



中国科学院合肥物质科学研究院

Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences

重器巨帙·融合开放

# 小型液态金属反应堆设计研发进展

郁杰/李桃生

中国科学院合肥物质科学研究院 核能安全技术研究所





# 报告目录

---

一.

核所简介

二.

小堆研究

三.

总结与展望

# 合肥研究院 历史沿革

- 合肥综合性国家科学中心核心建设单位
- 中科院合肥大科学中心依托单位
- 中科院区域大气环境研究卓越中心分中心
- 中科院机器人与智能制造创新院分部

中科院安徽光  
学精密机械研  
究所成立

1970.12

1978-  
1982

中科院合肥分院

中科院等离子体物理所  
中科院固体物理所  
中科院智能机械所  
先后成立

2001.12

合肥分院整合



中科院合肥物质  
科学研究院

2014.2

中科院核能安全  
技术研究所

2019.12

深化体制机制改革



# 研究院组织架构

- 在职职工**2658**人（正高级：367人）
- 在学研究生**2420**人（博士生：1091人）

## 七个科研单元

- 中科院合肥研究院 **安徽光学精密机械研究所**
- 中科院合肥研究院 **等离子体物理研究所**
- 中科院合肥研究院 **固体物理研究所**
- 中科院合肥研究院 **智能机械研究所**
- 中科院合肥研究院 **强磁场科学中心**
- **中科院合肥研究院 核能安全技术研究所**
- 中科院合肥研究院 **健康与医学技术研究所**



**13**个机关处室 + **6**个支撑部门 + **3**个直属单位

# 核能安全技术研究所的组织结构



郁杰

党委书记、常务副所长  
主持研究所党委工作和全面工作



王锐

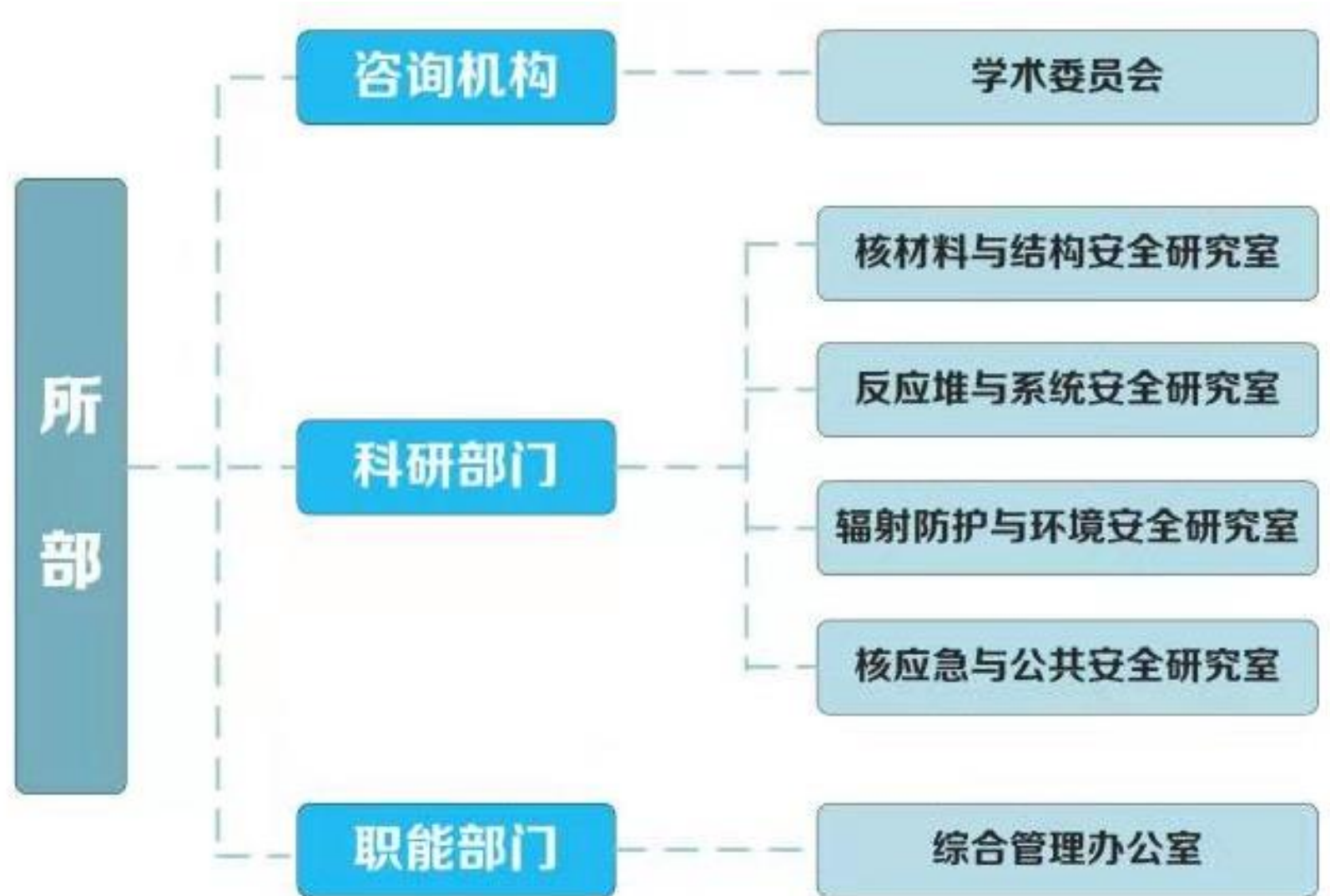
党委副书记、纪委书记、副所长  
主持研究所纪委工作  
分管安保、质量计量、研究生等工作



裴刚

副所长

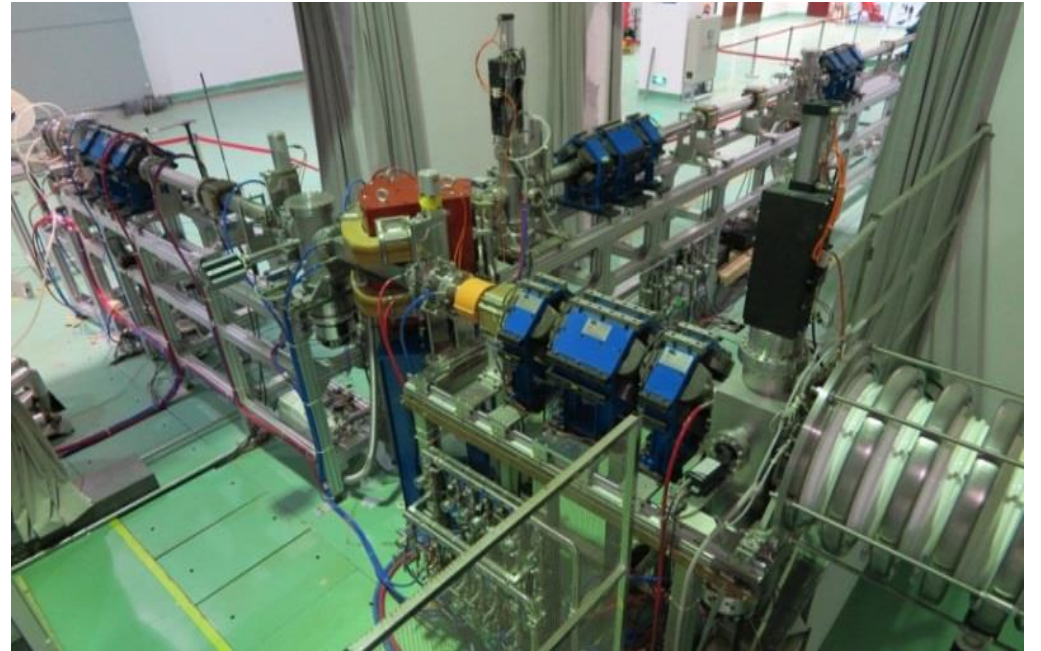
分管科教融合和项目合作等工作



# 核能安全技术研究所的研究定位

## 围绕先进核能与核能安全技术开展基础研究

- 1 小型核裂变系统及关键技术
- 2 核应急与仿真技术
- 3 聚变核安全与材料技术
- 4 核技术交叉应用



中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室的依托单位



# 报告目录

一.

核所简介

二.

小堆研究

三.

总结与展望



# 小堆研究

---

- **研究背景**
- **前期基础**
- **近期进展**



# 研究背景

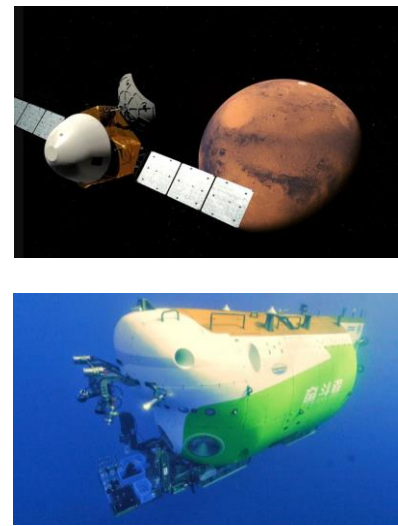
## 国家“十三五”国家科技创新规划

清洁高效能源技术：开展**先进核燃料**-----**超高温气冷堆、先进快堆、超临界水冷堆、新型模块化小堆**等研究。

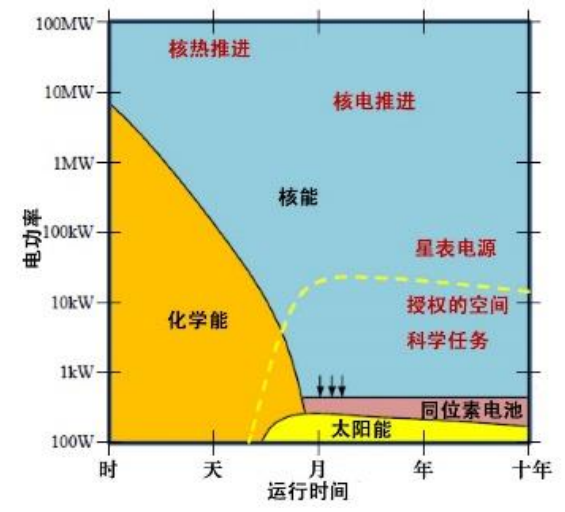
## 国家十四五规划和2035年远景目标建议

瞄准-----**空天科技、深地、深海**等前沿领域，实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。

