

国家磁约束核聚变能发展研究专项

2019 年度项目申报指南

（征求意见稿）

聚变能源由于资源丰富和近无污染，成为人类社会未来的理想能源，是最有希望彻底解决能源问题的根本出路之一，对于我国经济、社会的可持续发展具有重要的战略意义，是关系长远发展的基础前沿领域。

本专项总体目标是：在“十三五”期间，以未来建堆所涉及的国际前沿科学和技术目标为努力方向，加强国内与“国际热核聚变实验堆”（ITER）计划相关的聚变能源技术研究和创新，发展聚变能源开发和应用的关键技术，以参加 ITER 计划为契机，全面消化吸收关键技术；加快国内聚变发展，开展高水平的科学研究；以我为主开展中国聚变工程试验堆（CFETR）的详细工程设计，并结合以往的物理设计数据库在我国的“东方超环”（EAST）、“中国环流器 2 号改进型”（HL-2M）托卡马克装置上开展与 CFETR 物理相关的验证性实验，为 CFETR 的建设奠定坚实科学基础。加大聚变技术在国民经济中的应用，大力提升我国聚变能发展研究的自主创新能力，培养并形成一支稳定的高水平聚变研发队伍。

2019 年，本专项将以聚变堆未来科学研究为目标，加快国内聚变发展，重点支持高水平的科学研究、理论与数值模拟研究、CFETR 关键技术预研及聚变堆材料研发等工作，继续推动我国磁约束核聚变能的基础与应用研究。

按照分步实施、重点突出原则，2019 年拟优先支持 14 个方向，国拨总经费 4.0 亿元。指南方向 1~10，每个指南方向拟支持 1~2 个项目。指南方向 11~14 支持 35 岁以下青年科学家开展相关研究，每个指南方向拟支持 5 个项目。

本专项的项目执行期一般为 5 年。原则上所有项目应整体申报。指南方向 1~10 项目须覆盖相应指南研究方向的全部考核指标，下设课题数不超过 4 个，每个项目所含单位数不超过 6 个。指南方向 11~14 的项目下不设课题。

对于指南方向 1~10，原则上只立 1 项，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同的情况下，可同时支持 2 个项目，并建立动态调整机制，根据中期评估结果确定后续支持方式。

申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题、突破关键技术及建立规模化资源共享平台进行整体设计、合理安排课题；项目负责人应具备较强的组织管理能力。

1. 面向聚变堆高比压放电破裂预警、控制与缓解研究

研究内容：针对未来 ITER、CFETR 运行模式，依托 HL-2A/M 和 EAST 装置，在高性能等离子体 ($\beta_N > 2.8$) 和

低动量注入条件下，研究磁流体不稳定性特别是多磁岛非线性演化及其控制手段的物理基础，深入理解等离子体破裂与逃逸电子的产生机理，特别是芯部与边界模式耦合在破裂中的作用。发展与破裂预警、缓解密切相关的高时空分辨诊断技术，结合智能算法对各种破裂事件进行预测；发展控制等离子体破裂和逃逸电子的有效快速响应技术。提高实时破裂缓解技术的可靠性和效率，实现高效的破裂控制和缓解。

考核指标：（1）在归一化比压 $\beta_N > 2.8$ 条件下，磁岛测量精度 $< 1\text{ cm}$ ；建立准确率大于90%、预警时间3~10 ms的破裂预警系统；（2）实现破裂期间瞬态热负荷、晕电流和逃逸电流等幅度降低到未控制情况下的50%，破裂控制和缓解成功率 $> 95\%$ ；（3）新经典撕裂模实时控制时间小于50 ms，百千安培级逃逸电流的主动耗散时间 $< 10\text{ ms}$ 。

2. 面向聚变堆高性能等离子体中快粒子物理实验研究

研究内容：针对ITER和CFETR高性能稳态运行，依托HL-2A/M和EAST装置，在高约束模（ $\beta_N > 2.5$ ， $H_{98} > 1.1$ ）等离子体中，实验研究快粒子的动力学行为；发展与快粒子物理相关的诊断技术，探索快粒子损失的机理。结合理论与模拟，开展快粒子及其驱动的不稳定模式对本底等离子体输运过程影响的实验研究；运用局域加热或电流驱动等手段缓解快粒子损失，为聚变堆中快粒子的约束、输运和损失研究与控制提供重要数据和参考。

