

# 钍基熔盐堆核能系统

黄鹤飞

TMSR 先进核能创新研究院

中国科学院 上海应用物理研究所

小堆经验交流会, Jan 13th, 2021, 海南昌江





# 汇报提纲

1. 熔盐堆国际研究进展
2. TMSR专项主要进展

## 美国：先进反应堆示范计划 (ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program)

📖 DOE2020年5月发布ARDP计划，旨在通过与美国工业界的成本分担合作关系，帮助美国国内私企加速研发先进核反应堆，能源部希望在未来七年内与行业合作伙伴共同投资，研发方向包括：**1) 先进反应堆示范项目；2) 未来风险降低示范；3) 先进反应堆概念-20 (ACR-20)**

📖 2020年12月，“未来风险降低示范”启动，共资助5个项目，即**Kairos Power的固态燃料熔盐堆 Hermes**、Westinghouse的eVinci微堆、BWX的可移动式微堆、Holtec的SMR-160压水堆、**Southern Company的氟盐实验堆MCRE**。这五个堆中两个是熔盐堆

📖 2022.11.15，美国总统签发《两党基础设施投资和就业法案》（1.2万亿），620亿供DOE用于未来清洁能源，包括现有核电站延寿和投资先进核能项目。其中25亿美元通过ARDP计划用于先进核反应堆研发（Terra和X Energy）。比尔盖兹称合计融资40亿美元。

📖 **ARDP的这三个项目将会为美国在全球市场上的高度竞争力铺平道路！**

# 先进堆技术选择：非轻水反应堆 (Non-LWR) 的场景

## 先进反应堆设计的广阔场景

液态金属冷却快堆 (LMFR)

高温气冷堆 (HTGR)

熔盐堆 (MSR)

微堆

TerraPower(Natrium)\*  
 GEH PRISM (VTR)  
 Oklo  
 先进反应堆概念  
**钠冷**

X-energy\*  
 Framatome  
 StarCore  
 MIT  
**Triso燃料球**

Kairos(Hermes/RTR)\*  
**液态熔盐冷却**

Westinghouse(eVinci)  
 BWX Technologies  
 X-energy  
 Radiant /RTR  
**可运输的**

Westinghouse  
 Columbia Basin  
 Hydromine  
**铅冷**

General Atomics (EM<sup>2</sup>)  
 General Atomics

Terrestrial \*  
 Southern/TP MCFR/RTR  
 ACU /RTR \*  
 Elysium  
 Thorcon  
 Muons  
 Flibe  
 Alpha Tech  
**液态熔盐燃料**

Ultra Safe /RTR  
 Oklo  
**固定的**

图例

ARDP计划

先进堆示范  
 未来风险降低  
 ARC-20



许可申请



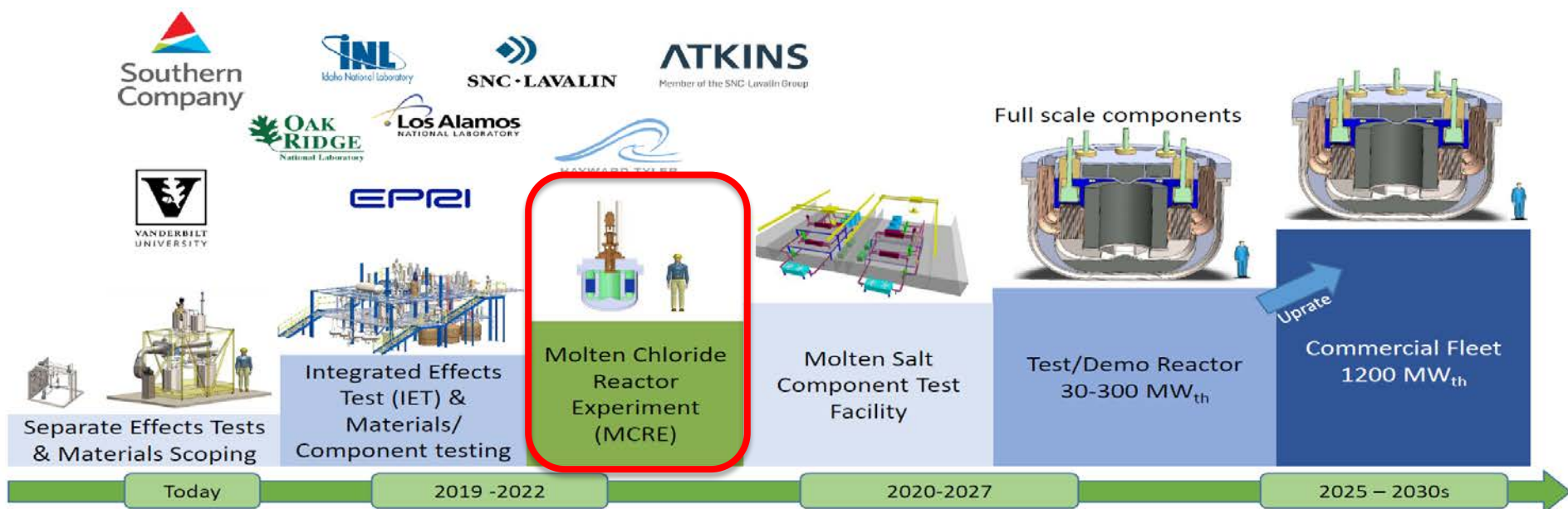
预申请



研究/实验堆

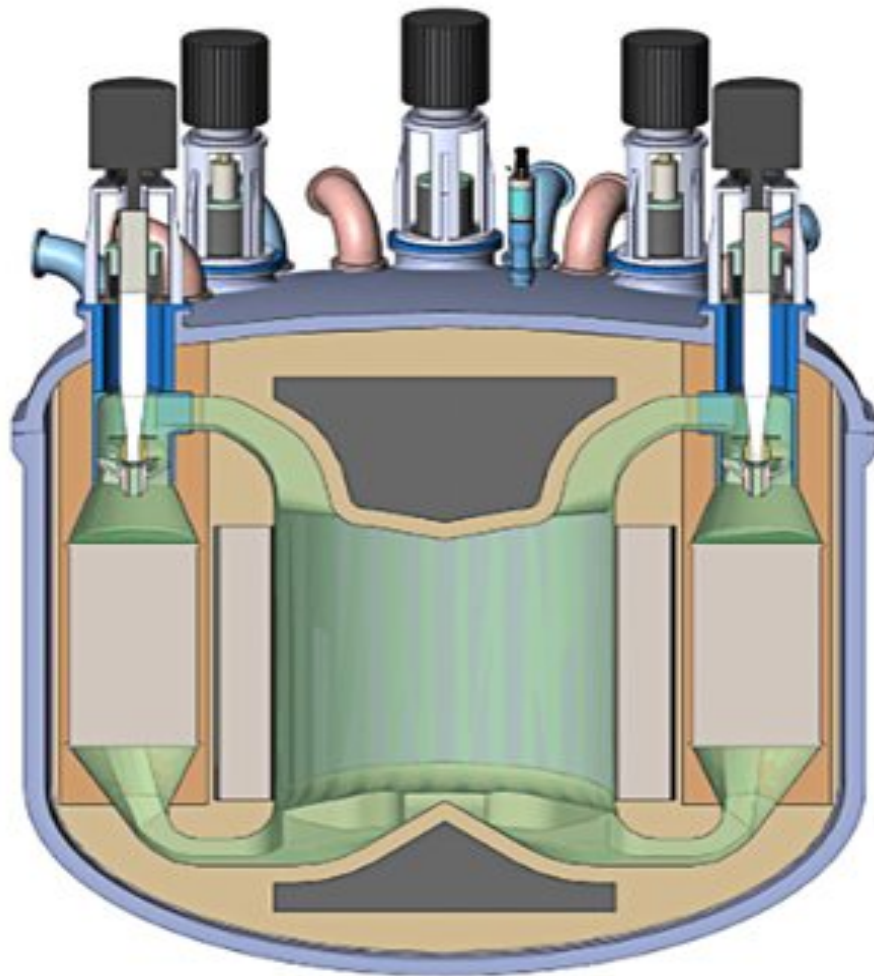
# 氯盐快堆MCRE-南方电力 (Southern Company)

- 📖 MCRE是基于Terra Power氯盐快堆 (MCFR) 技术基础上建立的小型实验堆，可接入商用电网，将为未来示范反应堆的设计、许可和运行奠定基础。
- 📖 南方电力公司主导MCRE设计、建造和运行。与Terra Power、英国CORE-POWER、法国Orano和美国电力研究所 (EPRI) 及其他私营公司、实验室和大学合作。
- 📖 计划启动建造许可证预申请。



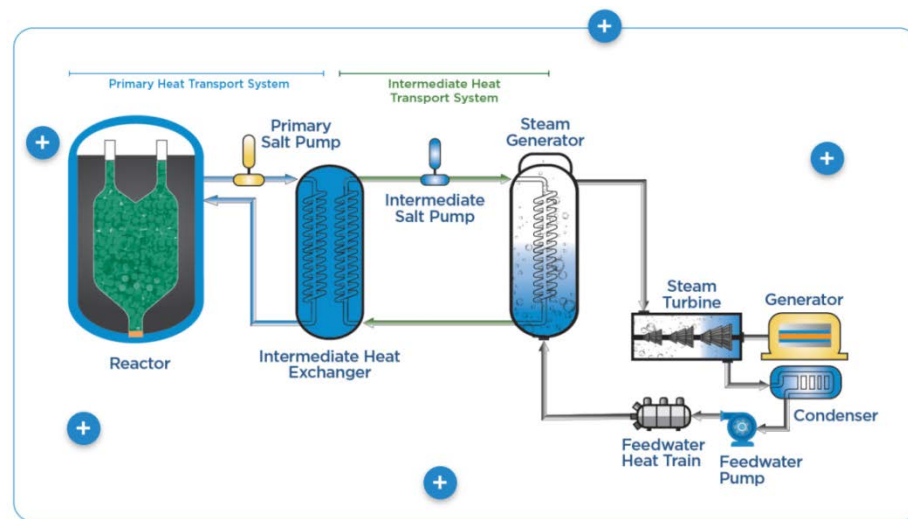
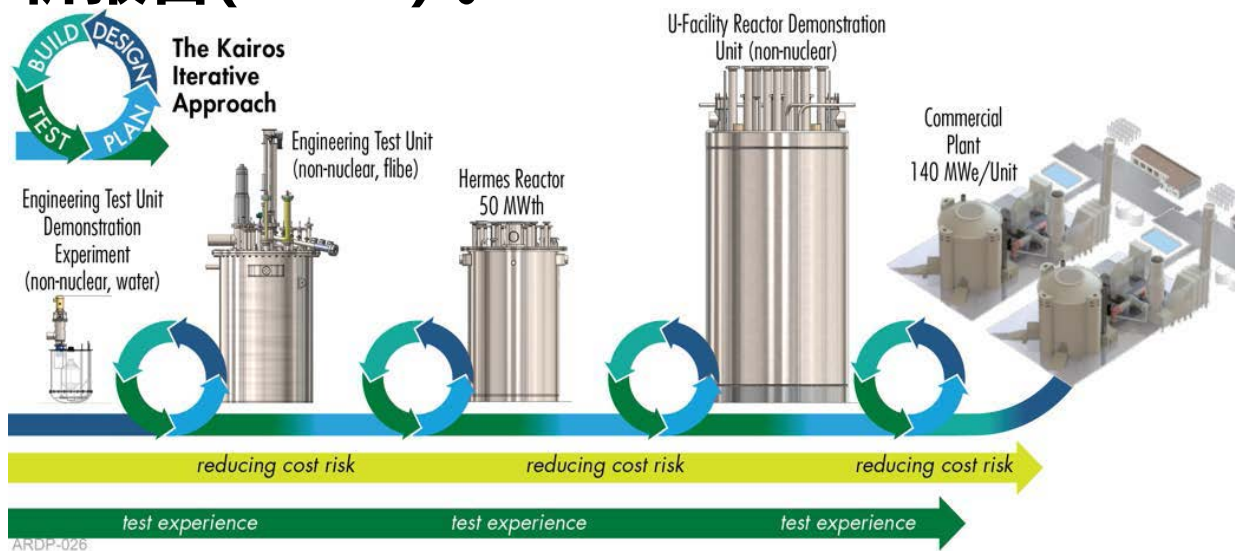
# 氟盐快堆MCRE-南方电力 (Southern Company)

