
国家重点研发计划

中国聚变工程实验堆集成工程设计研究

课题一 SPEC 文档

中国科学技术大学

国家聚变堆总体组

2017/9/20

目录

| | |
|--|----|
| 任务一 堆芯物理参数设计 | 6 |
| 1 任务说明 | 6 |
| 2 研究内容 | 7 |
| 2.1 CFETR 放电平顶段运行方案设计与优化 | 7 |
| 2.2 CFETR 目标等离子体建立与软着陆方案设计与优化 | 8 |
| 2.3 CFETR 稳态运行高约束模台基区参数的设计及优化 | 9 |
| 3 考核指标 | 9 |
| 任务二 堆芯参数设计校核 | 11 |
| 1 任务说明 | 11 |
| 2 研究内容 | 11 |
| 3 考核指标(与 TASK1 相同, 但是方式方法不同) | 11 |
| 任务三 位型优化设计 | 13 |
| 1. 任务说明 | 13 |
| 2. 研究内容 | 13 |
| 2.1 等离子体平衡位形的建立 | 13 |
| 2.2 线圈的设计优化 | 14 |
| 3. 考核指标 | 14 |
| 任务四: 垂直不稳定性评估与控制(所有运行方案的评估) | 15 |
| 1. 任务说明 | 15 |
| 2. 研究内容 | 15 |
| 3. 考核指标 | 16 |
| 任务五: 偏滤器设计、优化及热流和粒子流评估及控制 | 18 |
| 1 任务说明 | 18 |
| 2 研究内容 | 18 |
| 2.1 设计工具及模型的验证 | 18 |
| 2.2 偏滤器运行模式设计及分析优化 | 18 |
| 2.3 偏滤器几何位型设计优化 | 18 |
| 2.4 偏滤器材料寿命及杂质输运评估 | 18 |
| 2.5 瞬态靶板热流评估 | 19 |
| 3 考核指标 | 19 |
| 任务六: 粒子控制 | 20 |
| 1. 任务说明 | 20 |
| 2 研究内容 | 20 |
| 2.1 实验研究当前高功率长脉冲实验装置的粒子控制 | 20 |
| 2.2 分析评估 CFETR 高功率聚变等离子体稳态运行中的粒子控制 | 20 |
| 2.3 加料模式的设计及加料效率的分析和优化 | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.4 粒子排出速率的控制与优化..... | 21 |
| 2.5 氚滞留的有效控制与清除..... | 21 |
| 3 考核指标..... | 21 |
| 任务七 MHD 不稳定性分析评估..... | 22 |
| 1. 任务说明..... | 22 |
| 2. 研究内容..... | 22 |
| 3. 考核指标..... | 23 |
| 任务八 高能粒子物理（主要分析和防控风险）..... | 24 |
| 1. 任务说明..... | 24 |
| 2. 研究内容..... | 24 |
| 2.1 高能粒子与等离子体波和不稳定性相互作用..... | 24 |
| 2.2 CFETR 中高能粒子的约束和输运..... | 25 |
| 3. 考核指标..... | 25 |
| 任务九 诊断系统物理设计..... | 27 |
| 1 任务说明..... | 27 |
| 2 研究内容..... | 27 |
| 2.1 测量物理量的提出..... | 27 |
| 2.2 诊断技术的确定..... | 27 |
| 2.3 诊断系统在包层上的占用面积估算..... | 28 |
| 3 考核指标..... | 28 |
| 任务十 堆芯等离子体核反应研究（重点如何提高燃烧率，找到>3%燃烧率的方法）..... | 29 |
| 1 目的..... | 29 |
| 2 范围..... | 29 |
| 3 设计内容..... | 29 |
| 4 技术要求..... | 30 |
| 5 任务考核..... | 30 |
| 任务十一 包层和屏蔽设计（详细方案设计）..... | 31 |
| 1 目的..... | 31 |
| 2 设计目标、设计约束与设计要求..... | 31 |
| 3 工作内容..... | 32 |
| 3.1 包层功能与方案设计..... | 32 |
| 3.2 包层性能评价..... | 33 |
| 2.3 包层屏蔽能力评价..... | 33 |
| 2.4 包层安全性能研究..... | 33 |
| 4 考核指标..... | 33 |
| 任务十二 辐射场计算研究（各区域在不同运行时段辐射、活化、放射性剂量分析）..... | 34 |
| 1 目的..... | 34 |
| 2 范围..... | 34 |

| | |
|---------------------------|----|
| 3 辐照方案, 计算工具, 与数据库 | 34 |
| 3.1 辐照方案 | 34 |
| 3.2 计算工具与数据库 | 34 |
| 4 工作内容 | 35 |
| 4.1 CFETR 中子学模型的开发 | 35 |
| 4.2 CFETR 中子通量分布分析 | 35 |
| 4.3 CFETR 材料活化分析 | 35 |
| 4.4 CFETR 停堆剂量分析 | 35 |
| 4.5 放射性迁移分析 | 35 |
| 5 任务考核 | 36 |
| 任务十三 CFETR 核心参数设计 | 37 |
| 1 目的 | 37 |
| 2 范围 | 37 |
| 3 设计内容 | 37 |
| 4 技术要求 | 37 |
| 5 任务考核 | 38 |
| 任务十四 CFETR 子系统参数与设计 | 39 |
| 1 目的 | 39 |
| 2 范围 | 39 |
| 3 设计内容 | 39 |
| 4 技术要求 | 39 |
| 5 任务考核 | 40 |

前言:

"Each task should not be carry out in isolation. Progress in one task depends on progress in many other tasks. Communcation and information exchange among all the tasks are of the utmost importance. A strong organization is needed to make this happen. Management should provide periodic assessment and guidance to ensure they work as a singe team."

Vincent Chan

2018/2/10

任务一 堆芯物理参数设计

1 任务说明

堆芯参数设计课题研究内容包括两部分，分别是（i）CFETR 放电平顶段运行方案的设计与优化；（ii）CFETR 目标等离子体建立与软着陆方案的设计与优化；（iii）CFETR 稳态运行高约束模台基区剖面的设计与优化。

内容（i）运用已经验证过的有效的平衡及输运等物理模型，以多方面自洽的集成模拟为主要研究手段，为满足 CFETR 总体目标，针对若干种可能的运行模式（见表一），优化精炼出几种可行的运行方案，提供为其他课题深入研究所需的 CFETR 目标等离子体参数；对辅助加热手段进行物理优化，尽量减少对包层空间的占用等。内容（ii）通过随时间演化的模拟手段，为 CFETR 目标等离子体的建立与软着陆提供可信方案，同时评估伏秒数消耗、辅助加热类型与功率需求等等。内容（iii）结合先进的边界等离子体理论，实验及模拟，为 CFETR 提供具有很小或者没有边界局域模的运行选择，为 CFETR 以及下一步的装置的台基区设计提供理论基础。

表一： CFETR 若干种可能运行模式的主要参数

| | PFUS | BT0 (T) | BETAN | FBS | NE/N_GW |
|--------------------|--------|---------|-------|------|---------|
| L-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE STEAY-STATE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.5 |
| H-MODE INDUCTIVE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.8 |
| H-MODE STEAY-STATE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 1.0 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 0.8 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | < 1.2 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | 1.0 |

2 研究内容

2.1 CFETR 放电平顶段运行方案设计与优化

本部分的研究分成以下四方面同时开展，在 2018 年年底前完成前两方面内容，为其他 CFETR 研究课题提供堆芯等离子体参数与不确定性评估。

2.1.1 运行模式的零维分析

- 对可能的运行模式的主要参数进行零维分析，给出等离子体的宏观参数以及相应的聚变功率，评估运行方案的可行性

2.1.2 运行模式的集成模拟

- 应用以 OMFIT 为框架的集成模拟工具包进行 1.5 维的模拟，在零维分析的基础上对运行模式进行细化设计，给出台基参数、等离子体平衡、加热与电流驱动、粒子与能量输运四者自洽的模拟放电参数。
- 探索多种能够实现目标的加热与电流驱动组合方案，评估不同运行模式下所需要的加热和电流驱动功率。
- 根据粒子控制、MHD 不稳定性分析、高能粒子物理等等相关课题结果以及等离子体建立与台基区优化等研究结果，迭代改进所设计的运行模式。

2.1.2 基于集成模拟结果的系统程序再优化

- 结合集成模拟与零维系统程序，对堆芯总体参数进行优化，评估堆芯参数的不确定性与冗余度。
- 探索堆芯物理参数与相关工程设计兼容的解决方案。

2.1.3 模型与模拟程序的校验与实验验证

基于现有的装置对于集成模拟工具中用到的模型进行程序间相互校验与实验验证；同时，结合国际上理论研究的最新进展，改进相关模型，提高模拟研究的可靠性。具体包括：

- 根据 CFETR 运行模式的等离子体参数在现有装置实验中筛选参考炮或选择合适的装置开展必要的实验
- 对广泛使用的回旋朗道流体输运模型 TGLF 进行实验验证与改进。
- 利用改进模型检验所设计的 CFETR 运行模式的可靠性。