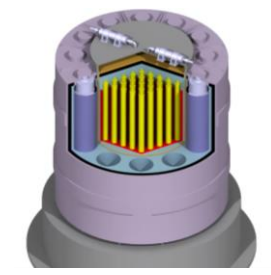
深空探索  
深海作业



特殊环境下**高功率**  
**长寿期**的能源需求



现实可选能源



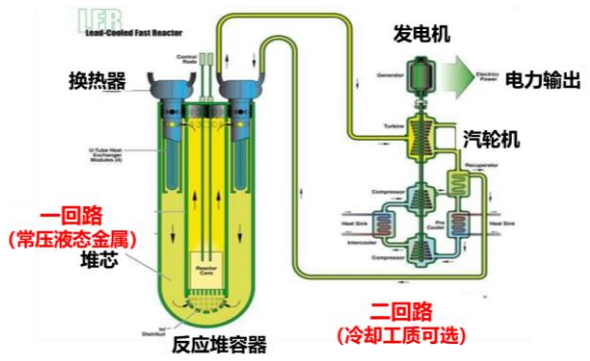
微小反应堆

**特点**  
体积小、重量轻  
高功率、长续航、适应各种环境

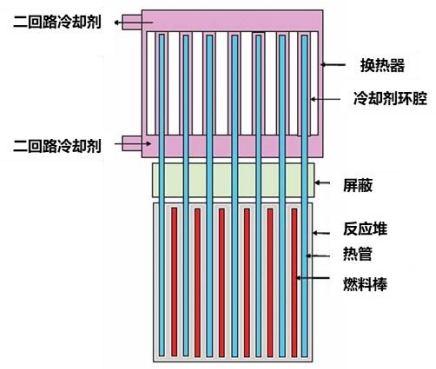
微小反应堆 是国家科技创新战略需求

# 研究背景

中子引发链式核裂变反应产生热能，利用**液态金属作为冷却剂**将能量引出，进行发电或开展其他热利用。



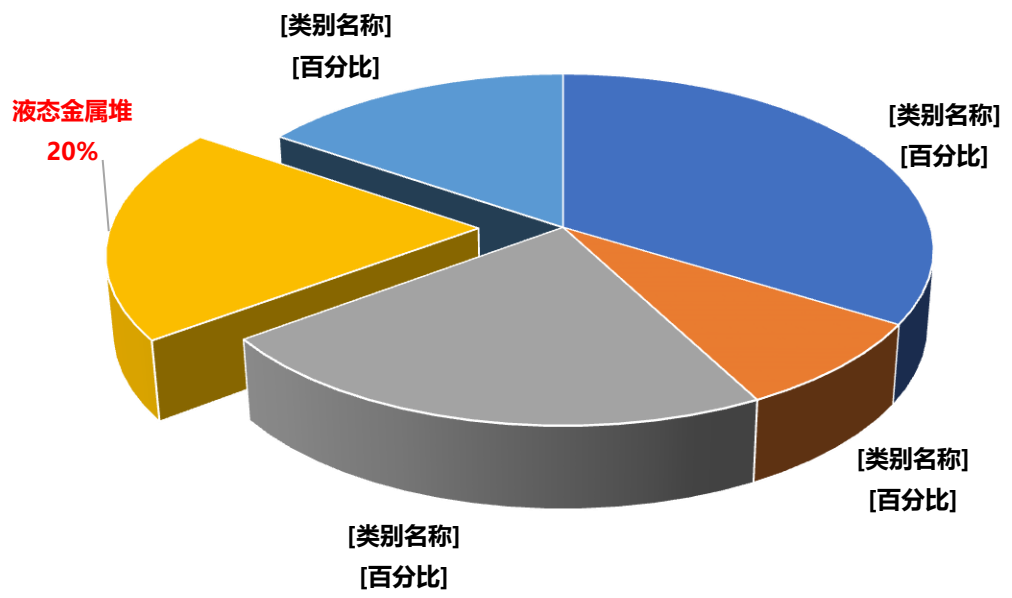
铅基反应堆



热管反应堆

特点	原因
<b>安全可靠</b>	常压运行、无高压破口风险 非能动余热排出、消除外部极端事件导致的冷阱丧失
<b>小型轻量</b>	传热性能好、堆芯紧凑，进而减轻屏蔽重量 常压运行、系统简单，易于小型化
<b>长时高效</b>	快中子增殖，废料最小化 冷却剂出口温度高 (>500~1000°C)，能量利用率高

## 微小反应堆堆型统计 (IAEA,2020)



**液态金属堆 是微小型模块化堆的代表之一**

## 1. 分布式供电

- 内陆偏远地区
- 适应缺水地区

## 2. 海洋平台/浮动核电站

- 岛礁开发
- 多元联供
- 深潜器

## 3. 极地开发/深空探测

- 科考站、寒区基地
- 深空飞行器、地外基地

## 4. 商用大型电站

- 第四代反应堆
- 聚变反应堆





# 小堆研究

---

- 研究背景
- 前期基础
- 近期进展



# 液态金属堆研发历程

1980s-1990s

“863” 计划  
“973” 计划



聚变裂变混合堆

I. “863” 计划 核能专项  
聚变裂变混合反应堆, 负责铅基混合堆

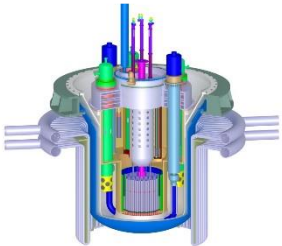
II. 国际科技合作计划 “国际热核实验堆 (ITER)”  
全球规模最大的科技合作项目, 负责铅基包层

III. 中科院 战略性先导专项 “ADS核废料嬗变系统”  
2011年启动, 负责次临界铅基堆

IV. 空间与海洋核电源设计研发  
科技部重点研发计划与中科院重点部署项目支持, 负责核电源总体设计

2010s

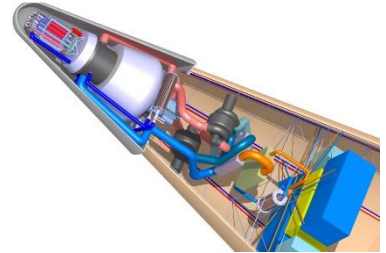
中科院先导专项



次临界铅基堆

2018-2020s

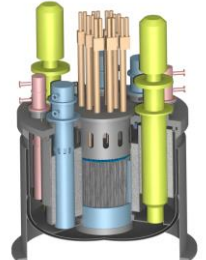
科技部重点研发计划



锂冷空间堆电源

2010s-2020s

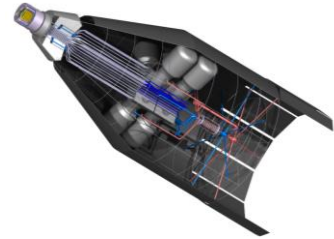
院所合作项目



小型移动式铅基反应堆

2019-2020s

中国科学院重点部署



热管空间堆

液态金属堆研发 具有长期的历史和积累

## 液态金属反应堆关键技术研发

冷却剂技术	专用部件及设备	结构材料与核燃料	堆运行与控制技术
<ul style="list-style-type: none"> <li>高纯度铅合金熔炼</li> <li>液态金属氧测量</li> <li>液态金属气/固相氧控</li> <li>液态金属强化传热</li> <li>液态金属自然循环</li> <li>液态金属热工测量技术</li> <li>.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>小型化控制棒驱动机构</li> <li>双层管壁换热器</li> <li>紧凑型堆内构件</li> <li>双层池式主容器</li> <li>堆内遥操换料机系统</li> <li>密集贯穿式堆顶盖</li> <li>紧凑型散热器</li> <li>.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>抗中子辐照结构钢CLAM</li> <li>抗腐蚀包壳材料</li> <li>一体化堆芯核燃料设计</li> <li>全尺寸燃料组件与加工</li> <li>新型核燃料芯块制备</li> <li>结构/功能一体化屏蔽材料</li> <li>复杂部件3D打印技术</li> <li>.....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>仪控系统验证技术</li> <li>多时间尺度在线运行安全仿真</li> <li>瞬态系统分析技术</li> <li>概率安全分析技术</li> <li>实时风险监测与控制</li> <li>无人值守智能控制技术</li> <li>.....</li> </ul>



