**熙元聚变创新基金指南**

**(2025)**

1. **物理类**

**1.托卡马克高密度运行的机理研究**

**研究内容**：托卡马克聚变功率正比于等离子体密度的平方，高密度运行可显著提升聚变堆的经济性。面向ITER基准运行模式，在全金属壁条件下，梳理出H模下最高运行密度对磁场、注入功率、安全因子等的实验定标关系；结合当前研究动态，应明确边界物理过程对H模密度极限触发的作用，揭示托卡马克高密度H模运行的机理。

**考核指标**： (1) 在金属壁条件下，边界安全因子低于5（q95<5）的运行区间内，获得超过1.2倍Greenwald密度极限的H模等离子体。(2) 基于我国托卡马克物理实验，或通过国际合作研究，提出或验证一种H模密度极限的物理模型。

**2.高密度条件下的高约束实现的机理**

**研究内容**：高密度运行诱发约束下降在国际各大装置上被普遍观测到，尚缺乏有效的解决方法，是聚变能开发过程中面临的一个重要挑战。针对这一难题，设计实验，通过（但不限于）杂质注入、边界再循环控制、离轴电流驱动/磁剪切控制、形变控制等手段，实现等离子体剖面和湍流的主动调控，开展输运分析，探索出高密度条件下约束改善的有效方法，并结合模拟揭示其机理。

**考核指标**： (1)提供至少1种高密度下等离子体约束改善的方法，获得超过0.8倍Greenwald密度极限的H模等离子体，H98因子超过1。(2) 在ITPA合作框架下开展联合实验1次，在国际学术会议上作专题报告1次。

**3.降低燃料的滞留的机理与方法**

**研究内容**：聚变堆的氚滞留将影响燃料循环并导致潜在的放射性污染。调研现有聚变堆中的燃料滞留现状，梳理和分析已有的降低燃料滞留的技术路径，深入比较不同燃料去除方法的机理与适用性，明确其优缺点。提出具有针对性的改进策略，以提升部件中的燃料去除效率，阐明其理论依据，并结合具体聚变装置运行条件，设计并评估该方法的可行性实施方案。

**考核指标**（满足下列之一）：（1）明确边界等离子体状态（温度、密度、中性粒子、杂质等）对壁材料中氢同位素注入影响的机理，给出优化的等离子体参数区间；（2）提出一种堆内部件高效除氚的新方法以及具体实施方案；（3）设计一种低滞留量的新型面向等离子体材料或部件结构；

**4.提高聚变燃烧率的方法与模拟**

**研究内容**：聚焦托卡马克聚变堆中氘氚燃料燃烧率的优化问题，旨在提升聚变能产出的经济性与可持续性。参考BEST及ITER等未来聚变堆的运行方案，系统分析制约燃烧率提升的物理机制，如加料深度、加料效率、边界再循环、宏观粒子约束时间、α粒子加热效率等关键因素等。给出上述物理或工程因素的精确定义及其对燃料燃烧效率的敏感性分析；发展1-2种提高芯部加料的技；实现低再循环、高加料效率下长脉冲稳定放电。在此基础上提出一种能够提高聚变燃烧率的有效方法，并开展实验或模拟验证。

**考核指标**(满足下列条件之一）：（1）提出一种提高燃料燃烧率的新理论、新技术或新方法，通过多维度数值模拟验证其可行性；（2）在EAST托卡马克装置中开展针对性的芯部加料或约束优化实验，验证相关理论或模型。

**5.使用AI 提高放电效率的方法**

**研究内容**：未来聚变堆的控制运行亟需解决的核心问题之一是等离子体参数的稳态精确控制和瞬态事件预测与避免。通过人工智能技术优化等离子体控制模拟，提高模拟与实验的一致性，并加快模拟速度，优化放电方案；实时智能调控等离子体形状和温度、密度等相关参数，实现对磁约束聚变等离子体的有效控制，并尽可能优化等离子体约束性能，提高聚变产能效率；

**考核指标**：（1）基于AI+物理模型推理，根据装置状态与运行目标准实时设计、优化放电方案与波形（包括爬升、平顶与下降阶段）（2）在单次实验放电中实现80%以上时段的AI控制器接管，连续接管时间大于100秒（包括爬升、平顶与下降阶段）（3）结合燃烧等离子体的物理模型与机器学习，实现对等离子体密度、电子温度、离子温度和氚分数的模拟控制，稳态误差<5%；面向控制的模拟中，EAST 等离子体密度、电子温度、离子温度演化误差<10%。

**6.高效IC耦合的机理与实现**

**研究内容**：针对提升聚变装置中离子回旋共振加热（ICRH）耦合效率的需求，开展ICRH天线协同提升耦合效率的新方法研究。主要研究内容包括：探索多窗口天线结构与发射波谱之间的关系，深入分析射频天线的反射系数、天线表面电场或电压、耦合效率，以及波在等离子体中的全局分布与多天线放置位置、磁场位形、密度、馈入电压或电流、波频、相位、结构等因素的相互影响。同时，结合国内聚变装置的运行参数，进行多窗口ICRH天线协同提升耦合的优化分析。

