范堆的研究开发计划。

日本2003年完成了国家聚变能研究未来发展纲要,确定国家政策将推动聚变能研究,明确在ITER计划基础上建造并运行磁约束核聚变示范堆。

韩国政府把聚变能的发展作为国家发展的长期国策,并在国会以法律的形式通过了韩国聚变发展法,宣布2040年前后建成聚变示范堆。

在ITER制造中以高品质兑现中国承诺

科技部作为我国ITER计划的政府主管部门,在ITER《联合实施协定》的框架内,协调国内相关资源,切实履行国际承诺,全面参与国际组织管理与ITER计划实施。中方积极通过ITER理事会及其下设附属机构对ITER管理提出建议,在大是大非问题上的原则立场和态度多次成为决定ITER计划如何向前发展的重要因

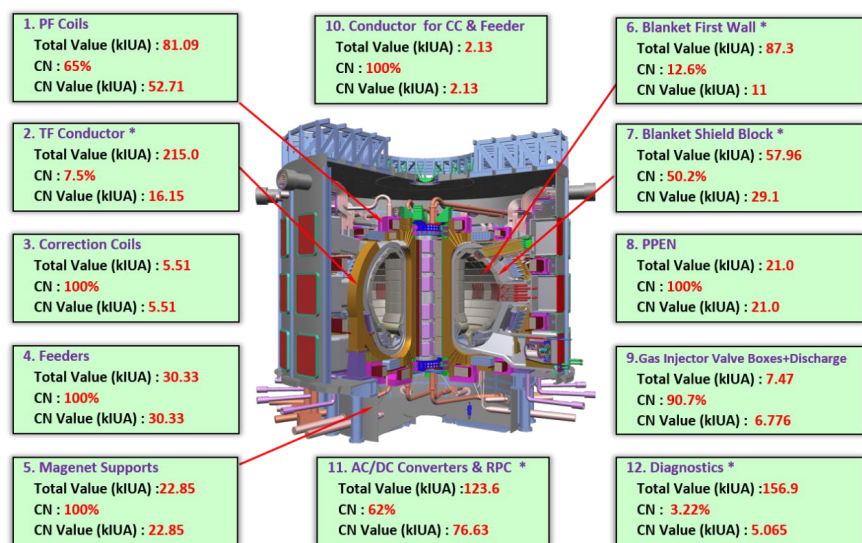
素。

中国国际核聚变能源计划执行中心主任罗德隆在“ITER十年——回顾与展望”会议上发表主题报告时指出,从2008年至2017年,在中国参与ITER计划的带动下,国家磁约束核聚变能发展研究共部署119个项目,总计安排经费约40亿元。取得了多项国际和国内第一的研究成果,使中国在核聚变领域处于与国际同等甚至某些方面领先的地位。

2008年以来,我国陆续承担的18个采购包的制造任务,涵盖了ITER装置几乎所有关键部件,由上百家科研院所、企业承担。在ITER采购包研发制造过程中,取得了重大突破,解决了一系列聚变工程关键技术。

ITER 电源采购包

2012年顺利通过初步设计评审,2014年顺利通过最终设计评审。2008年中方指出ITER电源原设计方案存在设计风险和不安安全性,并提出新的设计方案,最终被ITER组织批



我国承担的 ITER 采购包情况

准实施。目前 ITER 所有的电源方案，均采用中国的设计方案。

ITER 第一壁采购包半原型部件

2016 年成功通过了高热负荷试验验证，在世界范围内率先实现了该类部件的高热负荷测试。中国的增强热负荷第一壁技术已达到国际领先水平，相关技术被 ITER 国际组织推荐应用到 ITER 偏滤器上。

磁体支撑系统采购包

全套磁体支撑系统采购包由中方独立建造，中方在建立极低温材料力学认证测试与评价体系、特殊环境焊接技术、特殊尺寸异形锻件及紧固件等领域均实现了技术突破。

环向场、极向场线圈导体采购包

环向场、极向场导体是 ITER 装置的核心关键部件之一，前者已于 2015 年圆满完成。在实施过程中，实现了我国低温超导股线 100% 国产化、产品质量 100% 满足要求，带领我国超导线材研发能力和工业化生产能力达到国际一流水平。

磁体馈线采购包

中方承担 ITER 装置所有 31 套磁

体馈线采购包的制造任务，首先产品已顺利交付 ITER 组织。

屏蔽块采购包

屏蔽块采购包进展顺利，在国际上率先建成一套热氦检漏系统。

校正场线圈采购包

校正场线圈采购包全部由中方自主制造。

无功补偿采购包

无功补偿采购包一次性通过 ITER 组织的所有评审。

脉冲高压变电站材料采购包

脉冲高压变电站材料采购包成功完成了特种电力变压器、大尺寸集成性电气舱等国内罕见设备的复杂制造和测试。

十年来，ITER 中方组织从一张白纸起步，建立了符合国际大科学工程管理的管理机制，为我国聚变领域科技在国际上由跟跑者向领跑者奋进保驾护航。健全了包括项目进度、经费、合同、质量、核安全、运输、风险、标准、知识产权等项目管理机制，适时开展各类培训，集成国内各领域优秀资源，确保我国承担的采购包制造