- 📖 目标：更好的经济性、安全性、资源利用率、废物处理能力和防核扩散性能
- 📖 氟盐作为燃料盐载体和冷却剂，功率为20MWe
- 📖 固有安全性高，具有较大的负温度系数和较低的后备反应性
- 📖 燃料选择多样化，可灵活使用贫铀/天然铀/钍/乏燃料等多种燃料形式



# 氟盐冷却高温堆 (Hermes) - Kairos Power

- 📖 Hermes是氟盐冷却高温堆(KP-FHR)的低功率版本，Kairos Power主导设计、建造和运行，与ORNL、INL、美国电力研究所 (EPRI) 和Materialon公司合作。
- 📖 2021年5月，与田纳西河谷管理局 (TVA) 达成合作共同开发Hermes，由TVA提供工程、运营和许可支持，在橡树岭进行演示验证。
- 📖 2018年10月，启动建造许可证预申请；**2021年10月，向NRC提交初步安全分析报告(PSAR)。**



# 氟盐冷却高温堆 (Hermes) - Kairos Power

📖 功率50MWe，采用TRISO燃料、

氟盐冷却剂和非能动余排系统

📖 使用常规材料、现有工业设备

和常规建造方法

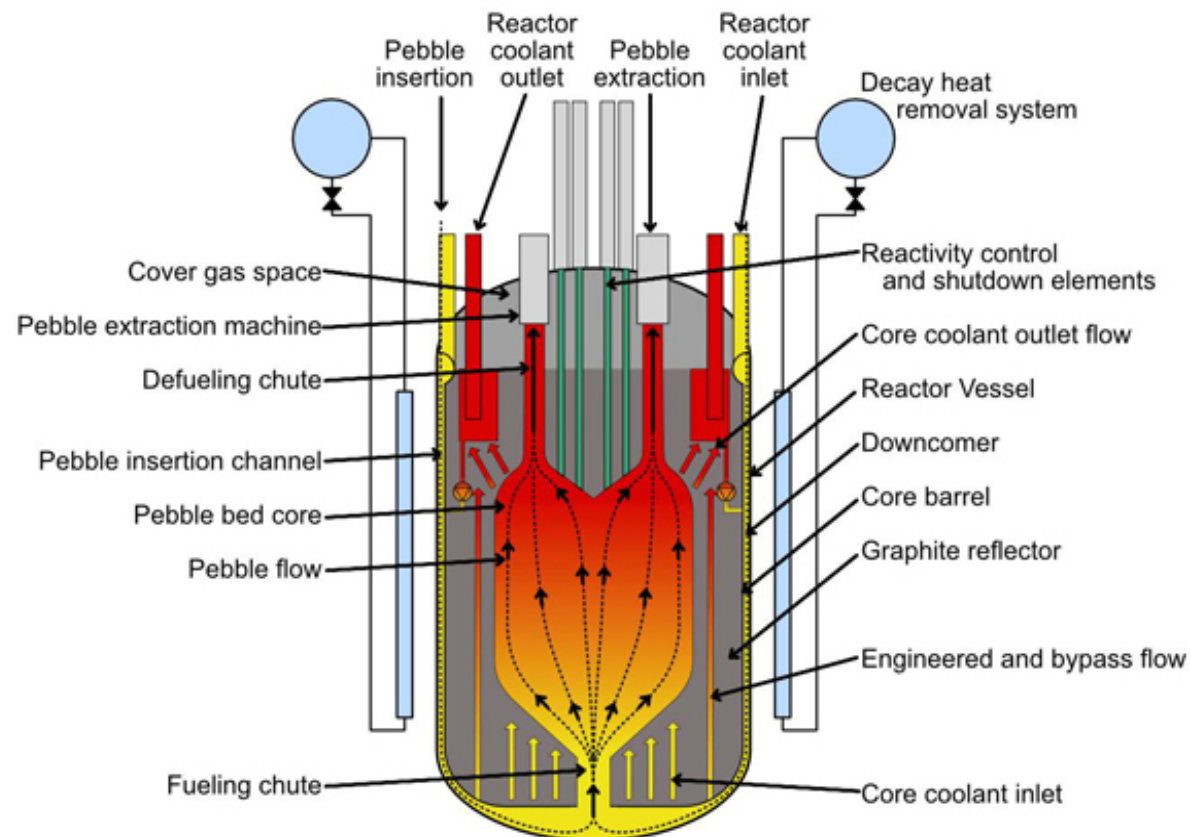
📖 降低了对高成本核级部件和结

构材料的要求

📖 提供在成本上能与天然气竞争、

可长期使用、可灵活调度的低

碳能源





# 其他熔盐堆研发计划

## Thorcon

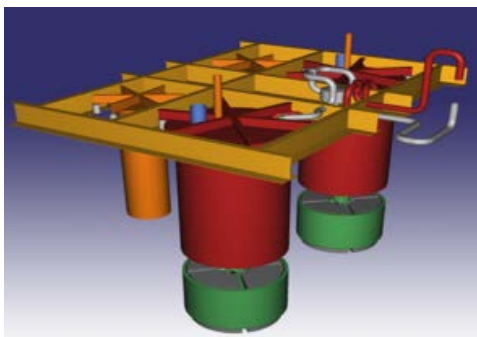
### ThorCon

石墨慢化氟盐热焚烧堆

功率：250MWe

低浓铀和钍混合运行

以MSRE技术为基础



处在概念设计阶段

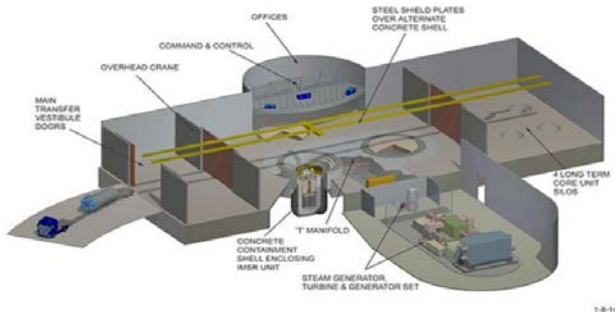
## Terrestrial energy

### IMSR

一体化氟盐堆

功率：195MWe

使用铀或钍燃料



19.10 许可证预申请

## Flibe Energy

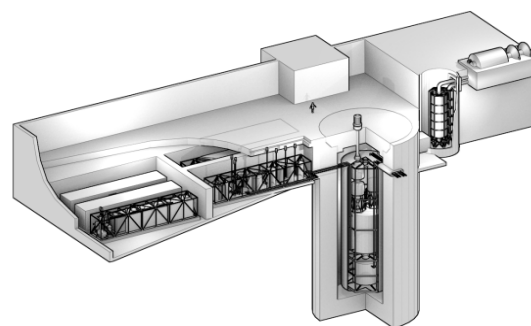
### LFTR

石墨慢化氟盐热增殖堆

功率：250MWe

基于钍铀燃料循环

MSBR的衍生设计



处在概念设计阶段

## ACU/NEXT lab Abilene Christian Univ.

### MSRR

熔盐研究堆

功率：<1MWth

使用铀燃料

大学联合研发的实验堆



20.07 许可证预申请

# 其他熔盐堆研发计划

**Transatomic Power**

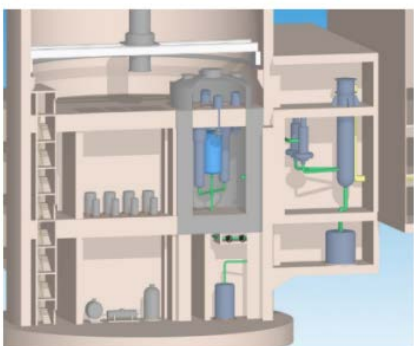
**TAP**

混合燃料焚烧堆

功率：550MWe

使用铀燃料或钍燃料

ZrH慢化熔盐堆



处在概念设计阶段

**Elysium Industries**

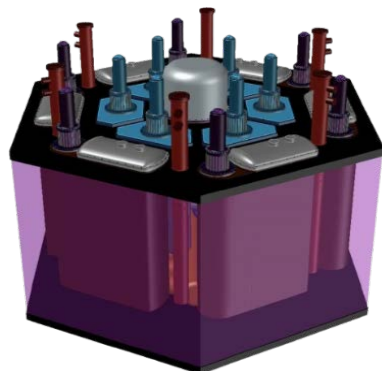
**MCSFR**

模块化氟盐快增殖堆

功率：50MWe/模块

使用铀/钍或混合燃料

可扩展到1200MWe



处在概念设计阶段

**Alpha Tech**

**MSTIR**

氟盐热堆

功率：30MWth

使用铀或钍燃料



处在概念设计阶段

**Muons Inc.**

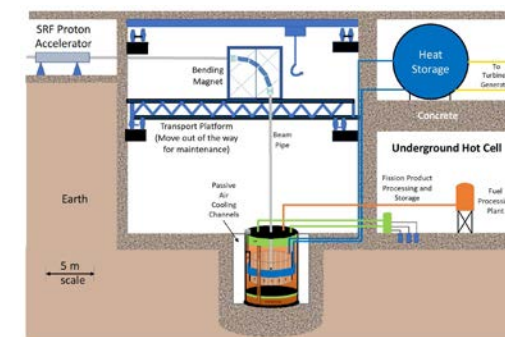