考核指标：(1) 在快粒子比压 $\beta_f > 1\%$ 的条件下，确定快粒子驱动的不稳定性所导致的快粒子损失份额；所发展的快粒子损失诊断系统能量分辨率 ΔE 小于 5 keV，螺距角分辨率小于 3° ，快粒子通量时间分辨率小于 2 微秒，中子扰动时间分辨率小于 10 微秒；(2) 成功实施对快粒子驱动多模不稳定性的控制，实现快粒子损失份额相比无控制减少 70%以上。

3. 聚变堆高性能稳态脱靶运行模式与小幅度边缘局域模 (ELM) 的兼容性研究

研究内容：依托 EAST 和 HL-2A/M 装置，在大功率加热、低动量注入和金属壁条件下，探索具有稳态高约束性能芯部等离子体且与偏滤器脱靶相兼容的小幅度或无 ELM 运行模式；开展其形成条件和芯部高约束模式 (H 模) 与边缘输运垒/偏滤器脱靶相兼容的机理研究；为具有小幅度或无 ELM 的 CFETR 稳态脱靶高性能运行模式提供物理基础。

考核指标：(1) 获得偏滤器部分脱靶条件下的自发小 ELM 稳态等离子体，ELM 对内能扰动幅度小于 2%，约束性能 $H_{98} > 1.1$ ；(2) 在大于粒子平衡时间的尺度上，重复实现考核指标 (1) 的稳态运行；(3) 无 ELM 的 H 模运行时间大于 5 倍电流扩散时间。

4. 聚变堆等离子体无量纲归一化参数区稳态运行模式实验验证研究

研究内容：针对 ITER/CFETR 集成运行条件和无量纲归

一化参数目标，依托 EAST 和 HL-2A/M 装置，集成相关加热/加料组合、等离子体控制方法，在类 ITER/CFETR 运行条件下，获得 ITER/CFETR 稳态运行模式归一化参数范围的等离子体；并在远大于等离子体电流扩散时间尺度上，验证 ITER/CFETR 稳态运行模式的物理可行性，并为 ITER/CFETR 加热组合方式的选择提供参考。

考核指标：（1）获得 ITER/CFETR 稳态运行模式主要无量纲归一化参数范围的等离子体： $q_{95}=5\sim 6.5$ ， $n_e/n_G=0.5\sim 0.85$ ， $v^*=0.02\sim 0.05$ ， $T_e/T_i=1\sim 1.5$ ， $H_{98}=1.0\sim 1.3$ ；（2）在考核指标（1）条件下，等离子体维持时间大于 20 倍电流扩散时间；（3）获得聚变堆高比压运行模式主要无量纲参数范围的等离子体： $\beta_N > 2.5$ ，归一化回旋半径 $\rho^*=0.005\sim 0.01$ 。

5. 氦氦聚变等离子体中磁流体过程的理论和模拟研究

研究内容：针对未来聚变堆氦氦运行和燃烧等离子体物理设计需要，开发用于模拟 α 粒子与磁流体模式相互作用过程的数值模拟程序，开展高能量增益氦氦聚变条件下 α 粒子物理过程和燃烧等离子体韧致/回旋辐射对磁流体平衡和稳定性的影响、 α 粒子输运和排灰过程研究。

考核指标：（1）开发出拥有完全自主知识产权、用于模拟未来聚变堆氦氦运行等离子体的大规模磁流体+ α 粒子数值模拟程序；（2）计算、模拟 α 粒子及韧致/回旋辐射效应与各种磁流体模式（包括各种本征模）相互作用过

程，给出 CFETR 主要运行模式下平衡剖面 and 磁流体稳定性分析，并评估 α 粒子输运和排灰对平衡和粒子控制的影响。

6. 基于非线性回旋动理学的氘氘聚变等离子体约束改善理论和模拟研究

研究内容：针对 ITER 运行和 CFETR 设计需要，依托国内现有大型托卡马克装置，开展氘氘聚变等离子体约束改善的理论和数值模拟研究。开发用于模拟氘氘聚变等离子体输运过程的非线性回旋动理学程序，并完成验证；模拟研究聚变等离子体湍流非线性演化和输运；研究内部输运垒的形成机制、边缘局域模的稳定性和非线性演化及其对输运垒性能的影响。

