

## 附件 1

# “国家磁约束核聚变能发展研究专项”

## 2024 年度公开项目申报指南

核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，以未来建设磁约束核聚变堆（以下简称“聚变堆”）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”（以下简称“ITER”）计划相关核聚变能源技术研究和创新，发展核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 ITER 关键技术；加快国内核聚变能科技发展，开展高水平的科学研究；依托我国的“东方超环”（EAST）、“环流 3 号”（HL-3）托卡马克等装置开展与聚变堆物理相关的验证性实验，大力提升我国核聚变能发展研究的自主创新能力，推动聚变相关技术在国民经济中的应用，培养并形成一支稳定的高水平聚变研发队伍，为 ITER 和我国聚变堆的建设奠定科学基础。

2024 年度项目申报指南以 ITER 和聚变堆未来科学研究为目标，重点支持高水平科学研究、ITER 关键技术消化吸收、聚变堆关键技术预研及核心部件研发和专业人才培养等

工作，继续推动我国磁约束核聚变能基础与应用研究的发展，拟支持 22 个项目，拟安排国拨经费概算 7.75 亿元。同时，指南方向 23~27 拟支持 30 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 8600 万元：指南方向 23~26，每个项目约 200~420 万元；指南方向 27，每个项目 200 万元。

指南方向 1~22 项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部考核指标。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。项目实施周期不超过 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，项目负责人可担任其中 1 个课题的负责人。

指南方向 23~27 为青年科学家项目，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 名负责人，对于指南方向 23~26 的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 1984 年 1 月 1 日以后出生；对于指南方向 27 的项目负责人，男性应为 1989 年 1 月 1 日以后出生、女性 1984 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. 混合运行模式下台基物理的多装置联合实验研究**

**研究内容：**参考 ITER 研究计划，在类 ITER 物理条件

下，重点开展集成混合运行模式相关的约束性能、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框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与台基物理专题组的多装置国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

**考核指标：**（1）在类 ITER 射频波加热主导、低动量注入、边界安全因子  $q_{95} \sim 4-5$  条件下，实现约束改善因子  $H_{98} \sim 1.2$ 、稳定维持时间超过 10 倍电流扩散时间的类 ITER 混合运行模式的等离子体放电；（2）在台基物理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%；每年在专题组会议报告不少于两次。

**关键词：**混合运行模式、台基、不稳定性

## 2.面向聚变堆等离子体压强剖面智能控制的合作研究

**研究内容：**托卡马克等离子体压强剖面受诸多等离子体基本物理过程影响，纯物理模型或过程的计算分析难且慢，因此有必要采用人工智能和深度学习方法对其进行识别和控制。本项目针对托卡马克聚变堆等离子体压强剖面智能控制的科学技术问题，研发等离子体和装置运行控制的人工智能技术，发展基于物理过程的算法及程序，研究深度学习代理模型对等离子体剖面压强参数的预测和计算，开发智能信息处理系统，构建剖面演化的快速集成建模核心功能程序，研究实时智能识别算法、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，为聚变堆等离子体压强剖面实时反馈动态运行提供支撑。

**考核指标：**（1）自主研发1套等离子体压强剖面智能主动控制系统，在归一化比压 $\beta_N > 2.5$ 、中心安全因子 $q_0 \sim 1.1$ 、边界安全因子 $q_{95} \sim 4.5$ 、维持时间大于10倍能量约束时间条件下，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等离子体放电；（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 $\geq 10$ 个，以我国资源为主开展的合作研究提案 $\geq 10$ 个。

**关键词：**人工智能、深度学习、剖面演化

### 3.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立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 $> 70 \text{ kA}$ 、重联磁场强度 $> 500 \text{ Gauss}$ ；（2）实现环向等离子体电流达到 $300 \text{ kA}$ 的等离子体放电，实现负三角形变、双环位形等多种等离子体位形的等离子体放电；（3）给出初步的融并加热定标关系。

**关键词：**低环径比、等离子体融并、三角形变

#### 4.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  $D_\alpha$  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氦浓度比等，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：测量范围  $> 1.8 \text{ keV}$ ，误差为  $\pm 20\%$ ，时间分辨为  $400 \text{ ms}$ ；（3）快离子速度分布函数：快离子能量范围为  $20 \text{ keV} \sim 1 \text{ MeV}$ ，在  $100 \text{ keV}$  以下能量分辨为  $5 \text{ keV}$ ，投掷角度范围为  $-\pi \sim \pi$ 。