**考核指标**：（1）构建多窗口ICRH天线与等离子体相互作用的三维物理模型，并开发相应的数值计算代码；（2）提供射频天线的工程结构及其仿真结果；（3）获取多窗口ICRH天线协同提升耦合阻抗和耦合效率的优化参数及方案。

**7.AI对破裂预测与防护的策略**

**研究内容**：未来聚变堆的控制运行亟需解决的核心问题之一是等离子体参数的稳态精确控制和瞬态事件预测与避免。预测包括由等离子体不稳定性、密度/比压极限等导致的等离子体破裂，监测装置各系统级的降能/失能异常；分析由各类等离子体破裂、系统失能降能等异常事件对聚变堆装置的安全风险，制定事件分级标准。基于制定的响应措施标准，执行装置放电策略修正、紧急停机控制、破裂缓解与防护等响应策略。

**考核指标**：（1）多任务的破裂预警模型，提前300毫秒预测等离子体潜在的破裂并明确风险原因（2）基于不同破裂风险，设计执行不同的响应策略（3）预测与响应算法模型，需在EAST或其他装置实验中验证，并可推广到BEST装置上。

**8. 台基区密度分布参数的建模及其影响研究**

**研究内容**：迄今为止，欧洲和中国的托卡马克聚变堆设计均表明，高台基区密度对于实现高聚变增益具有重要作用。此项研究将调研影响台基顶密度、分离面密度及密度梯度峰值等分布参数的关键物理过程，并建立能够耦合这些物理过程的定量估算模型。同时，还需进行自洽分析，研究密度分布参数对台基顶部压强及整体聚变性能的影响。在上述物理研究的基础上，通过与边界物理、芯部加料等研究的交叉融合，提出调控台基密度分布的方法。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）建立台基区密度分布参数的理论预测模型，开发应用于CFEDR的数值模拟程序，物理上能显著弥补目前已完成的模拟预测的不足；（2）针对分离面密度、台基区密度梯度峰值与温度峰值偏移幅度、台基区顶密度等关键参数如何定量影响台基顶压强与整体聚变性能的问题，给出包含输运、加料、不稳定性等物理过程的综合分析报告；（3）从现有装置的实验数据出发，提出可适用于CFEDR上述问题的预测方法并给出相应的论证报告。

**9. 提高聚变堆芯区燃料粒子密度峰化度的方法**

**研究内容**：提高芯区燃料粒子密度峰化度是提高聚变功率的重要途径。此项研究需在满足聚变堆芯区氦灰排除并避免重杂质聚芯的前提下，探寻提高燃料粒子密度峰化程度的物理方法。研究需结合湍流输运、新经典输运与不稳定性的物理，掌握并综合利用相关模拟程序，对芯区不同离子成分的分布进行相互自洽的建模。同时，还需研究未来聚变堆的芯区加料方式对等离子体输运与约束的影响，助力CFEDR团队提出有效加料以提高聚变功率的完整方案。

**考核指标**（同时满足）：（1）调研影响芯区不同粒子成分的输运过程与微观机理，掌握相关的物理模拟方法；（2）寻找燃料离子向内箍缩与氦灰离子向外排出的参数区，阐述其中机理，并采用高保真物理模拟进行验证；（3）利用包含湍流输运与不稳定性物理的模拟与理论分析，给出CFEDR不同加料方式下燃料粒子密度分布的预测报告。

**10、误差场锁模的避免及动态校正**

**研究内容**：聚变堆装置固有误差场会产生锁模，触发新经典撕裂模，引起等离子体约束大幅降低甚至破裂，将会大大降低聚变堆经济性甚至造成装置损坏。误差场至今是ITPA磁流体不稳定性中唯一尚未解决的物理课题。如何避免误差场锁模及动态校正是聚变堆将要重点解决的重要物理课题。

**考核指标**(满足下列条件之一)：（1）提出适用于聚变堆的固有误差场测量同时避免锁模引起破裂的有效手段并通过现有装置验证；（2）明确共振分量及非共振分量在高比压等离子体中的物理机理及主要作用区间；（3）提出不同等离子体状态下的动态误差场校正策略并在现有装置验证。

**11.主动避免新经典撕裂模的研究**

**研究内容**：新经典撕裂模是未来聚变堆高聚变增益的重要障碍。国际上现有较为成熟的新经典撕裂模抑制主要通过外加电子回旋电流驱动（ECCD）的手段来实现，然而通过计算得知现有设计的聚变堆未来即便电子回旋功率全部用于抑制新经典撕裂模也无法满足需求。因此，提出新的主动避免新经典撕裂模的手段对于实现BEST科学目标至关重要。

**考核指标**(满足下列条件之一)：（1）在等离子体电流爬坡阶段，通过调节电子回旋波注入位置，避免新经典撕裂模种子磁岛；（2）建立新经典撕裂模种子磁岛主动避免的运行方案；（3）提出新的可供聚变堆应用的其他有效抑制新经典撕裂模的方案。

**12.高性能小/无ELM研究**

**研究内容**：小幅度或无ELM（Edge Localized Mode，边缘局域模）运行模式可显著降低边界瞬态热负荷、提升壁材料寿命。在较低边界安全因子（q95）和台基碰撞率条件下，实现稳定、可控的小/无ELM运行模式，并验证其与金属壁、偏滤器脱靶等运行条件的兼容性，是聚变堆装置实现高约束稳态运行必须要解决的关键科学技术问题之一。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）对较低q95和低台基碰撞率条件下实现小/无ELM模式的物理机制开展系统性分析，并预测聚变堆稳定运行的窗口；（2）在EAST装置上开展小/无ELM实验，获取高Z杂质（如钨）在边界的输运数据并建立输运模型；（3）对小/无ELM靶板热负荷分布与远刮削层热流输运进行数值模拟或实验验证，提出适用于聚变堆装置的热负荷集成控制方案并进行可行性评估。