大型液态铅合金技术综合实验回路



氧测控试验装置



异性长柄扳手



多针装配测量枱架

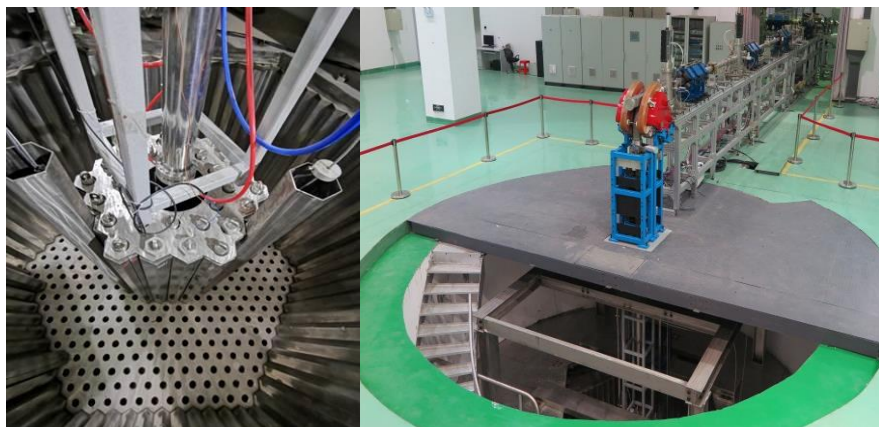


非点断式液位计

液态金属技术单项实验



数字仿真实验反应堆



中子源与反应堆物理实验装置



反应堆工程验证试验装置

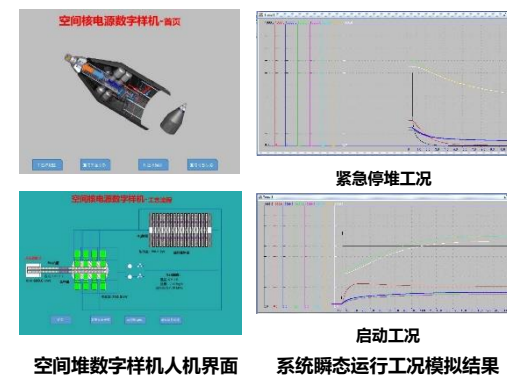
## 数字仿真平台

### ◆ 完全自主化软件体系，全过程全范围无缝耦合仿真

- 全过程可视化的设计仿真
- 全范围动态3D运行仿真
- 5大设计与安全评价软件体系



模拟机仿真平台



空间堆系统仿真与安全分析

2016年度 中国自动化学会 科技进步奖一等奖

“促进了新型反应堆设计的流程革新，达到国际先进水平，在自动化程度上优于国际同类产品”



## 物理实验平台

$6.4 \times 10^{12}$  n/s 高能中子 物理实验装置

**氙氙中子源强 国际第一** (全能谱+三维精准反演)



**入选 美国核学会 ANS Newsletter 和 国际原子能机构 IAEA 实验装置名录**

## 工程验证平台

- ◆ **世界最大**铅基堆热工水力综合验证平台：2.5MW，>200吨铅合金
- ◆ 工程规模铅基堆设备样机综合测试装置



**国际首个池式铅基堆全尺寸关键设备及双模式热工水力集成验证装置**



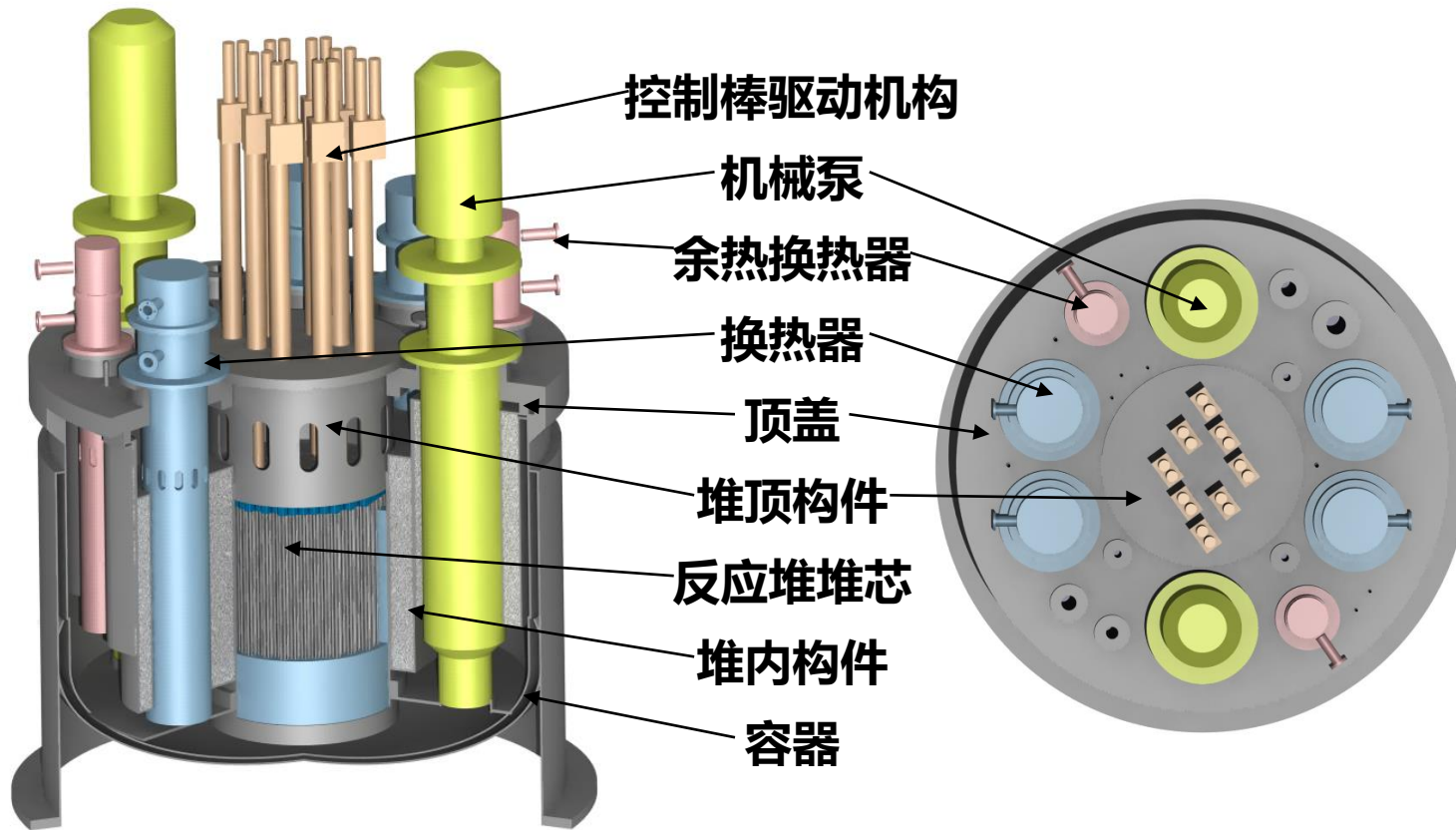
# 小堆研究

---

- 研究背景
- 前期基础
- **近期进展**
  - 核反应堆设计
  - 关键技术研发
  - 核应急与仿真技术

## 铅基堆设计方案

### 一体化固态堆芯+铅铋+水朗肯循环发电

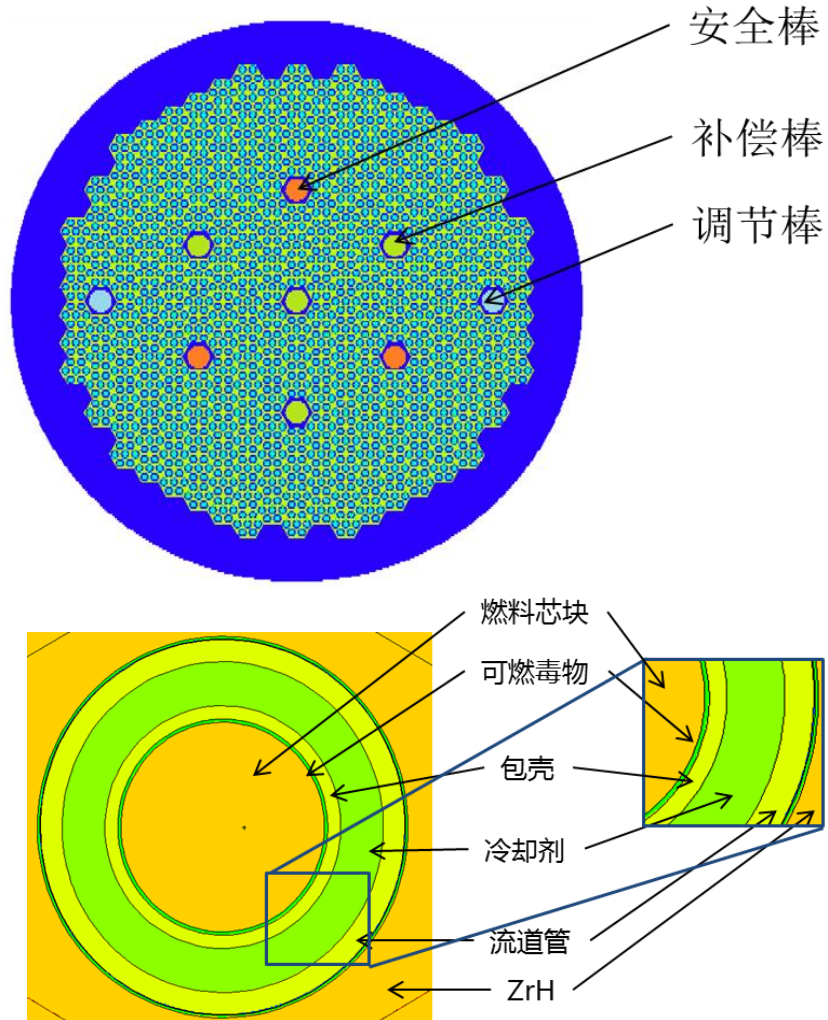


特性	设计目标
热功率	7.5 MW
发电功率	1.5 MW
重量要求	尽可能小
设计寿命	30年
换料周期	10年
环境要求	具备可运输性

[1]Chi Xu, et al.Preliminary design and analysis on the cogeneration system for Small Modular Lead-cooled Fast Reactor. 2020, Applied Thermal Engineering

[2]Xiao Yang,et al. Operation and control simulation of multi-modular lead-based reactor systems.2021, Progress in Nuclear Energy

