



基本原理

核能包括裂变能和聚变能两种主要形式。裂变能是重金属元素的核子通过裂变而释放的巨大能量。受控核裂变技术的发展已使裂变能的应用实现了商用化，如核（裂变）电站。但是，核燃料来源、核辐射风险以及核废料的处置等因素限制了裂变能的发展。聚变能是两个较轻的原子核聚合为一个较重的原子核释放出的能量。目前开展的受控核聚变研究正是致力于实现聚变能的和平利用。核聚变的燃料是氢的同位素氘（D）和氚（T），氘在地球的海水中有极其丰富的蕴藏量，总量约40万吨。每升海水中所含的氘完全聚变所释放的能量相当于燃料340升汽油。按目前世界消耗的能量计算，海水中氘的聚变能可用几百年。特别重要的是聚变产生的废料为氦气，是清洁和安全的。因此，聚变能是一种无限、清洁、安全的新

能源，核聚变能源是最有希望彻底解决能源和环境问题的根本出路之一。这就是世界各国尤其是发达国家不遗余力竞相研究、开发聚变能的根本原因。

托卡马克（Tokamak）是前苏联科学家于20世纪50年代发明的环形磁约束受控核聚变实验装置。经过半个多世纪的努力，在托卡马克上产生聚变能的科学可行性已被证实。而超导技术成功地应用于产生托卡马克强磁场的线圈上，是受控核聚变能研究的又一个重大突破。超导托卡马克使磁约束位形能连续稳态运行，是公认的探索 and 解决未来聚变反应堆工程及物理问题的最有效的途径。目前建造超导装置开展聚变研究已成为国际热潮。其国际热核聚变实验堆（International Thermonuclear Experimental Reactor，ITER）计划是目前全球规模最大、影响最



EAST

全超导托卡马克核聚变实验装置

EAST全超导托卡马克装置

深远的国际科技合作项目之一。它的建造大约需要20年，预计建造费用为50亿欧元。合作承担ITER计划的七方是欧盟、中国、韩国、俄罗斯、日本、印度和美国，这七方包括了世界主要的核国家和主要的亚洲国家，覆盖人口接近全球一半。2006年11月21日，七方签署了建设ITER的国际协定。ITER国际聚变能组织于2007年10月24日正式成立，ITER计划进入装置建造阶段。我国是一个持续高速发展的的发展中大国，能源问题日益突出，因而长期以来对有可能彻底解决能源问题的核聚变能研究做了力所能及的安排，对国际上有关ITER计划的讨论一直给予高度关注。全国人大常委会和国务院于2007年正式批准我国参加ITER计划，希望通过参加ITER计划，掌握大规模聚变能发展的知识和技术，尽快独立自主地在我国开展聚变堆的

发展。

中科院等离子体物理所（简称“等离子体所”）主要从事高温等离子体物理、受控热核聚变技术的研究以及相关高技术的开发研究工作，担负着国家核聚变大科学工程的建设和研究任务，是我国热核聚变研究的重要基地，先后建成常规托卡马克 HT-6B、HT-6M 等装置。1994 年底，成功地建成我国第一台大型超导托卡马克装置 HT-7，使我国进入超导托卡马克研究阶段。“九五”国家重大科学工程——大型非圆截面全超导托卡马克核聚变实验装置（EAST）的建成，标志着我国进入国际大型聚变装置（近堆芯参数条件）的实验研究阶段，表明中国核聚变研究在国际上已占有重要地位。等离子体所承建的“十一五”国家重大科技基础设施“托卡马克核聚变实验装置辅助加



2011年4月9日，中共中央政治局常委、国家副主席习近平视察等离子体所

热系统”也已顺利通过国家验收并正式运行。目前，等离子体所在高温等离子体物理实验及核聚变工程技术研究方面处于国际先进水平，近年来，荣获2项国家科学技术进步奖及多个国家重要奖项，已形成“以我为主”的全面开放格局，是ITER中国工作组的重要

单位之一，承担了多项采购包任务，占中国承担ITER采购包任务的73%。目前，采购包研制工作进度在ITER七方中位于前列。江泽民、胡锦涛、习近平、李克强等多位党和国家领导人曾莅临等离子体所视察。2013年，俄罗斯总理梅德韦杰夫访问等离子体所。