**关键词：**合成诊断、能量分辨、速度分布函数、诊断、燃料粒子

#### 5.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，开展离子回旋共振加热下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；建立快粒子（包括射频波加热产生的以及聚变产

生的)分布物理模型并自主开发数值模拟程序;开展离子回旋共振加热下快粒子与波非线性相互作用对湍性输运影响研究,分析其在燃烧等离子体芯部约束中的作用,理解相应的物理机制,提出利用快粒子提高等离子体芯部约束的方法。

**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,并用相关实验数据进行校核;(2) 分析、揭示高聚变功率( $> 200\text{ MW}$ )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高功率加热实验加以验证。

**关键词:** 燃烧等离子体、聚变功率、阿尔法粒子、快粒子

## 6.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的关键物理和技术问题,发展杂质在等离子体中沉积、消融、输运等模型及数值模拟程序;在杂质注入数值模拟的基础上,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输运等问题;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、输运等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) 在破裂缓解中电流猝灭速率达到 80 MA/s; (4) 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。

**关键词:** 偏滤器、杂质注入、破裂缓解

## 7.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和相关系统对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) 完成吨级新型中子-伽马复合屏蔽材料的规模化制备, 屏蔽材料的致密度 $\geq 98\%$ , 耐温 $\geq 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 屏蔽性能满足  $^{60}\text{Co}$  伽马射线线性衰减系数 $> 0.5\text{ cm}^{-1}$ 、热中子半值层厚度 $\leq 0.60\text{ cm}$ 、14 MeV 快中子半值层厚度 $\leq 4.0\text{ cm}$ ; (2) 制造出屏蔽模块(最大尺寸为 300 mm(环向) $\times$  400 mm(径向) $\times$  500 mm(极向)), 进行氘氚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 $> 3.5$ 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、组件和模块的服役行为。

**关键词：**屏蔽材料、中子、伽马射线、磁导率

## **8.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要求，研制可满足环向磁场、中心螺线管和极向磁场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 温度下力学、电绝缘及抗辐照性能全面优于 ITER 同类材料技术指标；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 温度下的力学性能：ILSS（ $0^\circ$ ） $> 100 \text{ MPa}$ 、ILSS（ $90^\circ$ ） $> 90 \text{ MPa}$ 、UTS（ $0^\circ$ ） $> 900 \text{ MPa}$ 、UTS（ $90^\circ$ ） $> 450 \text{ MPa}$ ，经 3 万次拉伸疲劳循环后，UTS（ $0^\circ$ ） $> 250 \text{ MPa}$ 、UTS（ $90^\circ$ ） $> 150 \text{ MPa}$ ；2K、4.2 K、77 K 温度下的电绝缘性能：击穿强度  $> 50 \text{ kV/mm}$ ；（2）抗辐照性能：经 10 MGy 量级伽马射线辐照后，4.2 K、77 K 温度下 ILSS（ $0^\circ$ ） $> 85 \text{ MPa}$ ，ILSS（ $90^\circ$ ） $> 70 \text{ MPa}$ ，UTS（ $0^\circ$ ） $> 650 \text{ MPa}$ ，UTS（ $90^\circ$ ） $> 220 \text{ MPa}$ ；（3）真空浸渍模拟线圈：导体截面  $41 \text{ mm}\times 41 \text{ mm}$ ，匝数  $> 20$ ，内径  $> 800 \text{ mm}$ ；常温及 4.5 K 温度下线圈绝缘对地耐压  $> 17.4 \text{ kV}$ ，绝缘电阻  $> 0.5 \text{ G}\Omega$ ；常温及 77 K 帕邢放电测试  $8.7 \text{ kV}@1、10、100、1000$