**13. 金属壁台基结构及约束性能研究**

**研究内容**：高约束模（H-mode）的典型特征是在等离子体边界自发形成一个输运显著降低、具有陡峭温度和密度分布的台基结构。在金属壁条件下，台基结构的形成与稳定性受到壁材料、杂质行为及再循环中性粒子的显著影响。深入理解这些因素如何影响台基结构及约束性能，对于聚变堆装置的高效运行具有重要意义。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）系统性评估金属壁条件下硼化壁处理对台基结构及约束性能的影响；（2）建立可用于预测聚变堆台基结构的物理模型，特别是厘清再循环中性粒子在密度台基结构形成中的作用；（3）提出1-2种在金属壁条件下改善台基约束性能的技术方案，并完成初步实验验证。

**14.三维场对偏滤器打击点影响**

研究内容：聚变堆装置中各种MHD不稳定性或外加的非对称磁扰动以及装置误差场等可能导致实际放电磁位形为三维环向非对称结构，进而使偏滤器热流和粒子流沉积出现更多的打击点，需要对其进行评估并有效控制，这也是ITPA-DSOL专题组的一个重要研究方向。基于现有装置或已设计装置的实际情况，通过实验和理论模拟，分析可能存在的三维环向非对称因素并评估这些因素对偏滤器及第一壁热流沉积、粒子溅射等过程的影响；针对可能影响到装置长脉冲高参数运行的因素，设计并评估能够有效控制第一壁和偏滤器热负荷的运行方案。

**考核指标**：（1）可能存在的三维环向非对称因素以及等离子体响应分析（2）评估这些因素对偏滤器及第一壁热流和粒子流分布可能产生的影响（3）针对至少1种因素，设计控制第一壁和偏滤器热负荷的运行方案，通过实验或模拟来评估方案对维持装置长脉冲高参数稳定运行的有效性。

**15.聚变堆钨材料腐蚀与边界杂质屏蔽研究**

**研究内容**：未来聚变堆将采用全钨壁设计以应对高温、高热负荷以及高能粒子轰击的极端服役环境。针对聚变堆的运行工况，深入研究不同条件下偏滤器和第一壁钨材料的腐蚀及其关键影响因素。通过理论、模拟和实验研究，明确钨杂质产生、输运及其在边界等离子体中的屏蔽机制。在此基础上，提出能够有效控制未来聚变堆壁材料腐蚀和芯部钨杂质浓度的边界运行方案。

**考核指标**：（1）发展适用于远刮削层在内的边界钨杂质输运理论与模拟方法；（2）理解全钨壁条件下壁腐蚀与边界钨杂质输运机制，明确其关键影响因素；（3）为聚变堆提出满足其低芯部等离子体钨浓度和壁材料使用寿命的边界运行方案。

**16.微观湍流与快粒子不稳定性相互作用**

**研究内容**：在反应堆中，微观湍流引起的反常输液是决定约束性能的关键因素之一；其与快粒子及其驱动不稳定性的相互作用对反应堆约束的影响尚不明确。因此，预研快粒子加热主导下的微观湍流特性，理解其饱和水平，对于实现反应堆的科学目标有重要意义。

**考核指标**(满足下列条件之一)：（1）基于第一性原理程序模拟，明确快粒子加热主导下的芯部湍流特性；（2）明确在现有装置上研究与反应堆相关的湍流与快粒子不稳定性相互作用所需要的参数区间，并提出实验提案。

**17.混杂运行模式下快粒子不稳定性**

**研究内容**：混杂运行模式是反应堆的潜在运行模式之一，其中的阿尔法粒子良好约束是反应堆高性能运行的关键因素之一。因此评估混杂运行模式下的快粒子不稳定性和约束，及对混杂运行模式维持的影响，是亟需解决的问题。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）基于本征值和初值代码，得到反应堆混杂运行模式下快粒子不稳定特性；（2）模拟快粒子不稳定性的非线性饱和过程，评估其对混杂运行模式的影响；（3）明确CFEDR混杂运行模式下高能量粒子模（EPM）雪崩输运的可能性。

**18.面向未来聚变堆高比压等离子体环向自发旋转的模拟研究**

**研究内容**： 面向ITER和未来聚变反应堆稳态先进运行模式的前沿科学挑战，由于弱/反磁剪切等特性，极易触发电阻壁模（RWM）不稳定性从而引发破裂。在当今的装置中，等离子体环向旋转是致稳RWM的重要手段之一。当等离子体旋转足够大时，可以致稳RWM，从而允许归一化比压超过无壁比压极限并接近理想壁比压极限。然而对于未来聚变堆，由于装置尺寸的增大，仅靠中性束注入难以在芯部驱动足够大的等离子体环向旋转。在高比压低动量注入等离子体中，湍流与新经典效应产生的残余应力是驱动等离子体环向自发旋转的重要机制。因此，深入理解残余应力驱动自发旋转的物理机制，是提高等离子体稳定性的关键所在。目前的残余应力模拟程序缺乏对极向非对称性的自洽计算，难以准确评估新经典残余应力的实际贡献。针对金属壁条件下新经典残余应力的模拟问题，离子组分间的动量耦合使得杂质种类与浓度变化会对残余应力产生影响。因此，亟需开展轻/重杂质对残余应力影响的系统研究。为此，本项目拟发展具备极向非对称性自洽计算能力的模拟程序，研究新经典残余应力驱动自发旋转物理机理，并结合实验结果加以验证，为托卡马克先进运行模式的稳态运行提供重要科学依据。