2.1.4 芯部加料改善等离子体性能与提高氙燃烧率的研究

模拟研究弹丸注入与氙中性束加料时对等离子体性能的影响,探索其对运行模式的改善作用。

2.2 CFETR 目标等离子体建立与软着陆方案设计与优化

本部分研究需要进行随时间演化的模拟。为降低计算量,将以托卡马克模拟程序 TSC 为主,部分物理模型将比平顶段模拟所采用的模型有所简化。

2.2.1 目标等离子体的建立过程研究

根据平顶段运行方案给出的多个运行模式,设计相应等离子体建立过程。具体包括:

- 预测电流爬升过程中的伏秒消耗、初步评估中心螺线管线圈的伏秒数要求。
- 设计等离子体位形演化过程,减小爬升阶段等离子体与第一壁的接触时间,在保持等离子体位形的条件下优化线圈电流配比,使其保持在工程限制以内。
- 在满足 MHD 稳定和工程限制的条件下,优化等离子体电流爬升率,优化伏秒消耗。
- 开展各辅助加热模式(电子回旋波与低杂波为主)辅助等离子体电流爬升的探究,确定各辅助模式所需的功率要求。
- 优化从未燃烧进入燃烧阶段的放电过程,特别是兼顾实现 L-H 转换所需的功率要求。

2.2.2 软着陆过程研究

CFETR 等离子体软着陆的科学目标是在避免等离子体破裂的情况下,将等离子体电流从燃烧状态的大电流降低到 $1\sim 2$ MA 及以下。这个复杂的过程涉及到许多的工程与物理问题,包括等离子体燃烧熄灭、H-L 模式转换、等离子体电流下降、等离子体密度下降、等离子体位形控制、CS 与 PF 电流急剧变化、等离子体不稳定性抑制。综上所述,我们需要在如下诸多限制条件下设计并优化等离子体软着陆方案:

- 等离子体燃烧终结与 H-L 合理转换;
- 避免多余的伏秒消耗,尤其是避免 CS 线圈电流的增加;
- 避免等离子体破裂与垂直不稳定性;
- 减小等离子体电流到 $1\sim 2$ MA 及以下,并维持偏滤器位形;

2.3 CFETR 稳态运行高约束模台基区参数的设计及优化

高约束模为 CFETR 稳态高参数运行所需要的关键运行模式，而高约束模的台基结构对等离子体性能有极大影响，台基区的边界局域模对装置安全也有重要影响。本部分将着重于台基区的设计，通过理论，实验以及数值模拟结合的方式对于 CFETR 的台基区参数和边界局域模行为进行预测。这部分将开展以下研究：

- 使用 EPED 模型以及 EPED-like 模型，对台基区的温度、密度、压强和电流剖面继续预测计算；
- 对集 EPED 模型所计算的 CFETR 台基区剖面，使用 ELITE、BOUT++、NIMROD 等程序对 CFETR 边界局域模行为进行研究，评估这些不稳定性对等离子体及装置运行的影响，并对台基参数进行优化，反馈回芯部集成模拟研究；
- 研究小幅边界局域模（small ELM）的运行区间，结合 EAST 和其他装置的实验结果，配合数值模拟，了解其物理机制与所存在的参数区间；
- 积极发展先进小/无边界局域模的运行模式，并在国内现有实验装置上进行验证进而探讨其应用于 CFETR 的可行性。

3 考核指标

(1) CFETR 放电平顶段运行方案设计与优化

- (i) 针对 CFETR 可能的运行模式，设计出在集成模拟意义上自洽的堆芯等离子体参数，如等离子体小半径与大半径、环向磁场、等离子体电流、比压、平顶段磁通消耗、典型剖面参数、辅助加热与电流驱动的功率，中性束能量，射频波频率等等。
- (ii) 利用集成模拟结果改进零维系统程序计算，评估堆芯参数的不确定性与关键参数的冗余度。
- (iii) 在现有装置的实验上验证等离子体输运模型和辅助加热与电流驱动模型，总结归纳出模型适用范围。评估相关改进模型对 CFETR 运行模式的影响。
- (iv) 评估芯部加料方式对氦燃烧率的影响。

(2) CFETR 启动与软着陆方案设计与优化

- (i) 将等离子体电流从 500kA 演化到目标电流，给出等离子体参数演化、PF 线圈电流波形、消耗伏秒数情况，确定爬升过程中各辅助加热模式所需的功率要求。
- (ii) 在此基础上，优化等离子体爬升率，给出不同爬升率下的有效演化方案。

-
- (iii) 研究在未充分燃烧的阶段实现 L-H 转换的等离子体电流、密度等爬升过程。
 - (iv) 最后完成满足物理与工程各种限制条件的最优化等离子体启动方案设计, 使得等离子体平稳过度到平顶阶段, 给出相应方案的等离子体各项参数、PF 线圈电流波形。
 - (v) 将等离子体电流从燃烧状态的电流水平降低到 2MA, 并维持偏滤器位形。给出线圈电流波形、等离子体密度演化与辅助加热运行情况, 避免线圈电流超过最大电流限制与等离子体密度极限破裂。
 - (vi) 比较 L-mode 软着陆与 H-L 转换软着陆两种方式, 避免等离子体内感的急剧上升, 给出等离子体参数的变化过程。最后比较给出最为合理的软着陆详细设计方案。

(3) CFETR 稳态运行高约束模台基区剖面的设计与优化

- (i) 对不同的运行模式, 给出台基区的密度、温度、压强和电流剖面
- (ii) 对 CFETR 的边界局域模进行评估, 给出相应剖面所对应的边界局域模类型和对装置的影响; 据此对台基参数进行优化, 降低设计风险;
- (iii) 结合现有实验, 对于小/无边界局域模进行物理研究, 得到相应的参数区间, 探讨其在 CFETR 装置上实现小/无边界局域模的可行性;

(4) CFETR 运行模式与 ITER 运行模式优缺点的对比

- (i) 利用计算 CFETR 相同的方法重新计算 ITER baseline 的平顶段运行方案并与 ITER 已报道的结果进行比对;
- (ii) 对比 CFETR 类似运行方案与 ITER baseline 运行方案的优缺点。

任务二 堆芯参数设计校核

1 任务说明

本课题拟采用不同于课题一（堆芯参数设计）所用工具的模拟工具，对课题一所提供的 CFETR 目标等离子体的建立与维持进行模拟研究与综合分析，评估课题一所预测的等离子体参数和运行方案的可靠性，并分析课题一的结果与本课题结果的差异，这对于增强集成模拟的可信度具有重要意义。

2 研究内容

本课题拟采用的主要模拟工具是美国 PPPL 开发的 PTRANSP&TSC 和法国 CEA/IRFM 与瑞士 EPFL 开发的 CRONOS&DINA-CH 两套有别于子课题一中使用的集成建模工具。其中，TSC 与 DINA-CH 处理平衡位形演化，而 PTRANSP 与 CRONOS 处理固定边界的等离子体平衡、加热与电流驱动及输运等这些与等离子体演化相关的模拟计算。

(1) 对 CFETR 燃烧等离子体的模拟校核

- (i) 对比并理解不同工具所预测的完全非感应状态下燃烧等离子体全局参数。为了更好的理解整体的差异，不同工具所计算的如下参量需要被仔细比较，包括：杂质辐射水平、中性束加热与电流驱动剖面、射频波加热与电流驱动剖面、alpha 粒子加热剖面、弹丸加料深度等；
- (ii) 利用本课题的模拟工具对于课题一选择的实验参考炮进行模拟验证并评估和理解模拟与实验之间的差异；

(2) 对 CFETR 燃烧等离子体建立与维持的放电过程的模拟校核

- (i) 校核电流爬升、密度爬升过程的等离子体与平衡位形演化、伏秒数消耗、PF 线圈电流等。
- (ii) 对比不同模拟工具中不同 L-H 转换模型对等离子体演化的影响。
- (iii) 校核不同辅助加热与电流驱动在等离子体电流与储能爬升过程的作用。
- (iv) 模拟评估等离子体着陆过程的安全性。

3 考核指标(与 TASK1 相同，但是方式方法不同)

(1) CFETR 放电平顶段运行方案设计与优化

- (i) 针对 CFETR 可能的运行模式，设计出在集成模拟意义上自洽的堆芯等离子体参数，

如等离子体小半径与大半径、环向磁场、等离子体电流、比压、平顶段磁通消耗、典型剖面参数、辅助加热与电流驱动功率，中性束能量，射频波频率等等。

(ii) 利用集成模拟结果改进零维系统程序计算，评估堆芯参数的不确定性与关键参数的冗余度。

(iii) 在现有装置的实验上验证等离子体运输模型和辅助加热与电流驱动模型，总结归纳出模型适用范围。评估相关改进模型对 CFETR 运行模式的影响。

(iv) 评估芯部加料方式对氦燃烧率的影响。

(2) CFETR 启动与软着陆方案设计与优化

(i) 将等离子体电流从 500kA 演化到目标电流，给出等离子体参数演化、PF 线圈电流波形、消耗伏秒数情况，确定爬升过程中各辅助加热模式所需的功率要求。

(ii) 在此基础上，优化等离子体爬升率，给出不同爬升率下的有效演化方案。

(iii) 研究在未充分燃烧的阶段实现 L-H 转换的等离子体电流、密度等爬升过程。

(iv) 最后完成满足物理与工程各种限制条件的最优化等离子体启动方案设计，使得等离子体平稳过度到平顶阶段，给出相应方案的等离子体各项参数、PF 线圈电流波形。

(v) 将等离子体电流从燃烧状态的电流水平降低到 2MA，并维持偏滤器位形。给出线圈电流波形、等离子体密度演化与辅助加热运行情况，避免线圈电流超过最大电流限制与等离子体密度极限破裂。

