

题目编号：CS-202604

# 四代核电钠冷快堆乏燃料池冷却水高精度净化关键装备研发比赛方案

## 一、发榜单位

中核霞浦核电有限公司

## 二、题目名称

四代核电钠冷快堆乏燃料池冷却水高精度净化关键装备研发

## 三、题目介绍

乏燃料池冷却水净化是各类核电站共性的关键技术需求。无论是目前全球装机规模最大的压水堆(PWR)、沸水堆(BWR)等第二、三代堆型，还是代表未来核能方向的第四代核电技术(涵盖钠冷快堆SFR、铅冷快堆LFR、熔盐堆MSR、气冷快堆GFR等)，乏燃料组件卸出后均需在乏燃料池中长期冷却储存，对池水水质净化的技术要求高度相似，均面临腐蚀产物颗粒去除、水质长期维护、辐射环境下设备可靠性等核心挑战。本题目聚焦第四代钠冷快堆乏燃料池冷却水净化的特定技术难点展开攻关——在核电站运行过程中，为提升燃料组件性能，组件外套管材料由传统奥氏体不锈钢更换为先进的铁素体-马氏体钢(简称铁马钢，Fe/M钢)。铁马钢具有优异的中子学特性和机械性能，但其在乏燃料池冷却水环境中的腐蚀速率明显高于传统材料，由此产生的腐蚀产物净化问题具有代表性和挑战性。

第四代钠冷快堆乏燃料组件从反应堆换出后，需经过组件清洗，然后进入乏燃料池进行冷却。乏燃料池冷却净化系统通过循环冷却水（流量约  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ ）和净化回路（流量约  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ）实现对乏燃料的持续冷却和池水水质维护。然而，铁马钢外套管在池水中产生的腐蚀产物会随冷却循环水系统带入乏池，导致冷却水中悬浮杂质、腐蚀产物颗粒浓度升高，若不能有效去除，将造成以下严重问题：

1. 降低池水透明度，影响乏燃料组件的可视化监测和操作安全；
2. 悬浮颗粒可能吸附放射性核素，增加放射性水平和环境风险；
3. 影响下游除盐系统和离子交换树脂使用寿命，增加运维成本；
4. 颗粒物累积可能堵塞管道和设备，威胁系统长周期安全运行。

根据乏池水化学指标要求，需将池水净化处理后满足以下严格标准：腐蚀产物（含悬浮杂质） $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ ，透明度 $\geq 95\%$ ，放射性浓度 $\leq 1000 \text{ Bq/L}$ ，pH 值 $\geq 6.5$ ，Cl 离子 $\leq 100 \text{ } \mu\text{g/L}$ ，电导 $\leq 5 \text{ } \mu\text{S/cm}$ 。该水质控制标准对净化系统的分离效率、可靠性、抗辐照性能提出了极高要求。

本题目要求参赛者以乏燃料池冷却水净化为工程基准场景，设计开发高效、可靠、经济的固液分离净化系统。该系统需能

在核辐射环境下长期稳定运行，高效去除冷却水中的微细腐蚀产物颗粒和悬浮杂质，确保池水水质满足运行要求，保障乏燃料冷却系统的长周期安全运行。同时，鼓励参赛团队论证所提方案对压水堆等其他堆型乏池净化需求的适应性，具有更广泛推广价值的作品将在评审中给予额外加分。

本题目具有鲜明的工程应用导向，要求参赛者不仅具备扎实的理论基础，还需具有工程实践能力和创新精神，设计出可实际应用于核电站的净化系统方案。

#### **四、参赛对象**

学生赛道：2026 年 6 月 1 日以前正式注册的国内全日制非成人教育的普通高等学校在校专科生、本科生、硕士和博士研究生（不含在职研究生），以及全日制职业教育本科、高职高专在校学生，可通过学生赛道申报作品参赛。

高校青年教师在指导学生参赛的同时不得以参赛人员身份参加同一选题比赛。发榜单位及同发榜单位有相关隶属关系单位的青年不得参加本单位选题比赛。

参赛对象可以团队或个人形式参赛，每个团队不超过 10 人，每件作品可由不超过 3 名指导教师进行指导。可以跨专业、跨学校、跨单位、跨地域组队，但同一团队所有成员均应符合本赛道相关年龄、身份要求。每件作品只可由 1 所高等院校、科研院所或企业等作为参赛主体提交申报。

#### **五、答题要求**

参赛作品应包括以下核心内容:

### (一) 系统设计方案

参赛作品应包括以下核心内容:

1. 技术原理阐释: (1) 腐蚀机理解析模型: 建立腐蚀产物的生成、形态转化及粒径演化的理论模型, 结合必要的试验测试给出腐蚀速率的半解析表达式(综合考虑温度、pH、溶解氧等关键参数的影响)、或建立腐蚀速率预测的电化学数值模型。

