

## 附件

# “国家磁约束核聚变能发展研究专项”

## 2021 年度项目申报指南

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。

2021 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，拟安排国拨经费概算 3.7 亿元。同时，拟支持 16 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 3200 万元，每个项目 200 万元。

指南方向 1-17 项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容和考核指标。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，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。项目实施周期一般为 5 年。项目下设课题数不超过 4 个，每个项目参与单位总数不超过 6 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人。

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。项目实施周期一般为 5 年。青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，对于青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1986 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生，原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

#### 1. 托卡马克千秒量级实验研究

研究内容：面向未来磁约束聚变堆长时间运行面临的挑战，发展托卡马克超长脉冲高参数等离子体放电和装置安全运行技术，研究远超壁平衡时间尺度的关键物理过程，在此基础上探索提升和长时间维持等离子体高参数运行的途径，促进成果在 ITER 未来运行、科学研究中的应用。

考核指标：实现稳定、可控的等离子体高参数放电，并同时满足：（1）等离子体运行时间>1000 秒；（2）中心电子温度一亿度；（3）线平均密度 $>1.5\times 10^{19}/\text{m}^3$ 。

## 2. 提升聚变等离子体平均压强的实验研究

研究内容：依托国内磁约束核聚变研究装置，获得高性能等离子体，着力拓展聚变三乘积空间，提升我国磁约束聚变等离子体的综合品质。在等离子体强电流、大拉长比、高加热功率条件下，开展多种加热/驱动手段功率耦合机制及粒子和能量约束改善机制研究，探寻提高等离子体聚变三乘积的有效方案；为未来聚变堆高参数运行及稳定控制提供物理基础和技术积累。

考核指标：在磁约束聚变装置上获得高性能等离子体，并同时满足：（1）等离子体储能大于 0.5MJ；（2）聚变三乘积达到目前国内磁约束聚变装置已实现数值的 3 倍以上、维持时间不小于能量约束时间。

## 3. ITER 国际托卡马克物理活动-偏滤器/刮削层实验研究

研究内容：参考 ITER 研究计划和第一阶段运行的需求，针对类 ITER 物理条件下边界/刮削层和偏滤器热流/粒子流稳态控制面临的主要挑战，在 ITER 国际托卡马克物理活动（ITPA）框架下，聚集国内力量从技术、实验、理论、模拟多方面力量，开展偏滤器/刮削层（Div/SOL）专题边界输运、粒子输运等方面的国际联合研究，显著提升我国在 ITPA（Div/SOL）专题科学研究中的参与度和贡献。

考核指标：在 ITPA Div/SOL 专题组新增 1 到 2 项由我国科研人员/装置主导的 ITPA 联合实验研究，所有联合实验研究的总体参与度达到 50%，ITPA 专题报告每年不少于两次。

#### 4. ITER 托卡马克物理活动-磁流体不稳定性/破裂实验研究

研究内容：针对未来 ITER 实验与稳态安全运行的需求，在国际托卡马克物理活动（ITPA）的框架下，汇聚国内力量与资源从技术、实验、理论、模拟多方面参与和主导磁流体不稳定性/破裂（MHD/Disruption）专题组的国际联合研究任务。在磁流体不稳定性控制特别是破裂预测、缓解和抑制这一 ITPA 重点研究领域开展研究，显著提升我国在 ITPA（MHD/Disruption）专题的参与度和贡献。

考核指标：在 ITPA MHD/Disruption 专题组新增加 1~2 项由我国研究人员/装置主导的联合实验，所有联合实验的总体参与度达到 50%，ITPA 专题报告每年不低于 2 次。

#### 5. ITER 相关高极向比压等离子体物理问题的研究

研究内容：充分利用国内外磁约束聚变领域的研究能力和资源，瞄准未来磁约束聚变堆高约束稳态运行目标所面临的一系列重大挑战，以高极向比压运行模式及其相关等离子体约束与稳定性、边界物理兼容方面的科学技术前沿问题为重点，通过实验、理论、模拟的国际合作研究，探索其与 ITER 和未来磁约束聚变堆条件/环境相兼容的物理基础和实验方法。