**Mu\*STAR**

加速器驱动热焚烧堆

功率：220MWe

使用铀燃料

超导质子加速器+MSRE



处在概念设计阶段



# 汇报提纲

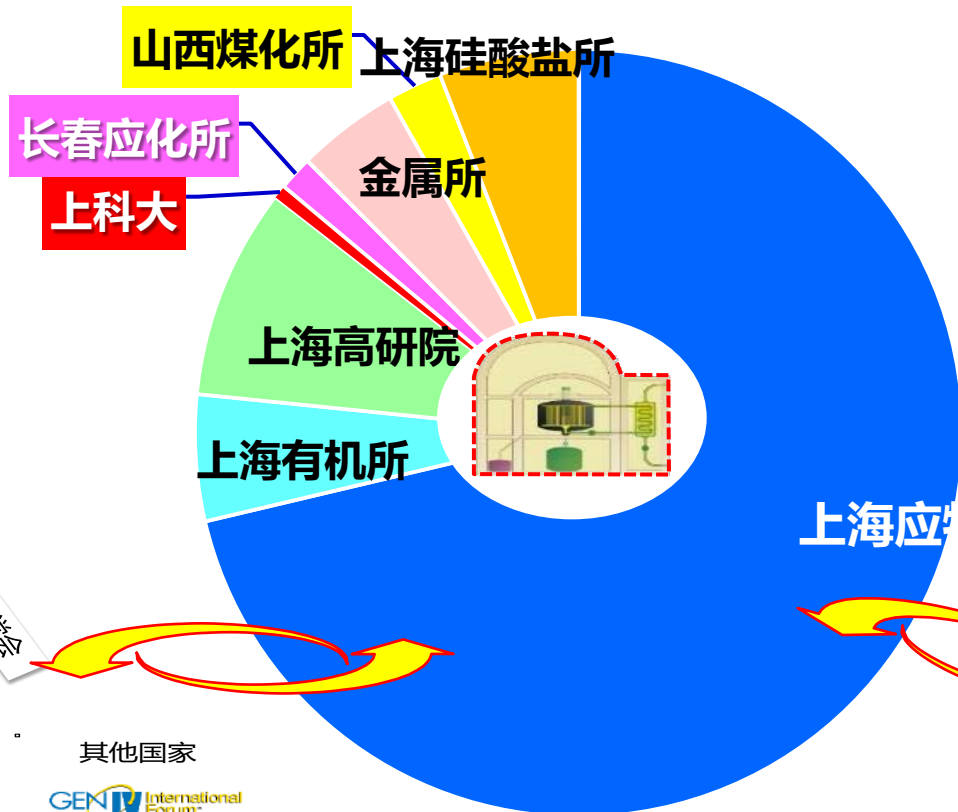
1. 熔盐堆国际研究进展
2. TMSR专项主要进展

# 中科院2011年启动TMSR先导专项 (A)

- **项目的名称：**未来先进核裂变能—**钍基熔盐堆核能系统 (TMSR)**
- **项目的目标：**用**20年**左右时间研发第四代的裂变反应堆核能系统以及钍铀循环技术，达到工业应用。
- **TMSR研发取得重大突破：**跨所组建了国际上规模最大的熔盐堆研发团队，约750人（应物所约500人）；在立足于自主研发和国内工业的基础上，从无到有，TMSR团队已掌握关键材料与装备、腐蚀控制等核心技术，建成功能完善的非核（冷）研究基地，**即将建成实验堆。**
- **小型模块化钍基熔盐堆研究设施列入“十四五”国家规划**

# 中国科学院先进核能创新研究院

TMSR科技队伍  
~ 750人  
TMSR中心400人  
研究生~ 220人



中国科学院  
先进核能创新研究院



# 解决：熔盐堆用材料和燃料研制关键技术

## 掌握液态燃料盐技术，居国际领先

- 掌握核纯FLiBe盐合成技术  
(杂质硼当量 $<2\text{ppm}$ )
- 掌握FLiNaK熔盐合成净化技术  
(氧杂质 $<100\text{ppm}$ )
- 掌握高纯熔盐吨级生产工艺
- 完成熔盐物性数据评估
- 完成燃料盐体系热力学数据库



高温熔盐



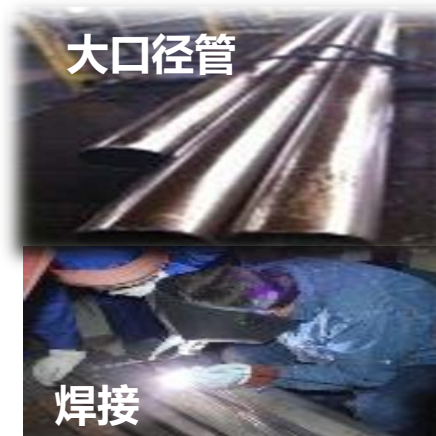
氟盐制备中试样机  
(年产吨级)



FLiBe

## 掌握高温镍基合金制造加工焊接技术 打破国外垄断

- 耐熔盐腐蚀GH3535高温镍基合金
- 掌握中试冶炼、型材加工、焊接技术，总体性能与美国Hastelloy N合金相当
- 攻克高钼合金变形加工技术，大尺寸无缝管材技术超越美国



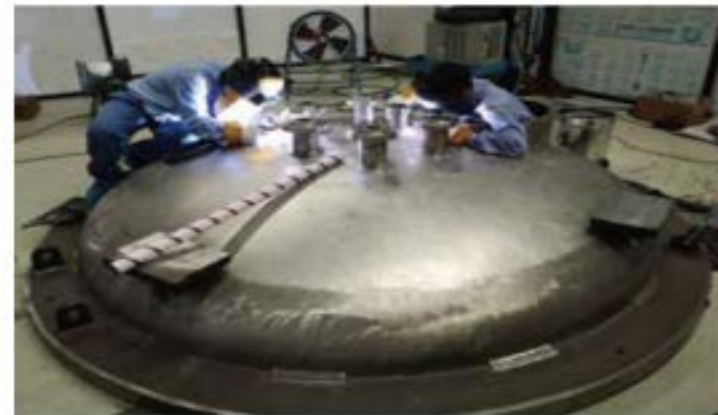
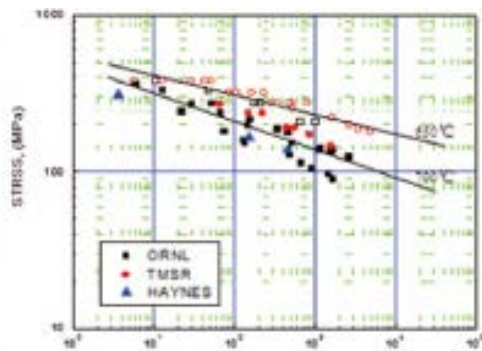
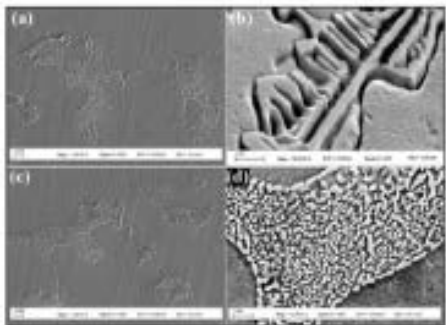
大口径管

焊接

制造能力	中国	美国Haynes
管材直径	168 mm	$<89\text{ mm}$

堆用无缝管材制造能力

# 镍基合金焊接及设备制造



基础研究

实验室研究

主容器环缝自动焊接技术

接管座精度控制技术



工艺验证

设备制造

换热管内孔焊技术

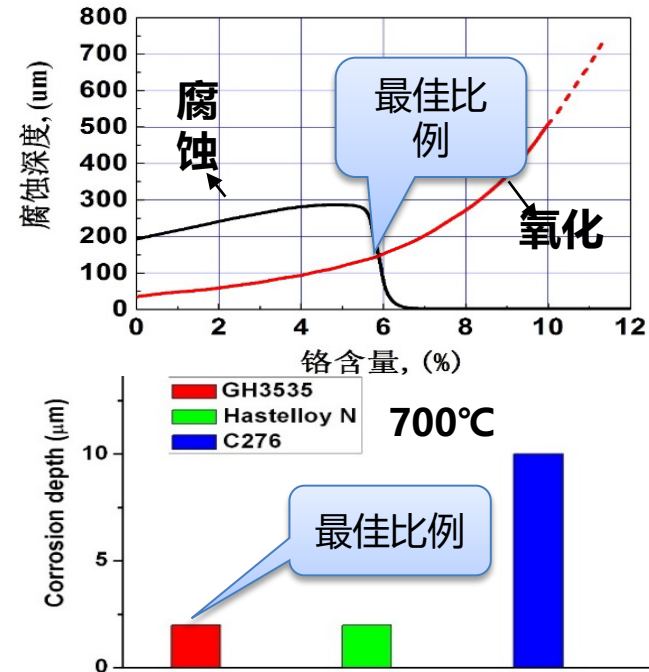
熔盐泵单面焊双面成型技术

# 解决：堆用合金熔盐强腐蚀性难题

□ 揭示易蚀元素扩散和杂质腐蚀机理，发展了综合性熔盐腐蚀主动控制技术

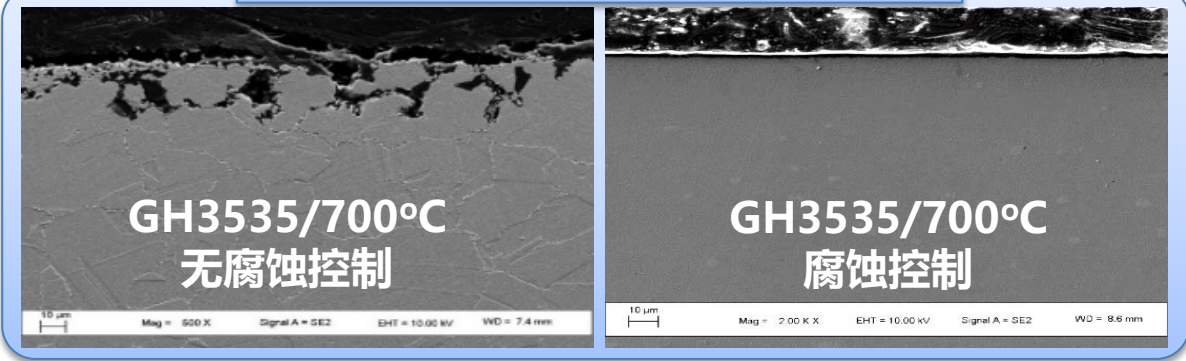
● 合金700度下年腐蚀率小于15微米

- **设计优化**：优化合金成分、降低Cr扩散
- **表面处理**：表面FTD改性，提高耐腐蚀性
- **熔盐纯化**：制备高纯氟盐、控制杂质含量
- **电位调控**：添加抑制元素、电化学控制腐蚀