考核指标：（1）开发出拥有完全自主知识产权的回旋动理学湍流大规模数值模拟程序，模拟氘氘聚变条件下等离子体湍流非线性演化和输运，预测 ITER/CFETR 中等离子体的反常输运；（2）通过理论和数值模拟预测内部输运垒的形成和性能，并同实验进行比较验证。

7. CFETR 核设计与关键安全分析软件开发及数据库建立和完善

研究内容：基于 CFETR 核设计与安全分析评价的需求及关键软件自主可控的要求，在国内已有的自主研发核电软件基础上，构建聚变堆中子物理、安全分析、粒子输运模拟

与活化计算、停堆剂量率计算等核心功能的自主化软件系统研发、集成。开发聚变堆核截面、材料热物性、热工水力等数据库。

考核指标：(1) 完成具有自主知识产权的聚变堆中子输运与活化计算集成、热工安全分析、事故工况仿真分析等软件，与国际通行程序计算结果对比验证；(2) 建立并完善上述程序所需的核截面、材料热物性及热工水力等数据库；(3) 对考核指标(1)与(2)进行部分实验验证。

8. 面向 CFETR 偏滤器材料和模块的高热负荷等性能的规范化测试与评价

研究内容：基于先进钨基材料的研究进展和 CFETR 偏滤器的设计要求，特别是 $20\text{MW}/\text{m}^2$ 稳态热负荷的要求，建立偏滤器面对等离子体材料和偏滤器模块的高热负荷测试评价标准，并规范其它性能测试规范；研发满足 CFETR 要求的先进钨基材料以及基于先进钨基和铜基材料的水冷偏滤器模块。开展以高热负荷测试为主的综合性能评价，建立包括材料热力学、高热负荷及其它服役性能评价的方法及验收规范。优化后的钨基材料/模块在大型托卡马克装置上进行测试。

考核指标：(1) 规范用于高热负荷测试的水冷偏滤器模块制备工艺和规格，获得适合于 CFETR 先进钨基材料及水冷偏滤器模块的高热负荷测试和验收规范；(2) 先进钨基材

料的单锭规模不小于 40 公斤；室温热导率 ≥ 150 W/mK；韧脆转变温度 DBTT ≤ 100 °C；再结晶温度 RCT ≥ 1500 °C；室温抗拉强度 UTS ≥ 1 GPa，1000°C UTS ≥ 500 MPa，1500°C UTS ≥ 200 MPa；获得钨基材料在 1000~1500°C 范围的蠕变和疲劳（低周和高周）数据；获得先进钨基材料的高通量低能等离子体辐照损伤、H/He 滞留和高能粒子辐照数据，数据指标均需优于 ITER 级纯钨。（3）先进钨基材料能够承受 20 MW/m² 稳态热负荷；水冷偏滤器模块能承受稳态 20 MW/m²、2000 次以上的循环热负荷。（4）获得先进钨基材料/模块在大型托卡马克装置上的测试数据。

9. 面向 CFETR 水冷包层模块的整体制造关键技术及验证

研究内容：针对 CFETR 水冷包层防氦渗透和整体制造等需求，开展包含钨第一壁、阻氦材料、结构材料、冷却流道的水冷包层模块结构设计、中子学计算和安全评估；开发与基材（RAFM/ODS 钢）结合良好、氦渗透率低的铁基阻氦材料体系；研发水冷包层模块的结构及阻氦功能的整体制造及相关检测技术；开展模块及材料的氢同位素渗透、高热负荷试验、重离子辐照、大型托卡马克装置验证等工作。

考核指标：完成水冷包层模块的结构及阻氦功能整体设计，实现“结构+流道+阻氦+钨第一壁”的整体制造；完成 1~2 种铁基阻氦材料体系筛选，阻氢因子 >10000 （500°C），

并获得 10 dpa 重离子辐照下材料结构与阻氢性能变化特性；掌握模块整体制造及无损检测技术，完成 1/5 缩比模块研制；测试模块综合阻氢因子 >1000 （ 500°C ），通过 $5\text{ MW}/\text{m}^2$ 热负荷考核，并完成模块在大型托卡马克装置上的电磁力及热工水力实验验证。

10. 长脉冲高功率射频四极管关键技术研究

研究内容：在消化吸收 ITER 1.5 MW 长脉冲四极管技术的基础上，开展国产大功率射频四极管的设计与模拟计算、关键技术预研，四极电子管研制，集成和整管调试；所研制的长脉冲高功率射频四极管在相关发射机平台上进行实验。