考核指标：在高极向比压等离子体研究方面，利用国际资源

开展的合作研究实验任务不低于 10 个，以我国资源为主开展的合作研究实验任务不低于 10 个。

## 6. ITER 相关的聚变堆边缘区域物理问题研究

研究内容：依托国内外先进托卡马克装置，通过广泛的国际合作开展等离子体边缘区域物理行为的联合实验与理论模拟研究。主要考察高约束、高比压 ( $\beta_N > 2.5$ ) 条件下，等离子体边缘区域湍流发生机理、演化特性和控制技术以及边缘三维扰动场物理效应刮削层与边缘区等离子体耦合等关键物理问题的研究，为 ITER 边界等离子体研究提供物理支持。通过国际合作，进一步提升我国在磁约束聚变等离子体边缘物理方面的研究水平，培养国际化人才，为深度参与 ITER 实验及聚变堆设计提供技术支撑和人才储备。

考核指标：在聚变堆边缘区域物理研究方面，我国科研人员参与国外聚变装置实验任务不低于 10 项，国外科研人员实质参加国内实验任务不低于 10 项。

## 7. 非托卡马克等离子体性能改善的新方法和新技术研究

研究内容：针对传统托卡马克以外的磁约束聚变途径（如仿星器、球形环等），开展旨在提升等离子体约束性能、增强等离子体宏观和微观稳定性的新方法和新技术探索研究。发展三维成形技术提升宏观磁流体稳定性、优化仿星器中约束/输运；提出实现更好的快粒子约束的新策略；发展波与等离子体相互作用的新方法，实现波对等离子体启动和有效维持；研究热壁或全金属壁条

件下等离子体与壁相互作用；研究环径比等参数对约束和运输的影响等。

考核指标：（1）给出仿星器位形三维成形技术的优化方案，评估优化方案对等离子体湍流运输和新经典输运及宏观磁流体稳定性的影响；（2）在理解和控制快粒子重分布方面有新的进展；（3）实现波对等离子体有效启动和维持；（4）定性评估热壁对等离子体与壁相互作用的影响。

#### 8. 高分辨热相干散射、安全因子、中子探测诊断技术研究

研究内容：依托 HL-2M、EAST 等国内磁约束聚变装置开展聚变堆关键等离子体参数诊断技术研究。自主发展热相干散射测量技术，提供高时空分辨的等离子体离子及 $\alpha$ 粒子的温度、密度参数；发展基于激光和微波的技术，对等离子体位移和中心安全因子进行快速实时监测；自主研发高时空分辨的中子探测阵列，实时监测中子时空变化，提供离子动理学信息。

考核指标：（1）研制热相干散射诊断系统：等离子体离子密度测量范围 $>10^{19} \text{ m}^{-3}$ ，主离子温度测量误差为 $\pm 15\%$ ，时间分辨率为 5 微秒，空间分辨率为 2 厘米，重复频率为 20Hz；（2）研发基于激光或微波技术对等离子体位移和密度及中心安全因子快速监测系统：等离子体密度测量范围为  $10^{18}\sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ，中心安全因子快速监测误差为 $\pm 10\%$ ，等离子体位移测量误差为 $\pm 2$  厘米，时间分辨率为 1 微秒，空间分辨率为 2 厘米；（3）研发高时空分辨中子探测阵列：中子能量分辨率为  $5\% @ 2.45 \text{ MeV}$ ，时间分辨率小

于 50 毫秒，主离子温度测量精度优于 20%。

#### 9. 聚变堆等离子体加料、离子加热模块研发

研究内容：面向聚变堆高能量增益运行，开展稳态运行下等离子体关键物理过程及其对等离子体整体性能影响的数值模拟研究。针对不同能量增益因子（ $Q$  在 5 到 30 之间）的聚变堆氘氚运行过程，建立高能量增益条件下加料及离子加热等关键物理过程的模型，自主研发聚变堆高能量增益氘氚运行的加料与离子加热模块，为未来聚变堆自主集成模拟平台建设提供支撑。

考核指标：（1）开发出具有完全独立自主知识产权和先进物理模型、可用于集成模拟聚变堆氘氚运行的加热及离子加热模块，并与 TFTR/JET 氘氚实验数据进行比对、验证；（2）根据目前 CFETR 装置尺寸，给出 CFETR 高能量增益（ $Q>20$ ）、高聚变功率（2GW）运行的模拟结果。

#### 10. 提升聚变堆等离子体密度参数的关键问题研究

研究内容：以揭示环形磁约束等离子体密度极限的关键物理机制、实现未来聚变堆高密度运行为目标，研究限制托卡马克等离子体密度提升的关键因素和主要物理机制，探索聚变堆等离子体高参数运行条件下进一步提高等离子体密度的新理论、新技术、新方法。