(2) 分离技术原理: 深入分析乏池冷却水中腐蚀产物的物理特性(粒径分布、密度、形态等), 阐述所选分离技术的基本原理和作用机制。基于乏池水质特点和净化要求, 论证所选分离技术的科学性和先进性, 优先考虑可长周期稳定运行的物理分离方法, 避免化学药剂使用带来的二次污染, 避免需频繁更换的技术路线。

2. 关键装备设计: 提供净化系统核心分离装备的结构设计方案, 明确关键设备的尺寸规格、材料选择、处理能力等技术参数, 需考虑核辐射环境下的材料相容性和设备的长期耐久性。说明装备的再生方式、维护周期和运行可靠性。

3. 工艺流程开发: 基于关键装备特性, 提出完整的乏池冷却水净化工艺流程, 明确各处理单元的功能定位、技术参数和相互关系。说明工艺流程中的关键控制点和运行参数(如流速、压降、再生周期等), 提供工艺流程的优化方案和应对异常工况的措施。

4. 系统总体集成：说明净化系统如何与现有乏池冷却循环系统实现无缝对接，提供系统布置方案，包括管道设计、设备布局、空间优化等。阐述自动控制方案、安全联锁逻辑和应急响应机制，说明系统的启停操作、运行监测和故障诊断方案。

## （二）性能分析与论证

1. 分离效率：通过理论计算、仿真模拟或实验验证，论证系统对不同粒径颗粒物的去除效率，确保出水腐蚀产物含量  $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ ；

2. 系统可靠性：分析系统在连续运行、再生清洗、故障工况下的可靠性，提出维护方案和备用措施；

3. 经济性分析：对比现有技术（如膜过滤、精密过滤器等），分析本方案在设备投资、运行能耗、维护成本等方面的经济优势；

4. 抗辐照性能：说明系统主要材料和部件在乏池辐射环境（绿区，放射性浓度  $\leq 1000 \text{ Bq/L}$ ）下的适用性。

## （三）创新性与工程可实现性

1. 技术创新点：明确阐述相对于现有技术的创新之处，如新型分离机理、结构优化、智能控制等；

2. 工程实践基础：如有相关技术在其他领域的成功应用案例，应详细说明，并论证其向核电领域迁移的可行性；

3. 原型样机或中试装置：参赛团队提供原型样机、中试装置及模拟实验数据，作为技术可行性的有力证明。

#### **(四) 作品形式要求**

参赛作品应包含以下材料:

##### **1. 技术方案报告 (PDF 格式) :**

(1) 封面: 作品名称、参赛单位、团队成员、指导教师

(2) 摘要 (不超过 500 字)

(3) 正文: 包括问题分析、技术方案、性能论证、创新点说明、工程应用前景等 (正文字数 1.5~3 万字)

(4) 参考文献

##### **2. 设计图纸 (CAD 或 PDF 格式) :**

(1) 工艺流程图

(2) 主要设备结构图和装配图

(3) 系统布置图

##### **3. 演示材料 (PPT 格式) :**

(1) 用于终审现场答辩, 20~30 页

(2) 需包含技术原理动画、仿真结果展示等可视化内容

##### **4. 支撑材料:**

(1) 仿真计算报告和数据

(2) 实验测试报告和数据

(3) 原型样机照片或视频

(4) 相关专利、论文等知识产权证明

#### **六、作品评选标准**

评审将从以下五个维度进行综合评价, 总分 100 分:

(一) 技术方案科学性与先进性 (30 分)

1. 对乏池冷却水腐蚀产物和净化需求分析是否准确深入(5 分)
2. 所选分离技术原理是否科学合理,技术路线是否先进(10 分)
3. 工艺流程设计是否完整,各单元功能是否明确(8 分)
4. 主要设备参数设计是否合理,计算是否准确(7 分)

(二) 性能指标达标性 (25 分)

1. 分离效率能否满足腐蚀产物 $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ 的严格要求(10 分)
2. 系统处理能力是否满足  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  的净化回路流量需求(5 分)
3. 出水水质能否全面达到乏池水化学条件(5 分)
4. 系统压降、能耗等运行参数是否经济合理(5 分)

(三) 工程可实现性 (20 分)

1. 设备结构设计是否合理,加工制造难度评估(5 分)
2. 系统安装调试方案是否可行(3 分)
3. 材料在核辐射环境下的适用性论证是否充分(5 分)
4. 是否具有相关技术的工程应用实践或中试验证(7 分)

(四) 创新性 (15 分)

1. 技术原理或实现方法具有创新性(6 分)
2. 设备结构或系统集成具有创新性(5 分)

