

“国家磁约束核聚变能发展研究专项”

2022 年度项目申报指南

(征求意见稿)

聚变能源具有资源丰富和近无污染的优点，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“十四五”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，依托我国的“东方超环”(EAST)、“中国环流器 2 号改进型”(HL-2M)托卡马克装置开展与 CFETR 物理相关的验证性实验，为 CFETR 的建设奠定科学基础。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。

2022 年度指南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、实验研究、CFETR关键技术预研及聚变堆部件研发等工作，继续推动我国磁约束核聚变能的基础与应用研究，拟支持 17 个项目。指南方向 18-21 是青年科学家项目，支持青年科研人员承担国家科研任务，拟支持 20 个青年科学家项目。

同一指南方向下，原则上只支持 1 项，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 项。

1. 大电流、高离子温度托卡马克等离子体实验研究

研究内容：面向未来聚变堆等离子体大电流运行面临的挑战，依托 HL-2M 等国内磁约束核聚变研究装置，研究发展高功率中性束加热、等离子体电流驱动，以及大电流运行控制等技术，研究不同运行模式下影响等离子体约束性能改善的关键因素，探索提升等离子体高参数运行的技术途径，为未来聚变堆高参数运行提供科学技术支撑。

考核指标：（1）等离子体电流 ≥ 1.5 MA、维持时间 ≥ 1 秒；
（2）离子温度一亿度、维持时间大于 3 倍能量约束时间。

2. 无涂层全金属壁条件下托卡马克运行技术研究

研究内容：瞄准未来聚变堆无涂层全金属壁稳态运行面临的主要科学技术问题，依托 EAST 托卡马克装置，发展适用于全金属壁条件下的先进壁处理方法及其相关诊断系统，研究分析壁处理过程中影响粒子清除效率及均匀性的关键因素；研究全金属壁条件下适合高约束模式稳定运行的技

术，实现有效控制和稳定可重复的长脉冲高约束等离子体，为国际热核聚变实验堆（ITER）和未来聚变堆长脉冲高参数等离子体运行提供控制和壁处理技术方案。

考核指标：在无涂层全金属壁条件下，实现稳定重复的、约束改善因子 $H_{98} > 1.0$ 、边界安全因子 $q_{95} \sim 5$ 、归一化密度 $n_e/n_{GW} > 0.5$ 的高约束长脉冲（60 秒）等离子体放电。

3. ITER 国际托卡马克物理活动——低 q_{95} 下台基物理的联合研究

研究内容：参考 ITER 研究计划，在类 ITER 物理条件下，重点开展集成混合运行模式相关的约束性能改善、台基结构物理和不稳定性控制等关键科学技术问题研究。在 ITER 国际托卡马克物理活动（ITPA）框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与 PEP（Pedestal Physics）专题组的国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

考核指标：（1）在射频波加热主导、低动量注入条件下，实现 $q_{95} \sim 4$ （ $I_p > 0.6$ MA）、 $H_{98} \sim 1.2$ 、稳定维持时间超过 10 倍电流扩散时间的类 ITER 混合运行模式；（2）在 PEP 专题组的联合实验研究中，至少有一项由我国科研人员/装置主导的 ITPA 国际托卡马克联合实验研究；联合实验研究参与度达到 50%；每年在 PEP 专题组会议报告不少于两次。

4. ITER 国际托卡马克物理活动——电子和多离子组分

输运与约束实验研究

研究内容：参考 ITER 研究计划，在类 ITER 物理条件下，重点开展电子和多离子组分条件下等离子体输运与约束、同位素效应等关键科学技术问题研究。在 ITER ITPA 框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与 T&C (Transport & Confinement) 专题组的国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

考核指标：（1）在不同多离子组分条件下，实现归一化比压 $\beta_N > 1.8$ 、 $n_e/n_{GW} > 0.6$ 的等离子体运行；（2）在 T&C 专题组的联合实验研究中，至少有一项由我国科研人员/装置主导的 ITPA 国际托卡马克联合实验研究；联合实验研究的总体参与度达到 50%；每年在 T&C 专题组会议报告不少于两次。

5. 面向 ITER 首期运行计划的氦等离子体高约束模式国际合作研究

研究内容：充分利用我国和国际磁约束聚变领域的研究能力和资源，针对 ITER 第一期 (PFPO, Pre-Fusion Power Operation) 运行阶段氦等离子体运行目标相关的关键科学技术问题，以纯射频波加热和全金属壁条件下获得托卡马克稳定高约束氦等离子体为重点，通过实验、理论、模拟的国际合作研究，探索适合于 ITER PFPO 无核期间运行的物理基础和实验方法。