考核指标：（1）揭示国内外托卡马克实验的一些放电过程中等离子体密度超过 Greenwald 极限的原因及参数依赖关系，解释其主要物理机制；（2）提出放电过程中密度可超过 Greenwald 极

限的创新性理论模型，并进行实验验证；（3）在国内托卡马克装置上实现密度超过 Greenwald 极限的等离子体放电。

#### 11. CFETR 结构材料中聚变中子辐照致氢氦协同效应的等效模拟方法

研究内容：针对聚变中子辐照时结构材料中的氢氦协同损伤效应，通过大尺度计算模拟方法与物理模型，建立不同剂量率与氢氦产生率条件下结构材料中辐照肿胀的理论模型及定量等效关系，并利用多离子束辐照实验验证等效关系的可靠性；利用多离子束辐照，建立模拟结构材料中离位缺陷与氢/氦协同损伤作用的等效实验方法，并利用现有低剂量聚变中子、裂变中子及散裂中子辐照的材料肿胀数据予以验证；根据 CFETR 设计参数中 10 ~ 50 dpa 的聚变中子辐照剂量，利用建立的多离子束等效实验模拟方法，获得若干 CFETR 候选国产包层结构材料的等效聚变中子辐照的肿胀数据，并对其应用条件进行评估。

考核指标：（1）利用多离子束同时辐照实验，验证所建立的辐照离位缺陷与氢氦协同效应致肿胀、屈服强度等力学性能的理论模型与等效关系，误差在30%以内；（2）利用现有低剂量聚变中子、裂变中子（Fe基合金中含Ni等嬗变元素）和散裂中子辐照的实验数据，验证所建立的多离子束同时辐照模拟聚变中子辐照致材料肿胀的等效实验方法，误差在30%以内；（3）在10 ~ 50 dpa 及相应的H、He含量条件下，利用上述理论与实验模拟方法，获



得2~3种国产先进结构材料在不同温度下等效的辐照肿胀等性能退化数据。

## 12. 聚变堆材料小尺寸样品力学性能标准化测试技术与评价方法

研究内容：针对聚变堆耐高温抗辐照候选材料研发与性能快速评价的迫切需求，开展辐照材料小/微尺寸样品相关力学性能测试技术研究，发展聚变堆中子辐照小样品的力学性能标准化测试技术与评价方法；开展微样品的系列载能离子辐照与力学性能测试实验并结合数值模拟，建立微米及亚毫米尺寸微样品材料力学性能（如辐照硬化/脆化）的标准化实验与评价方法；建立小/微样品与标准样品之间力学性能的定量对应关系；建立小/微样品力学性能测试分析的技术规范。

考核指标：（1）获得系统的聚变堆候选结构材料的各项机械性能随尺寸变化的系统实验数据及与标准试样的对应关系，并完善现有的理论模型；（2）建立2~3项反应堆中子辐照后小样品材料力学性能的标准化测试技术，辐照剂量不低于3 dpa；（3）建立微样品的离子辐照与力学性能测试的标准化实验技术与方法，辐照剂量不低于10 dpa，辐照损伤深度范围大于10微米；（4）建立聚变堆结构材料小/微样品力学性能的测试分析规范，形成2项以上行业标准。

## 13. 液固复合构型第一壁部件研发

研究内容：根据 CFETR 和未来聚变电站对第一壁部件服役性能的要求，研制出可循环更新的钨基多孔毛细结构及基于 3D 打印的底板液态锂膜流偏滤器靶板部件，能经受长时高通量粒子流的辐照考验；研究强磁场环境下流动液态金属在新型偏滤器固体部件表面的浸润和流体流动及传热行为；研究强磁场、高密度氢氦等离子体辐照下热屏蔽、再循环机制，并进行可控的台面实验研究；提出液态锂回路中氢同位素在线测量、回收与锂再循环方案。

考核指标：（1）所研制的液态锂-钨基多孔毛细结构的复合偏滤器靶板部件，可承受粒子通量密度不小于  $10^{24}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  氢氦等离子体流辐照实验验证，液态锂的稳定流动时间超过 1000 秒；（2）完成聚变堆环境强磁场及热流密度参数环境下，固-液复合偏滤器整体热流问题的理论建模；阐明锂蒸汽云对热负荷和粒子的屏蔽效应及机制，实现固体材料在高通量等离子体和高热负荷运行环境下辐照损伤的有效屏蔽。