**考核指标**：（1）发展现有动量输运模拟程序的新经典残余应力模型，具备模拟未来聚变堆先进运行模式下D、He、Ar、Xe、W等多种杂质组分等离子体环向旋转剖面的能力，实验验证等离子体环向自发旋转及极向非对称性的模拟结果；（2）结合相关装置高比压等离子体实验，验证残余应力驱动环向旋转对RWM的致稳效应。

**19.聚变堆归一化参数区混合运行模式能量约束时间定标律研究**

**研究内容**：能量约束时间定标律是物理实验和未来托卡马克装置设计的重要基础，其普适性问题一直是聚变界关注的焦点。国际上最常用的IPB98（y,2）定标律来源于中性束离子加热为主、基准运行模式的托克马克装置实验结果，对射频波电子加热主导混合运行模式的约束性能评估将产生较大偏差。对此，依托EAST托卡马克，利用聚变堆归一化参数区射频波电子加热混合运行模式的实验结果构建EAST混合运行模式实验数据库，结合纵场、电流等关键参数定标实验，研究这些参数之间的内在依赖性及其对能量约束时间的影响，构建EAST混合运行模式能量约束时间定标律，为评估聚变堆混合运行模式等离子体性能提供依据。

**考核指标**：1）构建EAST装置聚变堆归一化参数区射频波电子加热主导混合运行模式等离子体约束数据库；2）构建EAST混合运行模式能量约束时间定标律，实现对未来聚变堆射频波电子加热主导、混合运行模式的等离子体约束性能预测和评估。

**20.混杂运行模式下芯部高Z杂质输运研究**

**研究内容：**高Z杂质输运与控制研究一直是磁约束聚变研究的前沿课题。混杂运行模式是未来ITER基本运行模式之一。然而该运行模式下（低q95以及内部输运垒等）杂质聚芯问题严重，相关物理机制以及如何避免该放电条件下杂质聚芯仍需进一步研究。调研国内外装置混杂运行模式下高Z杂质的芯部行为和输运特征；在长时间尺度、全金属壁、低动量、电子加热主导这种类ITER混杂运行条件下开展高Z杂质芯部输运特征研究；探索此放电条件下避免高Z杂质聚芯运行区间，为避免混杂运行模式下高Z杂质聚芯提供参考。

**考核指标：**（1）从实验和模拟方面给出高Z杂质的扩散系数和对流速度；（2）给出混杂运行模式下影响高Z杂质聚芯的关键物理量以及避免高Z杂质聚芯的运行区间。

**21.与先进仿星器磁场周期共振的新型射频天线研究**

**研究内容**：针对未来先进仿星器聚变堆的加热等离子体需求，开展与先进仿星器环向周期性磁场共振的新型射频天线设计研究。主要研究内容包括：开发先进仿星器位型下射频波与等离子体相互作用的三维物理模型，以支持先进仿星器射频加热研究；应用所开发的程序设计先进仿星器位型下的新型射频天线；探讨新型射频天线在先进仿星器位型下产生驻波和与周期磁场共振满足的条件。

**考核指标**：（1）开发具有自主知识产权、适用于先进仿星器装置的三维射频加热程序；（2）设计与先进仿星器磁场周期共振的新型射频天线；（3）深入研究射频波在先进仿星器中的驻波和与周期磁场共振行为。

**22.基于AI的氢同位素光谱诊断比例预测技术**

**研究内容**：未来聚变堆的T/D+T 同位素比例测定是亟需解决的核心问题之一。通过人工智能技术实现核聚变装置中氢同位素比例（D/H+D）的预测，并将该技术延展T/D+T 同位素比例的预测，为聚变装置安全运行提供技术支持。

**考核指标**：（1）优化深度学习算法，使其能精准地从氢 - 氘（HD）等离子体的 Hα/Dα 线光谱特征中测定 D/H+D 同位素比例，将平均误差控制在 6% 以内，中位数误差控制在 2% 以内。（2）探索将该技术从 HD 等离子体扩展到 DT 等离子体的有效途径，实现对 DT 等离子体中 T/D+T 同位素比例的预测。（3）解决技术应用中的关键约束，特别是难以实时获取参数的问题，提出切实可行的解决方案。

**23.托卡马克等离子体芯区参数分布随时间演化模拟**

**研究内容**：包含先进物理模型且能够高效模拟等离子体芯区多种参数分布随时间演化过程的程序，是发展新运行模式与开展装置物理设计的重要工具。此项研究需通过调研整理出能同时模拟等离子体多种粒子成分的密度、温度与安全因子等径向分布以及二维平衡随时间演化的理论框架。在此基础上，通过自主研发或拓展已有的物理模拟程序，以耦合先进的物理模型程序，并通过优化算法或机器学习代理模型等方法实现高效的演化模拟。研究中需利用 EAST 等装置实验数据进行验证，并应用到 BEST 和 CFEDR 的运行模式模拟中。

**考核指标**（需同时满足） ：（1）整理出多种粒子成分的密度、温度与安全因子等径向分布以及二维平衡随时间演化的理论模拟框架，完成原型程序开发或掌握一套可大致实现上述框架的程序。（2）开发或拓展一个高效的模拟程序，使其包含 ITPA-TC 组认可的先进输运模型与台基预测模型，并通过多种优化手段，避免或显著缓解因先进物理模型引入而造成的程序运行时间瓶颈。（3）给出基于 EAST 或其他装置实验数据的程序模拟验证报告，给出应用于 CFEDR 和 BEST 主要目标运行模式的模拟结果。