(vi) 比较 L-mode 软着陆与 H-L 转换软着陆两种方式，避免等离子体内感的急剧上升，给出等离子体参数的变化过程。最后比较给出最为合理的软着陆详细设计方案。

(3) CFETR 稳态运行高约束模台基区剖面的设计与优化

(i) 对不同的运行模式，给出台基区的密度、温度、压强和电流剖面

(ii) 对 CFETR 的边界局域模进行评估，给出相应剖面所对应的边界局域模类型和对装置的影响；据此对台基参数进行优化，降低设计风险；

(iii) 结合现有实验，对于小/无边界局域模进行物理研究，得到相应的参数区间，探讨其在 CFETR 装置上实现小/无边界局域模的可行性；

(4) CFETR 运行模式与 ITER 运行模式优缺点的对比

(i) 利用计算 CFETR 相同的方法重新计算 ITER baseline 的平顶段运行方案并与 ITER 已报道的结果进行比对；

(ii) 对比 CFETR 类似运行方案与 ITER baseline 运行方案的优缺点。

任务三 位型优化设计

1. 任务说明

中国聚变工程实验堆 CFETR 的主要目标是能够演示聚变能的产生,以及实现燃料循环自持,聚变功率 1.5GW,氦增值比TBR ≈ 1.2 ,燃烧等离子体运行时间占空比 $\geq 0.3\sim 0.5$ 。在CFETR装置设计中,等离子体平衡位形优化设计是一个基本课题,其主要任务是根据装置设计给出的真空室及极向场线圈设计满足堆芯物理需求的等离子体平衡位形,并在设计过程中给出反馈,供装置设计参考,实现线圈设计和位形设计的交互,从而获得优化的等离子体平衡位形和PF线圈放电优化方案。

2. 研究内容

2.1 等离子体平衡位形的建立

运用平衡计算模拟程序,按照装置物理目标的要求,构建各种偏滤器位形,如ITER-like位形,雪花偏滤器位形等。估算等离子体放电过程伏秒数损耗,运用静态平衡的方法,针对不同偏滤器位形计算在放电过程中关键时刻点(如平顶开始)的PF线圈电流,验证PF线圈是否具有生成各类平衡的能力。利用来自TASK1的输出量,建立如下列表中各种运行模式的平衡位形,重点是0.5GW,1GW和1.5GW下的平衡位形优化。

| | PFUS | BT0 (T) | BETAN | FBS | NE/N_GW |
|--------------------|--------|---------|-------|------|---------|
| L-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE STEAY-STATE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.5 |
| H-MODE INDUCTIVE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.8 |
| H-MODE STEAY-STATE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 1.0 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 0.8 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | < 1.2 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | 1.0 |

2.2 线圈的设计优化

平衡位形与 PF 线圈设计相互影响，优化的平衡设计减少对 PF 线圈的要求，PF 线圈的优化亦提高平衡的性能。

- 对于不同运行模式下具有不同剖面参数与内自感的平衡位形，考虑超导材料线圈电流的限制，计算 PF 线圈系统的运行区间（放电平顶段长度），得出线圈的适应性，为进一步优化提供依据。
- 依据工程设计上的约束，调整 PF 线圈的位置与匝数，以获得尽可能长的放电平顶段，尽量少的线圈造价。重点考虑 D1 和 D2 线圈的位置和参数优化。

3. 考核指标

1) 给出可满足极向场线圈布局和线圈能力的等离子体平衡位形，包括单零位形及雪花偏滤器位形的设计方案；

2) 设计并优化可满足等离子体运行的线圈电流波形并完成相关的放电模拟；

3) 确定最优化的极向场线圈、偏滤器线圈设计方案。

4) 对比 ITER baseline 和 CFETR 类似平衡位形和偏滤器位形的优缺点。

任务四：垂直不稳定性评估与控制（所有运行方案的评估）

1. 任务说明

本文档阐述了 CFETR 垂直不稳定性评估与控制研究相关所需考虑到的研究任务、限制条件、目标参数等相关内容。本课题主要针对 CFETR 等离子体的不同典型平衡，分析和评估垂直位移增长率，评估不同控制模型对于垂直位移的控制能力。在此基础上，开展内部线圈与被动结构的布局设计。最后分析垂直位移失控下的 halo 电流分布，评估内部部件上的电磁载荷，为 CFETR 真空室内部部件设计提供物理上的参考。

2. 研究内容

本课题通过数值模拟和实验验证的方法，开展 CFETR 垂直不稳定性评估与控制。在 TSC、DINA、Toksys 等成熟的托卡马克等离子体演化模拟程序的基础上，定制 CFETR 垂直不稳定性分析评估模块，研究 CFETR 的内部线圈、内部部件、等离子体宏观参数与垂直不稳定性之间关系；优化 CFETR 内部线圈和被动结构的布局；设计 CFETR 等离子体垂直位置的控制方法，并通过已有实验装置实验验证方案的可行性，通过数值模拟评估对控制线圈的能力的需求；开发 halo 电流计算模块，经实验数据验证后，预测垂直不稳定失控后 halo 电流的分布，进而进行应力分析，为装置的结构分析提供反馈。

| | PFUS | BTO (T) | BETAN | FBS | NE/N_GW |
|--------------------|--------|---------|-------|------|---------|
| L-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.6 |
| H-MODE STEAY-STATE | 100 MW | 5 | 1.5 | 0.3 | < 0.5 |
| H-MODE INDUCTIVE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.8 |
| H-MODE STEAY-STATE | 500 MW | 6 | 2.0 | 0.4 | < 0.6 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 1.0 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1 GW | 7 | 2.5 | 0.5 | < 0.8 |
| H-MODE INDUCTIVE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | < 1.2 |
| H-MODE STEAY-STATE | 1.5 GW | 7 | 3.0 | 0.75 | 1.0 |

需要对下列表格中的各种运行方案开展以下五个方面的内容研究：

- 1、模型的构建：根据目前线圈与真空室的设计构建 CFETR 的数字 tokamak 模型，

同时构建托卡马克等离子体垂直位移增长率分析模块,使用现有实验装置的实验数据校验模型;根据堆芯参数设计与位型设计,选取 CFETR 的典型位型,分析和评估垂直位移增长率;分析和识别 CFETR 垂直位移增长率的分布区间,以及与等离子体主要参数(I_p , R_c , l_i , β_{top} 等)的数值关系,为堆芯设计与位型设计提供反馈。

2、垂直位移的控制能力的评估:根据现有托卡马克装置使用的垂直位移控制方法,设计等离子体垂直位移控制模块(PID、Bangbang 等常规模型),开发 PID+Bangbang 等新型控制算法,通过现有实验装置的实验数据验证控制逻辑和算法的可行性;使用垂直位移控制模型模拟 CFETR 垂直位移控制过程,分析控制能力区间。

3、内部线圈和被动结构的设计优化:分析内部线圈参数和被动结构的材料(电阻和电感值)以及不同位置对等离子体垂直位移增长率的影响;优化内部线圈和被动稳定结构的布局,获得容忍的较小的垂直增长率;针对优化的内部线圈和被动稳定结构参数,评估对垂直位移增长率的影响。

4、halo 电流的评估:开展垂直位移控制失控的模拟,计算等离子体进去熄灭阶段大量能量进入装置时对装置产生的电流载荷与电磁力载荷。首先使用现有装置实验数据进行校验工作,与实验数据进行比对,验证其模型的合理性;在校验工作完成之后,将其推广至 CFETR 的模拟,开展 CFETR halo 电流的评估,得出 halo 电流的演化分布,并分析失控过程中真空室与内部部件的电流与电磁力,对真空室及内部部件设计提供参考。

5、模型间校核:当今,国内外主流的垂直不稳定评估与控制的程序,如 Toksys、TSC、DINA,采用的具体模型不尽相同。通过 Toksys、TSC、DINA 的相互验证,检验 CFETR 关于垂直位移增长率和控制能力的预测;通过 TSC、DINA 的相互验证,验证 halo 电流的评估,包括等离子体失控过程与真空室内部部件的电流与电磁力。

3. 考核指标

本课题针对研究内容,提出了五个方面的具体指标:

- 1) 构建模拟程序中 CFETR 垂直不稳定性分析模型。分析与评估 CFETR 不同典型位型的垂直位移增长率,提供 CFETR 垂直位移增长率的分布区间;
- 2) 构建等离子体垂直位移控制模块,评估控制器的控制能力,提供 CFETR 等离子体垂直位移控制区间与主动控制电源供电能力间的关系;
- 3) 分析内部线圈参数和被动结构对等离子体垂直增长率的影响,提供内部线圈和被动结构的优化方案,分析对应的垂直位移增长率区间及主动被动控制能力;
- 4) 开发 halo 电流模拟模块,提供 CFETR halo 电流空间上的演化分布,计算 CFETR 内部部件的电磁力;