#### 14. CFETR 偏滤器靶板实验件研制及长时间考核研究

研究内容：针对未来聚变堆偏滤器靶板长时间、高热负荷、高粒子通量的实际工况，研发针对 CFETR 条件下使用的第一壁材料（纳米钨、合金钨）、ODS 铜热沉、高效热去除冷区通道集一体的偏滤器靶板实验件，开展长时间、高热负荷、高粒子流通量的综合测试研究，为未来 CFETR 偏滤器靶板部件制备提供可选方案。

考核指标：（1）形成批量化材料制备工艺和方案：其中第一壁材料采用抗溅射先进钨基材料、热沉使用 ODS 铜、靶板使用先进可靠高热负荷去除能力设计，材料形成批量化制备工艺和方案。（2）提供 2 个同时满足下列条件的合格样品：①样品在  $10\text{MW}/\text{m}^2$  热负荷条件下，表面温度不大于  $1000^\circ\text{C}$ ；2000 次热循环条件下，热传导性能退化不大于 3%。②样品在  $1 \times 10^{24}/\text{sm}^2$  等离子体粒子通量条件下，持续辐照 24 小时，表面溅射小于 0.5mm，偏滤器靶板表面不开裂，热负荷测试依然满足条件 2 测试指标。

#### 15. 聚变 CICC 高温超导磁体关键技术发展及磁体研制

研究内容：针对未来聚变堆中心螺管磁体（CS）运行工况，研制高性能高温超导磁体所需的高性能长带材，参数达到国际先进水平；制备可用于未来聚变堆磁体所需的 CICC 导体；研制高温超导 CICC 磁体；开展模拟未来 CS 运行波形条件下低温超导实验，为未来聚变高温超导磁体的使用提供可行性方案，实现设计、材料、导体、磁体、实验所有过程的全部国产化。

考核指标：（1）高温超导带材：单位宽度临界电流  $I_c > 1000\text{A}/@4.2\text{K}$ 、 $10\text{T}$ （垂直场、4mm 宽带材）， $I_c > 700\text{A}/@4.2\text{K}$ 、 $15\text{T}$ （垂直场、4mm 宽带材）；单根带材长度  $> 500\text{m}$ ，整长度上载流偏差  $< \pm 10\%$ ；（2）CICC 导体：分流温度大于  $10\text{K}/@15\text{T}$ 、 $15\text{kA}$ ；（3）CICC 磁体：运行电流大于  $15\text{kA}$ ，储能大于  $20\text{kJ}$ ；（4）磁体实验：最大磁场变化率  $2.5\text{T}/\text{s}$ ，磁体运行温度： $4.5\text{K}$ 。

## 16. CFETR 氦冷包层氚增殖比高精度评估与实验验证

研究内容：针对 CFETR 氦冷包层氚增殖比的高精度设计需求，开展氦冷包层氚增殖比工程影响因素分析，建立包层氚增殖比的中子学检验方法与评价技术，提出包层氚增殖比中子学验证评估规范。研制基于 CFETR 氦冷包层设计方案的、具有工程相似性的缩比实验模块，利用 D-T 中子源开展聚变中子产氚率实验，给出铍材料前后的中子能谱，掌握高精度产氚率测量技术，获得包层氚增殖比评价结果，为准确判断氚“自持”性能提供支持。

考核指标：（1）基于铍倍增剂的工程化包层缩比实验模块 1 套，模块体积缩比度  $\geq 1:50$ ，其中固态增殖剂球床 Li-6 丰度  $\geq 90\%$ 、径向结构与包层设计方案的相似度  $>95\%$ ；（2）提供中子能谱分布与产氚率数据，产氚率测量不确定度  $<4.0\%$ 。

## 17. 磁约束聚变堆排放气氛氚测量与捕集技术研究

研究内容：针对磁约束聚变堆主机真空室壁处理及燃料加注和氚工厂系统运行过程所产生大量氚污染气体的安全排放问题，开展低浓度含氚氢同位素气氛、氮气气氛、氩气氛及空气气氛等各种环境流出气氛的在线氚测量、高效氚捕集回收工艺技术研发；通过氘、氚并结合百居里级氚实验验证，综合平衡高可靠性、经济性和效率的关系，优化概念设计；研制催化剂、吸气剂等关键材料及系列在线氚测量仪、循环风机、氚喷淋-洗脱柱等关键装备。解决  $5000\text{m}^3/\text{h}$  级大流量下高效、经济氚捕集的关键工程问题。