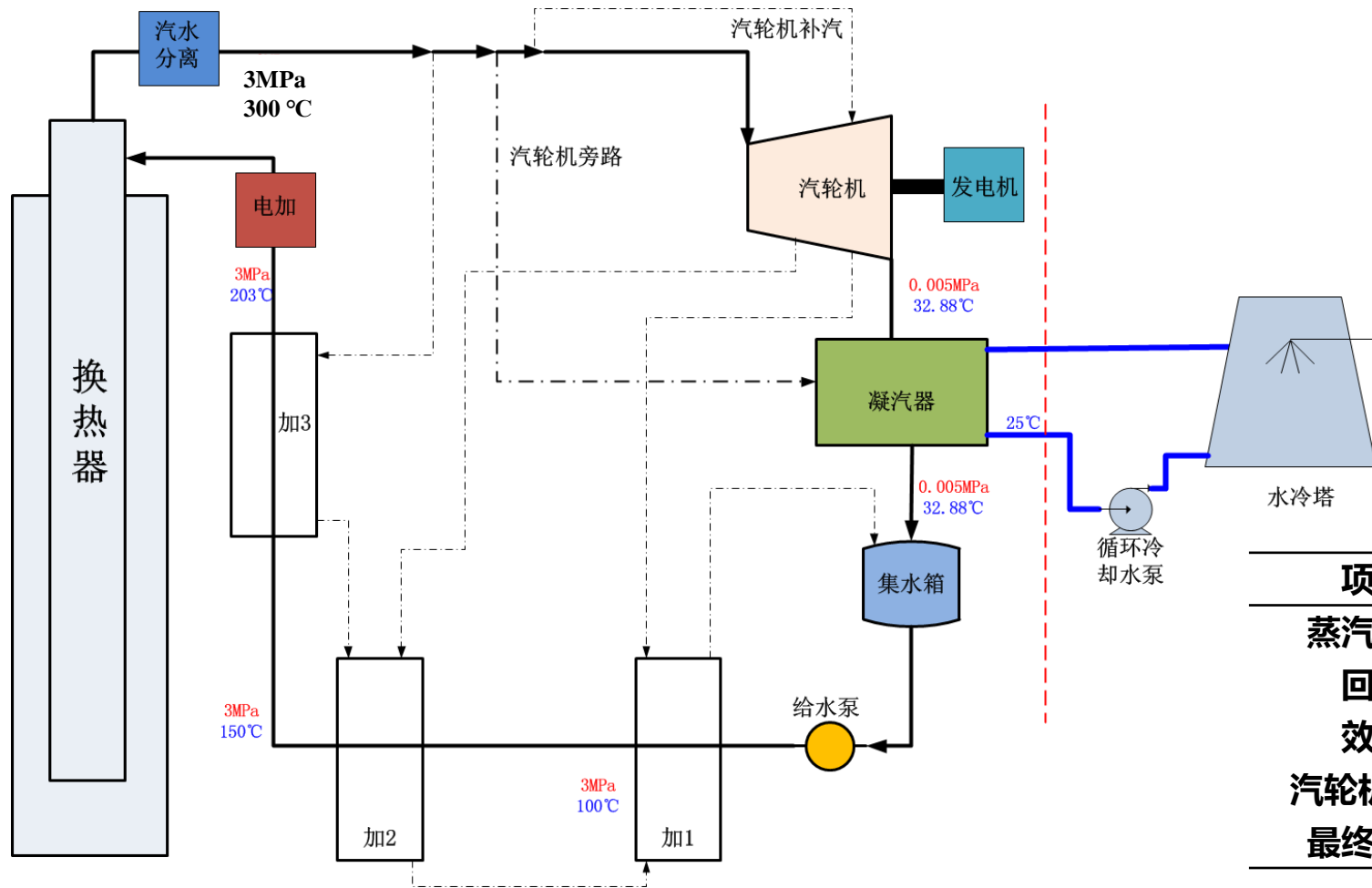
## 铅基堆设计方案--堆芯



芯块外壁涂覆硼化锆可燃毒物

项目	参数
燃料	19.75% $\text{UO}_2$
活性区高度	650 mm
活性区外径	860 mm
燃料组件单元数	244
燃料棒数	1708
慢化剂	$\text{ZrH}_{1.60}$
屏蔽材料	$\text{B}_4\text{C}$
初始 $k_{\text{eff}}$	1.05
$\text{UO}_2$ 装料量	733 kg
燃耗深度	56000 MWd/tU
换料周期	10年

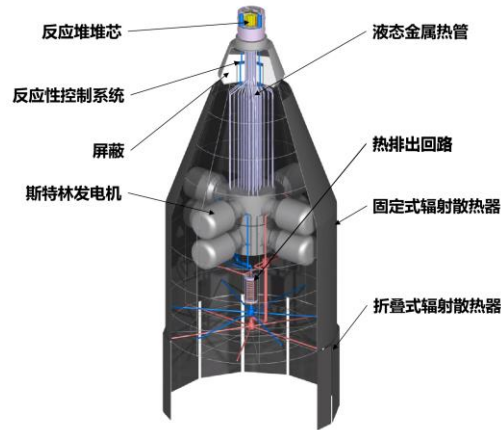
## 铅基堆设计方案--发电系统



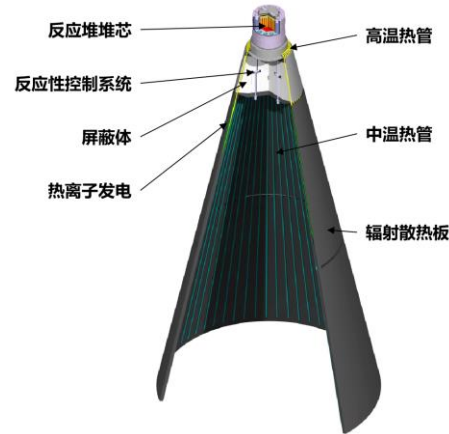
项目	参数
蒸汽参数	3 MPa 过热蒸汽
回热	3级回热
效率	20%
汽轮机补汽	有 (末端湿度大)
最终热阱	水冷塔

## 空间核电源设计方案

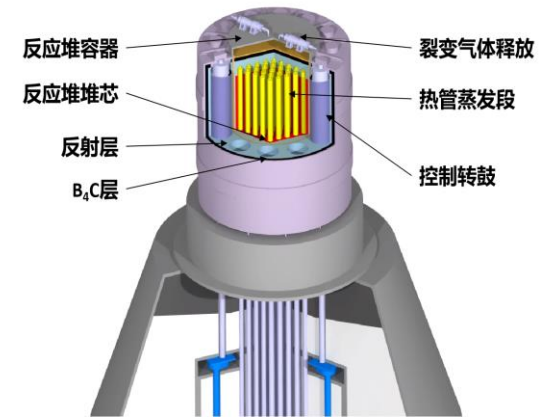
一体化堆芯+热管非能动传热+斯特林发电/热离子



200 kWe斯特林方案 (主选)



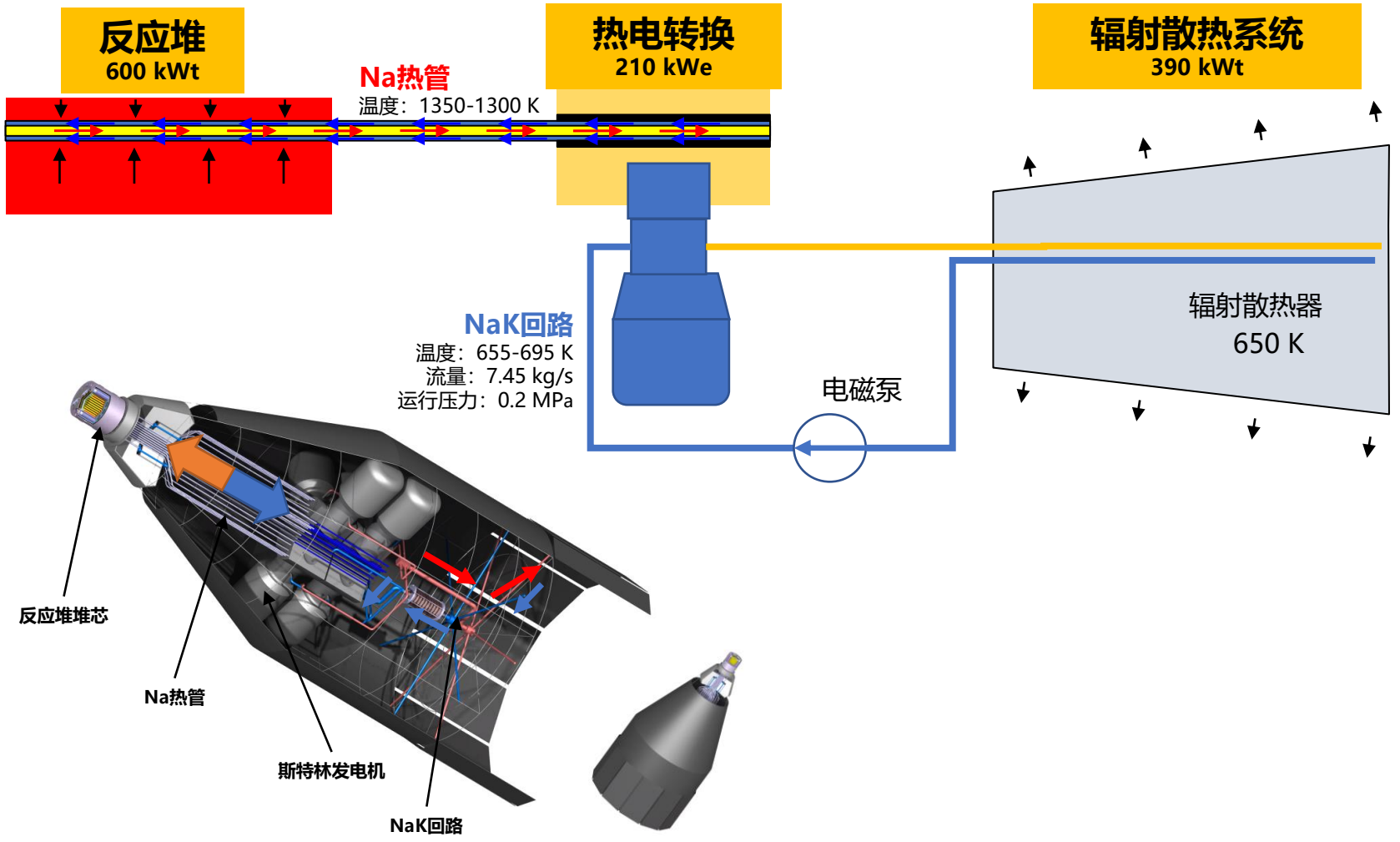
200 kWe热离子方案 (备选)



