

国家重点研发计划政府间国际科技创新合作专项

国家磁约束核聚变能发展研究

2018 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实验堆（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；发展氦自持、聚变堆材料、聚变堆包层及聚变能发电等ITER未涵盖的聚变堆技术。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。建立国际一流的研发平台，初步构建聚变工业发展体系，培养并形成一支稳定的高水平聚变研发队伍，在2020年前后具备自主建造聚变工程堆的能力，适时启动高效安全聚变堆研究设施建设，加快聚变能走向实际应用进程，跨入世界聚变能研究开发先进行列。

2018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，重点开展高水平的科学研究、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。

本专项2018年项目指南如下：

1. 面向聚变堆的先进偏滤器位形实现和控制方法研究

研究内容：面向 CFETR，发展雪花、三叉（ Tripod ）等

先进偏滤器位形的控制和识别技术。通过解决垂直不稳定性控制及先进偏滤器位形的精确识别等关键问题，发展基于双 X 点连线长度和角度的控制算法，研发具备有效控制双 X 点、多打击点等复杂磁拓扑位形的先进控制系统。在大功率辅助加热条件下，开展大拉长比、高三三角形变的先进偏滤器位形实验研究，掌握先进偏滤器位形的稳定控制技术，为 CFETR 的工程设计和未来运行提供技术支撑。

考核指标：在辅助加热功率大于 4 MW 条件下实现具有雪花、Tripod 先进偏滤器位形的等离子体运行；实现 X 点及打击点识别时间小于 1 毫秒，位置控制精度小于 1 厘米；实现大拉长比（1.5-1.8）和高三三角形变（0.2-0.6）先进偏滤器位形的等离子体控制。

2. 面向 CFETR 的等离子体稳态集成控制技术及实验验证

研究内容：建立能够验证 CFETR 稳态运行要求的先进等离子体控制集成框架，以及与之相适应的安全、控制、通讯和数据框架，并发展相关软件；集成诊断、加热及其它外

部控制手段，研究发展托卡马克等离子体控制模型和策略，实现对高性能等离子体性能和行为的控制，包括：位形、压强、偏滤器热负荷和磁流体 (MHD) 稳定性等的控制以及破裂预警与防护；开展相关实验研究，探索等离子体动理学分布参数的主动控制方法和策略；在高参数下验证等离子体控制模型，优化和完善控制器，运用先进的控制和人工智能技术建立高性能等离子体的稳态运行平台。

考核指标：建成具有自主知识产权的托卡马克等离子体控制及数据集成平台；实现不少于 2 个独立物理控制量（压强、功率等）下的稳定、长脉冲（大于 200 秒）高约束先行实验，验证控制系统和主要控制算法的可靠性、安全性和有效性；该控制系统需具备未来复杂工况下集成、安全预警、扩展等功能。

3. 面向 ITER/CFETR 的高热负荷控制及相关物理研究

研究内容：瞄准 ITER/CFETR 高约束、高热负荷条件下等离子体运行的物理机制与运行控制问题开展研究。利用主动送气、杂质注入等手段，实现部分及完全偏滤器脱靶的高

约束模运行；探索偏滤器热沉积区展宽与主动调控靶板热负荷、粒子流的方法和机理；在不同第一壁材料的条件下，探索解决 10 MW/m^2 量级热负荷问题的实验手段，并与芯部等离子体高约束性能运行模式相兼容；发展相关测量诊断，开展热沉积区展宽、脱靶产生机理、高约束运行模式与偏滤器兼容等关键物理问题研究，为 ITER 及 CFETR 在偏滤器高热负荷条件下的高约束模式的稳定运行提供科学和工程基础。

考核指标：实现半脱靶及全脱靶高约束模式 ($\beta_N > 2.5$, $H_{98} > 1.0$) 的可靠控制运行；在大于 5 倍电流扩散时间尺度、初始偏滤器靶板峰值热负荷 10 MW/m^2 量级基础上，提供至少两种实现偏滤器靶板热负荷降低 50% 以上的控制手段；在偏滤器热负荷有效控制条件下，芯部等离子体约束性能下降小于 20%。

4. 氦氦聚变等离子体中 alpha 粒子过程对等离子体约束性能影响的理论模拟研究

研究内容：针对 ITER 氦氦运行和 CFETR 物理设计需要，开发用于模拟 alpha 粒子物理及相关能量、粒子输运过程的

数值模拟程序，开展燃烧等离子体氘氚聚变条件下 alpha 粒子物理过程的理论、模拟研究，计算能量增益 $Q \geq 5$ 条件下 alpha 粒子密度空间分布剖面 and 能谱分布，分析 alpha 粒子物理过程对等离子体约束性能的影响。