考核指标：（1）在纯射频波加热和全钨偏滤器条件下，演示维持时间大于 10 秒、 $H_{98}>1$ 、具有第一类边界局域模特征的高约束模式氦等离子体运行；（2）在 10 倍电流扩散时间尺度上实现第一类边界局域模的有效控制；（3）在氦等离子体研究方面，利用国际资源开展的合作研究提案不低于 10 个，以我国资源为主开展的合作研究提案不低于 10 个。

6. 面向聚变堆的等离子体压强剖面智能控制国际合作研究

研究内容：基于人工智能技术，发展可用于等离子体运行状态监测的集成数据采集和分析系统，研究深度学习代理模型对等离子体剖面参数和运行状态的监测技术，开发剖面智能信息处理系统，构建托卡马克剖面演化的快速集成建模核心功能程序，研究剖面参数的实时智能识别算法、用于剖面控制的加热加料系统预设参数的智能配置运行模式，以及智能协调控制策略，为聚变堆实时反馈动态运行提供支撑。

考核指标：（1）自主研发一套等离子体压强剖面智能主动控制系统，在 $\beta_N>2.5$ 、中心安全因子 $q_0 \sim 1.1$ 、 $q_{95} \sim 4.5$ 、维持时间大于 10 倍能量约束时间的条件下，在国内聚变实验装置上实现可重复的压强剖面控制参数设定的放电；（2）在面向聚变堆的等离子体运行智能控制研究方面，利用国际资源开展的合作研究提案不低于 10 个，以我国资源为主开展的合作研究提案不低于 10 个。

7.低环径比聚变等离子体融并压缩的物理与技术研究

研究内容：主要依托低环径比托卡马克装置，发展融并压缩启动技术，研究启动过程中电流产生和等离子体平衡弛豫的机制；探索等离子体融并加热的方法，验证融并加热定标关系，评估融并加热的效率及其独自为聚变反应堆提供高功率加热的可行性；开展多种等离子体位形建立的实验研究，进一步拓展托卡马克传统的运行区间。

考核指标：（1）实现环形等离子体融并启动，其中外极向场启动等离子体电流大于 50 kA，重联磁场强度大于 500 高斯；（2）环向等离子体电流达到 200 kA，实现负三角形变、双环位形等多种等离子体位形；（3）给出初步的融并加热定标关系。

8.聚变堆燃料粒子合成诊断技术和方法研究

研究内容：针对聚变堆等离子体条件下燃料粒子诊断和物理研究，完善中子能谱与产额诊断、伽马光子诊断、快离子 D_{α} 诊断、中性粒子能谱诊断等多种非介入先进诊断技术，发展基于第一性原理的物理模型和集成数值模拟手段，结合机器学习方法，获得自洽的燃料粒子关键信息，主要包括离子温度、快离子速度分布函数、氦燃烧率和燃料粒子氦氖浓度比等，并在国内托卡马克典型等离子体放电条件下，对相关诊断技术和分析模型进行实验验证。

考核指标：（1）发展出基于理论、模拟与多种诊断相结

合的燃料粒子合成诊断模型；(2) 离子温度：范围 >1.5 keV，误差为 $\pm 20\%$ ，时间分辨为 500 毫秒；(3) 快离子速度分布函数：快离子能量范围为 20 keV ~ 2 MeV，在 100 keV 以下能量分辨为 5 keV，投掷角度范围为 $-\pi \sim \pi$ ；(4) 基于氦等离子体聚变实验中子产额诊断得到氦燃烧率：范围为 0.003 ~ 0.01，误差为 $\pm 20\%$ 。

9. 燃烧等离子体中快粒子对芯部约束影响的理论模拟研究

研究内容：针对未来聚变堆中燃烧等离子体典型稳态运行模式，开展快粒子对高聚变功率燃烧等离子体能量、粒子约束影响的理论模拟研究，特别是分析、揭示聚变阿尔法粒子与背景等离子体相互作用对芯部约束的影响；自主发展射频波加热产生的快粒子分布和聚变产生的阿尔法粒子分布的物理模型及相应的模拟程序；开展快粒子与波非线性相互作用对湍性输运影响的研究，分析其在燃烧等离子体芯部约束中的作用。

考核指标：(1) 自主发展物理模型和数值模拟程序，用于研究分析离子回旋共振加热下的快粒子分布及聚变产生的阿尔法粒子分布，并用相关的实验数据进行校核；(2) 分析、揭示高聚变功率 (>200 MW) 条件下快粒子/阿尔法粒子对芯部约束影响的物理机制，提出提高芯部约束改善的实验方案，并在国内装置上开展相关的高功率加热实验加以验