反应堆结构

项目	斯特林方案	热离子方案
电功率	210 kW	203 kW
满功率时间	10年	10年
反应堆质量	3.5 t(不含斯特林)	3.1 t
功率质量比	60 W/kg	65.5 W/kg

## 空间核电源设计方案--发电系统

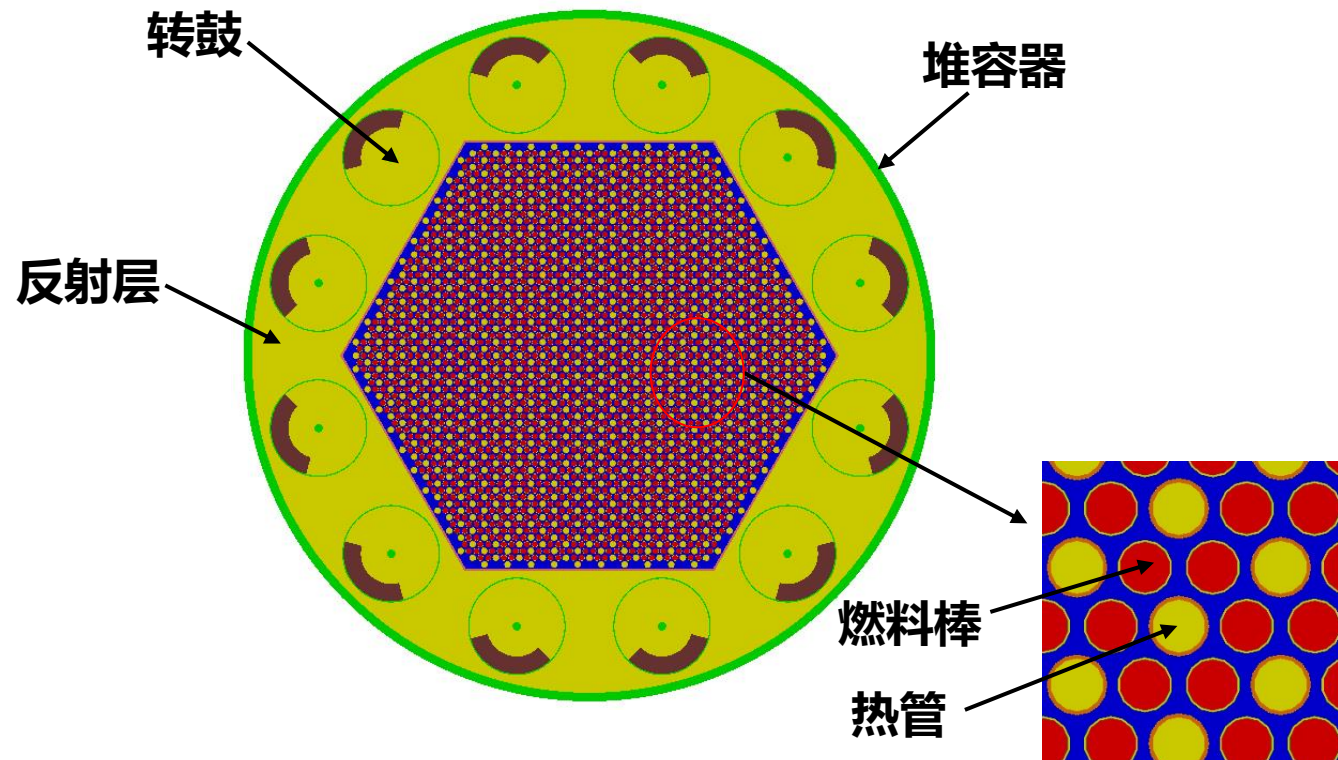


类型	设计值
热功率	600 kWt
电功率	200 kWt
堆芯热管温度	1350 K
系统效率	35 %
系统重量	3.5 t (含斯特林4.78 t)
系统尺寸	H 5.75 m, D 2.8 m
设计寿命	10年



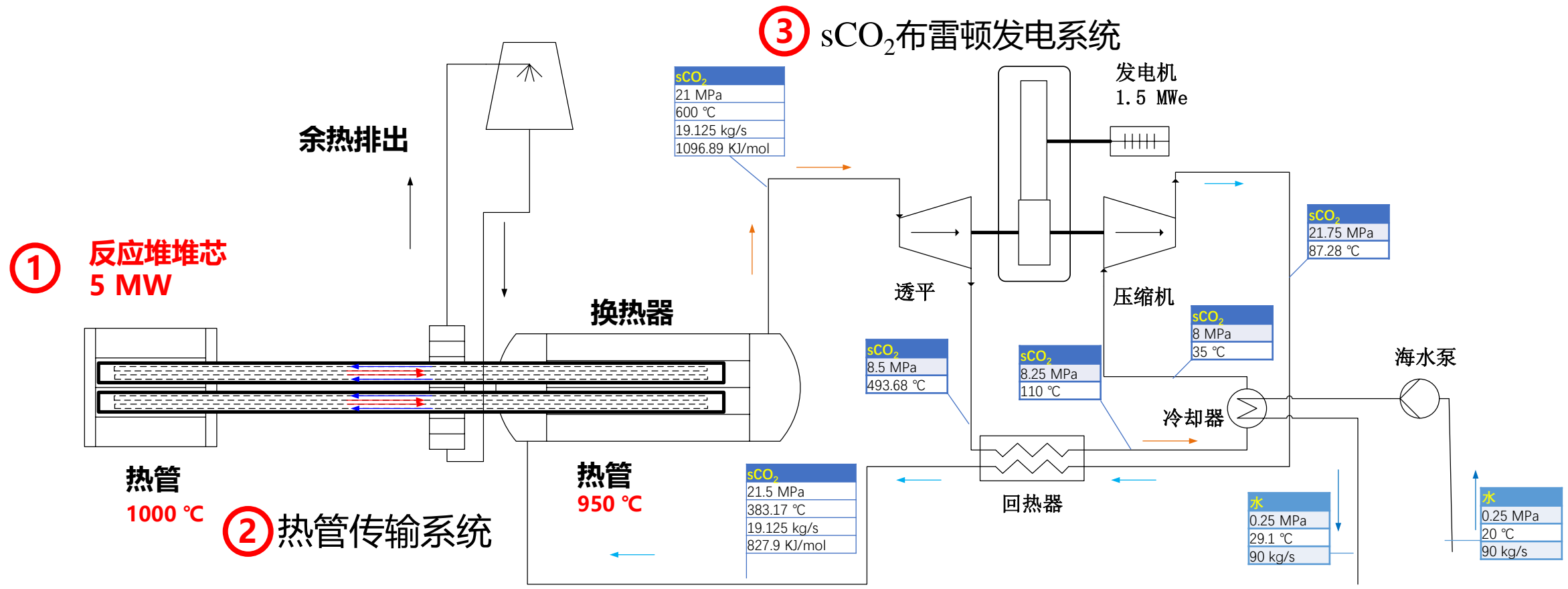
## 水下核电源方案--堆芯

堆芯为一体化固态结构，设计选用成熟低浓 $UO_2$ 燃料，5~6年内可实现装堆



项目	参数
燃料	19.75% 富集度 $UO_2$
活性区直径	1.14 m
活性区高度	1.050 m
燃料元件数	1860 根
热管数	991 根
导热基体材料	石墨
反射层材料	BeO
中子吸收材料	92%丰度 $^{10}B$ 的 $B_4C$
初始冷态 $k_{eff}$	1.01486
平均燃耗深度	6879 MWd/tU
$UO_2$ 装料量	3050 kg

## 水下核电源方案--系统动力学循环



**钠热管一回路+sCO<sub>2</sub>发电系统+海水冷却散热**  
**系统总热功率5 MW，电功率1.5 MW，总体效率30 %**

[1]孔繁丽, 基于铅冷快堆的超临界CO<sub>2</sub>动力循环系统设计与特性研究, 博士论文, 中科大优秀博士毕业生

## 核结构材料与先进核燃料

◆ 完成**Mo合金**/改进型15-15Ti/316L不锈钢的**包壳管**研制 (抗高温、抗腐蚀)



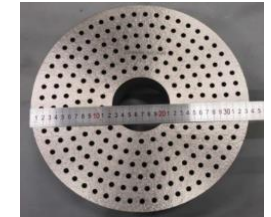
Mo合金包壳



316L包壳

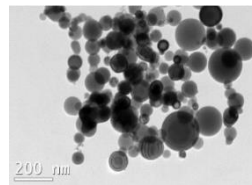
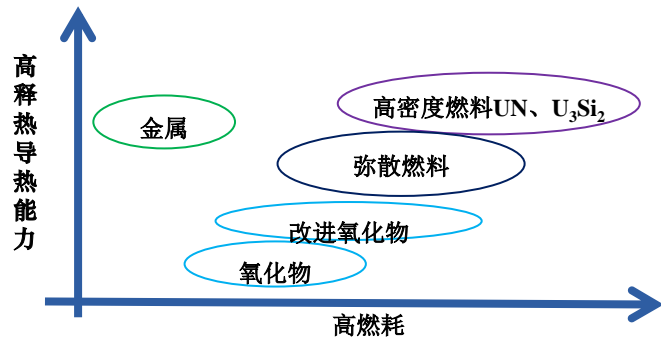