装置概况

20世纪90年代初，俄罗斯库尔恰托夫研究所表示愿意将T-7装置赠送给中国。等离子体所果断决策，接收了T-7装置。T-7装置不是简单的引进，而是根据研究和实验要求进行了根本性改造，将一个原本不具备物理实验功能的T-7装置改造成能够开展多种实验的先进装置——当时中国第一个、世界第四个超导托卡马克HT-7。1994年12月28日，HT-7首次进行了工程调试并成功获得等离子体。1995年，HT-7正式投入运行。运行18年来，物理实验不断取得重大进展和突破，获得了400s的稳态等离子体放电等一系列国际先进或独具特色的成果。2012年10月，在完成最后一轮物理实验后，HT-7正式申请退役。2013年2月1日，中科院正式批准HT-7退役。

在HT-7成功运行的基础上，“九五”国家重大科学工程——大型非圆截面全超导托卡马克核聚变实

验装置HT-7U开始建设。1998年7月，国家计委下文同意由中科院主持，中科院等离子体物理所承担该项目的建设；2000年10月，国家计委批复同意该项目工程开工建设。2003年10月，HT-7U正式改名为EAST（Experimental Advanced Superconducting Tokamak）。EAST工程历经5年多的建设于2006年全面、优质地完成。2006年9—10月和2007年1—2月EAST装置进行了两次放电调试，成功获得了稳定、重复和可控的各种磁位形高温等离子体。2007年3月1日，EAST项目通过了国家发改委组织的验收。从此，EAST——世界上第一个非圆截面全超导托卡马克装置正式投入运行。EAST的建设和投入运行为世界稳态近堆芯聚变物理和工程研究搭建起了一个重要的实验平台，使我国成为世界上第一个掌握新一代先进全超导托卡马克技术的国家，为我国磁约束核聚变研究的进一步发展，提升我国磁约

束聚变物理、工程、技术水平和培养高水平人才奠定了坚实基础。“EAST 非圆截面全超导托卡马克聚变实验装置的研制”项目获得 2007 年度安徽省科技进步奖一等奖和 2008 年度国家科学技术进步奖一等奖；EAST 的成功运行被两院院士评为 2006 年“中国十大科技进展”、2006 年“中国重大技术与工程进展”、2006 年“中国基础研究十大新闻”以及中科院 2006 年十大重大研究成果之首。作为 HT-7 的升级装置，EAST 不仅规模更大，其独有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构三大特性，将更有利于探索等离子体稳态先进运行模式，可以开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变反应堆基础物理和工程问题实验研究。中国目前正在参与 ITER 项目，EAST 虽然比 ITER 小，但位形与之相似且更加灵活。ITER 的建设需要 10 年左右，其间 EAST 将是国际上极少数可开展与 ITER 相关的稳态先进等离子体科学和

技术问题研究的重要实验平台。

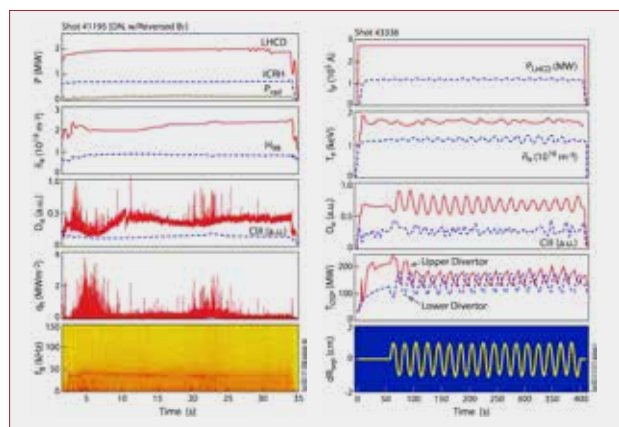
国家重大科技基础设施“EAST 辅助加热系统”是 EAST 的二期工程，国家发改委于 2008 年 7 月立项，2011 年 11 月开工建设，建设 4 MW 中性束加热和 4 MW 低杂波电流驱动系统，建设周期 4 年。项目开工以来，项目组刻苦攻关，自行设计并研制出稳态大功率低杂波电流驱动系统，全面系统地发展了 C 波段稳态大功率微波系列设备和系统集成技术，成功解决了薄壁水滴型铝管成型焊接工艺和高性能大体积绝缘箱体一体化成型等一系列技术难题，建成的辅助加热系统其输出功率、运行脉冲长度等参数均达到或超过设计指标，拥有完全独立知识产权，其中“低杂波系统性能达到国际领先水平，中性束系统达到国际先进水平”。2015 年 2 月正式通过国家验收。该项目进一步提升了我国大规模自主研发聚变关键技术和系统的能力，为未来 EAST 开展高水平的科学实验奠定了坚实的基础。