证。

10. 面向 ITER 的杂质注入关键问题研究及应用

研究内容：杂质主动注入是 ITER 和未来聚变堆运行的重要控制手段。针对 ITER 控制瞬态及稳态高热负荷所需杂质注入涉及到的关键物理和技术问题，发展杂质在等离子体中沉积、消融、运输的模型和数值模拟程序；依托国内托卡马克装置，发展先进杂质注入技术，研究弹丸消融过程、杂质注入下的辐射功率平衡以及杂质运输等问题；研究杂质注入在偏滤器脱靶运行、边界局域模控制、破裂缓解中的实际应用。

考核指标：（1）建立杂质注入在等离子体中的沉积、消融、运输模型并自主发展出数值模拟程序；（2）研发出速度大于 1200 m/s 的杂质注入技术及系统；（3）在对杂质量化分析的基础上，实现杂质注入下的偏滤器脱靶运行、边界局域模控制和破裂缓解。

11. 面向聚变堆超导磁体辐射屏蔽的先进屏蔽材料研究

研究内容：针对未来聚变堆对超导磁体辐射屏蔽防护的要求，以及堆内各类诊断和加热窗口及相关系统对于高效屏蔽材料的需求，开展服役工况下磁体辐射防护用屏蔽设计和屏蔽材料组分优化研究，获得满足超导磁体辐射防护要求的屏蔽材料组分和屏蔽方案；开发抗辐照、耐腐蚀、高屏蔽效率、高性价比、可批量生产的新型辐射屏蔽材料；全面测试

服役工况下所研制的屏蔽材料、组件及模块的物理、力学、屏蔽性能，为未来聚变堆的建造提供候选超导磁体屏蔽设计方案和先进屏蔽材料。

考核指标：（1）自主研发出可量产的新型中子-伽马复合屏蔽材料及其制备工艺，屏蔽材料的密度不均匀性 $\leq 1\%$ ，有效元素含量不均匀性 $\leq 5\%$ ，耐温 $\geq 600\text{ }^\circ\text{C}$ ；屏蔽性能满足 ^{60}Co 伽马射线线性衰减系数 $>0.5\text{ cm}^{-1}$ ，当其厚度达 15 cm 时可实现热中子吸收率 $>99.9\%$ ，快中子（ $E>0.1\text{ MeV}$ ）吸收率 $>99\%$ ；（2）制造出屏蔽组件和屏蔽模块（最大尺寸 300 mm （环） $\times 400\text{ mm}$ （径） $\times 500\text{ mm}$ （极）），进行氘氘聚变中子场条件下的屏蔽性能考核，需满足穿过模块的中子通量下降 >2.5 个数量级的要求；（3）材料磁导率 $\mu<1.1$ ，并在托卡马克磁场及放电环境下考察屏蔽材料、组件和模块的磁化行为。

12. 聚变堆大型超导磁体低温绝缘材料研发

研究内容：根据聚变堆对绝缘材料服役性能的要求，研制可满足纵场（TF）、中心螺线管（CS）和极向场（PF）超导磁体线圈应用的高性能低温绝缘材料，其在 77 K 和 4.2 K 温度下的力学、电绝缘及抗辐照性能全面优于ITER同类材料的技术指标；开展模拟线圈的真空浸渍工艺研究，为线圈制造提供国产化的合格材料；优化绝缘材料制备工艺，形成高性能低温绝缘材料批量化生产能力，为聚变堆高场超导磁体系统建造奠定基础。

考核指标：（1）满足超导磁体线圈绝缘材料的工艺性能要求：浸渍温度下初始粘度 $<50 \text{ m}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，最终粘度 $<80 \text{ m}\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；4.2 K、77 K 温度下力学性能：ILSS（ 0° ） $>100 \text{ MPa}$ 、ILSS（ 90° ） $>90 \text{ MPa}$ 、UTS（ 0° ） $>900 \text{ MPa}$ 、UTS（ 90° ） $>450 \text{ MPa}$ ，经 3 万次拉伸疲劳循环后，UTS（ 0° ） $>250 \text{ MPa}$ 、UTS（ 90° ） $>150 \text{ MPa}$ ；2 K、4.2 K、77 K 温度下电绝缘性能：击穿强度 $>50 \text{ kV/mm}$ ；（2）满足超导磁体线圈绝缘材料的抗辐照性能要求：经 10 MGy 量级伽马射线辐照后，4.2 K、77 K 下 ILSS（ 0° ） $>80 \text{ MPa}$ 、ILSS（ 90° ） $>65 \text{ MPa}$ 、UTS（ 0° ） $>650 \text{ MPa}$ 、UTS（ 90° ） $>220 \text{ MPa}$ ；（3）建立超导磁体线圈绝缘材料生产线，产能达百吨级/年。