3. 相对现有技术具有明显技术优势（4分）

（五）经济性与可靠性（10分）

1. 设备投资、运行成本相对现有技术的优势（5分）

2. 系统可靠性设计，维护方便程度（3分）

3. 长周期运行能力分析（2分）

评分细则说明：

基础分：满足题目基本要求，方案完整可行，得 60-70 分

良好分：技术方案先进，性能指标优异，工程可实现性强，得 71-85 分

优秀分：技术方案创新，性能突出，具有工程应用实践或中试验证，经济性好，得 86-95 分

擂主候选：技术方案重大创新，性能指标全面优于现有技术，具备实际工程产品或应用业绩，经济效益显著，得 96-100 分

特别说明：对于能够提供可实际应用于核电工程的成熟产品或技术，并具有在其他工业领域成功应用业绩的参赛作品，在工程可实现性和可靠性评价中将给予重点加分。

## 七、作品提交时间

2026 年 5 月至 9 月上旬，各参赛团队选择榜单中的题目开展研发攻关，各高校、企业、科研机构等组织协调机构应组织学生和青年科技工作者参赛，安排专业人员给予指导，为参赛团队提供支持保障。



2026 年 9 月 15 日前,各参赛团队要向发榜单位完成作品提交,具体要求详见第五点第(四)条,并严格遵照发榜单位明确的提交规范执行。

2026 年 9 月 30 日前,由发榜单位完成初审,确定入围终审擂台赛的晋级作品和团队。

2026 年 10 月,发榜单位安排专门团队提供帮助和指导,各晋级团队完善作品。

2026 年 11 月,组织终审擂台赛,角逐“擂主”。

## **八、参赛报名及作品提交方式**

### **(一) 报名方式**

(1) 参赛选手登录“挑战杯”官网 [www.tiaozhanbei.net](http://www.tiaozhanbei.net),在“揭榜挂帅”擂台赛报名入口注册账号,登录大赛申报系统在线填写报名信息。报名信息提交后,下载打印系统生成的报名表。

(2) 申报人在报名表对应位置加盖所在学校或所在单位公章。

(3) 将盖章版报名表扫描件上传至报名系统,等待系统审核。请参赛选手注意查看审核状态,如审核不通过,需重新提交。

(4) 系统开放报名时间为 2026 年 5 月 30 日—6 月 30 日,逾期后系统将自动关闭报名功能。

### **(二) 作品提交方式**

参赛团队的作品提交形式、提交方式等具体要求见第五点第（四）条，提交作品材料到邮箱 [xnpcmyz@126.com](mailto:xnpcmyz@126.com)，邮件主题格式为“CS202604-作品名称-参赛单位-团队负责人”，邮件内容需包括团队负责人的联系方式。同时，各参赛团队在提交作品时，同步报送 1 份经报名系统审核通过的参赛报名表，报名表所有信息须与系统内填报内容完全一致。

## **九、赛事保障**

中核霞浦核电有限公司将为参赛团队提供全方位的支持保障：

### **（一）专家指导与技术答疑**

组建技术专家指导团队，及时解答参赛选手就题目技术背景、设计思路和工程实现方面的问题。

### **（二）成果对接与转化支持**

对于技术方案具有工程应用前景的参赛优秀作品，发榜单位将积极推荐参赛团队与公司相关部门对接，探讨后续技术合作、成果转化及产学研合作的可能性，为参赛小组提供更长远的发展路径。

## **十、设奖情况及奖励措施**

### **1. 设奖情况**

本选题设“擂主”1 个，特等奖 5 个，一、二、三等奖各 5 个。最终授奖数量视作品申报数量和质量情况动态调整。

### **2. 奖励措施**

“擂主”：税后奖金 10 万元/队

特等奖：税后奖金 2 万元/队

一等奖：税后奖金 1 万元/队

二等奖：税后奖金 5000 元/队

三等奖：税后奖金 2000 元/队

### 3. 奖金发放方式

比赛结束后，单位比赛专班工作人员与获奖团队取得联系，填写奖金申请表，待获奖团队提供银行卡详细信息后 1 个季度内，将奖金一次性发放至获奖团队提供的银行卡中。

## 十一、比赛专班联系方式

### 1. 专家指导团队

顾问专家：代老师，联系电话：0593-8708458

负责比赛期间技术指导保障。

### 2. 赛事服务团队

联络专员：苗老师，联系电话：0593-8709648

负责比赛期间组织服务及后期相关赛务协调联络。

### 3. 联系时间

比赛期间工作日（9:00-17:00）

## 附：发榜单位简介

中核霞浦核电有限公司成立于 2015 年，是中国核工业集团有限公司全资子公司，承担着我国首座第四代核电快堆工程的建设和运营任务。该项目采用钠冷快中子反应堆，是中国核工业走向世界前沿的标志性工程。公司拥有一支专业的核电技术团队，在四代核电钠冷快堆设计、建造、调试等方面积累了丰富的经验，致力于打造国际一流的快堆核电站，为我国核电技术创新和能源结构优化做出重要贡献。

作为第四代核电技术的工程，快堆在提高铀资源利用率、降低长期放射性废物产生量、增强固有安全性等方面具有显著优势，可将天然铀资源利用率从目前的约 1%提高至 60%以上，是我国四代核电技术的重要实践，对实现核燃料闭式循环、推动核能可持续发展具有战略意义。