-
- 5) 通过模型间的相互验证，比较模拟预测结果的准确性，分析模型计算间差别；
 - 6) 开展 ITER 垂直不稳定性研究工作的调研并与 CFETR 的研究结果进行比对，并对 CFETR 设计的优缺点进行评估。

任务五：偏滤器设计、优化及热流和粒子流评估及控制

1 任务说明

本课题的主要任务是设计可满足 CFETR 装置在聚变功率分别为 1GW 和 1.5GW 的高功率多种长脉冲运行条件下，具有较好的热和杂质排出能力的偏滤器几何位型及运行模式，并与 ITER 偏滤器设计进行全面比较。评估主要运行模式下到达偏滤器靶板的稳态及瞬态热流、粒子流及其对靶板材料的使用寿命。

2 研究内容

2.1 设计工具及模型的验证

在现有装置上开展设计工具（如 SOLPS, EPED1, DIVIMP, ERO, OEDGE, BOUT++, SD1D 等）及物理模型（如脱靶机制，边界杂质输运，抽气和充气，辐射控制等）的实验验证和对比工作，并完善和改进模型使其能更可靠地用于 CFETR 的偏滤器物理设计。

2.2 偏滤器运行模式设计及分析优化

通过大规模数值模拟探寻最优的一种或几种偏滤器运行模式（脱靶或者部分脱靶等），开展边界与芯部等离子体的兼容性研究，评估不同类型杂质对偏滤器脱靶以及台基区和芯部等离子体的影响，选取适用于 CFETR 的杂质辐射气体。并在现有的托卡马克装置上对这些偏滤器运行模式开展实验验证。

2.3 偏滤器几何位型设计优化

根据 CFETR 的基本参数，磁场位型和运行模式，开展 CFETR 偏滤器几何位型设计，包括靶板和 Dome 形状，位置，通过模拟比较不同结构的影响进行优化，同时与 ITER 偏滤器几何位型的优劣进行比较。研究及分析不同偏滤器几何位型和抽气对偏滤器靶板热负荷以及边界杂质的屏蔽效应的影响，探索 CFETR 应用新型先进偏滤器位型的可能性。

2.4 偏滤器材料寿命及杂质输运评估

根据偏滤器的设计方案和运行基本参数，对偏滤器面向等离子体材料的腐蚀与沉积开展预测模拟，评估偏滤器靶板的使用寿命及燃料滞留速率，同时预测壁材料杂质对芯部等离子体的影响，为芯部的集成模拟提供基础。

2.5 瞬态靶板热流评估

评估聚变功率约为 1GW 时的瞬态行为(ELM 爆发等)时到达偏滤器靶板的热流及粒子流,分析其对靶板材料的溅射损伤和热腐蚀对偏滤器靶板使用寿命的影响。

3 考核指标

1) 提供可靠的 CFETR 偏滤器物理设计工具及物理模型。

2) 确定至少两种能满足 CFETR 聚变功率分别为 1GW 和 1.5GW 的长脉冲运行的偏滤器几何位型,并与 ITER 偏滤器几何位型进行比较,同时给出偏滤器材料的选取方案。

3) 确定最优的偏滤器运行模式,并确保运行模式与芯部的兼容,边界上游的电子密度低于 0.65 倍的 Greenwald 密度极限。

4) 完成稳态运行条件下偏滤器靶板的热流、粒子流及其对靶板材料的腐蚀和溅射情况的评估分析。提出可行的控制方案,确保到达偏滤器靶板的最大热流不超过 10MW/m²,确保较低的靶板材料的腐蚀和溅射,以及较低的重杂质聚芯(如,钨杂质的浓度必须低于 1e⁻⁵)。

5) 给出 CFETR 瞬态事件发生时偏滤器靶板的热流、粒子流,及其对材料和部件的损伤,使用寿命影响的评估报告。

任务六：粒子控制

1. 任务说明

根据堆芯参数设计的等离子体运行模式和参数，分析评估 CFETR 聚变燃烧等离子体稳态运行对聚变燃料补充、密度稳定控制、粒子有效排出以及氚滞留控制的要求，探索适合 CFETR 高功率、聚变燃烧等离子体稳态运行的粒子控制的先进运行模式和参数，包括高加热功率和聚变功率条件下的芯部稳态加料、超高的燃料粒子流和氦灰粒子流的有效排出、以及氚滞留的控制与清除。研究各种加料模式和参数、粒子排出对芯部等离子体约束性能及边界等离子体参数分布的影响，分析与 CFETR 高功率聚变燃烧等离子体的兼容性，在现有的高功率长脉冲实验装置 ($>3\text{MW}$, >100 秒) 上开展验证，对堆芯参数设计提出合理的优化建议。**重点放在各个加料及其他粒子调控系统的详细设计方面。**

2 研究内容

2.1 实验研究当前高功率长脉冲实验装置的粒子控制

在现有实验装置上，实验研究高功率长脉冲 ($>3\text{MW}$, >100 秒) 运行中不同加料方式的加料效率、偏滤器粒子流的排出速率、稳态运行中的燃料滞留速率、等离子体运行参数对粒子控制的影响、各种粒子控制方法和参数对等离子体约束性能及边界等离子体参数分布的作用、各种壁处理方法和参数对壁滞留的清除效率，全面分析总结现有实验装置上实现粒子有效控制的方法和参数。

2.2 分析评估 CFETR 高功率聚变等离子体稳态运行中的粒子控制

根据 CFETR 堆芯参数和运行模式的设计，从维持等离子体密度、补充聚变燃烧反应的燃料损失、平衡边界热流和粒子流、氦灰粒子的排出、放射性氚燃料的安全与成本等多个方面考虑，分析评估 CFETR 高功率聚变等离子体稳态运行对粒子控制的要求，包括各种加料方式的加料效率和加料速率、燃料粒子和氦灰粒子的排出速率、氚的滞留速率以及氚滞留的清除周期和效率等。

2.3 加料模式的设计及加料效率的分析和优化

分析评估充气、超声分子束注入、弹丸注入等多种加料方式在高功率稳态运行条件下的加料效率，以及不同加料方式对于 CFETR 芯部和边界等离子体参数、再循环行为以及约束性能的影响，为 CFETR 的运行确定合理可行的加料模式与具体参数优化加料模式和参数，提高与 CFETR 堆芯参数的兼容性，在当前高功率长脉冲实验装置设计合理的实验进行模拟验证。

2.4 粒子排出速率的控制与优化

分析 CFETR 堆芯参数运行条件下的粒子排出速率，评估不同等离子体位型、偏滤器材料以及抽气机组配置等参数对粒子排出的影响，研究通过优化等离子体位型和边界参数及提高泵组抽速提高对粒子的排出能力，并在当前的高功率长脉冲实验装置上模拟验证，根据研究结果对 CFETR 真空系统的设计提出合理的要求。

2.5 氦滞留的有效控制与清除

在当前实验装置长脉冲高参数运行中壁滞留研究结果的基础上，根据 CFETR 堆芯参数设计，分析 CFETR 在各种可能的第一壁材料条件下的氦滞留速率，结合当前高功率长脉冲装置上壁滞留的研究结果，通过优化等离子体参数、加料及粒子排出等方法降低实时的氦滞留速率，从而对堆芯参数设计提出针对降低壁滞留的优化设计方案。开展强磁场下高效率的壁处理研究，如射频放电清洗和高频辉光放电清洗等，实现对氦滞留的快速清除。

3 考核指标

- 1) 给出 CFETR 上各种粒子控制手段相关的子系统的详细设计，并与 ITER 上的粒子控制系统的设计进行比对，评估 CFETR 粒子控制子系统设计的优缺点；
- 2) 对 CFETR 上粒子控制的相关参数进行详细评估，具体内容如下：
 - a) 完成现有装置上高功率长脉冲运行条件下 ($>3\text{MW}$, >100 秒) 粒子控制的各种方法和参数的全面分析总结，为确定 CFETR 的粒子控制方案提供基础参考和数据；
 - b) 完成 CFETR 对粒子控制需求的可靠分析和评估，包括加料效率和加料速率、粒子排出速率、氦滞留速率以及所需的氦清除周期及清除速率；
 - c) 设计 CFETR 的加料模式与主要参数范围，并评估加料模式和不同参数对 CFETR 运行性能的影响，确定先进加料模式的可行性；
 - d) 完成 CFETR 不同运行参数和真空泵组配置对粒子排出速率影响的可靠评估，为 CFETR 运行参数的选择和真空泵组的配置设计提供输入参数；
 - e) 完成 CFETR 聚变等离子体稳态运行中氦滞留速率的分析，确定能够满足氦滞留清除的可行壁处理方法和基本参数