考核指标：开发出可模拟 ITER/CFETR 氘氚聚变等离子体的混杂数值模拟程序，模拟 alpha 粒子激发的本征模和慢化、热化等能量输运过程，并计算出能量增益 $Q \geq 5$ 条件下 alpha 粒子密度空间剖面 and 能谱分布；根据 ITER/CFETR 设计参数，计算、评估 $Q \geq 5$ 条件下燃烧等离子体中 alpha 粒子对等离子体约束性能的影响。

5. 长脉冲高功率速调管关键技术研究

研究内容：在消化吸收 ITER 0.5 MW 长脉冲速调管技术的基础上，开展国产大功率速调管的设计、关键技术预研、集成和整管调试研究，研制长脉冲高功率速调管，并能用于国内托卡马克实验。

考核指标：建立长脉冲 MW 级速调管的生产工艺规范，提供两只样管；样管工作频率 4.6 GHz，输出功率不小于 0.5 MW，脉冲长度大于 100 秒。

6. 聚变堆新型结构类材料的高效制备及性能测试

研究内容：根据 CFETR 对关键材料服役性能的要求，开展高洁净度熔炼和热机械加工技术研究，并优化合金成分及界面设计，实现材料强度与韧性、高温和抗辐照性能的同步提高，研发出新型抗辐照熔炼 ODS 低活化钢（兼顾其它可大规模生产的弥散强化低活化钢）、铜合金材料等。针对上述材料进行系统的力学、热学、磁学及焊接、重离子辐照、氢同位素渗透滞留等性能测试。

考核指标：结构钢：氧化物颗粒尺度不大于 10 nm，数密度不小于 $10^{24}/\text{m}^3$ ，热力耦合作用下不发生聚集长大；400°C-500°C/200 dpa 重离子辐照后，辐照肿胀率小于 0.1%；室温冲击功 $\geq 250\text{J}$ 、延伸率 $\geq 22\%$ ，韧脆转变温度 $\leq -90^\circ\text{C}$ ；650°C/120 MPa 蠕变断裂时间不小于 5000 小时。单件铸锭重量不小于 200 公斤。首批材料 2020 年基本满足入堆中子辐

照的要求。热沉铜合金：室温热导率 ≥ 300 W/m K，室温抗拉强度 ≥ 500 MPa，屈服强度 ≥ 400 MPa，延伸率 $\geq 18\%$ ；450℃抗拉强度 ≥ 300 MPa，屈服强度 ≥ 260 MPa，450℃/50 MPa蠕变速率不大于 10^{-9} s $^{-1}$ ；400℃-500℃/50 dpa 重离子辐照后，辐照肿胀率低于 0.1%。

7. CFETR 国产先进材料小样品高剂量中子辐照及结构性能测评

研究内容：根据 CFETR 的要求，针对包层结构、第一壁、偏滤器、热沉及阻氙涂层等五类先进国产材料，利用国内外现有条件，进行小样品的高剂量中子辐照及结构与性能测评。测试分析 10-50 dpa 反应堆中子辐照条件下各种候选材料的微观结构及系统宏观力学性能，并结合反应堆中子辐照过程中氦、氢含量的影响及小样品与标准宏观样品的对应关系，评价面向 CFETR 的候选国产先进材料在 10-50 dpa 中子辐照条件下的微观与宏观性能及服役行为。

考核指标：获得五种以上国产先进材料在中子辐照条件下（其中结构类材料不低于 30 dpa、第一壁材料不低于 10

dpa) 的 下 述 实 验 数 据 : 不 同 温 度 下 的 材 料 微 观 结 构 、 力 学 性 能 (至 少 包 括 硬 度 、 拉 伸 性 能 、 断 裂 韧 性 及 韧 脆 转 变 温 度 等) 、 辐 照 肿 胀 率 、 热 导 率 (对 于 钨 合 金 和 热 沉 等 材 料) , 以 及 蠕 变 与 阻 氚 (氢 同 位 素) 性 能 等 ; 建 立 小 样 品 中 子 辐 照 的 实 验 结 果 与 标 准 宏 观 样 品 的 对 应 关 系 ; 初 步 建 立 我 国 聚 变 堆 材 料 小 样 品 的 标 准 实 验 体 系 。