改进型15-15Ti 包壳

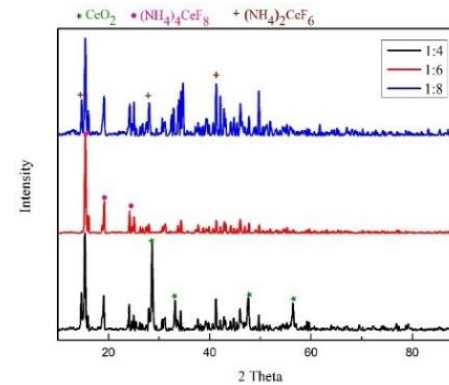


ZrH陶瓷

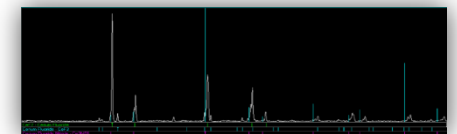
◆ 完成模拟UN燃料粉末制备



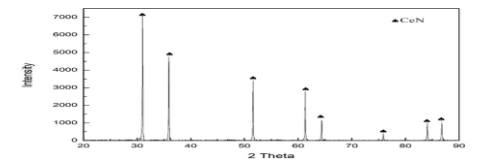
模拟UN粉末



铈氟胺化合物表征



CeN XRD检测结果



CeN产物表征

**掌握燃料元件与热管包壳材料制备技术、先进核燃料制备关键技术**

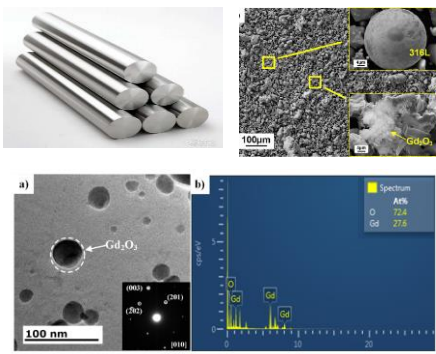
[1] 孙永菊,等.氮化铀(UN)粉末合成工艺分析[J].材料导报, 2021

[2] 孙永菊,等.基于(NH<sub>4</sub>)<sub>4</sub>CeF<sub>8</sub>的CeN纳米多晶干法合成工艺研究[J].现代化工, 2021

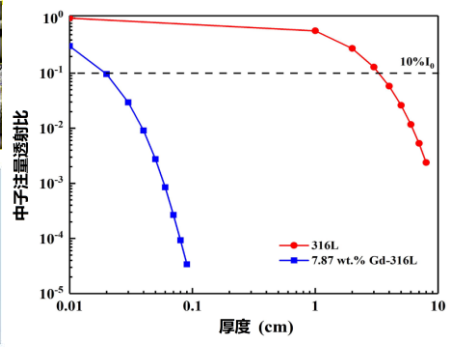
[3] Sun, Yongju etc. Synthesis of Cerium Tetrafluoride and Cerium Trifluoride Nanoscale Polycrystals from Ammonium Hydrogen Difluoride. ACS Omega, 2021.

[4] 梅华平,二氧化铀粉末和芯块中氮的测定—蒸馏光度法不确定度评定[J].核科技进展, 2021

## 轻量化中子屏蔽材料



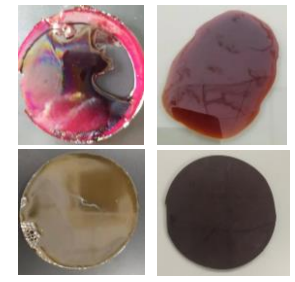
钆钢样品与形貌分析



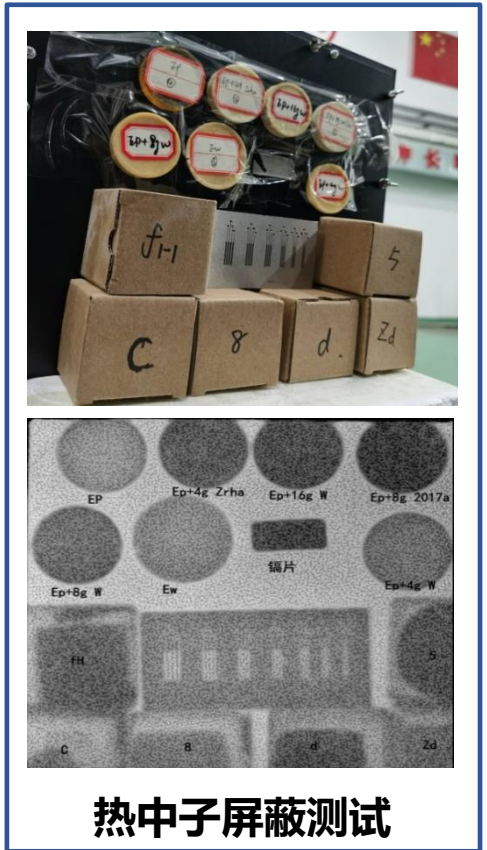
钆钢屏蔽测试



Gd-MOF/PI 复合屏蔽材料



硼酚醛树脂 (化学共混轻质屏蔽材料)



热中子屏蔽测试

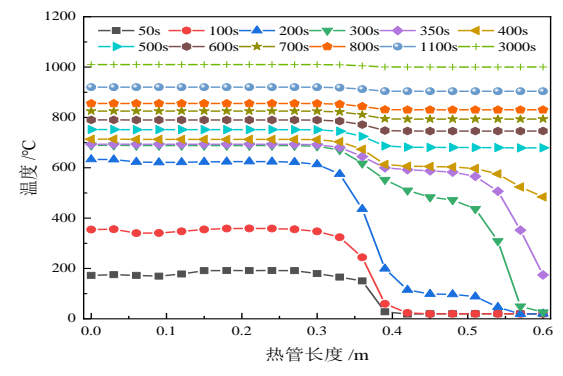
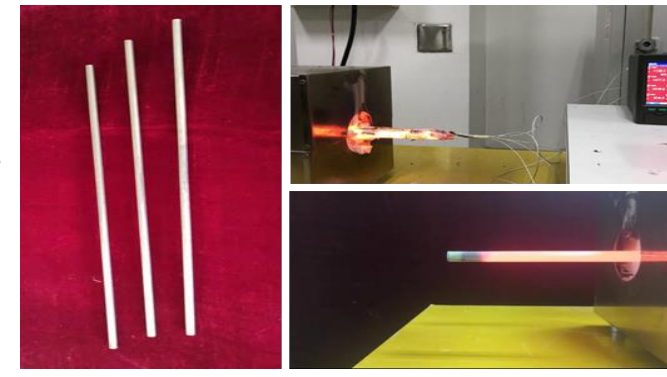
## 掌握钆钢和轻薄复合中子屏蔽材料的制备工艺

[1] Yang X, et al., Development of Gd-Si-O dispersed 316L stainless steel for improving neutron shielding performance[J]. Nuclear Materials and Energy, 2020, 23: 100739.  
 [2] Yu Lu, et al., GEANT4 simulations of the neutron beam characteristics for <sup>9</sup>Be/<sup>7</sup>Li targets bombarded by the low energy protons, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2021

## 超高温液态金属热管

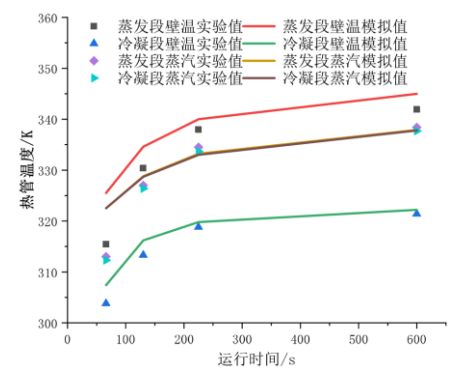
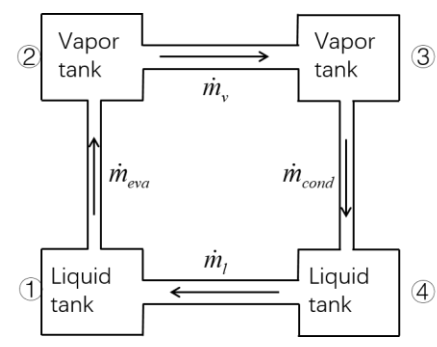
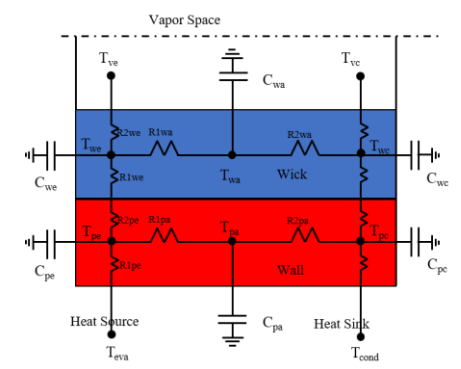
### ◆ 大长径比液态金属热管研制

- 采用难熔金属+热防护涂层解决超高温服役问题;
- 成功研制国内首套1m长、1200°C高温锂热管  
(传热功率≥10kW)



### ◆ 液态金属热管仿真程序

- 热管集总参数法模型
- 弯折效应和马兰戈尼流效应



**小型核系统中实现百千瓦换热的的能力已得到实验验证**

[1] Chong-Ju Hu, Da-Li Yu\*, Mei-Sheng He, Hua-Ping Mei, Jie Yu, Tao-Sheng Li. Performance evaluation of ultra-long lithium heat pipe using an improved lumped parameter model. Nuclear Science and Techniques, 2021.