任务七 MHD 不稳定性分析评估

1. 任务说明

本课题针对 CFETR 装置中 100MW~1.5GW 各种运行模式与破裂相关的 MHD 问题进行研究，为 CFETR 工程设计提供参数依据和优化建议。具体研究破裂避免、预测、控制、缓解等内容，确定 CFETR 无破裂稳定运行参数区域范围和边界，为 CFETR 实验上准确检测、识别破裂先兆和估算其后果提供理论数据，提供破裂缓解所需的射频电流驱动（如 ECCD）和外加磁场参数范围，提供 CFETR 破裂缓解的 MGI 气体注入的种类、位置、速度、数量等参数信息，明确 CFETR 上实现稳态小 ELM-H 模，应采用哪种或哪几种方法控制 ELM，提供 ELM 控制系统的物理和工程参数优化设计，给出无 ELM 的准静态 H 模（QH）运行区间。

2. 研究内容

（1）破裂避免、预测（相关磁流体模式分析）：

托卡马克中的破裂发生的相关 MHD 机制主要有新经典撕裂模、锁模、电阻壁模、VDE 模、边界局域模（ELM）等主要磁流体模式。

1) 对于 CFETR 装置，建立能够避免破裂的综合稳定参数区间；

2) 对于每种可能导致破裂的磁流体不稳定性，建立它们各自的线性和早期非线性时空模式特征，及其晚期非线性发展与破裂爆发的联系，用以预测实验中破裂的先兆特征和晚期后果。

（2）破裂控制及缓解：

控制：当今实验上主要通过射频电流驱动（如 ECCD）和外加磁场两大类方式抑制各种诱发破裂的磁流体不稳定性来实现破裂控制。其中，ECCD 已在 DIII-D 等实验上比较成功地应用于 NTM 的抑制，而外加磁场也在 DIII-D 等实验上通过直接和反馈补偿等方法实现了对误差场锁模、RWM、和 VDE 等的抑制和控制。这些抑制过程也已有相应的初步理论模型和数值模拟。为进一步掌握这些破裂控制方法的物理机制，并将其在 CFETR 上普及、推广，我们将分别应用和完善磁流体程序中的 ECCD 和外加磁场模型，用以模拟计算它们各自及同时对 NTM、锁模、RWM 和 VDE 的线性和非线性实时抑制过程，从而研究抑制机理和综合抑制效果。

缓解：目前实验上大破裂缓解的主要方式是 MGI (massive gas injection) 即通过杂质气体注入，诱发可为系统承受的小规模破裂，提前释放自由储能，从而达到缓解大破裂的目的。为了进一步理解 MGI 缓解破裂的机理，我们将继续运用和完善包含杂质辐射运输的

磁流体模型，用以模拟研究主要托卡马克装置上的 MGI 缓解破裂过程。其中，一方面，将研究破裂缓解中所诱发的具体磁流体不稳定性模式；另一方面，将探索如何模拟缓解破裂中晚期逃逸电子行为和电流熄灭（current quench）过程。

在以上研究基础上，理解和推广目前已有控制-缓解方案的适用范围，进而建立基于第一性物理原理的破裂控制和缓解方案。

（3）边界局域模（ELM）控制

研究边界磁拓扑结构（如磁共振及边界波加热等）对边界输运垒内部的湍流及输运的影响以及对 ELM 的影响，为 CFETR 装置提供扰动线圈的物理设计参数。

研究弹丸注入、超声分子束注入及杂质注入对台基结构及 ELM 的影响及抑制作用。同时分析不同控制方法的物理机制，形成较为完整的认识。

通过比较分析探寻适用于 CFETR 装置且能实现稳态的小 ELM-H 模的 ELM 控制模式，明确 CFETR 装置上将采用哪种或哪几种方法控制 ELM，并开展 CFETR 装置上 ELM 控制系统的物理和工程参数优化设计，并积极探索无 ELM 的准静态 H-模（QH）运行区间。

3. 考核指标

- 1) 分析 CFETR 上 100MW~1.5GW 各种运行模式下的 MHD 行为，并与 ITER baseline 的结果进行比对，同时从 MHD 不稳定性的角度去评估 CFETR 各种位形下优缺点；
- 2) CFETR 避免发生破裂的整体稳定运行参数区域范围和边界；
- 3) 为 CFETR 实验上准确检测、识别破裂先兆和估算其后果提供理论依据，例如各种磁流体模式线性和非线性发展的特征行为及其引起的破裂产物数值范围；
- 4) 提供 CFETR 破裂缓解的 MGI 气体注入的种类、位置、速度、数量等参数。
- 5) 提供实现 CFETR 破裂控制所需的，抑制各种诱发破裂的磁流体不稳定性的，射频电流驱动（如 ECCD）和外加磁场参数范围；
- 6) 明确 CFETR 装置实现稳态小 ELM-H 模，应采用哪种或哪几种方法控制 ELM，提供 ELM 控制系统的物理和工程参数优化设计，给出无 ELM 的准静态 H 模（QH）运行区间。

任务八 高能粒子物理（主要分析和防控风险）

1. 任务说明

高能课题研究内容包括两部分，分别是（i）CFETR 中高能粒子与等离子体波和不稳定性的相互作用；（ii）CFETR 中高能粒子的约束和输运。

内容（i）主要研究在 CFETR 参数下，高能粒子与磁流体不稳定性（包括锯齿震荡、新经典撕裂模、电阻壁模等）和集体模式（主要是阿尔芬本征模）的相互作用，即高能粒子对等离子体波和不稳定性的影响以及等离子体波和不稳定性对高能粒子重新分布、约束的影响。在此基础上，研究高能粒子（特别是 alpha 粒子）密度空间分布和能谱分布对等离子体约束性能的影响，为 CFETR 的平衡位型等的优化提供参考。内容（ii）主要研究在 CFETR 参数下，高能粒子在波纹磁场中的损失、磁流体不稳定性 and 集体模式对高能粒子的重新分布和损失的影响以及氦灰的约束和输运，为 CFETR 铁素体钢的布置、平衡优化提供参考以及长脉冲燃烧等离子体运行及第一壁、线圈、包层模块的优化设计提供数据支持。

2. 研究内容

2.1 高能粒子与等离子体波和不稳定性相互作用

2.1.1 高能粒子与磁流体不稳定性相互作用

- 针对 CFETR 1GW、1.5GW 的 6 种模式的平衡位型存在的磁流体不稳定性，研究高能粒子对这些磁流体不稳定性（包含锯齿震荡、新经典撕裂模、电阻壁模等）的影响，分析如何利用高能粒子控制磁流体不稳定性；
- 研究磁流体不稳定性对高能粒子重新分布和损失的影响，为 CFETR 的平衡优化提供参考。
- 研究高能粒子激发的高能粒子模以及高能粒子模对高能粒子分布和损失的影响，分析如何避免高能粒子的损失。
- 在上述基础上，总结 CFETR 1GW、1.5GW 的 6 种模式下，研究高能粒子（特别是 alpha 粒子）密度空间分布和能谱分布对等离子体约束性能的影响，为 CFETR 的平衡位型等的优化提供参考。

2.1.2 高能粒子与 Alfvén 波的相互作用

- 针对 CFETR 1GW、1.5GW 的 6 种模式的平衡位型存在的阿尔芬连续谱，研究高能粒子激发各种 Alfvén 本征模（例如 BAE、TAE、EAE 等）的增长率、阻尼率、频率、模式结构等以及高能粒子与 Alfvén 本征模的非线性相互作用；
- 研究高能粒子激发的 Alfvén 本征模对高能粒子的径向输运及速度空间的重新分布的影响，尤其是 Alpha 粒子的剖面分布变化及控制规律，从而得到维持长脉冲燃烧等离子体运行时剖面分布需要的限制条件，同时，对高能粒子产生的相应的能量输运给出定性或定量预测，为 CFETR 实现自持燃烧条件提供参考。

2.2 CFETR 中高能粒子的约束和输运

2.2.1 高能粒子的波纹场损失

- 利用已有的物理模型和程序，计算 CFETR 参数下高能粒子的波纹场损失，并与国际上其它托卡马克和 ITER 中的波纹场损失进行对比，研究优化的等离子体参数减少波纹场损失，计算波纹随机扩散自由区域，利于运行参数的选择。
- 由于为了减小波纹场损失，目前铁素体刚插件的方案为最佳选择。计算铁素体刚插件下高能粒子波纹场损失，从而优化线圈及包层模块设计。

2.2.2 等离子体波和不稳定性对高能粒子约束和输运的影响

目前，在已有的结果下，认为铁素体刚插件可大大减低波纹场损失，使得高能粒子损失造成的热通量远小于第一壁材料的热负荷，而等离子体波和不稳定性会影响高能粒子的重新分布和输运，因而与第一部分研究高能粒子与等离子体波和不稳定性相互作用的研究结合，重点研究磁流体不稳定性、高能粒子模、集体模式（主要是 Alfvén 本征模）对高能粒子的分布和损失的影响，分析如何避免高能粒子的损失。

2.2.3 氦灰的约束和输运

由于氦灰在等离子体中心的过分约束会稀释燃料，因而需要避免氦灰在等离子体中心的堆积。研究利用波纹场、等离子体波和不稳定性来增加氦灰的输运。

3. 考核指标

- 1) CFETR 1GW、1.5GW 下 6 种运行方案下，高能粒子对低频 MHD 模式的影响，从而优化 CFETR 的平衡；低频 MHD 模对高能粒子的重新分布和输运的影响，特别是 Alpha