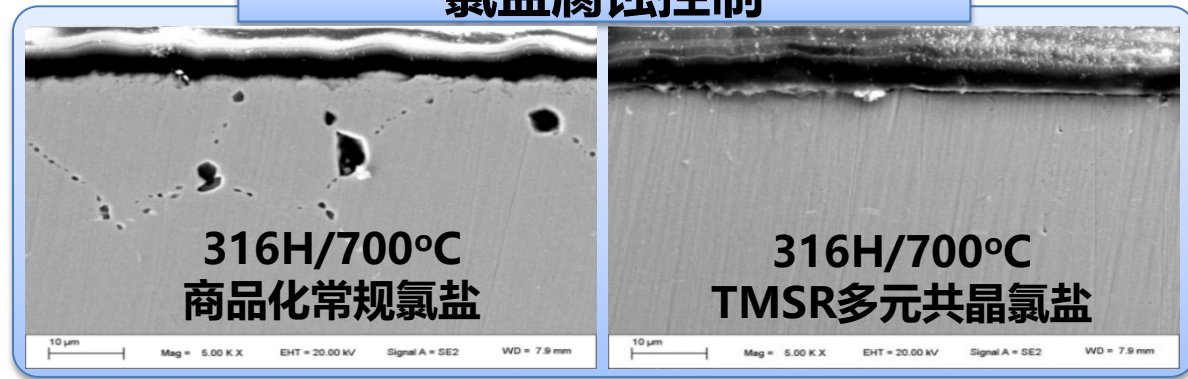


合金成分(Cr)优化 合金年腐蚀深度

## 熔盐堆氟盐腐蚀控制



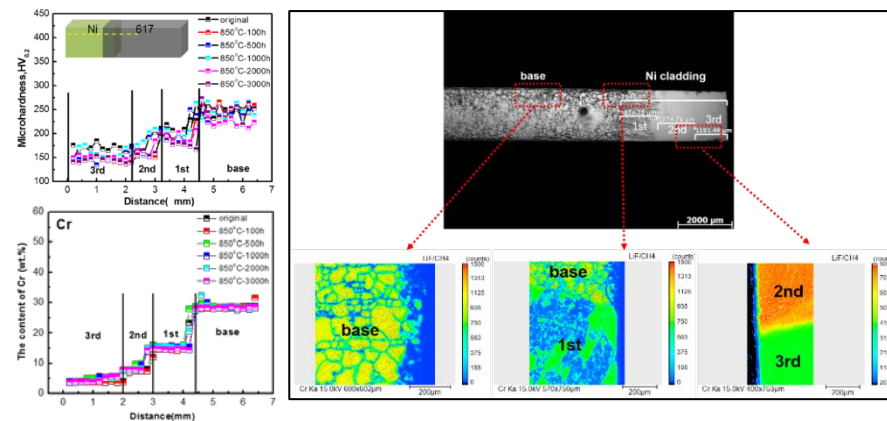
## 氟盐腐蚀控制





# 耐超高温 (~800°C) 合金研发取得进展

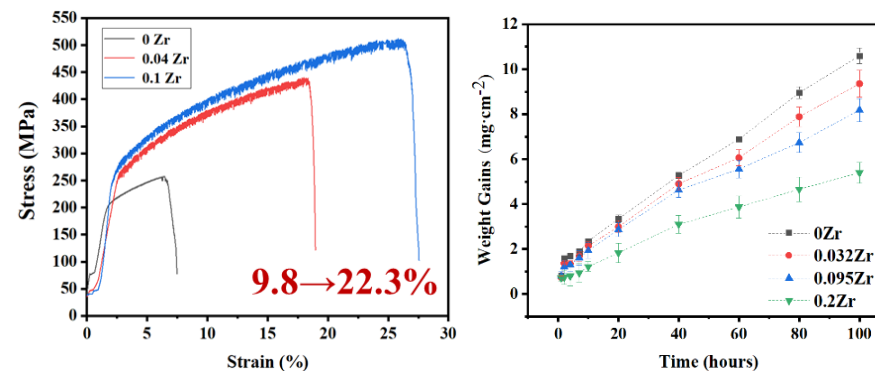
📖 完成了Ni/617复型合金的高温热稳定性及耐腐蚀性能评估，结果证明覆层的热稳定性好，并大幅提升了617合金的耐腐蚀性能。



复型合金在850°C的时效热稳定性以及的熔盐腐蚀行为

📖 通过微量Zr的添加，显著提高了Ni-26W-6Cr合金的中温脆性和抗氧化性能。

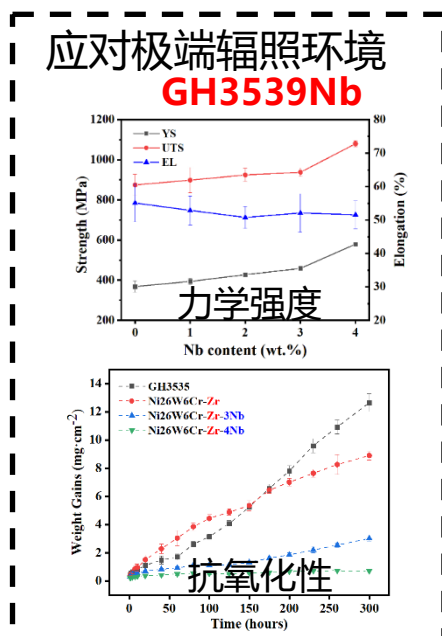
申请发明专利 (申请号: 2020108081888、202011247376.4)



Ni-26W-6Cr-Zr合金的650°C拉伸性能及850°C氧化动力学曲线

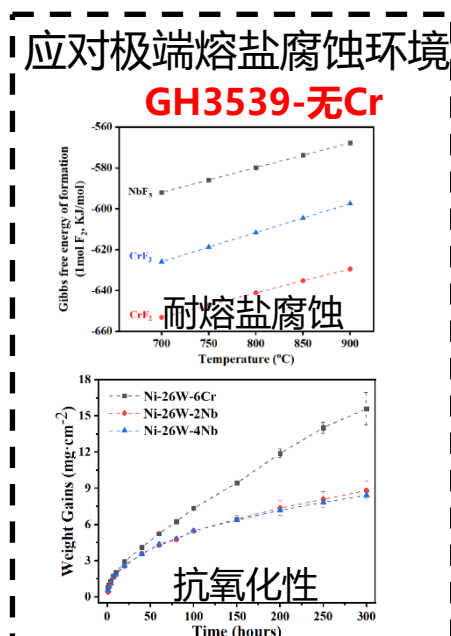
# 耐超高温 (~850°C) 合金研发取得进展

自主开发GH353合金，以及 $Y_2O_3$ 弥散强化NiMo高温二元合金表现出优异的耐熔融性盐腐蚀，显示了其作为熔盐堆结构材料的巨大潜力



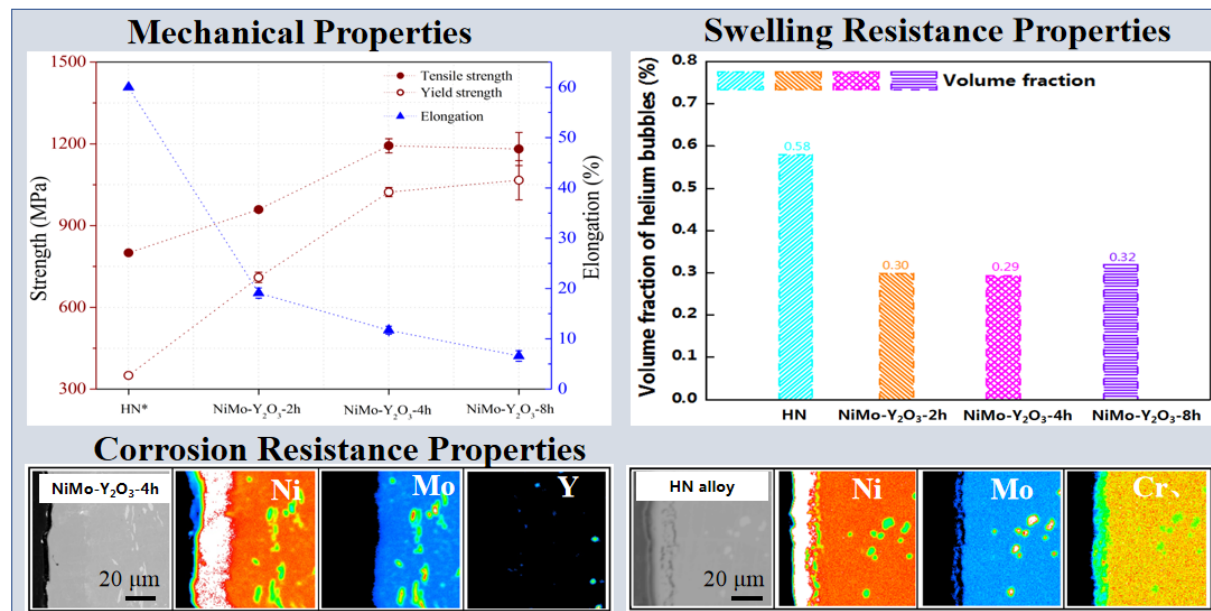
Nb改善力学强度和抗氧化性

专利申请号：202111056322.4



去Cr改善耐熔盐腐蚀和抗氧化性

发明专利申请号：202111220176.4



NiMo- $Y_2O_3$ 合金力学、抗氦致肿胀及耐腐蚀性能

H.F. Huang\* et al., *J. Mater. Sci. Technol.* 109 (2022) 129

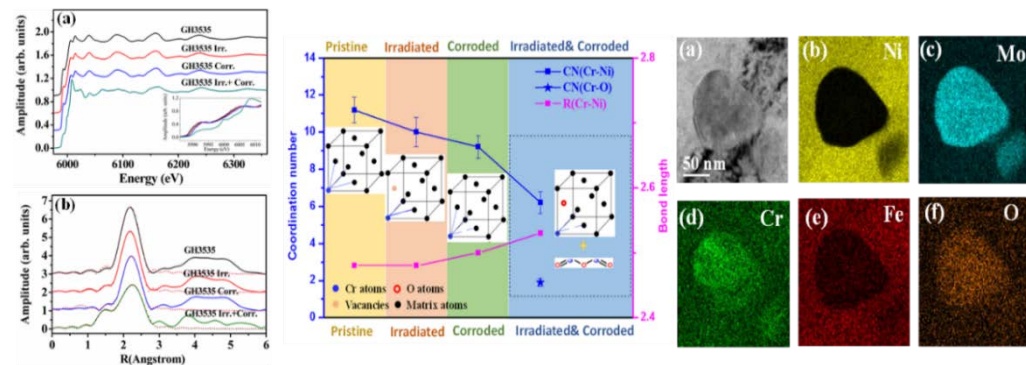
发明专利申请号：202110280872.8

X.-X. Ye\* et al. *Corros. Sci.* 191 (2021) 109761.