任务按时、保质、保量完成和交付。

十年的实践表明，在 ITER 计划七方中，中方采购包制造任务执行情况一直保持良好的，项目控制到位、质量管理过硬、资源配置合理。中国工程院院士，等离子体物理研究所研究员万元熙在接受采访时表示，在 ITER 领域当中，因为有稳定的经费，以及人力的聚集，所以在过去的十年当中，取得了巨大的进展，比如说中国的超导工业、超导技术，因 ITER 而得到了长足的发展，其他的在高功率的连续的波加热系统，在遥控的机器人的维护维修的系统，在材料系统，在大型的低温系统，在大型的电源系统，适合于未来聚变堆需要的都得到了长足的发展，所以这十年来在这方面，由于中国参加了 ITER，在聚变领域的各个领域当中，都得到了迅速的发展，有些已经走到了世界的前列。

国内核聚变技术由跟跑、并跑冲向领跑

我国先后建成并升级改造了中国环流器二号 A 和东方超环 EAST，用于在近堆芯的高参数条件下研究等离子体的稳态和先进运行，深入探索实现聚变能源的工程、物理问题。

中国环流器二号 A

中国环流器二号 A 是我国第一个带偏滤器的大型托卡马克聚变研究装置。自装置建成以来，在国内实现了三步跨越：第一步，磁位形由限制器位形到偏滤器位形的跨越；第二步，等离子体电子温度达 5500 万度，是迄今国内装置达到的最高温度；第三步，等离子体约束模式由低约束模式到高约束模式的跨越。尤其是 2009 年 4 月 18 日，中国环流器二号 A 在国内首次实现了高约束模式运行，使

得我国成为继美、日、欧之后第四个实现高约束模式运行的国家。

东方超环

东方超环是世界上第一个“全超导非圆截面托卡马克装置”。2017年7月3日晚，EAST装置在世界上首次实现了5000万度等离子体持续放电101.2秒的高约束运行，实现了从30秒到60秒，再到百秒量级的跨越，再次创造了核聚变新的世界纪录！这一里程碑性的重要突破，表明我国磁约束聚变研究在稳态运行的物理和工程方面继续走在国际前沿。

核聚变实验室装置进入高校

更为可喜的是，核聚变实验室装置已进入高校：华中科技大学的J-TEXT是全国高校中唯一的中型托卡马克装置，中国科学技术大学自行设计、自主建造了我国首台大型反场箍缩磁约束聚变实验装置。核聚变领域的基地建设正在快速成形！

经过多年努力，我国物理实验平台建设能力和实验能力都大幅提升，多项物理实验研究成果位于世界前位；消化吸收ITER关键技术，深入研究未承担的部件制造任务相关技术，并在氦循环、等离子体控制、测试包层模块（TBM）、核环境遥操作及模拟计算等领域都取得了很大进展和突破，我国在国际聚变界的影响力不断增强。

核聚变人才团队形成品牌

参与ITER项目的十年，是中国核聚变企业快速品牌化和国际化成长的十年，是中国核聚变产业链培育并不断完善的十年，是中国核聚变工程技术人才与团队持续储备的十年，是中国核聚变技术能力与管理水平大跨步前进的十年。

中国国际核聚变能源计划执行中心自成立以来，先后由时任科技部副部长的程津培、曹健林兼任主任，罗德隆、丁明勤、孙键、赵静等中心领导带领员工认真执行ITER专项，培养和锻炼了一支国际大科学与工程研发和管理团队。

中国工程院院士、中科院等离子体物理研究所李建刚在接受记者采访时表示，十年前，四部委开展了人才培养计划，希望通过4年能够培养1000个工程、物理和管理人才，我想我们非常好地做到了这一点，特别是在过去的十年中间，一大批的企业通过参加ITER，它的技术能力都得到了大量的发挥，不光是非常高质量地按时地完成了任务，同时把这些技术用到国民经济的其他方面，比如说国防高性能的材料，比如说这种高性能的核磁共振仪，以及未来的这种核磁超导的微型加速器等等，应该说经过十年的发展，我们今天可以非常有信心

也自豪地说，我们完成了十年前向国家打的报告，我们做到了。

十年来，ITER组织中方职员数量持续上升，目前已达74人，占比为9.4%，跃居除东道方欧盟外的六方之首。在ITER专项国内研发人才项目的支持下，目前已培养多位杰青、长江学者，吸引一批海外千人计划入选者归国。为加强培养核聚变能源技术研发人才和后备力量，2010年，科技部、教育部、中科院和中核总联合颁布了《关于促进磁约束核聚变人才培养工作的指导意见》。截至到2016年底，超过3400名科学家加入到这个特殊项目，其中高级专业人才占59%，2700名学生参与其中，其中1225名博士，1420名硕士。

在科技部的支持下，中国聚变界提出了后ITER时代自己的磁约束核聚变能源发展方案，力图解决ITER未涵盖的、但是核聚变能源实现商业化必不可少的重要工程技术难关，完成了中国磁约束聚变工程实验堆CFETR的概念设计，目前国内聚变团队已经开展工程设计和部分关键工程技术预研，这得到了世界其他国家聚变领域的专家高度关注。中国正在为解决人类未来能源问题作出越来越大的贡献！**科技**