注：ILSS-层间剪切强度；UTS-极限拉伸强度； 0° -平行于纤维； 90° -垂直于纤维。

13. 聚变堆涉氚气体循环-转移泵研制

研究内容：针对聚变堆含氚排放气体转移至氚工厂以及氚工厂系统运行过程中气体循环需求，开展含氚气体循环-转移泵的设计和研制工作。围绕对气体高效抽出及增压功能的需求且考虑到材料的氚兼容性要求，开展材料选择与评价、部件加工与装配、高效密封与散热等关键技术研究；通过模拟工况的运行考核和氚验证考核，评估泵的可靠性、寿命和氚兼容性；提供产品样机并形成自主可控批量化生产能力。

考核指标：（1）提供的含氙气体循环-转移泵样机，需满足：对氙气体的最低入口压力 ≤ 50 Pa，最大出口压力 ≥ 0.5 MPa；流量 ≥ 15 m³/h；真空法动态漏率 $\leq 5.0 \times 10^{-9}$ Pa·m³/s；连续、无故障运转时间 ≥ 2000 小时，且在氙循环试验装置上累计考核时间 ≥ 300 小时；（2）提供 2 台符合指标（1）要求的产品样机，其 TRL 技术成熟度达到 9 级。

14. 聚变堆涉氙低温吸附泵研制

研究内容：针对未来聚变堆长脉冲、高参数稳态运行面临的偏滤器中性粒子排出难题，研发大抽速、快速再生、具有氙抽气能力及氙兼容的低温泵，解决低温泵冷头、氙压缩机及再生精确控制系统中的关键技术，研发氙兼容的活性炭固定结构及泵体的二级包容结构，开展低温泵运行方案预演、实验验证及有效粒子排出速率的研究。形成自主可控批量生产能力。

考核指标：（1）完成一套口径大于 400 mm、快速再生冷泵的研发，其满足以下性能要求：再生时间不大于 30 分钟（6 K-95 K-6 K）、再生温度下氢气解吸率不低于 90%；极限真空度优于 5×10^{-6} Pa；对氢气的抽速 ≥ 60000 L/s、对氙气抽速 ≥ 10000 L/s；对氢气的饱和容量 ≥ 220 bar·L；具有氙兼容的活性炭粘附结构及二级包容结构；（2）完成托卡马克长时间等离子体载带实验，验证其可靠性和稳定性；（3）完成示踪量级的涉氙热试验，涉氙方面满足指标（1）的要求；（4）

提供 2 台/套合格产品，技术成熟度 TRL 达到 9。

15. 聚变堆超导磁体设计分析软件研发与实验验证

研究内容：针对未来聚变堆大型超导 TF、CS 和 PF 磁体的运行工况，发展具有自主知识产权的大型聚变堆磁体设计、分析（力学、流体、电磁、核热等）软件，并通过与实际的聚变托卡马克磁体的对比实验以及国际上通行软件进行验证和校核，为我国自主设计、分析和建造聚变堆大型超导磁体提供完整的设计程序和分析工具。

考核指标：（1）自主发展出聚变堆超导磁体的设计、分析软件；（2）利用 ITER 磁体数据进行计算分析，其结果与 ITER 设计值的误差小于 10%；（3）利用国内超导托卡马克及相关超导磁体开展对比实验，其设计分析值与实验结果误差小于 10%。

16. 聚变堆真空室精准成型及高性能焊接关键技术研究

研究内容：针对聚变反应堆核级部件服役及高质量建造的要求，开展聚变堆真空室精准快速成型、高性能焊接等关键技术研究。参考 ITER 真空室技术规范书要求，采用 ITER 规定的真空室材料，重点突破真空室壳体空间曲面段精准成型、扇区高效组对焊接、复杂结构焊缝无损探伤等关键技术，形成可批量生产的聚变堆真空室精准成型和高性能焊接行业规范，为聚变堆真空室高质量快速研制奠定基础。

考核指标：（1）完成 1/8 尺寸 ITER 真空室壳体空间曲

面段成型，轮廓精度优于 ± 2 mm；完成 1/8 尺寸真空室壳体空间曲面段双层壳体焊接原型件，焊后整体轮廓精度优于 ± 3 mm；（2）真空室本体及焊缝符合 RCC-MR 2007 要求；焊缝磁导率 $\mu < 1.05$ ；焊缝无损检测满足 ISO5817 B 级标准；真空漏率 $< 1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