总体目标及学术方向

EAST 不仅规模更大，其独有的非圆截面、全超导及主动冷却内部结构三大特性，将更有利于探索等离子体稳态先进运行模式，其工程建设和物理研究可为 ITER 项目的建设提供直接经验，并为未来聚变实验堆提供重要的工程和物理实验基础。总体目标是瞄准国际核聚变能研发前沿，开展国内外联合科学研究，

依托全超导托卡马克 EAST 装置开展稳态、安全、高效运行的先进托卡马克聚变反应堆基础物理和工程问题实验研究，为我国工程实验堆的设计建造提供科学依据，推动等离子体物理学科、相关学科和技术的发展。探索等离子体稳态先进运行模式，为 ITER 项目的建设提供直接经验并为未来聚变实验堆提供重要的工程和物理实验基础。主要学术研究方向为：

- 全超导托卡马克稳态运行条件下新的工程物理问题；
- 近堆芯、稳态等离子体的实时控制及安全运行；
- 稳态高功率加热条件下新的物理问题，特别是高能粒子相关行为；
- 稳态先进运行模式下等离子体约束及输运行为；
- 稳态先进运行模式下等离子体稳定性和控制；
- 稳态偏滤器条件下等离子体与壁相互作用；
- 未来反应堆加热、诊断及控制技术。



左图为超过30秒的高约束等离子体放电，右图为超过400秒的高参数偏滤器放电

中国科学院等离子体物理研究所 EAST 托卡马克装置

十年磨一剑 终成利器 聚变曙光 耀东方

白春礼 2007.3.1

2007年3月1日，中科院副院长白春礼为EAST题词

研究成果

EAST装置投入运行以来，物理实验取得一系列具有国际先进水平的成果：2009年，获得了稳定、可控、可重复的大于60s非圆截面双零偏滤器位形等离子体放电，这是国际上第一次分钟量级的非圆截面偏滤器高参数等离子体放电。2010年，获得了稳定重复的1MA等离子体放电，实现了EAST的第一个科学目标，这也是目前国际超导装置上所达到的最高参数。2012年，成功实现了411s、中心等离子体密度约 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、中心电子温度大于 $2 \times 10^7 \text{°C}$ 的高温等离子体放电，以一个数量级的提升再创国际最长时间记录，同时还获得了大于30s且稳定可重复的高约束等离子体放电，标志着我国在稳态高约束等离子体研究方面已位居国际前列。2013年，发现一种新型磁约束高温聚变等离子体边界稳定性的控制方法——低杂波改变边界磁拓扑结构及其对边界局域模的影响，首次实现了利用射频波控制边界局域模，并提供了一种比利用外加共振磁场线圈技术更为简单的、与反应堆更相关的边界局域模控制技术。2014年，发现托卡马克高约束模式等离子体台基区多种相干模式共存，在世界上首次实现重复的完全抑制边

界局域模稳态长脉冲高约束等离子体，获得了湍流驱动剪切流在L-H转换中扮演重要角色的关键实验证据。这些突破性的进展大大推进了EAST实现其总体科学目标的进程，使EAST的物理实验进入国际先进行列；实验中广泛开展的国际合作，使EAST成为国际上最重要的高参数长脉冲等离子体物理实验平台。EAST在把我国核聚变研究带进世界先进水平的同时，也为国际热核实验聚变堆ITER和我国未来独立设计建设运行聚变堆逐步地奠定了坚实的科学技术基础。等离子体所超导托卡马克创新团队被授予2013年度国家科技进步奖框架下的创新团队奖。