Pa, 漏电流  $< 20 \mu\text{A}$ ; (4) 建立绝缘材料生产线, 产能达百吨级/年。

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

**关键词:** 低温绝缘材料、力电性能、抗辐照、真空浸渍

## 9.聚变堆氦气体循环-转移泵研制

**研究内容:** 针对 ITER 含氦排放气体转移至氦工厂以及氦工厂系统运行过程中气体循环需求, 开展含氦气体循环-转移泵的设计和 product 研制工作。围绕对气体高效抽出及增压功能的需求且考虑材料的氦兼容性要求, 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氦验证考核, 评估泵的可靠性、寿命和氦兼容性; 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) 对实际氦氦气体循环、增压能力: 循环泵入口压力  $0.1 \text{ MPa}$  时的出口压力  $\geq 0.5 \text{ MPa}$ ; (2) 对实际氦氦气体转移能力: 转移泵在  $0.1 \text{ MPa}$  下的抽速  $\geq 15 \text{ N m}^3/\text{h}$ , 15 分钟内能将  $20 \text{ kPa}$ 、 $200 \text{ NL}$  的氦氦源气转移至不超过  $100 \text{ NL}$  的目标容器, 残余气压  $\leq 20 \text{ Pa}$ ; (3) 真空动态漏率  $\leq 3.0 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ; (4) 采用氢、氦及氦模拟气体进行气体循环考核, 无故障累计运转时间  $\geq 2000 \text{ h}$  且在已建立的氦工厂演示装置或类似装置平台中进行模拟循环工况下持续运行时间  $\geq 300 \text{ h}$ ; (5) 技术成熟度 TRL 达到 8 级, 循

环泵及转移泵或组合泵各提供 2 台合格产品样机。

**关键词：**氙气体、动态漏率、转移泵

## 10.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以及回温可控多级复合低温泵，开展低温泵等离子体载带实验验证。具备自主可控生产能力。

**考核指标：**（1）口径  $> 400\text{ mm}$ 、快速再生低温泵 1 套：再生时间  $\leq 30$  分钟（ $6\text{ K}-95\text{ K}-6\text{ K}$ ）、再生温度下氢气解吸率  $\geq 90\%$ ；极限真空度  $\geq 5 \times 10^{-6}\text{ Pa}$ ；对氢气的抽速  $\geq 60000\text{ L/s}$ 、对氙气抽速  $\geq 10000\text{ L/s}$ ；对氢气的饱和容量  $\geq 10\text{ mol}$ ；具有氙兼容的活性炭粘附结构及二级包容结构；（2）托卡马克长时间等离子体载带实验：低温泵稳定运行时间大于  $500\text{ h}$ ，对氢气的抽速和饱和容量衰减  $\leq 5\%$ ；（3）示踪量级涉氙实验：满足指标（1）的要求；（4）提供 2 套样机：1 台用（2）的实验，1 台用于（3）的实验，技术成熟度 TRL 达到 8 级；（5）回温可控多级复合低温泵 1 台：水蒸气、烷烃等杂质气体与氢同位素及惰性气体的分离效率达到  $99\%$ ，氢同位素与氙的分离效率达到  $70\%$ 。

**关键词：**同位素分离、惰性气体、低温吸附泵

## 11.聚变堆超导磁体设计分析软件研发与实验验证

**研究内容：**在充分吸收 ITER 设计的基础上，针对未来聚变堆大型超导环向磁场、中心螺线管和极向磁场磁体的运行工况，开发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，并通过与实际超导托卡马克磁体实验的对比实验以及国际上通行软件进行验证和校核，验证其可靠性和可用性。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）自主开发出聚变堆超导磁体的设计、分析软件；（2）利用 ITER、EAST 磁体数据进行计算分析，该软件所有核心设计分析值与 ITER、EAST 设计值以及实验结果的误差 $<10\%$ ；（3）利用国内超导托卡马克及相关超导磁体开展对比实验，该软件设计分析值与实验结果误差 $<10\%$ 。

**关键词：**超导磁体、软件设计、环向磁场

## 12.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 ITER 目前存在的真空室制造过程中焊接变形大、焊缝缺陷、成型效率低等问题，以及未来聚变堆真空室作为全生命周期服役的核级部件需高质量建造的要求，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，开

展有自主知识产权的大型复杂曲面焊接工艺的模拟研究，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、专利和行业及国家标准，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 1/6 尺寸 ITER 真空室壳体空间曲面段不同于 ITER 快速成型工艺，轮廓精度  $< \pm 2 \text{ mm}$ ；（2）完成 1/6 尺寸真空室壳全流程焊接变形和焊接应力仿真，通过深度数据学习，使仿真精度  $> 90\%$ ；（3）完成 1/6 尺寸低场区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  $< \pm 3 \text{ mm}$ ；（4）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  $< 1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**关键词：**真空室、精准成型、高性能焊接

### 13.面向未来磁约束聚变堆的紧凑等离子体环注入加料技术研究

**研究内容：**针对未来强约束磁场下聚变堆存在有芯部加料困难的问题，发展可以将燃料粒子直接注入到堆芯聚变等离子体中的紧凑等离子体环注入技术。发展和优化紧凑等离子体环注入加料系统中的紧凑等离子体环的高效成形、高速注入，以及重频注入技术；发展可以监测在磁约束等离子体中穿行的高速紧凑等离子体环参数的诊断测量技术，研究高速紧凑等离子体环在磁约束等离子体中的穿透机理及其相互作用机制，构建能够精准预测紧凑等离子体环加料行为和效