X.-X. Ye\* et al. *Corros. Sci.* 187 (2021) 109480.

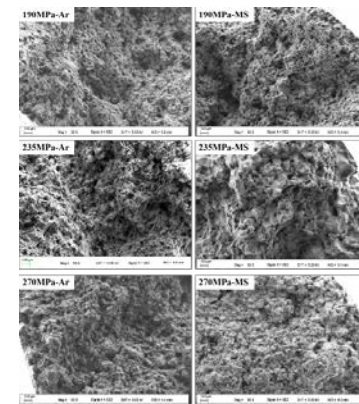
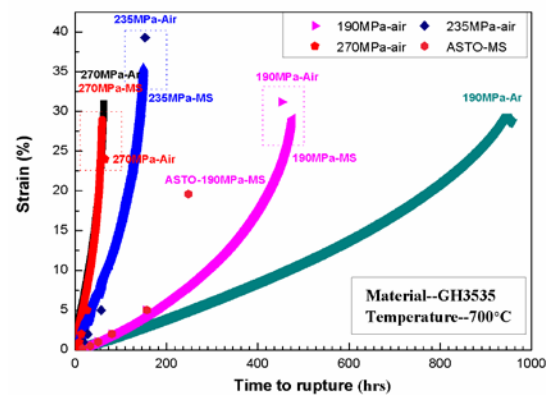
# 熔盐堆合金协同损伤效应研究取得重要进展

研究了GH3535合金的辐照-腐蚀协同效应，结合同步辐射表征从原子尺度揭示了辐照对熔盐腐蚀的促进机制。



GH3535合金650°C辐照-腐蚀实验后的配位结构及元素分布图

证明了GH3535合金在高拉应力作用下具有良好的抗蠕变-腐蚀能力，但熔盐纯度的降低将减少合金的蠕变寿命。



发表论文Corros. Sci. (2020) 108408。

GH3535合金在700°CFLiNaK熔盐、氩气及大气中的蠕变曲线及断口形貌

# 镍基合金辐照效应速率理论方法的建立

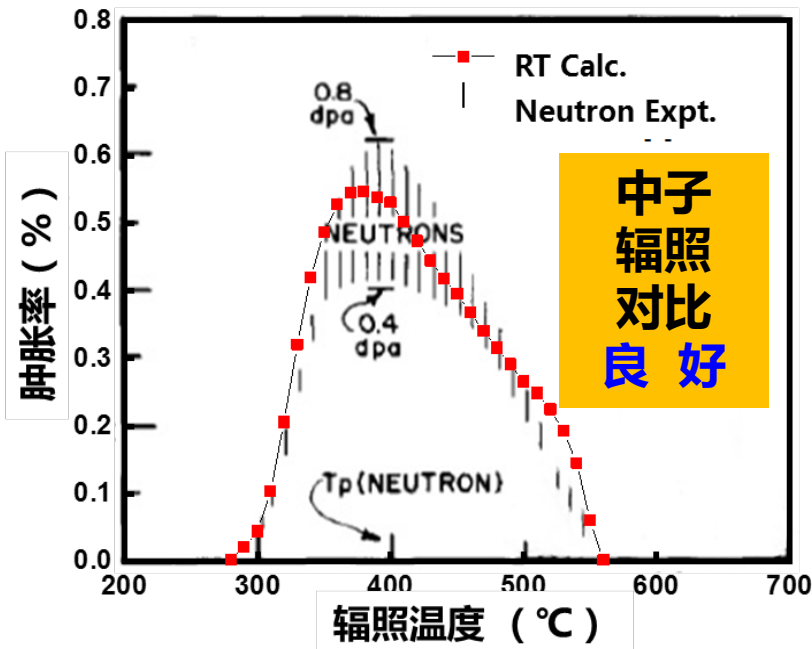
建立了金属镍在中子-离子辐照环境下辐照效应的速率理论预测方法  
预测材料肿胀率随温度、辐照剂量的关系，与辐照实验结果符合良好

## 速率理论方法学发展

- ◆ 建立适用于镍基合金的速率理论方法，并获得材料参数
- ◆ 求解辐照缺陷演化方程
- ◆ 模拟从皮秒-年尺度下缺陷演化
- ◆ 目标：  
获得以年为单位，长时缺陷演化规律，预测结构材料辐照寿命