粒子的剖面分布影响规律；

- 2) CFETR 1GW、1.5GW 下 6 种运行方案下，研究高能粒子激发各种 Alfvén 波的性质，以及 Alfvén 波对高能粒子的输运，尤其是 Alpha 粒子的剖面分布变化及控制规律，给出维持长脉冲燃烧等离子体运行时剖面分布需要的限制条件，为等离子体控制系统的设计提供需求依据；
- 3) CFETR 1GW、1.5GW 下 6 种运行方案下，研究高能粒子激发的高能粒子模的性质，以及相应的高能粒子模对高能粒子分布和输运的影响规律；
- 4) 在上述高能粒子与磁流体不稳定性 and 集体模式（alfven 本征模）相互作用的研究中，与 ITER 中的相应物理进行对比，讨论 CFETR 与 ITER 运行方案的优缺点；
- 5) 计算波纹损失导致的第一壁平均最大热负荷沉积，为第一壁材料选择提供参考；从波纹度限制出发，对线圈及包层模块设计优化（例如增加铁素体钢插件等弥补波纹场的部件）给出约束条件；
- 6) 磁流体不稳定性 and 集体模式对高能粒子的分布和损失的影响规律，分析如何避免高能粒子的损失。

任务九 诊断系统物理设计

1 任务说明

托卡马克上的诊断系统一般可按照不同的功能分为装置运行、安全保护和物理解三类。本任务的主要任务是根据 CFETR 装置 duty time 为 0.3-0.5，聚变功率为 1GW 的运行条件，设计一套可保障 CFETR 运行和评估 CFETR 聚变表现的诊断方案，对诊断方案进行初步集成研究。并对某些诊断系统开展可能的预研。

2 研究内容

对于 CFETR 装置，由于其与 ITER 装置科学目标的差异，可以将所需测量的物理量分为三类：1. 装置保护。2. 运行控制。3. 物理解。提出一套测量量及其参数需求，是本任务的首要研究内容。其次，根据测量物理量及其参数需求，找出相应的诊断技术。对于难以推广到聚变堆中的测量技术，需要找到替代方案并进行技术研究。此外，还需要对诊断系统做出一定程度的集成研究，得到初步的面积占用估算结果。最后，需要将此设计方案与 ITER 诊断系统设计方案进行比较与总结。

2.1 测量物理量的提出

基于 ITER 装置诊断系统的设计经验和目前 DEMO 装置的诊断系统设计思想，为 CFETR 1GW 的运行模式设计一套测量物理量，这套测量量系统应当包括装置安全与运行控制的关键参数，以及可能影响装置运行的长期监测量。根据 CFETR 装置的科学目标，可以将测量物理量分为三类。1. 装置保护。2. 运行控制。3. 物理解。

例如装置保护类物理量，可能包含：（1）等离子体稳定性：等离子体比压，破裂率，边界局域模，异常事件如泄漏等。（2）热负荷（强度与位置）。（3）等离子体密度与电流：辅助加热条件。（4）聚变功率。（5）装置监控：停机监测，废气监测，偏滤器长期监测，灰尘监测，氦存量监测等。运行控制类物理量，可能包含：（1）等离子体平衡：形状与壁距离，误差场修正，电流分布及低有理面位置，电流驱动，旋转及压力分布。（2）等离子体燃烧控制：燃料粒子种类及纯度，燃料比例控制，不稳定性的影响，氦灰含量，氦增殖。（3）偏滤器状态监控：脱靶条件，辐射功率，边界局域模缓解或抑制，中性粒子含量。物理解类物理量，可能包含：高能粒子与阿尔法粒子含量及分布等。需要注意的是，诊断系统的测量量之外，还需要大量对装置运行如真空系统，电源系统等的监控，这里并未提及。

2.2 诊断技术的确定

基于提出的测量物理量列表，需要针对各项物理量，利用目前主要的几类诊断技术（磁

诊断，激光诊断，微波诊断，热辐射与中子诊断，光谱诊断，第一壁与运行诊断) 确定相应的诊断技术。诊断技术的确定，需要结合目前等离子体诊断研究的现状与前沿技术，并结合 ITER 与 DEMO 系统的相关设计经验。对于目前技术下难以推广到 CFETR 运行环境下的诊断，需要提出新的研发需求。

2.3 诊断系统在包层上的占用面积估算

对提出的诊断系统做出一定程度的集成，分析估算此诊断系统在装置增殖包层上占用的面积量级，为 CFETR 装置的主机及窗口设计提供初步的相关参考信息。

3 考核指标

1) 为 CFETR 1GW 运行模式提出一个测量物理量列表，列表中包含保障装置安全与运行控制所必需的测量量。

2) 基于测量物理量列表，提出一套相应的诊断技术列表。本列表应当包含一个最精简的诊断系统方案，和一个具有一定冗余度的诊断系统方案。同时，针对各项诊断技术提出可能的研发需求。

3) 基于诊断系统方案，利用已有的方法，对诊断系统在 CFETR 装置包层上将占用的面积进行估算（精确到 10 平方米量级），为装置主机的设计提供参考。

4) 根据本诊断系统的物理设计方案，与 ITER 的诊断系统设计方案进行比较与总结。

任务十 堆芯等离子体核反应研究(重点如何提高燃烧率,找到>3%燃烧率的方法)

1 目的

“堆芯等离子体核反应研究”系统需求文档(SRD)依据“中国聚变工程实验堆集成工程设计研究”项目的研究目标和要求,给出了本任务的研究内容、技术要求、与其它系统之间的界面接口、考核指标等,为开展任务研究、考核和验收提供指导。

2 范围

“堆芯等离子体核反应研究”适用与CFETR整堆的总体技术要求和中子学评价。

3 设计内容

堆芯等离子体核反应分布即聚变堆中子源分布是聚变堆核设计与分析的至关重要的输入条件。随着等离子体模拟计算水平的提高和聚变堆设计要求的提高,国、内外在聚变堆设计中逐渐采用分布源,特别是随着ITER进展,对不同位置部件设计要求的提高,ITER开发了适用于ITER核分析的中子源。研究堆芯等离子体核反应分布可以为聚变堆的核设计提供精确的中子源分布,从而为聚变堆的部件工程设计提供可靠的输入条件。

堆芯等离子体核反应研究的目的是实现由氘-氚等离子体分布到氘-氚中子源分布转换,根据等离子体的温度与密度分布,获得中子源分布。另外,根据等离子体物理模拟和工程设计需求,综合考虑加料、约束、壁处理、杂质控制等多方面的因素,通过优化提高DT反应率及聚变功率,为实现>3%燃烧率的方案探索提供数据支持。堆芯等离子体核反应研究的内容包括氘-氚等离子体中核反应的计算方法研究、CFETR标准中子源制作以及为探索>3%的燃烧率方案探索提供数据支持等方面的内容。

3.1 建立不同运行模式(L模、H模等)对应的等离子体氘氚反应率的三维数值计算模型。模型真实反映堆芯空间几何尺寸(大半径、小半径、拉长度、三角形变等)、等离子体参数(温度、密度、峰值因子等)和不同运行模式对应的等离子体分布特点(如H模时台基处等离子体分布)。

3.2 进行氘在等离子体中分布和对氘氚反应率影响的分析评估,提出CFETR氘浓度设计许可限值范围。一方面,根据氘在堆芯处约束物理模拟,得出不同运行模式下氘在堆芯中的浓度及分布。另一方面,计算分析不同氘等离子体浓度及分布时氘氚反应率和可实现的聚变功率。综合考虑CFETR设计要求,提出氘浓度设计许可限值范围。

3.3 进行杂质在等离子体中分布和对氘氚反应率影响的分析评估,提出CFETR设计中杂质限值要求。关注堆芯中心等离子体体和边缘等离子体处杂质的影响。

3.4 基于 CFETR 运行工况，建立包括氘氚等离子体、氦和杂质密度和温度分布的三维数值计算模型，得出 CFETR 堆芯中氘氚反应率空间分布和总聚变功率。

3.5 根据 CFETR 堆芯中氘氚反应率空间分布转换为具有中子能量、角度分布的三维中子源，并制成满足中子学输运计算要求的中子源格式。

3.6 综合考虑堆芯氘氚等离子体、氦、杂质等参数，结合粒子约束优化、加料、壁循环等方面的优化结果，探索提高氘氚燃烧率的途径和手段。

4 技术要求

1) 根据堆芯等离子体的参数，结合最新的氘-氚聚变反应截面库，采用数值模拟计算等方法开发堆芯氘-氚离子体核反应率计算方法；

2) 根据 CFETR 堆芯等离子体参数计算模拟堆芯中子源分布，获得不同运行状态下 CFETR 堆芯中子源。

5 任务考核

考核指标：1) CFETR 堆芯氘-氚等离子体核反应率计算方法研究报告；

2) 提供满足中子学设计分析程序（如 MCNP）的 CFETR 堆芯具有中子密度、能量、角度分布的三维中子源；

3) 优化和提高 DT 反应率及聚变功率的分析报告；

4) 提供精确的氘-氚反应率数据并为探索>3%的燃烧率方案探索提供数据支持；

5) 完成堆芯等离子体核反应研究的概念设计评审、初步设计评审和最终设计评审。

任务十一 包层和屏蔽设计（详细方案设计）

1 目的

这个文件的目的是定义包层与屏蔽设计的目标、设计约束、技术要求，在要求的功能、规定的设计约束、和设计要求的范围内，开展 CFETR 包层与屏蔽设计工作的内容和验收要求。