17. 聚变堆新型电源控制拓扑方案研究

研究内容：针对未来聚变堆安全、可靠、稳定、经济的要求，研究和发展新型的、具有更高性价比的超导磁体电源拓扑结构和方案。建立包括等离子体电流环的多耦合超导线圈负载、电网、变流器和开关系统模型，在此基础上开展超导磁体电源系统拓扑结构和方案、控制模式的研究；开展超导磁体电源系统和聚变堆负载兼容及与电网兼容的研究；完成超导磁体电源系统方案的初步工程设计以及场地、价格的评估。

考核指标：（1）以 ITER 电源设计为参照，提供不少于 3 种控制性能更优，且容量/价格至少降低 30% 的超导磁体电源拓扑结构和设计方案，并提供初步工程设计方案；（2）设计方案须进行相关的仿真或实验验证，并通过专业研究机构组织的设计评审。

18. 聚变等离子体若干关键物理问题的解析理论研究

研究内容：紧密结合托卡马克物理实验及未来聚变堆运行的重要需求，针对磁约束聚变等离子体关键物理问题，开

展解析理论研究。

考核指标（完成下列目标之一，并应用到一两个磁约束聚变等离子体物理关键问题的解决中）：（1）提出一种新理论分析方法；（2）提出一种新理论模型并进行解析求解；（3）提出一种新解析求解方法；（4）发展一种可解决多尺度问题的非线性解析理论；（5）提出一种新的多时空尺度解析理论模型，以此发展具有自主知识产权的模拟程序，并同国际上现有的同类程序进行校验或与实验进行验证。

19.托卡马克撕裂模不稳定性的深度学习研究方法研究

研究内容：针对传统模拟与实验在撕裂模研究上的局限性，依托我国现有模拟程序和托卡马克装置的实验数据，引入深度学习技术，发展撕裂模不稳定性的识别、演化预测和模拟新方法，助力撕裂模不稳定性产生机理的理解，为未来聚变堆撕裂模的有效控制提供参考。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）给出基于深度学习的撕裂模不稳定性识别方法；（2）提出结合物理原理的深度学习撕裂模不稳定性演化预测新方法；（3）基于可解释的深度学习模型给出撕裂模不稳定性产生和发展的参数区间；（4）发展包含多种动理学效应的撕裂模不稳定性深度学习模型；（5）提出新的深度学习新方法，并应用于撕裂模不稳定性模拟。

20.聚变堆遥操真空检漏关键技术研究

研究内容：针对聚变堆超高真空环境下的氘氚运行工况以及可能发生真空泄漏引起的聚变堆安全问题，重点研究聚变堆超高真空环境下亟待解决的在线实时遥操真空检漏前沿关键技术，开展远程真空环境诊断与检漏技术、测试方法、遥操处理方法等研究，为未来的聚变堆遥操真空检漏提供可行的实施方案、原理验证和技术支持。

考核指标（完成以下目标之一，并在国内托卡马克装置上验证可用性和可靠性）：（1）开发出针对聚变堆超高真空环境下真空泄漏的远程感知与快速定位技术；（2）开发出一种针对聚变堆超高真空环境的遥操真空检漏原理样机；（3）研发出一种适用于聚变堆超高真空环境下真空泄漏检测的遥操人工智能技术。

21.聚变堆第一壁部件原位一体化智能修复技术

研究内容：针对聚变堆堆内包层复杂曲面高性能加工制造和高放射性环境下原位智能机器人修复等难题，在研究包层第一壁钨或钼材料与包层结构低活化钢高性能一体化成形技术的基础上，发展包层第一壁部件智能机器人原位修复技术，并研制出合格产品及进行相关实验验证。

考核指标：发展出一种针对第一壁为钨或钼、结构材料为低活化钢的三维曲面包层件的原位智能修复技术，并研制出合格样机。其中，包层件第一壁原位修复的尺寸要求为厚度 $> 2 \text{ mm}$ ，面积 $> 0.5 \text{ m}^2$ ，修复层钨或钼材料的纯度 $>$

99%，致密度 $\geq 98\%$ ，修复层需满足高热负荷测试要求：可承受 1000 次、单次功率密度为 1 MW/m^2 的高热辐照。所发展的技术需在国内托卡马克装置上开展实验验证，重点考核该技术的可用性和可靠性，其结果需通过第三方专业机构评审验收。

浙江大学 A00097