**24.脉冲高功率偏振干涉散射仪关键技术研究**

面向未来聚变堆燃烧等离子体极端中子辐射环境，以及多核心参数同时监测的多功能先进诊断需求，分析现有偏振干涉仪的局限性，提出一种基于超高功率脉冲远红外激光的远程非扰动诊断方法，评估在高密度、高温度等运行条件下诊断方案的可行性。目的是能够同时实现密度、磁场以及温度的同时测量。

**考核指标**：（1）对现有偏振干涉仪应用于未来聚变堆的局限性进行分析，（2）提出一种可同时测量多核心参数的超短脉冲偏振干涉仪诊断方案，（3）对新的诊断方案的可行性进行分析评估。

**25.相干汤姆逊散射诊断的散射信号接收模块设计**

相干汤姆逊散射（CTS）诊断可以直接测量聚变堆的离子温度以及快离子的速度分布，在合适的散射位型下还可以测量氘氚比，是未来聚变堆的关键诊断。但是由于散射截面极小，CTS诊断的散射信号只有~1nW量级，因此需要设计高灵敏的微波接收器来收集微弱的散射信号；为了得到完整的散射谱，散射信号接收模块需要采用多道测量，从而保证高频率分辨率。

**考核指标**：（1）现有CTS诊断接收模块的技术瓶颈分析；（2）提出实现对1nW散射信号测量的可行性方案；（3）提出多道测量的可行性方案，使得频率分辨率达到20MHz以下。

**26.基于轨道角动量的等离子体参数测量物理模型研究**

针对未来聚变燃烧装置对于诊断系统功能性和鲁棒性的需求，建立一种新型基于轨道角动量电磁波来测量等离子体参数的新方法。通过理论模拟与仿真，对轨道角动量电磁波测量等离子体参数进行针对性设计与功能论证。目标是论证利用轨道角动量技术来测量等离子体密度的功能可行性并延伸至基于调整轨道角动量的模式来实现对于不同等离子体参数测量的物理可行性。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）对于轨道角动量电磁波与聚变等离子体的相互作用的理论进行详细分析；（2）完成一个利用轨道角动量电磁波来测量等离子体密度的物理模型建立并论证其功能可行性；（3）基于物理模型完成一套利用轨道角动量测量等离子体密度的诊断系统设计。

1. **工程技术类**
2. **聚变堆高效硼化的方法**

**研究内容**：针对未来聚变托克马克示范堆的特殊环境，在参考ITER辉光放电硼化的基础上，设计发明一个能够结合射频与辉光协同效应的硼化系统，并对利用该系统对托卡马克低温等离子体中等离子体参数、高效硼化的效果进行分析，目标是实现高效、均匀、大面积的硼化技术。聚焦在调研、设计，分析技术的方案的可行性，鼓励开展相关的试验研究。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）对现有ITER硼化系统优缺点以及改善方案的详细分析（2）有一个完整的协同高效的设计方案并进行可行性分析（3）在EAST托克马克装置上开展相关的实验并与辉光放电和射频方案的实验进行对比。

1. **聚变堆脉冲运行条件下连续发电的方案设计**

**研究内容**：未来托卡马克聚变堆一种有效的运行模式是长脉冲等离子体放点、连续发电运行。等离子体长时间运行期间产生持续数小时的高功率热源，通过储能环节，可以将脉冲式的热源装换成连续的电功率。在仔细计算、分析托卡马克放点期间的各类热源的参数的基础上，设计出能高效稳定连续发电系统。

**考核指标**：计算分析示范堆脉冲热源参数，提供1-2种针对不同热源（第一壁、偏滤器、包层） 所需的储能和相应发电系统。该发电系统可以是纯发电模式，也可以是根据不同热源的品质，采用更经济高效的多能应用（发电、供热、海水淡化等）系统。

1. **提高射频天线的寿命方法**

**研究内容**：未来聚变堆射射频天线要面对高负荷的等离子体、中子辐照和强电磁力的多重极端条件工况。针对聚变堆的运行工况，分析天线损伤的机制，经过充分的调研，分析比较ITER射频天线设计的优缺点，提出高耐辐照天线的设计原则以及方法。在此基础上，给出大幅度提高等离子体天线相互作用的承载能力的设计方案。

考核指标（1）分析目前ITER射频天线寿命最薄弱的环节以及改进的原则和方法（2）提出新的提高射频天线寿命的方法和措施（3）给出目前薄弱环节改善的设计并做可行性分析。

1. **高性能弹丸注入器的设计**

**研究内容**：未来聚变堆需要高速弹丸注入器以便实现对芯部加料。调研现有的弹丸注入器的技术现状，了解限制现有弹丸注入器发射速度的缘由，深入分析ITER弹丸注入器优缺点，提出改善和提高弹丸注入的速度方法，并对该方法的实施提出可行性方案的设计和评估。