2 设计目标、设计约束与设计要求

2.1 设计目标：

设计出既可在 Phase-I 阶段运行、也可在 Phase-II 阶段运行的包层方案，在功能上满足两个阶段氦生产与增殖（ $TBR \geq 1.1$ ）要求、提取能量发电要求、屏蔽中子保护真空室和超导磁体要求，以及内、外包层扇段能满足从上窗口垂直操作与维护要求，功能上也需考虑在线更换增殖材料。

2.2 设计约束：

- (1) CFETR 堆芯参数为大半径 7.2m, 小半径 2.2m, 聚变功率范围在 200MW(Phase-I) ~1.5GW(Phase-II),
- (2) 偏滤器几何以外的区域是包层的设计空间，包层在径向由氦增殖包层和屏蔽层两部分构成，内包层（高场侧）和外包层（低场侧）被分配的最大径向尺寸分别为 0.8m 和 1.2m;
- (3) 在径-极面内分为内包层和外包层两个分段，在 CFETR1/16 扇段内，内包分段层在环向分为 2 块、外包层分段在环向分为 3 块，满足内、外包层分段分别从 CFETR 上窗口垂直进行操作与维护。
- (4) 来自等离子体热流密度，假设平均 $0.5\text{MW}/\text{m}^2$, 峰值 $1\text{MW}/\text{m}^2$ （如果边界物理能提供第一壁的热负荷参数，以边界物理提供参数为准）

2.3 设计要求：

- (1) 在偏滤器以外空间全部安装包层（氦增殖包层+屏蔽），氦增殖率 ≥ 1.1
- (2) 内包层空间有限，增殖包层与屏蔽层、母管一体化设计
- (3) 外包层增殖包层与屏蔽层、母管可以分离设计，也可以一体化设计
- (4) 偏滤器后部屏蔽单独设计

- (5) 内、外包层热工水力学设计确保包层结构温度与增殖剂温度低于材料许可限值，且使得增殖区温度高于释氦温度，冷却剂出口温度高、压降小，
- (6) 内、外包层结构设计满足 RCC-MRx 或 ITER-SDC-IC 参照标准，位移小于包层极向、环向之间间隙设置，
- (7) 包层提供足够的屏蔽能力，使得真空室钢在服役期内的辐照损伤小于 2.7dpa，He 的产生率低于 1appm；包层与真空室、热屏蔽组成的内屏蔽系统确保 TFC 磁体的中子辐照满足以下限值（参照 ITER 限值）：
 - (a) 超导磁体线包上快中子注量 ($>0.1\text{MeV}$) $<1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ ；
 - (b) 绝缘层上快中子 ($>0.1\text{MeV}$) 注量 $<5 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$
 - (c) 绝缘层上辐照剂量 $<10\text{e}^8 \text{ Gy}$
 - (d) 超导磁体钢盒上核热率峰值 $< 2 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^3$
 - (e) 在导体上的核热率峰值 $<1 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^3$
- (8) 包层结构功能可以实现在线更换增殖剂，
- (9) 包层在 VDE 事件、LOCA、LOFA 事故下，确保结构安全、缓解事故后果

3 工作内容

| |
|---|
| 1. 包层物理、热工水力学、结构设计、母管系统设计，即可在 Phase-I 运行，也能过度到 Phase-II 运行， |
| 2. 包层在 Phase-I 和 Phase-II 工况下三维全包层中子学、热工水力学、温度场分析、结构应力评价， |
| 3. 结合 CFETR 真空室、热屏蔽设计与材料选择，开展包层屏蔽能力评价，满足 Phase-I 和 Phase-II 阶段的屏蔽要求 |
| 4. 包层安全性能评价 |

3.1 包层功能与方案设计

依据 2 节中的设计目标、设计约束、与设计要求，通过中子学设计、热工水力学设计、结构功能设计，设计出在功能上满足产氦、排热发电、屏蔽、换料要求的包层（增殖包层和屏蔽层）结构方案，包括冷却剂在包层内的流动方案，氦吹扫气在包层内的吹扫方案，冷却剂母管，增殖剂在线换料方案；

3.2 包层性能评价

依据包层（氚增殖包层+屏蔽层）方案设计，开展三维中子学分析，验证包层在 Phase-I 和 Phase-II 阶段氚增值率和核热的变化，对包层开展三维全模型热工水力学流固耦合分析和热机械性能分析，评估包层在 Phase-I 和 Phase-II 运行阶段的可行性，在此基础上对包层方案进行优化。

2.3 包层屏蔽能力评价

结合优化的包层（增殖包层+屏蔽层）设计方案、偏滤器后面的屏蔽层设计、CFETR 中子学模型，对 CFETR 真空室、超导磁体、窗口区包层后面的材料的 dpa 损伤、气体产生率、中子通量、中子注量、核热率、吸收剂量的时空分布进行分析，依据真空室和 TFC 的辐照限值，评价包层屏蔽能力，参数化分析管道贯穿、连接件座、间隙等对包层屏蔽的影响，在此基础上对屏蔽方案进行优化。

2.4 包层安全性能研究

评估在等离子体事件和假设初因事件（LOCA、LOFA）下包层（增殖包层+屏蔽）的安全性，包括结构安全、热工安全、化学反应安全，分析这些事件下包层和屏蔽结构温度、应力的时空演化，提出缓解策略和设计改进方案。

4 考核指标

- 1) 在规定的设计约束条件下，完成包层（增殖包层+屏蔽层）初步设计，满足本文件 2 节中设计目标和要求，通过专家评审
- 2) 提交包层（氚增殖包层+屏蔽层）的设计报告、设计模型、装配设计图纸、零件图纸，提交针对 Phase-I 和 Phase-II 运行阶段的包层性能分析报告（模型描述、载荷条件、假设条件、边界条件、分析结果、分析模型）以及分析模型和计算输入文件
- 3) 提交在等离子体 VDE 事件下包层结构抵御瞬态电动力能力的评价报告；提交假设初因事件（LOCA、LOFA）下包层热工安全分析报告；同时提交计算输入文件、分析模型
- 4) 提交 CFETR 真空室、超导磁体、窗口内部件的材料的辐照损伤、气体产生率、快中子通量、快中子注量、核热率、吸收剂量和各维护区域的放射性剂量等核分析报告。

任务十二辐射场计算研究（各区域在不同运行时段的辐射、活化、放射性剂量分析）

1 目的

本文件规定了“辐射场计算研究”中的辐照方案定义，计算工具和数据库要求，工作内容，技术要求，该项研究的结果为设计人员开展材料选型、优化和评价，CFETR 运行、维护与安全保障提供重要依据。

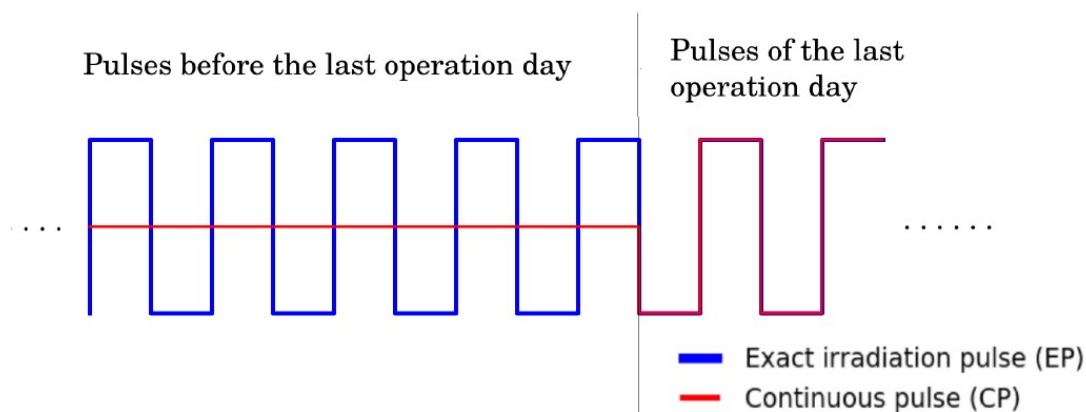
2 范围

“辐射场计算研究”适用于 CFETR 装置与人员的安全评价。

3 辐照方案，计算工具，与数据库

3.1 辐照方案

CFETR 在 Phase-I 阶段以 200MW 聚变功率运行 10 年，在 Phase-II 阶段以 1GW 聚变功率运行 10 年，CFETR 运行方案是长脉冲/稳态运行，负荷因子 0.3~0.5。假设辐照方案为如下图所示的连续脉冲运行方案，即在停堆前一日的堆是按 50%功率连续运行，最后一天按精确的脉冲进行，假设一个脉冲为 1 小时。