率的物理模型，为未来磁约束聚变堆提高聚变燃烧率和突破密度极限运行提供可靠的堆芯加料方案。

**考核指标：**（1）自主研发1套重频紧凑等离子体环注入系统，单次注入粒子量  $5 \times 10^{20}$ 、注入速度 200 km/s、重频注入频率 50 Hz、持续时间  $\geq 10$  s。（2）在国内中大型磁约束聚变实验装置上开展紧凑等离子体环注入实验研究，实现磁约束聚变实验装置高参数等离子体情况下的芯部加料，建立紧凑等离子体环注入加料性能与效率的预测模型。

**关键词：**紧凑环、加料、重频注入

#### 14.聚变装置偏滤器遥操作维护关键技术研究

**研究内容：**针对未来聚变装置偏滤器维护需求，研发1套偏滤器遥操作维护系统，实现偏滤器模块遥操作维护完整流程的实验验证。重点开展遥操作设备维护、管内自动切割、焊接执行器以及第一壁拆装执行器等研制；高精度力位混合控制算法的开发，基于数字孪生技术的遥操作设备故障预测系统的建立。要求系统设计、研制、元器件购置、软件开发和实验集成等所有过程全部实现国产化。

**考核指标：**（1）管道切后重焊质量要求：焊接成功率  $\geq 99.9\%$ ，焊缝质量满足 ISO-5817 B 级；焊缝漏率要求：负压检漏真空漏率  $\leq 1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，20 Bar 正压氦检真空漏率  $\leq 5 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；（2）偏滤器重新安装定位要求：第一壁表面轮廓精度  $\leq \pm 1 \text{ mm}$ ；（3）维护效率要求：完成偏滤器模块遥操作维护完整流程的实验验证（第三方专业机构认

证)，单个偏滤器靶板拆卸维护流程时间 $\leq 18\text{ h}$ ，单个偏滤器靶板安装维护流程时间 $\leq 24\text{ h}$ ；（4）维护设备耐辐照能力要求：累积辐照剂量（ $^{60}\text{Co}$  伽马射线） $\geq 10000\text{ Gy}$ 。

**关键词：**偏滤器、维护效率、辐照剂量、真空漏率

## 15.碳化硅复合材料流道插件制备及性能考核

**研究内容：**结合聚变堆高温液态锂铅包层服役环境和缓解磁流体动力学效应（MHD）的需求，开展碳化硅复合材料锂铅流道插件设计和优化；研发绝热绝缘、耐腐蚀、抗辐照的高强度碳化硅复合材料及大尺寸复杂流道插件制备工艺与连接技术；测试并考核碳化硅复合材料和插件的热、电、力学特性及耐腐蚀、抗辐照等性能，在堆外大型强磁场高温锂铅实验平台上开展综合测试，评价插件的 MHD 缓解效果，为未来聚变堆高温锂铅包层的应用夯实技术基础。

**考核指标：**（1）研发高性能碳化硅复合材料及制备工艺，制造出单构件高度 $\geq 1000\text{ mm}$ 、截面 $\geq 100\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 、壁厚 3-5 mm 的碳化硅复合材料插件；（2）碳化硅复合材料密度 $\geq 2.1\text{ g/cm}^3$ ，在锂铅包层典型服役温度（400-700 °C）下热导率 $\leq 5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，电导率 $\leq 100\text{ S/m}$ ，流道插件两侧耐受温差 $\geq 200\text{ °C}$ ，抗拉强度 $\geq 350\text{ MPa}$ ，在 400-700 °C 范围内及大于 3000 小时下锂铅侵蚀厚度 $\leq 20\text{ }\mu\text{m}$ ，在 500-700 °C 范围内离子辐照 100 dpa 剂量下空洞肿胀率 $\leq 2\%$ ；（3）在磁场 3T 的锂铅回路中对（1）中制备的插件进行高温磁流体动力学测试，测试段两端压降降低至无插件时金属壁