**考核指标**（1）现有弹丸注入器发射速度的技术瓶颈分析（2）提出在现有弹丸注入器的基础上改进发射速度的方法和可行性方案（3）提出新的弹丸注入器的设计以及可行性分析评估。

1. **聚变堆关键部件焊缝实时监测的方法**

**研究内容**：针对聚变堆关键部件，如真空室、包层、偏滤器、冷屏等重要部件在焊接过程中所需要严格的焊缝检查的需求，在广泛调研超声、射线、中子成像等各种焊接部件探伤的技术的基础上，设计出能够实时快速准确的识别聚变堆焊接过程中焊缝质量的检测方法。可以是一种，也可以是多种方法的组合。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）提出对某个关键部件进行实时在线焊缝高分辨率检测的方法设计和可行性方案的分析（2）提出利用人工智能的方法，加上大数据学习，在现有焊接检测的技术基础上进行快速的人工智能分析方法（3）提出一到几种方法组合的针对聚变堆关键部件，实时、快速、高质量焊缝检测的技术方案并对该方案可行性进行分析。

1. **地震对聚变堆关键部件的影响及评估方法**

**研究内容**：针对未来聚变堆在地震条件下，依然能够进行简单的修复就能恢复运行的要求，仔细分析聚变堆永久部件，如磁体、超导接头、真空室、冷评等在地震发生的条件下，最容易损坏部件所能承受的震动（符合免修准则）进行梳理分析，并提出对关键部件所需要的地震条件下的测试标准，提出实验需求。初步建立地震条件下，聚变堆关键部件承受地震免修标准的设计制造要求和模拟地震测试准则。

**考核指标**（满足下列条件之一）（1）在仔细调研 ITER和裂变堆地震条件下免修标准的梳理分析基础上，初步建立地震条件下，聚变堆防震准则和测大纲（2）提出聚变堆关键部件地震模拟测试标准依据和内容（3）提出几个聚变堆关键部件，如磁体、接头在地震条件下免修应该满足的条件和地震模拟测试内容及标准。

**7. 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，与发电系统高效耦合。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；参考核裂变反应堆发电方式，设计分析未来聚变堆慢速启动、停堆需求，开展超导磁体电源系统和聚变堆发电系统中的汽轮机、发电机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，提供一种控制性能更优，可满足未来聚变堆慢速启动、停堆要求，且容量/价格至少降低50%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，并通过专家组的设计评审。

1. **高温超导导体寿命的影响因素及评估方法**

**研究内容**：针对聚变堆未来使用的高温超导带材YBCO和线材2212等导体，研究高温超导导体在运行过程中，由于多种交变工况、电磁力、失超等影响造成对导体性能退化的机理进行分析和研究。通过理论分析、模拟和相关的实验给出作为未来聚变堆，寿命的判据以及表征的方法。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）分析线材或带材的退化机理以及表征的判据（2）实验验证在非正常工况下，如失操、快速电流变化等导致导体退化的表征和测量判据(3)给出未来导体寿命的探测和检验方法。

1. **第一壁材料损伤实时在线表征的方法**

**研究内容**：托卡马克聚变堆第一壁材料受高热负荷和离子热流辐照导致材料损伤。如何判断材料服役的行为、寿命以及对正常运行工况影响的评价至关重要。在广泛调研国内外等离子体壁与材料相互相互作用研究的基础上，提出1~2种对用于托卡马克中第一壁和偏滤器材料进行在线实时表征材料的损伤及形貌特征方法，进而提出第一壁材料更换的准则和标准。

**考核指标**（完成之一）：（1）提出1~2种第一壁材料损伤实时在线的测量方法（2）在广泛的调研和一定的实验基础上，针对对ITER第一壁材料表面形状诊断系统，提出可用于未来稳态聚变堆实时测量的改进方案。

1. **聚变堆模块化、并行化高效安装的方法设计**

**研究内容**：模块化、并行化、集成化高效安装是未来聚变堆建设的重要一环。在充分调研ITER等大型托卡马克安装、航母等大型装备模块化、并行化安装的基础上，设计出聚变堆高效安装的方法。

**考核指标**（完成下列之一）：（1）提出聚变堆主机模块化、并行化、集成化高效安装的思路，分析安装关键卡点的原因，采用建筑模块、主机模块高效耦合安装的新方法，并对聚变堆安装所需的时间工期给出分析评估。（2）利用大数据模型（如deepseek、ChatGPT）对聚变堆主机安装进行模拟，并对安装工艺、工期给出分析和评估。

**11、新一代聚变用屏蔽钢的研发与制备**

**研究内容**：面向CFEDR对保护超导磁体、降低核热沉积的需求，研发新一代聚变用高性能屏蔽钢材料。新材料需确保中子及γ射线屏蔽效能不低于ITER级304B7基准；同时显著提升材料的力学性能（强度与韧性匹配）和微观组织稳定性，确保材料在中子辐照、热-机械载荷耦合环境下长期安全服役。探索更简化、可控性更强的制备工艺路径，并致力于降低材料与制造成本，提高工程应用可行性。

**考核指标**（满足下列之一）:（1）提出新一代高硼钢的组分设计，屏蔽性能优于ITER级304B7，抗拉强度≥650MPa，延伸率≥20%；（2）提出一种适用于聚变堆环境、含硼量4%以上（或等效屏蔽效果）、可低成本批量制备的高性能屏蔽钢设计。

**12、大直径、高强度铍钛合金小球中子倍增剂的制备**

**研究内容**：针对聚变堆氚增殖包层混合球床优化设计对大直径中子倍增剂铍钛小球的需求，突破粒径可控、球形度高、组织结构均匀的单相Be12Ti合金小球的关键制备技术瓶颈，探索制备工艺参数对物相组成、组织形貌的影响规律；开展模拟服役工况下单相Be12Ti合金的辐照损伤研究，建立基于多尺度模拟技术的Be12Ti合金小球的失效模型，进一步阐明Be12Ti合金小球的性能损伤演化机理。

