

中国参与 ITPA 活动及对 ITER 物理的贡献

■文 / 庄 革 (中国科学技术大学)
万宝年 (中科院等离子体物理研究所)
段旭如 (中核集团西南物理研究院)

本文简要介绍了国际托卡马克物理活动组织 (International Tokamak Physics Activity, ITPA) 的发展历程, 以及该组织的目标宗旨、组织架构和任务使命。中国自加入国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 计划之日起, 便成为该组织的正式成员, 并开始全面参与 ITPA 的各项活动。十年来, 中国参与 ITPA 活动的广度和深度逐年提高, 结合中国实际, 成立了中国托卡马克物理活动的组织框架 (China Tokamak Physics Activity, CTPA), 有组织、有计划地在诊断、快粒子物理、集成运行方案、磁流体稳定性、台基物理、偏滤器与刮削层物理、约束和输运等研究方向上针对 ITER 所关心的物理问题开展了相关研究, 提出了解决问题的中国方案, 为 ITER 建设及其未来研究计划作出了中国应有的贡献。

一、国际托卡马克物理活动 (ITPA) 简介

“国际托卡马克物理活动 (International Tokamak Physics Activity, ITPA)”发端于1989年的“国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)”的概念设计。1989年, 在 ITER 概念设计国际研讨会上, 科学家们针对托卡马克等离子体低约束模进行了数据分析和定标, 得到了 ITER-89P 能量约束时间定标律; 同时就托卡马克等离子体高约束模的定标律研究提出了议案。基于此议题, ITER 概念设计开展了一系列托卡马克物理相关的实验和研讨活动, 并最终获得了 IPB98 (y, 2) 能量约

束时间定标律。在此过程中, 国际托卡马克物理活动的雏形开始显现, 特别是1994年 ITER 负责人提议将国际托卡马克物理活动扩展成六个专业小组, 将 ITPA 的组织架构基本确定下来。2001年 ITPA 的专家组重新进行了遴选, ITPA 组织正式确立。从2001年至2008年, ITPA 是在 IAEA 支持下开展活动的。2008年后, ITPA 在 ITER-10 支持下开展工作。中国从2005年开始以观察员身份参加了 ITPA 活动, 加入 ITER 计划后自动成为 ITPA 的正式成员。

ITPA 章程于2006年制定, 并在2008年进行必要修订。ITPA 章程就 ITPA 的使命、国际协调下的研究活动、成员、组织结构、会议/报告, 以及 ITPA 的法律基础做出了明确的描述。

ITPA 组织框架包括一个协调委员会 Coordinating Committee (CC) 和若干个专业组 Topical Groups (TG)。ITPA 的主要功能是提供一个组织框架以协调国际聚变研究活动, 而这些活动必须服务于 ITER 物理研究需求。在这个组织框架下, 各参与方持续开展托卡马克物理的研发活动, 为 ITER 的设计、建设和未来研究计划提供必要的、宽广的物理基础。这些活动不但有利于推进 ITER 计划的实施, 还将有助于各国磁约束聚变能发展计划。ITPA 章程中对 CC 和 TG 的功能和作用均有明确的定位, CC 主要负责协调参与方的托卡马克物理活动, TG 则是针对 ITER 具体的物理需求和目标, 确定科学研究任务, 并根据任务的优先级来制定年度计划和实施措施。

国际 ITPA 物理研究活动主要包括以下几个方面：以一致的物理格式准备和收集经过校验的各个聚变实验装置的实验数据；组织、管理和更新经过检验的数据库；介绍实验的分析结果以提高对聚变等离子体物理的理解；发展理论模型和数值模拟以解释和重现实验结果；鼓励和促进国际托卡马克装置间的联合实验；演示能够用于优化 ITER 性能的技术，如壁处理 / 清洗、等离子体控制等；研究适用于 ITER 放电运行方案；通过基于现有装置模型化的模拟以探索 ITER 进行燃烧等离子体实验的潜力；确认和决定在 ITER 等离子体控制中可能发生的关键的加热和电流驱动、诊断、加料问题；支持一些新的相关物理研究；等等。

ITPA 除了承担由 ITER-IO 同意的、对实现 ITER 目标具有重要性的科学研究之外，每年还需要提出符合 ITER 需求的年度优先级高的研发问题清单，这一清单明确定义了研究计划中的课题，并以这些课题的开展来促进国际托卡马克物理研究。