通道的 2% 以下。

**关键词：**碳化硅、绝热绝缘、磁流体动力学、锂铅侵蚀

## 16. 聚变堆钨第一壁条件下高 Z 杂质输运模拟研究

**研究内容：**针对 ITER 全钨第一壁引起高 Z 杂质影响主等离子体性能的问题，开发包含聚变堆等离子体与第一壁相互作用、高 Z 杂质输运、能量辐射及对芯部不稳定性影响等物理模型在内的大规模模拟程序，重点研究：等离子体不同放电条件下第一壁侵蚀、高 Z 杂质输运和聚芯过程，揭示其主要物理机制；高 Z 杂质与磁流体不稳定性相互作用，理解第一壁物理过程对能量、粒子约束的影响；研究壁处理、辅助加热方式对杂质产生和聚芯过程的影响，为聚变堆高 Z 杂质的控制提供物理方案。

**考核指标：**（1）开发出具有完全自主知识产权的、用于模拟聚变堆钨杂质产生、输运和聚芯的数值模拟软件，并在输入 ITER 参数的情况下完成与国际同类程序的比较核实验，验证该程序的正确性；（2）完成该程序模拟结果与托卡马克实验数据的比对工作，验证其物理模型的正确性。

**关键词：**钨、粒子约束、壁处理、辅助加热、杂质输运

## 17. 快粒子物理的多装置联合研究

**研究内容：**参考 ITER 研究计划，在全金属壁条件下，重点开展与内部输运垒兼容的快粒子相关不稳定性机理和再分布研究。在 ITER 国际托卡马克物理活动框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与快粒子物理专题组多

装置国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

**考核指标：**（1）在全金属壁条件下改善快粒子约束，实现快粒子压强份额  $> 25\%$ ，维持时间超过 5 倍电流扩散时间的等离子体放电运行；（2）在快粒子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%；每年在快粒子专题组会议报告不少于两次。

**关键词：**快粒子、金属壁、内部输运垒

## 18. 芯部弱磁剪切的集成运行控制多装置联合研究

**研究内容：**参考 ITER 芯部弱磁剪切运行模式的基本要求，开展芯部弱磁剪切特征安全因子剖面的形成和维持机理、不稳定性行为及控制机理的研究，探索提升宏观磁流体力学稳定性、改善等离子体约束品质的运行技术途径。在 ITER 国际托卡马克物理活动框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与集成运行方案专题组的多装置国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

**考核指标：**（1）在边界安全因子  $q_{95} \sim 4$  条件下，实现最小安全因子  $q_{\min} \sim 1.0$  芯部弱磁剪切剖面分布、约束改善因子  $H_{98} \sim 1.2$ 、维持时间不少于 5 倍电流扩散时间的等离子体放电；（2）在等离子体集成运行方案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



专题组会议报告不少于两次。

**关键词：**弱磁剪切、约束改善因子、边界安全因子

## **19.电子和多离子组份输运与约束的多装置联合实验研究**

**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份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 国际托卡马克物理活动框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与输运与约束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）在不同多离子组份条件下，实现归一化比压  $\beta_N > 3$ 、归一化密度  $n_e/n_{GW} > 0.6$  的等离子体放电；（2）在输运与约束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%；每年在专题组会议报告不少于两次。

**关键词：**输运、约束、同位素效应、多离子组份、密度

## **20.氦等离子体高约束模式的合作研究**

**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，针对与 ITER 氦等离子体相关的关键科学技术问题，以在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 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  $> 20\text{ s}$ 、约束改善因子  $H_{98} > 1$ 、具有第一类边界局域模特征的高约束模式氦等离子体放电运行；（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  $\geq 10$  个，以我国资源为主开展的合作研究提案  $\geq 10$  个。

**关键词：**氦等离子体、边界局域模、电流扩散时间

## **21. 聚变堆多工况下真空室排出气中氦快速回收技术研究**

**研究内容：**针对磁约束聚变堆氦自持对氦回收工艺的要求，充分利用前期氦工厂工艺研发以及相关硬件平台等成果，以直线等离子体发生装置模拟托卡马克刮削层等离子体环境、氢氦模拟氦实验以及适量氦验证等为主要手段，以工艺研发、验证试验及评估为主要工作任务，开展聚变功率 500 MW 级装置真空室等离子体持续运行、壁处理与背向烘烤等不同工况下排出气氛中氦回收工艺优化，形成稳定的组合工艺；发展等离子体超渗透、深冷分馏、催化吸收除杂质等快速分离氢同位素与杂质等新工艺技术；研究硼化壁对等离子体组分影响机制并研发相应的氦回收工艺；基于现有可行的技术方案，评估面向等离子体包层结构类材料中滞留氦的原位去除与在线回收效率。