考核指标：形成长脉冲兆瓦级射频四极管的生产工艺规范，建立测试平台，提供满足以下参数的四极管样管：（1）末级电子管 2 只，工作频率为 50~150 MHz，射频输出功率为 1~1.5 MW，推动功率小于 100 kW，运行方式为连续波；（2）陶瓷金属四级管 2 只，工作频率小于 150 MHz，射频输出功率为 100 kW，推动功率小于 5 kW，运行方式为连续波。

11. 高参数托卡马克装置刮削层/偏滤器物理过程若干关键问题研究

研究内容：针对 ITER 国际托卡马克物理活动（ITPA）关注的刮削层/偏滤器物理问题，依托我国 EAST 和 HL-2A/M 托卡马克实验装置，通过实验、理论、数值模拟，针对刮削层/偏滤器物理过程中若干关键科学问题开展研究。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）在类 ITER 无量纲参数条件下的刮削层/偏滤器物理实验或理论研究方面获得重要进展；（2）在类 ITER 无量纲参数条件下的等离子体与器壁相互作用实验或理论研究方面取得重要进展；（3）发展出一种偏滤器靶板热负荷过程诊断的新方法或新技术；（4）发展出一种偏滤器靶板热负荷缓解的新方法或新技术；（5）建立刮削层/偏滤器区输运过程新模型并开发出相关的数值模拟程序。

12. 聚变堆条件下台基物理的若干关键问题研究

研究内容：针对 ITER 国际托卡马克物理活动（ITPA）关注的台基物理问题，依托我国 EAST 和 HL-2A/M 托卡马克实验装置，通过实验、理论、模拟，针对边缘局域模及台基的基本物理问题开展研究。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）在托卡马克边缘局域模控制机理实验或理论研究方面获得重要进展；（2）在杂质对台基影响方面取得重要实验或理论研究成果；（3）在改善约束模（I 模）台基结构和边界弛豫过程的实验或理论研究方面取得重要进展；（4）在刮削层和偏滤器结构影响 L-H 转换功率阈值及台基形成的实验或理论研究方面取得新突破；（5）在碰撞率对密度和温度台基结构的影响实验或理论研究方面取得新进展。

13. 大尺寸光学级金刚石制备、封接相关技术研究

研究内容：为满足研制长脉冲大功率回旋管的需求，开展大尺寸光学级金刚石厚膜制备技术和性能测试方法研究，以及金刚石膜片金属化和金刚石微波窗封接技术研究。

考核指标(完成下列目标之一):(1)研制出直径 100~120 毫米、厚度 1~2 毫米的光学级金刚石厚膜 2~5 片，形成金刚石材料质量表征技术；(2) 建立金刚石薄膜窗口金属化和焊接的工艺和规范，研制出窗片直径 100 mm、厚度 1.36 mm、通径 63.5 mm 的微波窗 2 件，微波窗驻波系数小于 2，真空漏率小于 1×10^{-10} Pa m³/s。

14. 辐照损伤条件下聚变堆材料中氢同位素滞留/渗透行为的研究

研究内容：针对未来聚变堆中各种材料（面向等离子体材料、结构材料及涉氚材料等）的具体服役工况（等离子体辐照、中子辐照，氢同位素环境等协同作用），研究辐照损伤下聚变堆材料中氢同位素滞留/渗透等行为的演变规律；开展辐照损伤下材料中氢同位素滞留/渗透性能的实验与测试；探索研发既抗辐照又具有较强抑制氢同位素滞留/渗透的聚变堆新材料。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）在中子辐照损伤条件下聚变堆材料中氢同位素滞留/渗透等行为的理论研究、模拟计算方面取得重要进展；（2）在等离子体轰击下聚变堆材料中氢同位素滞留/渗透等行为的理论研究、模拟计算方面

取得重要进展；(3) 获得中子（或离子）辐照下离位损伤对材料中氢同位素滞留/渗透性能影响的重要实验进展；(4) 研发出既抗辐照又具有较强抑制氢同位素滞留/渗透的面向等离子体材料或聚变堆结构材料；(5) 研发出具有低氚滞留、良好氚相容性和抗辐照的聚变堆氚包容新材料。