此外，国际能源机构 International Energy Agency (IEA) 也从 2002 年起实施聚变研究合作执行协议，后来演化成托卡马克合作计划 (Co-operation on Tokamak Programs, CTP)。由于中国不是 IEA 的成员，未能加入这一计划，仅有中国科学院等离子体物理研究所和西南物理研究院从 2005 年受邀参加。2014 年底，中国国际聚变能源计划执行中心与 IEA 签署协议，中国成为 IEA 聚变能合作委员会 (Fusion Power Coordinating Committee, FPCC) 的正式观察员，正式加入 CTP 计划。每年，CC 成员、TG 主席、国际上主要托卡

马克装置负责人讨论联合实验 (Joint Experiments) 计划，并建议装置负责人将这些联合实验纳入他们正常的实验计划中。这一计划与 ITPA 的实验研究计划合并，成为 IEA/ITPA Joint Experimental Planning (JEX)。

二、中国参与 ITPA 活动的开展情况及贡献

我国参加 ITPA 的宗旨是充分利用 ITPA 资源和国内现有装置条件，积极参与和开展 ITPA 活动，了解和掌握国际聚变研究领域的前沿动态，不断提升我国磁约束聚变研究的能力和水平，逐步培养和造就一支能够与国际 ITPA 接轨的聚变研究队伍，为我国磁约束聚变能研发事业服务。从近期来看，根据国家中长期科学和技术发展规划纲要中所提出的要求，针对 ITER 科学研究计划，夯实国内的研究基础，为充分参与 ITER 计划、获取 ITER 的科学技术成果做好准备。从长远来说，一是通过广泛的国际合作促进我国在磁约束等离子体科学方面的研究；二是通过参加 ITER 研究计划，推动燃烧等离子体和聚变能源科学和技术发展，为未来我国具备有独立开展聚变示范堆物理和工程设计能力奠定了科学技术和人才队伍基础。

我国自加入 ITPA 以来，严格遵守 ITPA 章程，积极主动参与 ITPA 各项研究活动，对 ITPA 和其它国际前沿动态的技术资料积极进行收集、整理、吸收和消化。同时，通过开展与 ITPA 相关的物理研究活动，不断加强聚变领域国际间的交流与合作，切实提高了我国托卡马克物理的研究能力和水平。

目前我国参加 ITPA 的协调委员会 (CC) 成员共 3 人，参加 7 个专业

物理组 (TG) 的成员共 39 人，参加 ITPA JEX 的装置有中核集团西南物理研究院的 HL-2A 装置、中国科学院等离子体物理研究所的 EAST 装置、华中科技大学的 J-TEXT 装置、中国科技大学的 KTX 装置以及清华大学的 Sunist 装置。十年来，随着国家对磁约束核聚变能研发事业的支持，我国的托卡马克装置得以不断完善，实验水平得以不断提高，特别是 HL-2A 装置和 EAST 装置，它们已经具备开展一些前沿物理研究的基本能力，是我国开展 ITPA JEX 计划的主力装置。

我国参加 ITPA 的总体情况良好。随着国家磁约束聚变能发展专项的支持力度不断提升，我国磁约束聚变科研实力和水平逐年提高，聚变领域的国际交流与合作也逐年加深。为了更好地、更有效地利用 ITPA 资源和发挥中国在 ITPA 中的作用，在科技部和磁约束聚变专家组的推动下，2011 年中国磁约束聚变界成立了中国托卡马克物理活动的组织框架 (China Tokamak Physics Activity, CTPA)，开展关键物理研讨和组织国内相关的研究，促进中国磁约束聚变物理的发展和统筹参与 ITPA 的活动。2010 年至今，我国科学家参加 ITPA CC 和 TG 各类会议达到 119 人次，各类报告 87 人次，参与 TG 的 JEX 课题数目逐年上升，参与度也不断提高。据不完全统计，我国参加 JEX 课题的参与度已从 2010 年不到 10% 增长到 2016 年的 37%。

从 2010 年起，我国每年都参加 ITPA CC 年度会议，报告我国托卡马克物理活动和磁约束聚变能研发的主要进展，让 ITER 参与七方充分了解我国磁约束聚变能研发的情况和 ITPA 相关工作的开展情况，为我国磁约束聚变研究进一步拓展国际间合作和交



ITER 场址建设现场

流奠定基础和创造条件。

十年来，我国科学家和聚变实验装置积极参与到 ITPA TG 的活动中。

在输运和约束方面，我国参加了同 ITER 偏滤器相关的粒子输运和加料、动量输运、三维物理效应、剖面的刚性机制、芯部到边界的湍动和输运，以及 L-H 模转换的物理模型等课题研究。其中，在动量输运、三维物理效应及边界湍动和输运等方面贡献比较突出，为解决 ITER 尺度下约束输运关心的关键性问题以及发展基于“第一性原理”可预测 ITER 输运过程的能力提供参考。