## 热传输与辐射散热验证平台

### ◆ 超高温热管传输验证平台

- 最高温度: 1700 K
- 热管功率: ~10 kW
- 热管测试尺寸: D 20 mm × L 1000 mm



超高温热管传输平台总体

### ◆ 地面热辐射测试平台

- 系统测试功率: 20 kW
- 系统运行压力: 4 MPa
- 系统运行温度: 500 K



热辐射测试平台总体

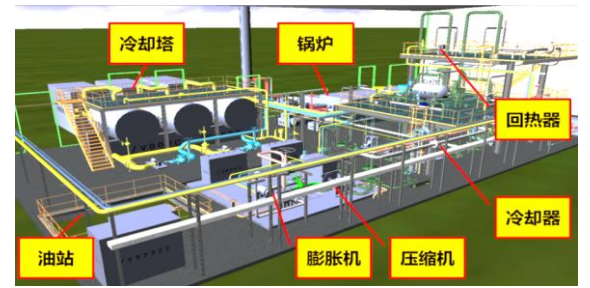


辐射散热板与真空腔室

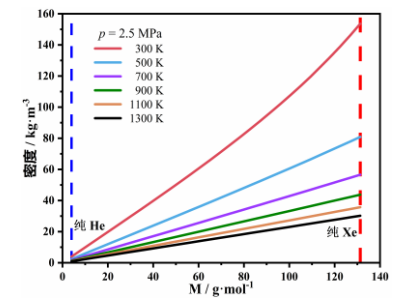
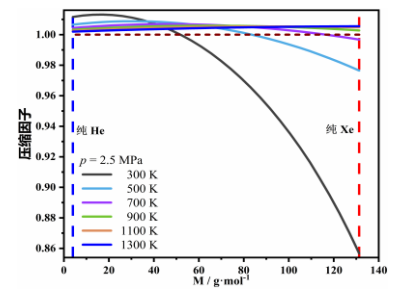
高温锂热管测试、辐射散热系统测试，支持空间堆热力学循环技术研究

## 高效热电转换技术

### 布雷顿发电系统-联合工程热物理所



MW级sCO<sub>2</sub>发电系统效果图

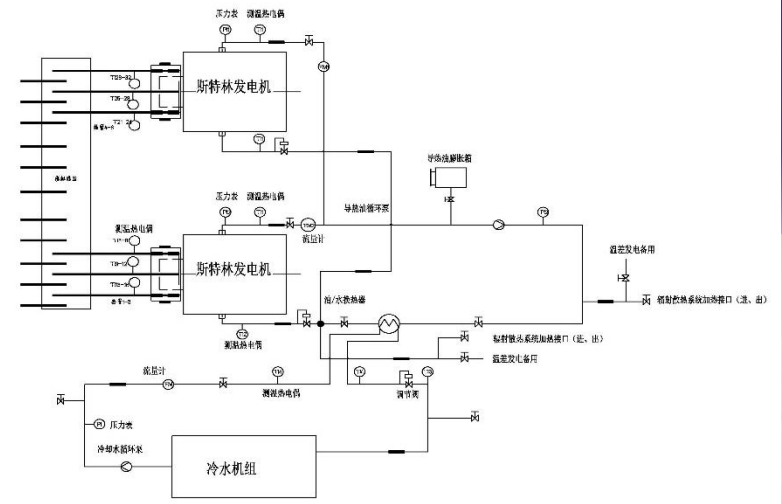


氦-氙物性分析及对布雷顿循环影响



MW级压缩机实验系统和工程样机

### 斯特林发电系统-联合理化所



斯特林集成测试平台设计



小型斯特林电机

## 联合优势单位，开展发电系统工程化研究

[1] Chi Xu, Fanli Kong, Dali Yu\*, Jie Yu, Muhammad Salman Khan. Influence of non-ideal gas characteristics on working fluid properties and thermal cycle of space nuclear power generation system. *Energy*, 2021

[2] 小型空间核电源热管斯特林发电耦合特性研究, 陈帅, 杨明翰等. 第十二届全国新堆研究堆学术会议

## 先进核能系统控制技术

满足当前核能系统多机耦合、负荷跟踪的关键需求

### 1. 堆芯功率的分布参数状态观测与控制

提供全新理论框架，从理论上确保安全稳定，适用性强

### 2. 多机组网络化协调控制

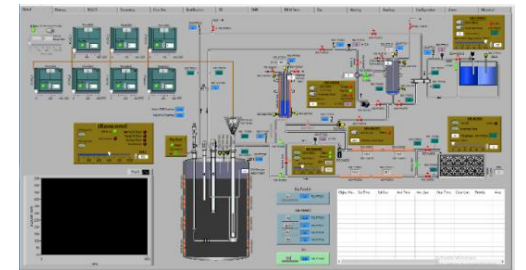
降低控制系统设计复杂度、确保网络结构的整体运行性能

### 3. 网络化的容错控制方案

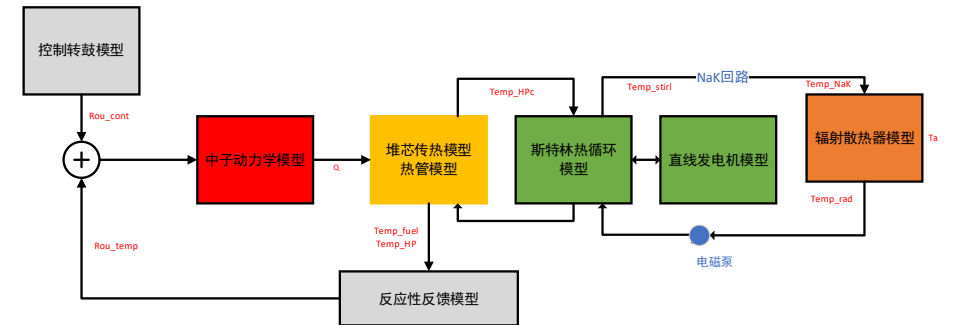
拓展核系统的应用范围，提高适应性



铅基堆工程技术集成实验装置



智能控制策略



空间堆控制逻辑

可广泛应用于空间核动力系统、核能-新能源耦合系统等场景中

[1] Research for axial power distribution control of a space nuclear reactor based on nonlinear model, CX Zhao, X Yang\*, MH Yang, et al. ANE, 2022, 108917.

[2] Module coordination control of multi-modular lead-based reactor systems, X Yang, CX Zhao, JY Wang, J Yu, MH Yang\*. ANE, 2021, 108873.



## 反应堆智能故障诊断系统

### 实现反应堆复杂系统的故障诊断和预测

#### 1. 基于小批量处理模式的神经网络故障诊断技术

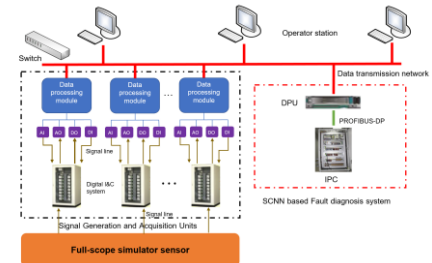
- 设计并构建了具有小批量处理模式的卷积神经网络模型，采用批归一化技术进行训练优化，提高了神经网络的训练效率。

#### 2. 基于门控循环单元的故障预测框架

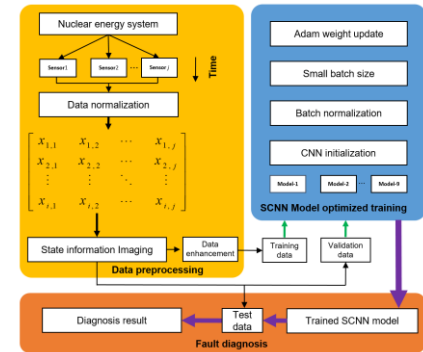
- 采用互相关分析来提取多元回归预测策略中的瞬态特征，通过贝叶斯优化对超参数设置进行优化，提高故障诊断率。

#### 3. 基于核知识迁移诊断预测与容错技术设计与验证

- 以网络迁移学习的技术为基础，结合已优化网络，提出一套基于迁移自适应残差网络的诊断预测与容错技术耦合方法。



硬件结构



诊断系统框架

可广泛应用于长期无人值守小型模块化反应堆的故障诊断

[1] Yuantao Yao, et al. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44, 7: 5841-5855.

[2] Yuantao Yao, et al. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 141: 107274.

[3] Yuantao Yao, et al. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44: 5841-5855.

[4] Yuantao Yao, et al. *Applied Soft Computing*, 2022, 114: 108064.

[5] Chen He, Daochuan Ge\*, et al. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 159: 108326.

[6] Yuantao Yao, et al. *2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing)*.