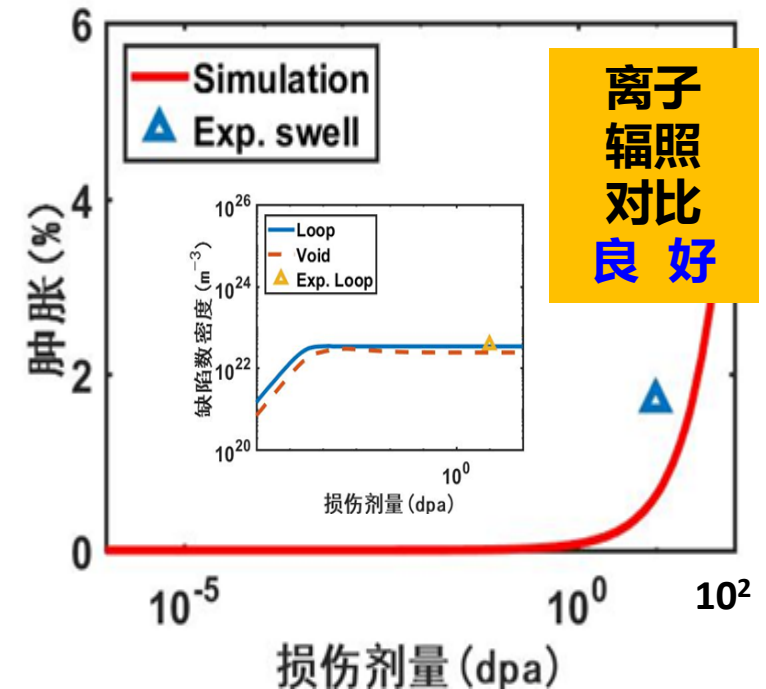
## 金属镍中子辐照肿胀规律预测

辐照时间：2.5月  
辐照剂量：0.6dpa（低剂量）



## 金属镍离子辐照肿胀规律预测

辐照剂量：<100dpa（高剂量）

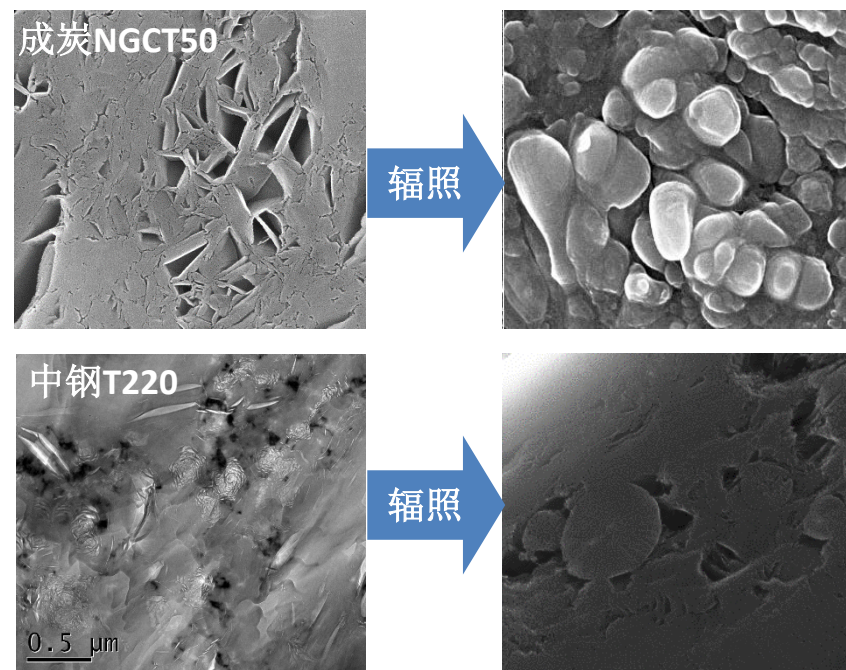


# 核石墨微结构与辐照寿命关联性

揭示了典型国际核石墨辐照寿命差异的微观结构根源，**初步建立核石墨微结构与石墨辐照寿命的关联性**

明确了国产超细颗粒石墨的微观结构缺陷（成炭NGCT50含大量取向杂乱微晶结构；中钢T220含大量喹啉不溶物以及界面缺陷），对辐照寿命不利，有待改进

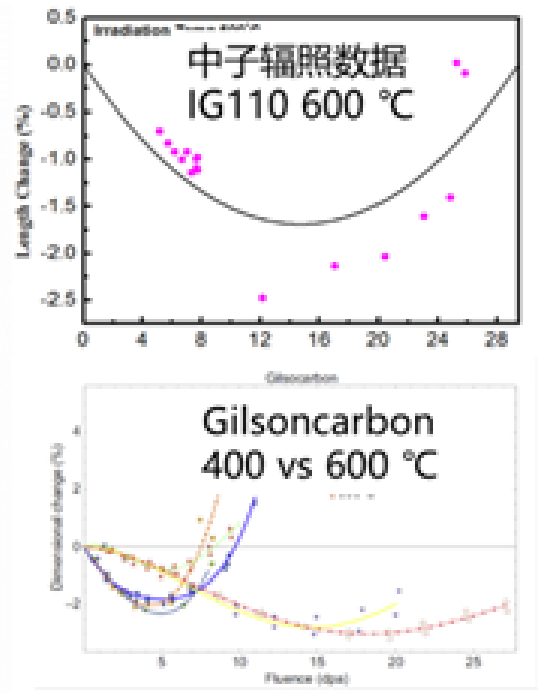
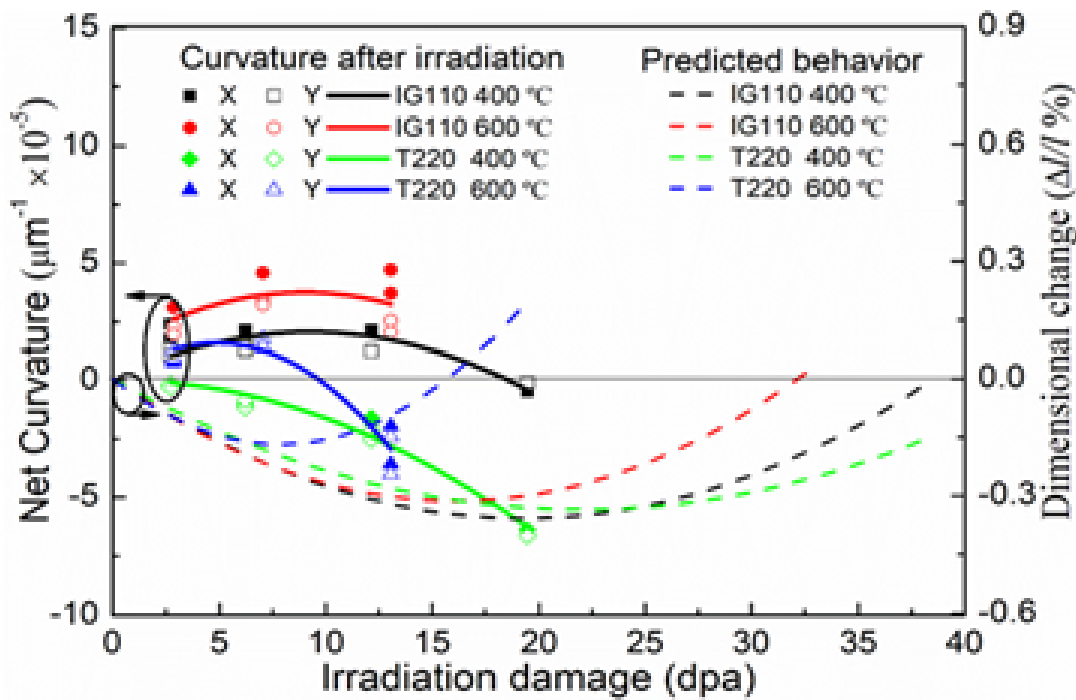
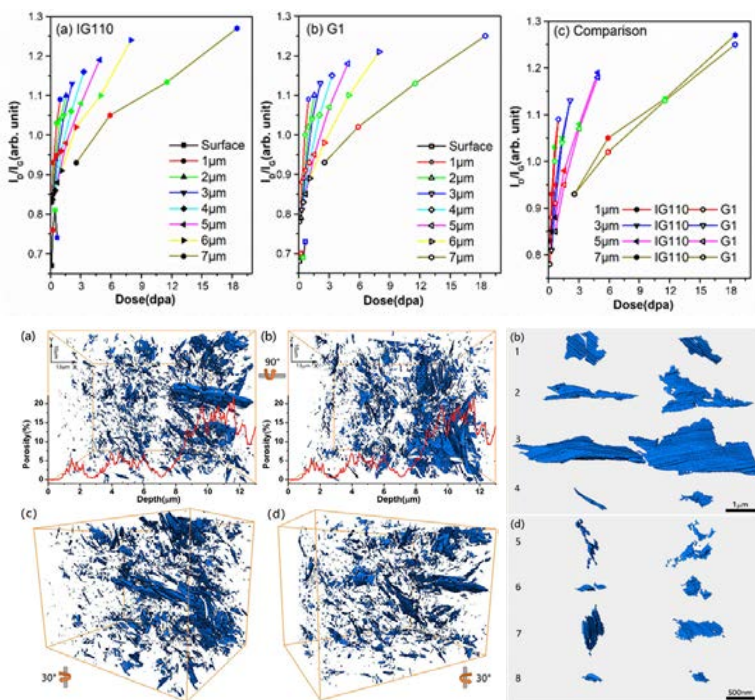
结构	石墨结构(微裂纹) 😊	煅烧裂纹 😊	喹啉不溶物 😊	取向杂乱微晶 😊
TEM				
SEM				
离子辐照后				



# 离子束辐照翘曲法测量核石墨辐照寿命

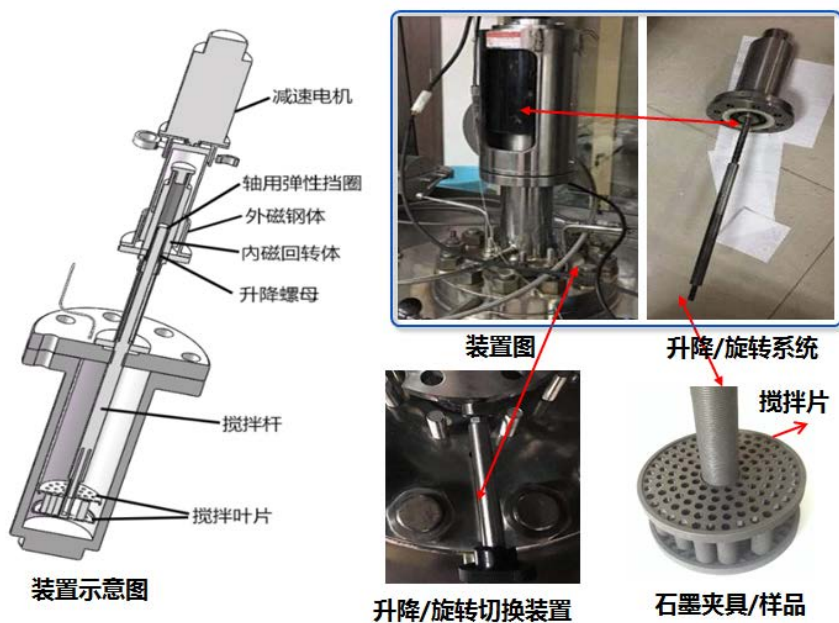
通过对离子辐照后的石墨的结构表征，建立了离子束辐照翘曲法测量核石墨寿命的模型。

经过离子束辐照深度校正，注量率效应以及注量效应的校正，离子束辐照翘曲法预测的IG110的辐照寿命与快中子辐照数据更接近。

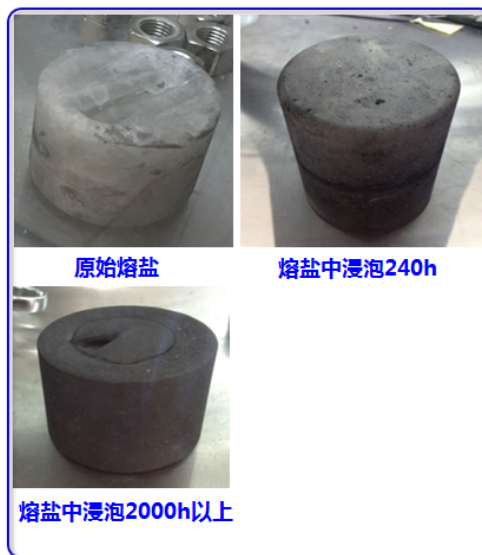


# 石墨在熔盐环境中的磨蚀行为研究

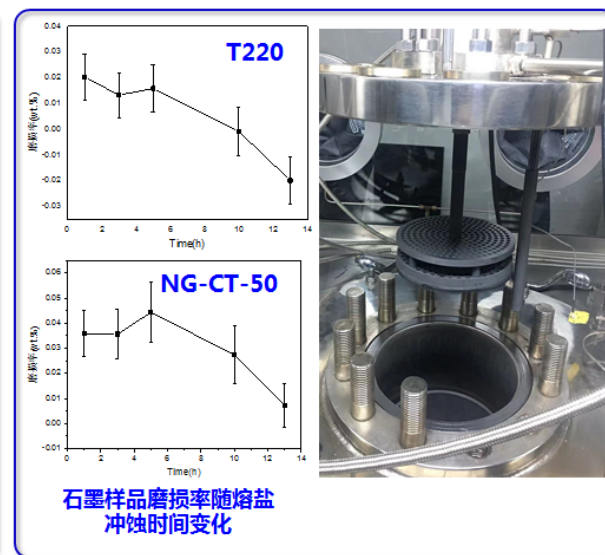
- 完成熔盐冲蚀实验装置研制，开展了FLiBe熔盐冲蚀环境中T220及NG-CT-50石墨磨蚀实验。
- 明确了在流动熔盐环境下石墨粉尘产量、颗粒尺寸分布，为熔盐堆中石墨粉尘清理、过滤提供建议。



静态熔盐实验



动态熔盐实验-旋转圆柱法



熔盐冲蚀实验装置研制

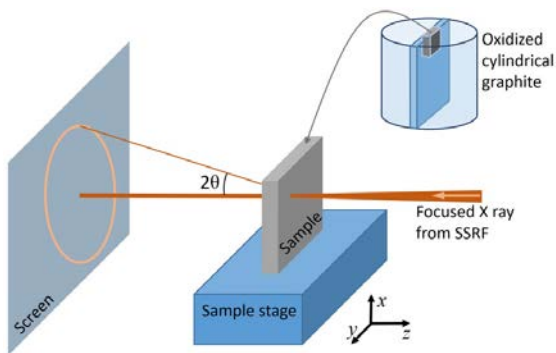
石墨在FLiBe熔盐中的磨蚀行为研究

# 提出核石墨氧化动力学研究的新方法

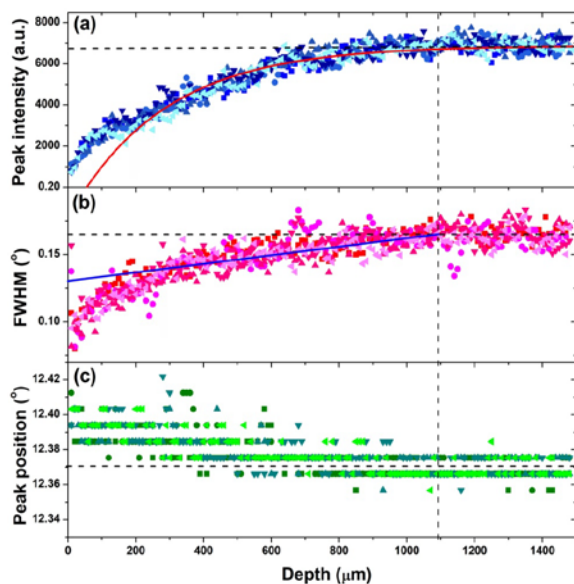
📖 在上海光源微聚焦线站，首次采用微聚焦XRD表征氧化后核石墨微结构的深度分布，发现(002)衍射峰的强度和宽度对氧化失重非常敏感。