在诊断方面，我国参与 ITER 部分诊断的研发工作，对确定 ITER 安全保护、等离子体控制以及评估和理

解燃烧等离子体性能所需的诊断作出一些有特色的工作，特别是在 ITER 诊断内置第一镜的测试和污染处理方法作出了独特贡献。未来，我国将参与发展针对 ITER 升级（高聚变增益）和未来 DEMO 所需的关键诊断的工作。

在偏滤器及刮削层物理方面，我国参加了控制流向偏滤器靶板的热流、钨偏滤器的损伤过程及机理、燃料粒子的滞留和杂质迁移机理研究等方面的工作。特别是控制流向偏滤器靶板热流的研究，我国除了采用传统的共振扰动磁场方法外，提出了采用低混杂电流驱动这一比较独特的技术方案，为 ITER 及未来聚变堆的物理设计提供了独特的思路。

在集成运行方案方面，主要是

基于已有实验结果开展 ITER 集成运行方案的模型研究，发展 ITER 的控制策略，其最终目的是演示拟议的集成运行方案，建立起将该方案推广至 ITER 的实验基础。截至目前，我国科学家参与 ITER baseline 运行方案、稳态运行方案和混合运行方案，以及 ITER 的运行和控制策略，辅助加热和电流驱动控制和实现策略等课题研究。在这个领域内，我国充分利用全超导托卡马克 EAST 的优势，开展了稳态（长脉冲）运行的实验研究，获得了长达 100 秒的基于射频波加热和电流驱动的完全非感应电流高约束模式放电，这无疑会对 ITER 未来开展相关运行及其运行和控制策略提供了重要且有益的参考。近期，EAST 和美

国的 DIII-D 托卡马克联合实验研究，也极大地丰富了 ITER 稳态和混合运行方案的内容。

在台基物理方面，我国参与边界局域模（ELM）控制方法、台基结构刻画以及 L-H 模转换物理机制和定标律修正等研究工作。在 ELM 缓解和抑制机制研究中，我国科学家阐述了 RMP 缓解 ELM 的非线性机制，为 ITER 采用 RMP 缓解 ELM 的方法提供重要的物理基础。此外，我国的研究工作还将对边界局域模（ELMs）物理及其定标律，以及将其推广至 ITER 尺度的可信度，还有 L-H 模转换物理和定标律以及将其推广至 ITER 尺度的可信度等 ITER 关心的问题起到一定的推

动作用。

在宏观磁流体稳定方面，我国参与与破裂的预测、避免和缓解，锯齿、新经典撕裂模及电阻壁模的刻画及控制研究，轴对称控制，误差场控制及减弱方法等研究工作。我国在轴对称及误差场控制方面有一些比较有特色的工作，这些工作为 ITER 破裂数据库及破裂缓解方法、MHD 不稳定性及其主动控制策略等相关研究作出了一定贡献。

在快粒子 TG 中，由于我国大功率中性束加热系统和快粒子诊断手段最近才发展起来，这一方面的工作开展尚少。

三、结语

在 ITPA 的框架下，中国积极融入到了国际托卡马克物理研究的主流活动中，并已经开展了卓有成效的工作，在各个 TG 中也开始崭露头角。随着 ITER 计划的不断推进，中国托卡马克物理研究愈来愈关注于解决 ITER 所关心和面临的关键物理问题，并积极提出中国方案，不断丰富 ITPA 的研究内容。我国借鉴 ITPA 工作模式，已经开始并将持续推进 CTPA 的工作，着手开展了 ITER 和 CFETR 关心的物理问题的研究，同时结合 ITPA 框架下已有成果，加速推进了我国 CFETR 聚变堆芯物理设计。此外，一批年青科研人才在这些活动中得以锻炼，成长迅速，也为我国将来磁约束聚变能研发培养和储备较多的优秀青年人才。

我国两大实验装置 EAST 和 HL-2A 下一步将会尽快提高和完善装置的实验水平和研究能力，以利于更加全面地、更好地开展 ITPA 课题研究，扩大我国 ITPA 的参与规模，为我国科研人员深入了解 ITER 物理和主持或参加 ITER 未来科学研究奠定基础。

我国继续积极参与 ITPA 活动，保持与 ITER 参与方之间托卡马克物理研究的良好合作势头，将使得我国 CFETR 堆芯物理设计可以有效地寻求到国际方面的经验和帮助，这无疑会为我国磁约束聚变能研究的快速发展构建起良好的外部支撑。科技