**考核指标**（完成下列之一）:（1）提出球形度高、组织结构均匀、粒径为5~10 mm的单相Be12Ti合金小球的制备方案；（2）基于实验数据与多尺度模拟技术，给出聚变堆内服役条件下Be12Ti合金小球的失效模型。

**13、聚变堆高场磁体绝缘应力优化及材料综合性能提升**

**研究内容**：在聚变堆运行过程中，高场磁体绝缘材料将面临中子辐照，高低温循环、强电磁力周期波动等挑战，可能引发绝缘层开裂、剥离等失效问题，进而影响磁体运行的安全性与可靠性。基于国内外聚变堆磁体研发及高压绝缘材料应力调控的研究基础，设计出聚变堆高场磁体绝缘应力优化与调控方法。需要系统研究绝缘材料在中子辐照、强磁场、低温、高电压等单一及多场耦合条件下的绝缘性能演变规律，开发适合聚变超导磁体用的绝缘材料特别是基于氰酸酯树脂体系的预浸料。

**考核指标**：（1）利用电磁力热多物理场仿真模型（如 COMSOL、ANSYS），对高场磁体绝缘应力进行动态模拟，结合机器学习算法优化绝缘材料配比与结构参数，对不同调控方案下的绝缘应力分布、失效风险及工程可行性给出分析和评估。（2）完成氰酸酯树脂预浸料开发，材料克重200-300克/平方米，粘度适中，易于包绕，固化温度不高于150摄氏度，适合非热压罐工艺成型。液氮温度下，材料层间剪切强度不小于80MPa，经过5MGy伽马射线辐照后强度衰减不高于20%。

**14、聚变堆主机系统在线服役工况评估方法**

**研究内容**：根据聚变堆磁体实际运行工况（低温、强磁场、高辐照、复杂电磁干扰），开发耐辐照、抗干扰的在线传感系统，实现温度、应变、磁场、绝缘状态等参数的高精度动态监测；基于大数据与深度学习的设备异常检测算法，建立实时数据融合与诊断平台；发展集材料力学、电磁反演，材料宏微观特性定量表征和成像，混频非线性超声技术等高精度高灵敏度无损检测方法，实现多模态检测与智能化分析。

**考核指标**（满足下列条件之一）：（1）完成抗低温，抗辐照以及电磁干扰的在线传感系统关键部件的设计及研制，并完成性能验证（2）完成关键运行参数数据库的建立，开发一种大数据与深度学习的设备异常检测算法（3）针对主机系统运行在线诊断与监测方法到几种，提出一种多模态的高精度无损检测方法，并完成可行性验证。**15、高强高韧低温钢焊接材料设计与组织性能研究**

**研究内容：**托卡马克聚变堆线圈中的线圈盒及铠甲构件服役温度低，承受载荷大，对材料的低温强韧性要求高。焊接是制备完整线圈构件必不可少的环节，焊缝金属的性能将决定构件的整体性能。以氮强化为基础的CHSN01新型低温奥氏体不锈钢材料是近几年聚变堆低温材料领域的新热点。在广泛调研国内外针对聚变堆用低温钢焊接材料研究的基础上，面向高强韧低温钢焊材需求，开展焊材热力学计算设计和低温层错能分析；采用非熔化极气体保护焊方法制备焊缝金属，研究不同设计成分下焊缝组织特征和力学性能；研制低温应用的高性能特种焊材。

**考核指标**：（1）形成不同合金元素对焊缝组织与性能的影响规律报告；（2）完成托卡马克聚变堆线圈盒及铠甲构件用低温钢焊接材料的室温及低温性能评定。

**16、超大型高强结构件的低成本制造及均质化研究**

**研究内容**：超导磁体线圈盒是承受强电磁应力冲击的主要载体，是超导磁体安全运行的保障。以氮强化为基础的CHSN01新型低温奥氏体不锈钢材料是近几年聚变堆低温材料领域的新热点，基本满足未来CFEDR线圈盒的材料性能要求。但是针对未来CFEDR线圈盒锻件成本高、吨位大、制造难度大等问题，迫切需要开展超大型高强结构件（净重大于10吨）的低成本制造工艺研究，突破大尺寸、大厚度线圈盒锻件的均质化成型关键技术。

**考核指标**：（1）针对CFEDR线圈盒大型锻件给出2种及以上成型制造策略并分析优缺点；（2）完成材料高温第二相固溶/析出行为、晶粒粗化行为等基础研究并形成报告。

**17、耐900度敏化的超导导体铠甲用材料遴选及性能研究**

**研究内容**：Bi2212（Bi2Sr2CaCu2O8）超导临界温度(Tc)为85K，临界电流密度及临界磁场强度远高于Nb3Sn超导线材，被认为是目前唯一一种可以制备成各向同性圆线的铜氧化物高温超导体，可用于制备CFEDR超导磁体高场内插线圈，以实现磁场强度的提升。但Bi2212超导导体制备工艺复杂，作为支撑保护的传统铠甲材料经Bi2212 900度热处理后力学性能普遍出现断崖式下跌，无法满足当前Bi2212铠甲性能要求。针对以上问题，迫切需要开展Bi2212新型超导导体线圈铠甲材料的研发。