📖 基于此实现石墨氧化深度的精确测量，为石墨氧化动力学研究提供了一个有力工具。

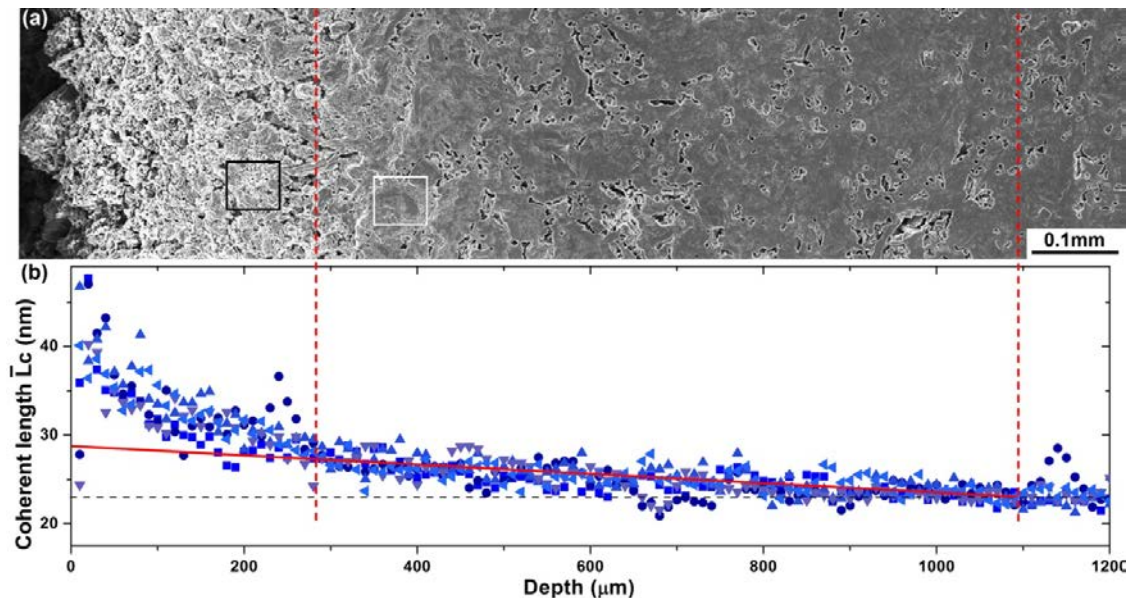
## 上海光源微聚焦线站



实验设计



XRD峰强度、宽度的深度分布



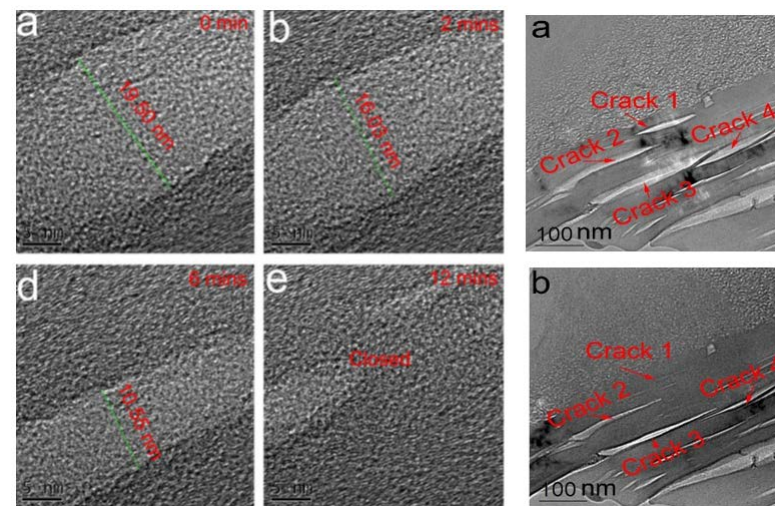
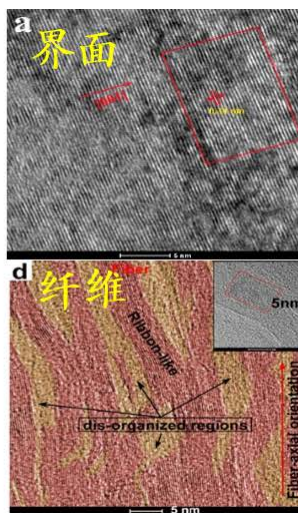
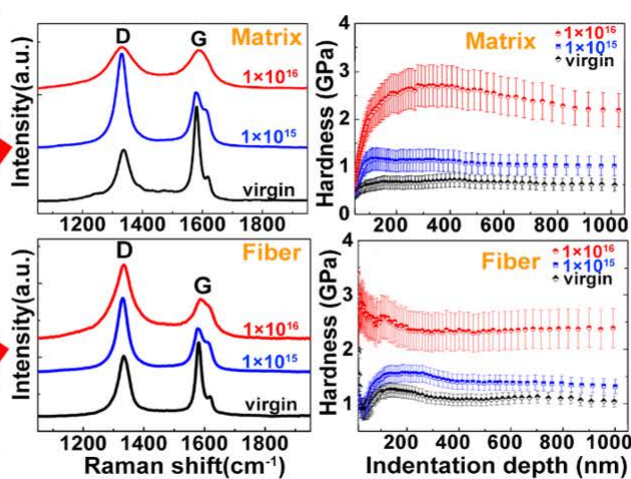
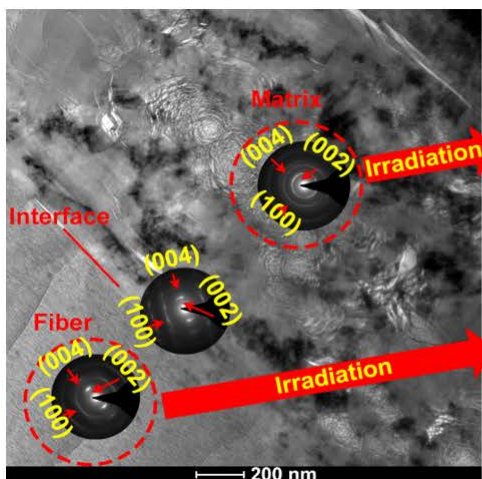
微结构表征与XRD结果相结合



# C/C复合材料在熔盐堆中的应用研究

探索C/C复合材料在熔盐堆中的服役过程中辐照损伤行为的关键科学问题。

针对C/C复合材料中纤维、基体以及界面处不同的辐照敏感性，进一步开展了辐照导致C/C复合材料辐照肿胀行为引起力学硬化、脆化的原因。



纤维、基体以及界面处不同的辐照敏感性

C/C复合材料辐照肿胀行为探究

# TMSR钍基燃料结构及物性数据

获得含钍燃料盐（混合熔盐体系）的结构与物性，包含基本物性参数（密度、热容、谱学）及动力学性能（扩散系数、粘度系数）等参数，补充作为熔盐子库C类数据

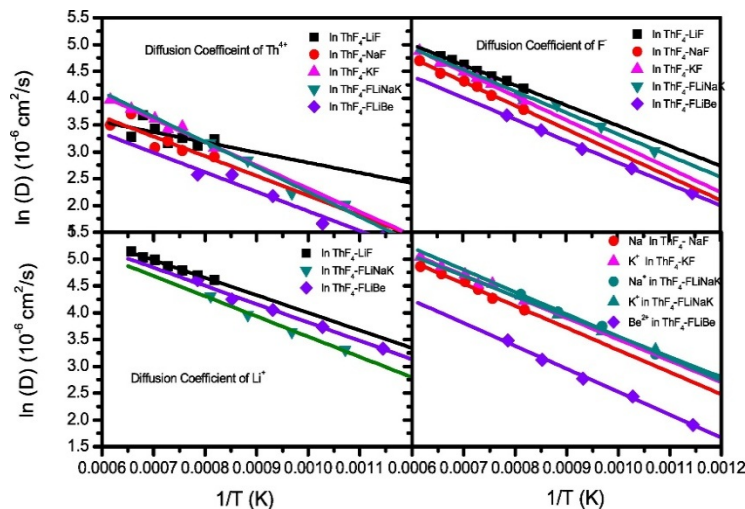
## ■ 熔盐体系、成分及结构性能汇总

熔盐体系	$X_{\text{ThF}_4}$ (%)	结构和物性
LiF, NaF, KF		<b>结构参数:</b> <input type="checkbox"/> 微结构信息 <input type="checkbox"/> 径向分布函数 <input type="checkbox"/> 配位参数  <b>性能:</b> <input type="checkbox"/> 粘度系数 <input type="checkbox"/> 扩散系数
LiF-NaF-KF (46.5:11.5:42)		
ThF <sub>4</sub> -LiF	5, 25, 50, 75	
ThF <sub>4</sub> -NaF	5	
ThF <sub>4</sub> -KF	5	
ThF <sub>4</sub> -LiF-NaF-KF	5	
ThF <sub>4</sub> -LiF-BeF <sub>2</sub>	5	