**考核指标：**（1）快速氦循环全周期（不含同位素相互分离） $\leq 40\text{ min}$ ；（2）氦验证投氦量  $\geq 1\text{ g}$ ；（3）给出结构类

材料中氚滞留、去除与回收效率等实验数据，不少于 6 次结果的分散度 $\leq 10\%$ ；（4）硼化及氮掺杂等离子体排出气中氢同位素单程及循环回收率分别不低于 98%及 99.5%；（5）形成稳定工艺，技术成熟度 TRL 不低于 6 级。

**关键词：**氚工厂、回收效率、氚滞留

## 22.聚变堆增殖氚提取与分离技术深化研究

**研究内容：**针对聚变堆氚工厂外燃料循环处理规模、提取效率、安全防护和能源消耗等的需求，重点研究增殖包层中氚的形成、释放与渗透行为，分析辐照产氚组件残余氚，掌握增殖剂中氚释放形态的控制方法，突破高浓氚水的快速捕集与相转换技术，解决氢同位素分离侧线循环、歧化反应和填料优化等瓶颈问题，升级现有氚提取与氢同位素分离系统，获得示踪量级氚运行参数，为聚变堆氚工厂外燃料循环系统的工程设计提供数据支撑。

**考核指标：**（1）建立具有氚包容功能的氚提取与同位素分离系统 1 套，完成示踪量氚演示验证，载气流量  $> 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ ，氚回收率达到 99%；（2）建立高浓氚水处理工艺研究装置 1 套，完成  $1 \times 10^{10} \sim 1 \times 10^{11} \text{ Bq/L}$  氚水捕集与相转化工艺验证，氚水相转化率 $\geq 90\%$ ；（3）建立带侧线循环和歧化反应的氢同位素分离级联装置 1 套，国产化低温精馏填料等板高度（HETP） $\leq 10 \text{ cm}$ 。

**关键词：**氚化水、相转化率、同位素分离

## 23.聚变等离子体若干关键物理问题的解析理论研究（青

年科学家类)

**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，并对程序进行校验或与实验进行验证。

**关键词：**解析求解、非线性理论、模拟程序

**24.托卡马克撕裂模不稳定性的深度学习研究方法研究（青年科学家类）**

**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及其有效性验证；（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）提出新的深度学习方法，并应用于撕裂模不稳定性模拟或者预测。

**关键词：**深度学习、撕裂模、不稳定性

## **25.聚变堆遥操真空检漏关键技术研究（青年科学家类）**

**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。

**关键词：**遥操、真空、泄漏

## **26.聚变堆第一壁部件原位一体化智能修复技术研究（青年科学家类）**

**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智能修复技术，并研制出合格样机。其中，包层件第一壁修复尺寸要求为：厚度  $> 2\text{ mm}$ ，面积  $> 100\text{ cm}^2$ ，修复层钨或钼材料的致密度  $\geq 98\%$ ，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  $1\text{ MW/m}^2$  的高热辐照。所开发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，其结果需通过用户评审验收。

**关键词：**第一壁、原位智能修复、高性能加工制造

## 27.托卡马克物理国际前沿科学问题研究（青年科学家类）

**研究内容：**针对托卡马克聚变堆物理前沿科学问题，紧密围绕着解决 ITER 国际托卡马克物理活动宏观磁流体力学与破裂及控制专题中低等离子体旋转条件下的误差场控制问题、约束与输运专题中弹丸加料高约束模等离子体的粒子输运问题、台基物理专题中刮削层和偏滤器条件对等离子体从低约束到高约束模式转换功率阈值的影响问题、快粒子物理专题中快离子损失诊断测量能力提升问题、偏滤器与刮削层专题中脱靶物理和脱靶控制问题、集成运行方案专题中混合运行模式下欧姆加热电流对约束改善的影响问题、诊断专题中利用光谱韧致辐射测定逃逸电子分布函数问题等七个专题

组的科研任务，依托国内现有的磁约束聚变实验装置，开展相关的理论、模拟、诊断和实验研究。

**考核指标：**参与一个国际托卡马克物理活动专题组指定的研究任务，在该专题组会议上作报告不少于两次，并完成下列目标之一：（1）在国内磁约束聚变实验装置上主持完成一项由国内外科学家共同参与的专题组实验研究工作，（2）提出一种新理论分析方法或模型，并发展相应的模拟程序；（3）发展一种新的诊断技术。为国际托卡马克物理活动的研究任务做出贡献。

**关键词：**韧致辐射、脱靶控制、集成运行、诊断、欧姆加热