**考核指标**：（1）遴选一种及以上适用于Bi2212超导导体铠甲用不锈钢或高温合金结构材料，经Bi2212 900度高温热处理后，材料4.2 K下屈服强度＞1250MPa；（2）完成相关材料历经Bi2212铠甲热处理后的组织及性能分析，形成报告。

**18、高温超导磁体馈线可行性研究**

**研究内容**：磁体馈线是连接磁体系统与外部低温系统、电源系统及信号采集系统的重要部件。目前馈线系统导体主要采用低温超导材料制备，需要在液氦温度（4.2K）下运行。拟开展基于YBCO/Bi2212/MgB2等高温超导材料的馈线系统导体研制，将馈线系统运行温区提高至20K以上，可利用磁体系统回流（T>10K）对其进行冷却，减少低温系统负荷。

**考核指标**：（1）完成一种百千安级，运行温度大于20K的高温超导磁体馈线导体设计及热稳定性分析；（2）开展导体在20K以上温区中直流及交流性能分析。

1. **聚变堆包层球床传热行为研究**

**研究内容**：研究两颗粒接触力学行为，建立接触力-变形关系。利用微观形貌分析获取颗粒变形表面微观特征，结合统计学手段建立不同接触力作用下的颗粒轮廓表明粗糙度函数。基于分形理论和传热理论，结合颗粒表面粗糙度函数，建立接触分形模型，探索不同接触力下的颗粒接触传热动态模型。通过两颗粒接触传热方程，推演随机堆积颗粒球床传热模型，探索优化球床传热的有效途径。

**考核指标**：（1）开发颗粒表面粗糙轮廓评估系统，要求系统准确率达90%以上；（2）开发球床传热动态演化计算模型，要求准确率率达95%以上。

1. **面向聚变堆第一壁的表面清洗除污技术研究**

**研究内容**：聚焦聚变堆第一壁表面激光清洗除污技术，针对等离子体-壁相互作用产生的共沉积层去除难题，开展高精度激光清洗机理与工艺优化研究。通过建立瞬态热-力耦合模型，研究激光诱导的烧蚀、相爆炸、等离子体冲击波等效应，针对不同沉积物（如碳氢膜、金属共沉积层）优化参数，通过实验与模拟确定钨、低活化钢等材料的损伤临界能量密度，研发面向CFEDR第一壁的激光清洗系统，集成在线激光诱导击穿光谱诊断与控制技术，实现污染物全自动清洗过程闭环控制。重点解决氚滞留控制、材料脆化及热阻增加导致的性能退化等关键问题，为聚变堆内部部件第一壁维护提供新型非接触式清洗方案，提升第一壁材料服役寿命与装置运行稳定性。

**考核指标**：（1）清洗效率：单位时间内清洗面积≥10cm2/min；（2）污染物去除率：针对第一壁表面沉积的污染物，清洗后污染物残留量≤10%；（3）氚去除率：清洗后表面氚残留量≤1Bq/cm2；（4）热影响深度控制：≤50μm；（5）二次污染控制：清洗产生的气溶胶颗粒浓度≤1mg/m3。

1. **3D打印钨/铬锆铜梯度层平板结构偏滤器靶板性能研究**

**研究内容**：采用电子束3D打印形成钨/铬锆铜梯度复合层，研究不同钨骨架结构网格类型（蜂窝形、钻石形，等）下形成的钨/铬锆铜的力学性能；研究钨骨架结构不同渗铬锆铜形式形成的钨/铬锆铜的力学性能；通过高热负荷测试开展3D打印钨/铬锆铜梯度层平板结构偏滤器靶板热负荷承载性能研究。

**考核指标**：（1）3D打印钨化学纯度优于ITER技术要求(>99.94 wt%)；（2）钨/铬锆铜梯度层2-4mm内钨含量在厚度方向100%渐变到0%；（3）钨/铬锆铜梯度层尺寸不小于50 mm（长）\*12 mm（宽）\*3 mm（高）。

1. **包层氚增殖材料中痕量氚测量技术研究**

**研究内容**：液闪法是目前氚含量测量最为灵敏的方法，但该方法前处理复杂，干扰因素多，大批量样品的测量质量难以保证。针对氚增殖包层发展需求，面向固态、液态氚增殖材料，开展氚活度测量的前处理工艺研发；结合三光电倍增管符合比技术（TDCR）的氚活度分析系统，基于研发的前处理工艺；探索自动化氚含量测量平台设计方案，以期实现氚增殖材料中氚含量标准化测量。

**考核指标**:（1）针对中子辐照后氚增殖剂材料，氚含量测量不确定度小于6%；（2）面向固态、液态氚增殖材料提出两种自动化氚含量测量平台设计方案。

1. **未来聚变堆超临界二氧化碳液态锂铅包层RAMI分析方法研究**

**研究内容**：面向未来聚变堆超临界二氧化碳液态锂铅包层RAMI研究面临的失效模式和失效率数据缺乏难题，发展包层部件寿命预测和可靠性评估方法。综合包层脉冲运行热-机械循环载荷特征、结构材料主要退化现象（如疲劳、蠕变、辐照脆化）以及不确定性量化，建立包层部件寿命分布、失效率和平均故障间隔时间（MTBF）评估的理论模型和分析工具，探索提升包层系统服役寿命潜在途径。

**考核指标:**（1）建立脉冲运行条件下超临界二氧化碳液态锂铅包层部件寿命预测和可靠性评估模型和方法，并开发分析程序；（2）建立脉冲运行条件下超临界二氧化碳液态锂铅包层部件失效模式和失效率数据库。