考核指标：（1）气源对象应至少包含氢同位素气氛、氮气气氛、

氙气氛（含氧、水汽等杂质）及空气气氛，单流程总氢同位素或氙的去除率 $\geq 99.9\%$ ，排放尾气中氙浓度 $< 100\text{MBq/m}^3$ ；（2）系列在线氙监测仪测量范围涵盖 $10\text{kBq/m}^3 \sim 100\text{TBq/m}^3$ ， $1\text{GBq/m}^3$ 附近氙浓度的测量精度优于 $10\%$ ，本底信号漂移量局限在数倍范围，高浓氙测量后至本底恢复时间 $< 10\text{min}$ ；（3）吸气柱中元素单质态氢同位素的回收率 $> 95\%$ ；（4）氙测量仪、循环风机、氙喷淋-洗脱柱等关键装备的国产化率不低于 $90\%$ 。

#### 18. 托卡马克粒子再循环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）关注的粒子再循环过程，特别是刮削层的粒子再循环问题，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，研究粒子再循环过程中若干关键科学技术问题。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）在托卡马克刮削层粒子再循环对低-高约束模式转换及边界湍流输运影响的物理实验或理论研究方面获得重要进展；（2）在托卡马克粒子再循环对脱靶影响的实验或理论研究方面取得重要进展；（3）研究出一种粒子再循环过程诊断的新方法或新技术；（4）研究出一种可控制刮削层粒子再循环过程的新方法或新技术；（5）建立刮削层粒子再循环过程新模型并开发出相关的数值模拟程序。

#### 19. 托卡马克离子回旋波加热/驱动若干关键问题研究

研究内容：针对离子回旋频段射频波加热/驱动在托卡马克上有效应用的关键物理和技术问题，开展波耦合、波在刮削层损失、

波与等离子体相互作用过程的理论、模拟、实验和技术研究。鼓励开展天线-馈线(包括真空室内相关结构)新概念和新技术研究,发展新的相关诊断,开展离子回旋加热/驱动模式的创新研究。

考核指标(完成下列目标之一): (1)提出新的离子回旋共振加热相关的理论模型; (2)建立离子回旋加热的新模型并开发出有自主知识产权的数值模拟程序; (3)研发出新的离子回旋射频天线、馈线设计技术; (4)研发出可诊断离子回旋加热效果的新测量技术; (5)在离子回旋加热物理方面获得新的、有意义的实验结果。

## 20. 第一壁材料表面杂质原位测量、去除与修复技术

研究内容: 针对磁约束聚变堆等离子体辐照第一壁材料表面产生的结构损伤与氢同位素、氦等杂质渗透问题,开展壁材料表面成分与形貌原位测量、驻留杂质原位去除以及结构损伤修复技术研究,发展先进的等离子体在壁材料中输运动态观测实验技术。

考核指标(完成下列目标之一): (1)在强流氢氦等离子体辐照第一壁材料产生渗透现象的动态观测技术方面有创新; (2)研究出一种远程、原位、近无损、定量检测第一壁表面氢的同位素及氦、氩、氮等杂质元素方法; (3)研究出一种第一壁表面形貌的远程观测方法,能较好地分辨溅射蚀坑、夹杂及再沉积物等结构缺陷; (4)研究出一种在较低温度下原位、高效去除第一壁表面氢同位素的方法; (5)研究出一种第一壁材料表面坑洞原位修复技术,修复区的热、力性能接近基材。

## 21. 新型/先进增殖剂材料探索研究

研究内容：面向中国聚变工程实验堆（CFETR）工程设计需求，开展性能优良、工艺先进、经济性能好的聚变堆包层先进/新型氚增殖用关键功能材料及工艺技术研究。开发先进/新型聚变堆中子倍增剂材料及制备新工艺，性能接近或超过传统的铍金属材料；开发力学性能优异、释氚温度低、安全性能好的新型锂陶瓷氚增殖剂材料。

考核指标（完成下列目标之一）：（1）完成多种候选聚变中子倍增剂材料技术和经济可行性综合评价，提出替代铍的材料及研制方案；（2）研制出性能接近或超过纯铍的先进聚变中子倍增剂材料样品，提供相关性能数据；（3）提出先进的铍小球中子倍增剂制备工艺流程；（4）研制出高致密纳米复合型陶瓷氚增殖剂，提供材料特性及释氚性能相关的实验数据；（5）提出可批量化、经济性良好的锂陶瓷氚增殖剂先进制备工艺。