8. 聚变堆金属材料中子辐照计算模拟

研究内容：基于 CFETR 对材料中子辐照损伤评价预测与高性能抗辐照材料研发的要求，构建从微观、介观到宏观的金属中子辐照计算模拟平台。开展金属材料中子辐照损伤模拟研究，建立表征辐照缺陷演化的关键参数数据库；结合相关实验数据构建基于辐照缺陷演化特征的力学性能模型，计算分析不同 dpa 与氢、氦浓度条件下材料缺陷结构与力学性能，获得材料微结构/辐照缺陷演化与服役性能之间的对应关系。选取典型 He/dpa 条件下的中子辐照实验，对比验证模拟平台的有效性。计算和预测 3-5 dpa 聚变中子辐照条件下的金属材料结构与力学性能，为 CFETR 一期材料服

役行为评价和二期中子辐照模拟提供预测。

考核指标：建立具有自主知识产权的中子辐照多尺度计算模拟平台；选取 1-2 个典型的 He/dpa 条件下的中子辐照实验数据，验证计算模拟平台的有效性，实现中子辐照下金属材料结构与力学性能的预测；预测 3-5 dpa 聚变中子辐照条件下金属材料结构与力学性能的演化规律。

9. 基于托卡马克位形优化的新方法探索

研究内容：以提升芯部等离子体性能，提高边界热流和杂质的排出能力，增强磁流体稳定性、减小乃至避免等离子体大破裂为目标，开展基于托卡马克位形进行优化的新方法探索研究，并进行相关的可行性实验验证，评估托卡马克位形优化对等离子体稳定性和约束的影响。

考核指标：

给出一种基于托卡马克位形进行优化的新方法的概念设计，完成可行性的评估报告。

10. 聚变堆条件下磁流体稳定性和高能量粒子若干挑战性问题的研究

研究内容：开展 Greenwald 密度极限物理机制、破裂逃逸电子过程及其缓解、破裂过程中晕电流作用、alpha 粒子激发本征模谱、燃烧等离子体诊断新方法等方面的实验、理论、模拟研究。

考核指标：在 Greenwald 密度极限物理机制的实验或理论研究方面取得进展；从实验和/或理论上理解破裂逃逸电子的物理机制、提出有效的缓解办法；开发出破裂过程中的晕电流作用的程序或实验测量方法；给出氦氖运行模式下 alpha 粒子激发的本征模功率谱分布；提出一种可用于燃烧等离子体诊断的新方法。

11. 聚变堆条件下约束与输运的若干关键问题研究

研究内容：开展环形磁约束等离子体电磁湍流及其对输运过程的影响、高参数聚变等离子体中杂质对输运过程的影响、强磁场约束下改善约束模（I 模）形成机制、芯部输运垒形成机制、聚变等离子体湍流诊断新方法等方面的实验、理论、模拟研究。

考核指标：在托卡马克电磁湍流实验或理论研究方面获

得重要进展；在杂质影响方面取得重要实验或理论研究成果；强场条件下 I 模形成机制的实验或理论研究方面取得突破性进展；在芯部输运垒形成机制的实验或理论研究方面有新的突破。

12、20 MW/m² 条件下聚变堆部件探索研究

研究内容：针对未来聚变堆 20 MW/m² 高热负荷的运行条件，探索降低高热负荷、延缓高热负荷部件寿命的方法，设计新的移除高热负荷的部件、研制快速移能的材料和部件，开展相关的工程实验，掌握有效控制杂质、快速移能的方法；研究长脉冲、高参数条件下杂质输运及等离子体与壁强相互作用过程。

考核指标：提出长脉冲、高参数、20 MW/m² 热负荷条件下降低等离子体与壁相互作用强度的方法，并做出详细工程计算和设计；提出可承受 20 MW/m² 热负荷的新材料设计，研制出该设计所需的样品材料，并给出材料性能测试结果；提出可承受 20 MW/m² 热负荷的工程结构设计，研制出该设计所需的单元部件，并完成设计所需测试实验；在高参数条

件下杂质输运及等离子体与壁强相互作用过程研究方面有重要进展。

13、部件级阻氦涂层制备技术及服役性能评价

研究内容：发展聚变堆结构包层或氦工厂系统管道（或容器）内壁阻氦涂层制备工艺技术，研究部件级、特别是异形部件阻氦功能涂层服役工况下综合性能变化规律，建立相关实验模拟与可靠性评价方法，提出改善阻氦涂层综合性能的技术措施。

考核指标：部件级阻氦涂层 500℃ 下氢同位素渗透率阻滞因子 > 1000；获取含氦分压（大于 50 kPa）氢同位素环境下阻氦涂层结构及性能在 1-2 年期间内变化规律及相关数据；获得部件级阻氦功能涂层在 1-2 年期间综合性能变化规律和相关实验模拟方法；提出部件级阻氦涂层服役可靠性评价方法。