## 核事故应急信息化指挥与决策

### 实现培训、演练、评估与推演一体化

#### 1. 层级架构、分布式协同设计

- 分布式多人协同指挥
- 基于应用需求定制升级

#### 2. 基于UWB的厘米级定位

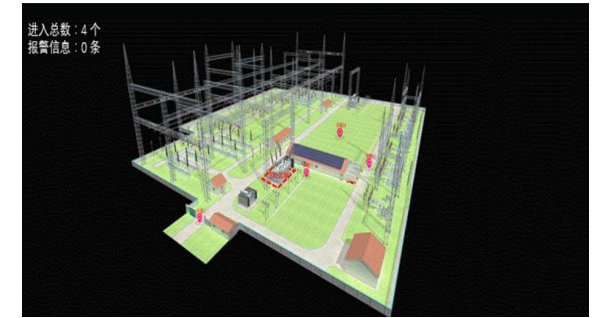
- 基于实时路径与剂量场进行动态累积后果评估

#### 3. 定量评估与定性评估相结合

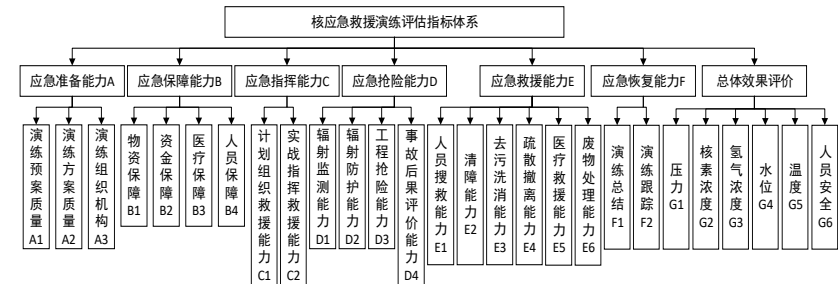
- 基于Delphi法建立评价指标体系
- 基于层次分析与模糊综合评价的评估模型



核事故应急指挥与导调系统



定位系统电子围栏预警



评价指标体系

相关研究成果支持国家核应急救援队以及安徽省核应急响应技术支持中心能力建设

[1]Yuan Cheng, Chunhua Chen\*,et.al, Nuclear Emergency Rescue Drill Database Design and Implementation, Annals of Nuclear Energy, 2022,166(108744).

[2]Fang Ruan, Chun-Hua Chen, Yuan Cheng, et al. Study on Evaluation Method for Nuclear Emergency Rescue Measures at Containment Vessel[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021(151): 107942.

## 核应急事故后果评价与应急决策支持

### 基于核应急准备与响应实际场景需求

#### 1. 多尺度多介质放射性核素迁移与扩散

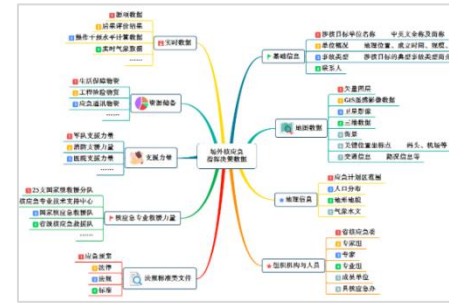
- 室内、微尺度、小尺度、中尺度 (m~400km)
- 大气-水域、大气-土壤-大气
- 植被截留、土壤再悬浮

#### 2. 核应急数据集成与多源异构数据库建设

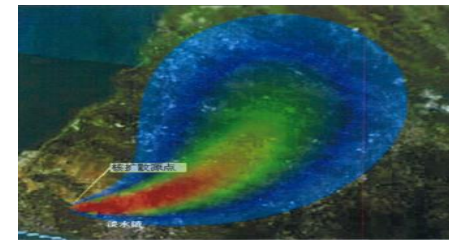
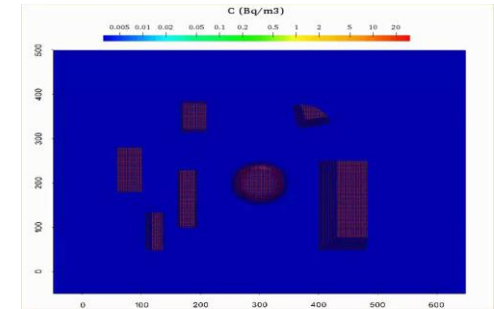
- Greenplum、Redis、MongoDB耦合数据库设计

#### 3. 基于人因工程的路径规划与调度

- 基于时间-剂量-人因多目标优化



核应急数据思维导图



核素扩散



可应用于应急准备、以及响应早期、中期和晚期的后果评价以及辅助决策  
相关研究获GF基金、安徽省军民融合基金支持

[1] Liwei Chen, Chunhua Chen\*, et al., Inverse model investigation of radionuclide dispersion in a ventilated room based on the adjoint probability method, *Annals of Nuclear Energy*, 2022

[2] Liwei Chen, Chunhua Chen\*, et al. Migration Simulation of Radioactive Soil Particles in the Atmospheric Environment Using CFD-DEM Coupled with Empirical Formulas[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021

## 核能复杂系统可靠性和概率安全分析软件系统

### 复杂系统的精准故障建模和快速安全评价

#### 1. PSA技术及软件系统

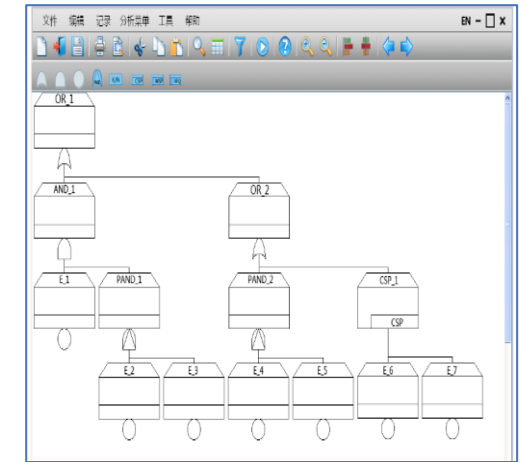
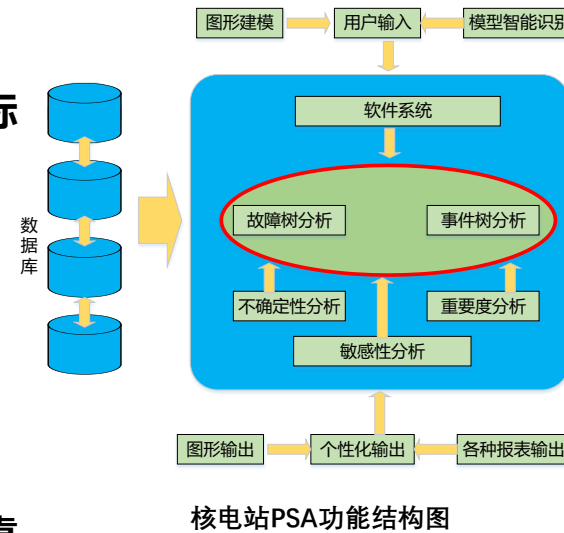
- 故障树/事件树建模, BDD/ZBDD快速计算引擎, 覆盖多阶段任务系统可靠度、核电厂风险、重要度、敏感性以及不确定性分析等指标计算功能

#### 2. 动态故障树技术及软件系统

- 能够对动态时序失效系统进行精准可靠性建模和分析

#### 3. 社会技术系统风险评价理论及方法

- 将风险模型及方法扩展到社会组织、人员层面, 评价结果更全面可靠



可广泛应用于各种核装置的风险评价和安全管理

获国家自然科学基金、国家重点研发计划子课题、国重实验室开放基金课题支持

[1]Longlong Tao, Daochuan Ge\*, et al. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 219: 108228

[2]Daochuan Ge\*, et al. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 142: 289-299.

[3]Daochuan Ge\*, et al. Quality and Reliability Engineering International, 2017, 33(2): 357-367.

[4]Daochuan Ge\*, et al. Quality and Reliability Engineering International, 2016, 32(1): 139-151.

## 放射性物质及装备运输风险评价方法及管理软件系统

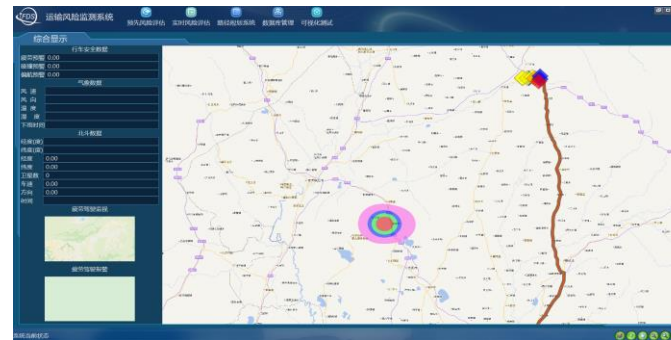
### 实现放射性物质及装备运输风险控制和管理

#### ◆ 技术特征

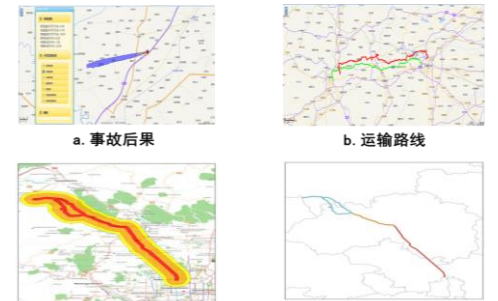
- 指标体系
  - 建立人-机-环境 三维风险指标体系
- 预先风险评估
  - 支持放射性物质运输预先风险评估
- 实时风险评估与监测
  - 支持运输实时风险评估与监测
- 动态路径规划
  - 基于运输风险最小的动态路径规划
- 运输车载管理与基地综合运输风险管理



公-铁-海联运



运输车载管理与基地综合管理软件



运输实时风险显示与预警技术

在放射性物质及装备运输风险控制和管理方面有着重要应用  
获军队/企业项目支持，发表专业领域SCI论文多篇

[1] Longlong Tao, Jie Wu, Daochuan Ge\*, Liwei Chen, Ming Sun. Risk-informed based comprehensive path-planning method for radioactive materials road transportation [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021,



# 报告目录

---

一.

核所简介

二.

小堆研究

三.

总结与展望



## 总结与展望

- ◆ 核能安全技术研究所围绕**先进核能与核能安全技术**开展基础研究，秉承“融合开放”的理念进行对外合作；
- ◆ 在**小型核能系统设计及关键技术、集成测试平台、核应急与仿真**等具备了较为丰富的研究基础和技术攻关经验；
- ◆ 希望与优势单位建立**长期的、良性发展**合作模式，形成**互信、互利、互赢**的合作局面，为我国核能事业发展做出应有的贡献。



中国科学院  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



敬请指导