左图为2008年度国家科学技术进步奖一等奖；
右图为2013年度国家科学技术进步奖

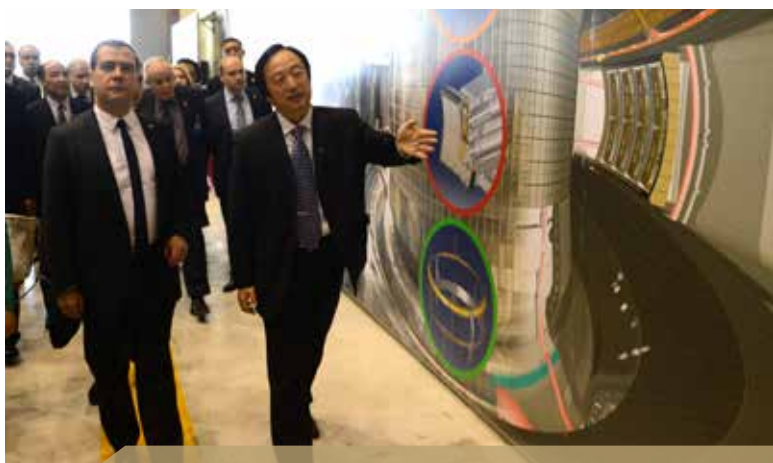
开放与合作

作为国际上最重要的核聚变研究平台之一，EAST 与美、俄、法、日、韩、德、英、丹以及 ITER 等世界主要聚变国家或组织一直保持良好的合作关系，围绕 EAST 研究签订科技合作协议 32 个，并被美国能源部列为合作的首选装置。2014 年 6 月 30 日，中国科学院—美国能源部第三届协调委员会会议在等离子体所召开，是该委员会会议首次由研究所承办。2013 年，等离子体所与法国 CEA 建立联合实验室，并且成功申报两项中法“蔡元培”交流合作项目。2014 年，等离子体所与俄罗斯联合核研究所（ASIPP-JINR）能源科技研究与应用合作研讨会在等离子体所召开。EAST 为中外等离子体物理与聚变科学家提供了良好的研究平台。目前，EAST 装置上除了本所开展的实验研究外，还根据实验条件和运行状态，提供了相当的运行时间和必要的条件用于其他单位提出的实验研究计划。每轮实验前会在网上对全世界发布实验指南，有意向参加实验研究的课题组可以预先通过系统提交实验提案，在获得批准后，将纳入实验日程安排，课题组可以派人或携带仪器设备加入实验。近年来每年均有数百人次的外国科学家直接参与实验研究。2013 年开始，EAST 与美国通用原子能公司（GA）的 DIII-D 装置多次开展联合实验并获得多项重要成果，这是等离子体所与 GA 国际合作的一个重要组成部分，其成功对 EAST/DIII-D 未来开展更深入的交流与合作与培养青年人才具有重要意义。从 2010 年开始至今，已经成功举办 6 届中丹等离子体秋季学校。

发展规划

通过 15—20 年的努力，使 EAST 成为我国磁约束聚变能研究发展战略体系中最重要的知识源头，使我国核聚变能开发技术水平进入世界先进行列。同时，积极参与国际合作，消化、吸收、掌握聚变堆关键科学与技术，锻炼队伍，培养人才，为我国下一步独立设计和建设中国聚变工程实验堆（CFETR）奠定坚实的基础。

针对 EAST 物理实验研究中产生的海量数据，建立了专门数据库存储，通过用户访问权限进行控制，达到数据资源共享，实现科研过程的互动。在世界各地均可便捷地访问到 EAST 的数据和服务。为了便于进一步加强合作研究，等离子体所正在建立一个支持远程参与的实验和计算平台，建成后必将大大促进我国受控核聚变研究的国际交流与合作。



2013 年 10 月 23 日，俄罗斯总理梅德韦杰夫访问等离子体所

总体来说，EAST 开放与合作范围越来越广、程度越来越深、前瞻性越来越强，已经形成“以我为主”的全面开放格局。合作伙伴上，保持与美、日、韩、英、法等国的良好合作，同时积极开展与俄罗斯等“近邻”的突破性合作；合作程度上，纵深发展成立中法联合实验室、开展中美联合实验；合作领域上，从核聚变领域扩展到非核领域，这种创新和突破将是等离子体所未来国际合作的发展趋势。

EAST 的科学研究分三个阶段实施：

第一阶段（约 5 年），长脉冲实验平台的建设；第二阶段（5—10 年），实现其科学目标，为 ITER 先进运行模式奠定基础；第三阶段（5—10 年），长脉冲近堆芯下的实验研究。