3.2 计算工具与数据库

中子输运计算应用 MCNP 程序，核数据库为 IAEA 聚变评价数据库 FENDL3.0，活化程序应用 FISPACT2007 以上版本，活化数据库为欧洲活化数据库 2007 以上版本

4 工作内容

| |
|---------------------------------|
| 1. 建立 3D 全堆（含生物屏蔽外）MCNP 中子学计算模型 |
| 2. CFETR 中子通量分析 |
| 3. 材料活化演化分析（固态、液态、气态） |
| 4. 停堆剂量演化分析 |
| 5. 辐照剂量场迁移 |

4.1 CFETR 中子学模型的开发

根据 CFETR 主机各系统部件的工程设计几何和材料选择，包括包层、偏滤器、真空室、TFC、中心螺管、PFC、装置上、中、下窗口及延伸段、冷屏顶端、冷屏基座、中性束等部件，以及生物屏蔽内外相关区域建筑的几何和材料成分，开发出 CFETR MCNP 标准中子学模型（几何卡、材料卡、中子源卡），用于后续的中子运输、材料活化分析、停堆剂量研究；

4.2 CFETR 中子通量分布分析

应用 MCNP 进行 CFETR 全堆的中子运输模拟，获得 CFETR 在 Phase I 和 Phase II 阶段的精细的中子通量场分布，

4.3 CFETR 材料活化分析

应用 MCNP 和 FISPACT 进行 CFETR 部件使用的固体材料、液体（主要是水）、气体开展活化分析，系统地获得全堆所用材料在不同时刻的活化特性，包括放射性活度、衰变余热、吸收剂量、活化路径、清洁解控因子等，能预测 CFETR 在 Phase I 和 Phase-II 期间的活化演化进程和主要核素对活化的贡献；

4.4 CFETR 停堆剂量分析

材料因中子辐照而活化，停堆后继续发射光子，形成光子场。可以应用一步法和两步法停堆剂量计算方法和程序，对 CFETR 在 Phase-I 阶段、Phase-II 阶段不同运行时刻停堆之后的停堆剂量场的演化。

4.5 放射性迁移分析

水是重要聚变堆辅助系统冷却剂， ^{16}O 在聚变中子的辐照下生成放射性强度较强的 ^{16}N 和 ^{17}N ，虽然其衰变时间很短，但随着水冷却剂的流动，对冷却剂沿线环境造成辐照，另外活化腐蚀产物也随冷区剂流动产生迁移，此外，维护、更换活化部件，在其运输过程中，也因发射光子对环境产生辐照，需要对其运输路径的环境进行分析。

5 任务考核

- 1) 获得CFETR在Phase-I和Phase-II运行时的中子通量场数据和分布图,提交报告,通过评审;
- 2) 获得CFETR在Phase-I和Phase-II期间全堆材料活化演化数据,提交分析报告和全堆不同时刻材料活化图谱,通过评审;
- 3) 获得CFETR在Phase-I和Phase-II期间停堆剂量演化数据和图谱,提交分析报告,,通过评审;
- 4) 获得CFETR在Phase-I和Phase-II期间水冷却剂活化和活化腐蚀产物总量,提交分析报告,通过评审;
- 5) 获得主要内部部件维护运输过程中,部件光子剂量场迁移对周围环境影响的数据,提交分报告,通过评审。

任务十三 CFETR 核心参数设计

1 目的

“CFETR 核心参数设计”系统需求文档（SRD）依据“中国聚变工程实验堆集成工程设计研究”项目的使命、研究目标和要求，给出了本任务的研究内容、技术要求、与其它系统之间的界面接口、考核指标等，为开展任务研究、考核和验收提供指导。

2 范围

“CFETR 核心参数设计”适用与 CFETR 整堆的总体技术要求。

3 设计内容

CFETR 是一个涉及许多学科的复杂系统，涉及到上万个核心参数与系统要求，而且这些核心参数和系统设计之间相互影响，任何一个核心参数的变动可能都会影响到整个系统的设计变化，因此，在开展 CFETR 工程设计的初期，首先就应该根据堆芯物理设计、装置主机概念、辅助系统功能等方面，确定、优化和固化 CFETR 的核心参数和系统要求，提出 CFETR 在工程设计阶段的总体技术要求，并作为各子系统的工程设计的顶层技术要求文件，用于指导整个 CFETR 的设计，避免后期由于核心参数的变动影响整个项目的开展。

首先从 CFETR 使命、目标出发，设计科学研究的具体技术路线和方案以及各阶段的科学技术目标，针对这些目标，提出工程设计的要求。从物理设计出发，给出 CFETR 一级核心参数。

CFETR 核心参数设计完成后，可以获得自治的 CFETR 核心设计参数，形成 CFETR 核心参数设计和系统要求报告并通过专家评审。CFETR 核心参数设计和系统要求报告将作为 CFETR 的整体设计和子系统设计的基础要求文件供子系统设计使用与遵守，类似 ITER-Plant requirement。

4 技术要求

本任务根据 CFETR 设计使命、目标和为了完成使命、目标所采取的技术路线，开展以下研究：

- 1) 提出 CFETR 科学目标和分期实验计划
- 2) 提出 CFETR 在工程设计阶段的技术要求，并作为顶层技术文件要求各子系统的工程设计必须遵守且满足该文件规定的技术要求；
- 3) 基于 CFETR 设计目标，对 CFETR 项目进行描述，包括系统核心参数、所属子系统描述等；

-
- 4) CFETR 的功能要求描述, 包括建造、集成任务、运行状态、维护和升级、去活化等;
 - 5) CFETR 的布局要求, 包括管理模式、建造场地的总体规划、窗口配置功能、诊断位置等;
 - 6) CFETR 的运行要求, 包括设计寿命、脉冲次数、用电要求、运行日程、RAMI 要求、检测及维护条件、人员保护要求等;
 - 7) 运行的安全准则、重大事故态、应急处理等对策
 - 8) CFETR 的环境要求、安全要求和健康要求等。

5 任务考核

考核指标

- 1) 提供 CFETR 项目集成工程设计的总体技术要求报告, 并通过专家评审。

成果要求

- 1) 根据堆芯参数和 CFETR 项目目标, 确定 CFETR 项目核心参数和设计要求, 完成 CFETR 项目集成工程设计的总体技术要求报告。

任务十四 CFETR 子系统参数与设计

1 目的

“CFETR 子系统参数与设计”系统需求文档（SRD）依据“中国聚变工程实验堆集成工程设计研究”项目的研究目标和要求，给出了本任务的研究内容、技术要求、与其它系统之间的界面接口、考核指标等，为开展任务研究、考核和验收提供指导。

2 范围

“CFETR 子系统参数与设计”适用与 CFETR 主机及各个辅助系统的总体技术要求。

3 设计内容

由于聚变堆是一个十分庞大的复杂系统，涉及到上百个不同类型的子系统，不同子系统之间在物理界面上和功能参数上可能会相互影响，一个子系统的设计变动可能会影响到不同其他系统的设计，因此，在开展 CFETR 工程设计的初期，在 CFETR 核心参数设计的基础上，需要对每个子系统的参数设计进行细化，并对子系统之间的界面进行详细定义和匹配，并不断动态管理，避免后期出现不同子系统之间参数和界面不匹配的问题。

基于 CFETR 在工程设计阶段的技术要求文件，开展子系统的功能描述并确定实现该功能所需要的关键参数；确定子系统、结构和部件的分级、子系统边界与界面等；确定子系统的设计要求，包括通用和特别要求等；确定子系统的安全要求，包括安全设计准则、监控、认证、安全相关的运行和程序、环境及人员安全等；确定子系统的运行与维护要求等。

4 技术要求

本任务根据 CFETR 设计目标和工程设计要求，针对每个相关子系统，开展的研究内容包括：

- 1) 基于 CFETR 目标、科学研究计划和设计要求，评估主机部件和各个子系统的功能、基本结构与配置、设计基本条件及界面等系统功能与物理要求，包括建造、集成任务、运行状态、维护和升级、去活化等阶段；
- 2) 基于该子系统功能和边界，评估该子系统的设计要求，包括结构、机械、防火、供电、仪控、绝缘、真空、热管理、电磁、安装及装配等设计要求；
- 3) 基于该子系统功能及设计要求，评估该系统的安全设计准则、安全限制、安全相关的仪控、检测、环境及人员安全检测等安全要求；
- 4) 根据 CFETR 的布局要求，包括管理模式、建造场地的总体规划、窗口配置功能、诊断位置等，评估各个子系统的运行与维护等要求，特别是核过程条件下，使用

RH 的兼容性；

- 5) 根据 CFETR 的运行要求，给出各个辅助系统设计寿命、脉冲次数、用电要求、运行日程、RAMI 要求、检测及维护条件、人员保护要求等；
- 6) 每个运行的安全准则、重大事故态、应急处理等对策
- 7) 根据 CFETR 的环境要求、安全要求和健康要求等准则，提出各个辅助系统对连锁保护的要求。

5 任务考核

考核指标：提供 CFETR 子系统参数与设计要求报告，并通过专家评审。

成果要求：根据堆芯参数和 CFETR 设计目标和系统要求，确定各子系统参数与功能，完成 CFETR 子系统参数与设计要求报告、子系统界面和界面参数管理流程。