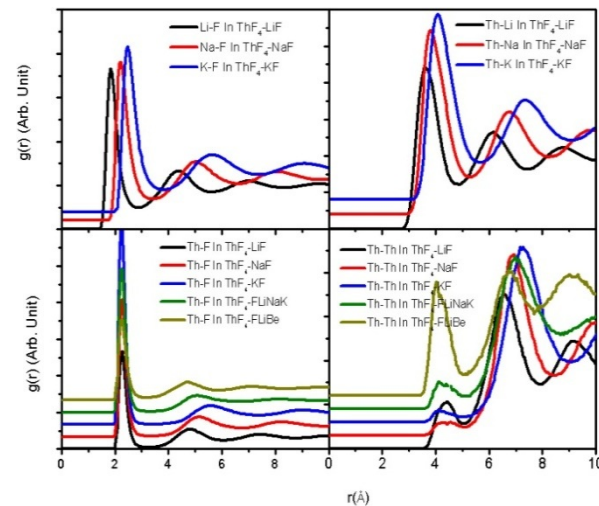
熔盐子库  
数据分析

分子动力学建模  
性能预测

C类数据  
补充汇总



不同含钍熔盐的扩散系数



不同含钍熔盐的结构信息

# TMSR材料工程数据库建设与标准建立

完成**A类物理隔离数据库**建设，推进数据保密工作，规范数据库使用  
完成《金属材料蠕变-疲劳试验方法》国家标准制定，填补我国在该领域的空白

## ◆ 完善数据库建设

- 完成**A类物理隔离数据库**建设
- 补充合金高温、长时力学性能数据 (>4.5万小时)
- 补充熔盐物性数据

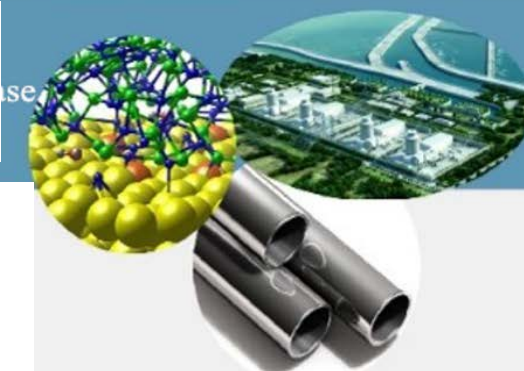
## ◆ 正式成立数据库工作小组，推进数据保密工作，规范数据库使用

## ◆ 堆材料规范与标准

- 完成《金属材料蠕变-疲劳试验方法》国家标准制定 (GB/T38822-2020)
- 《熔盐渗透石墨材料测定方法》中国标准立项

## TMSR科学与工程扩展数据库 (TMSR-SEED)

建立了熔盐堆材料性能数据库，涵盖合金、核石墨、熔盐等材料的**1000多类性能数据集**



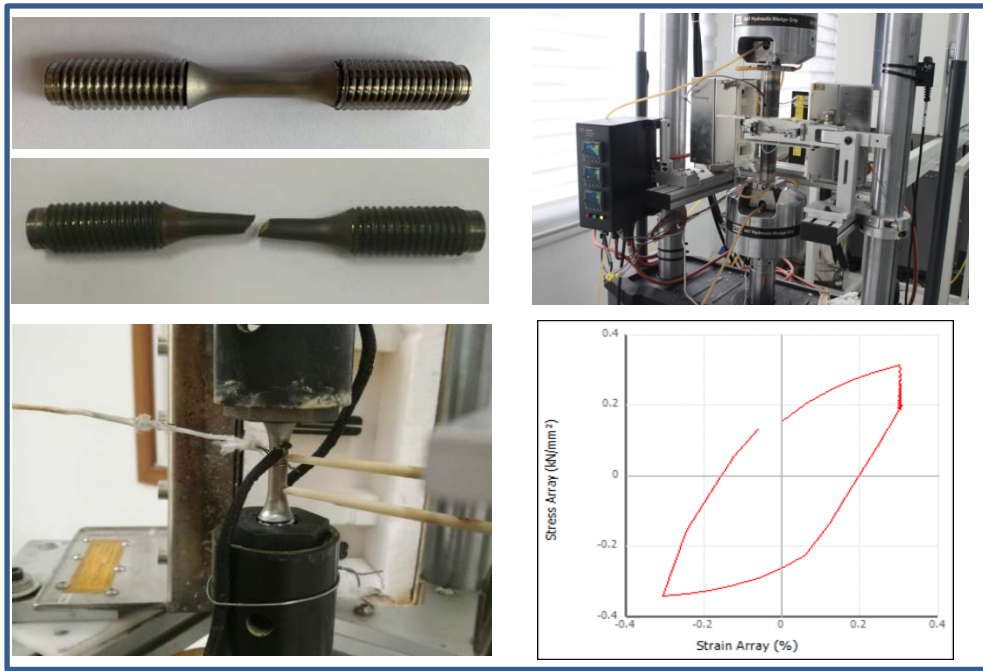
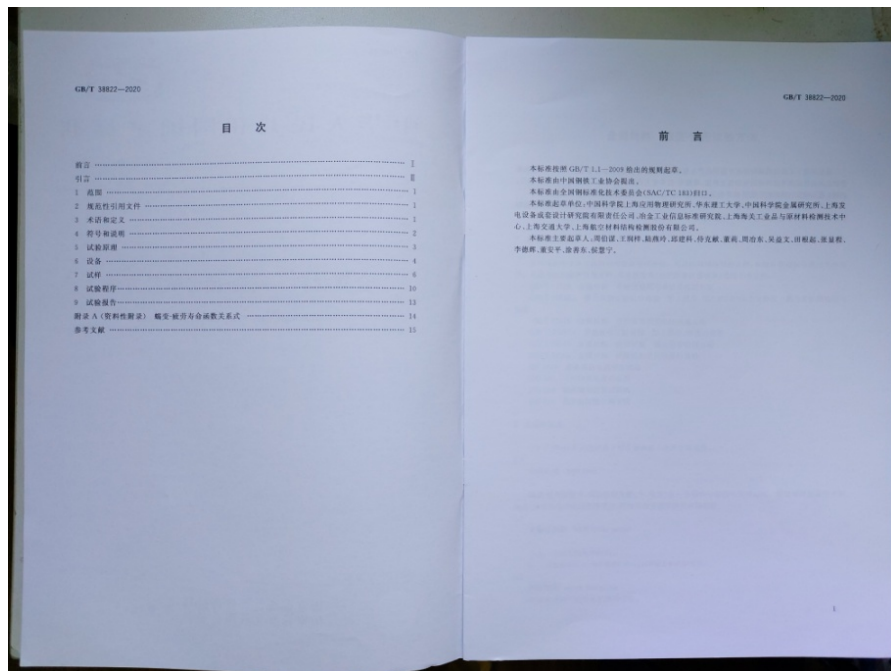
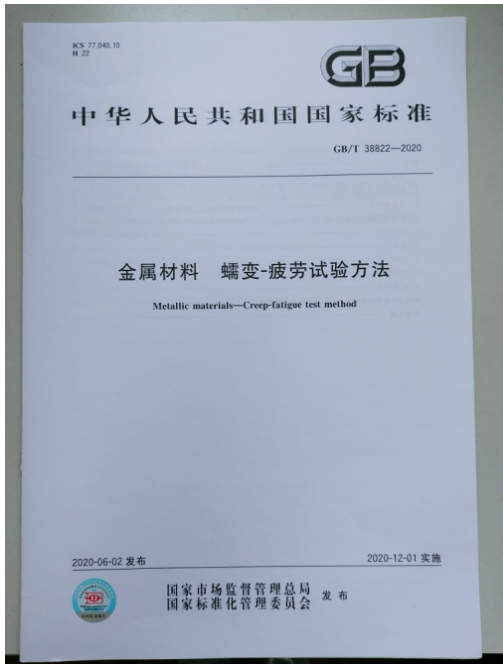
## 标准建立



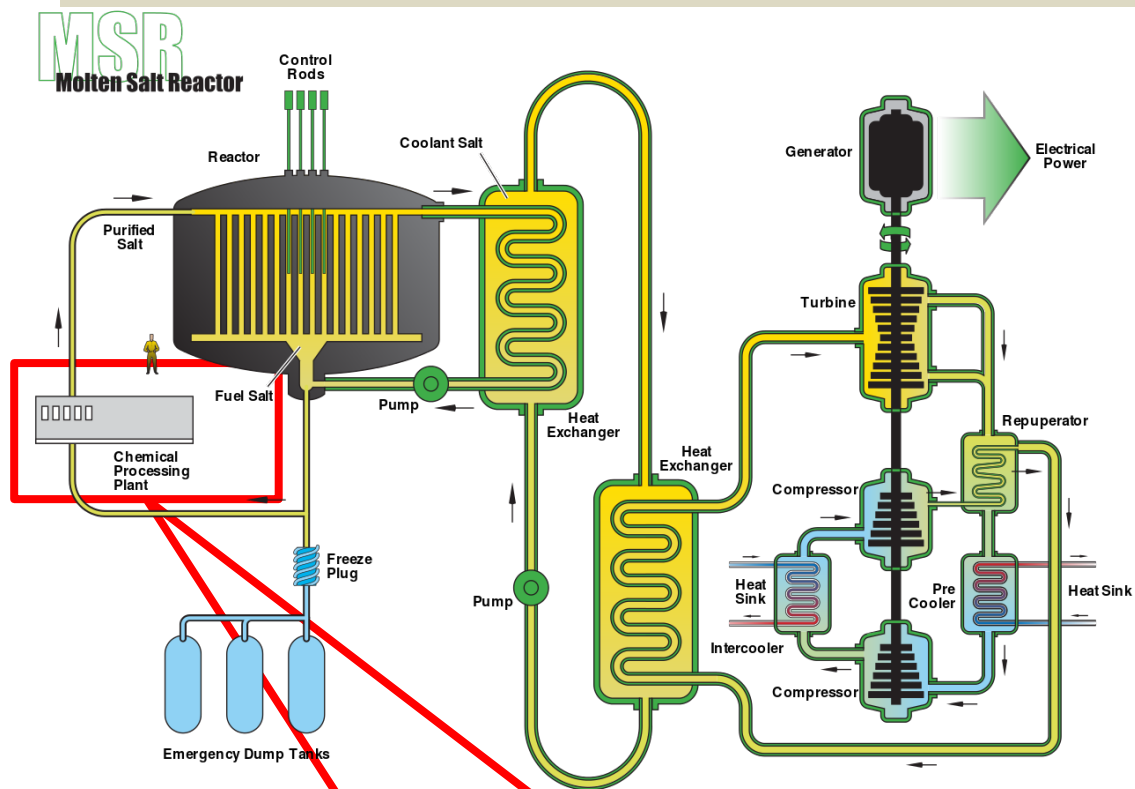
# 完成《金属材料 蠕变-疲劳 试验方法》国家标准制定

📖 材料研究部负责起草、主持制定，标准号**GB/T 38822-2020**

📖 **填补**了我国金属材料蠕变-疲劳试验领域测试标准的**空白**，为国内开展金属材料同时存在蠕变载荷和交变载荷条件下的试验提供了**统一依据**



## 必要性

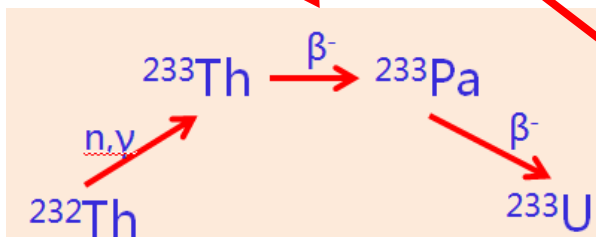


### ◆ 钍基熔盐堆——最合适的钍燃料利用方式

- 熔盐堆的特殊性来自于一回路中使用液态燃料，便于燃料换料和更新；
- 燃料类型：锕系氟化物溶解在氟化物载体盐( ${}^7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ZrF}_4$ )中。

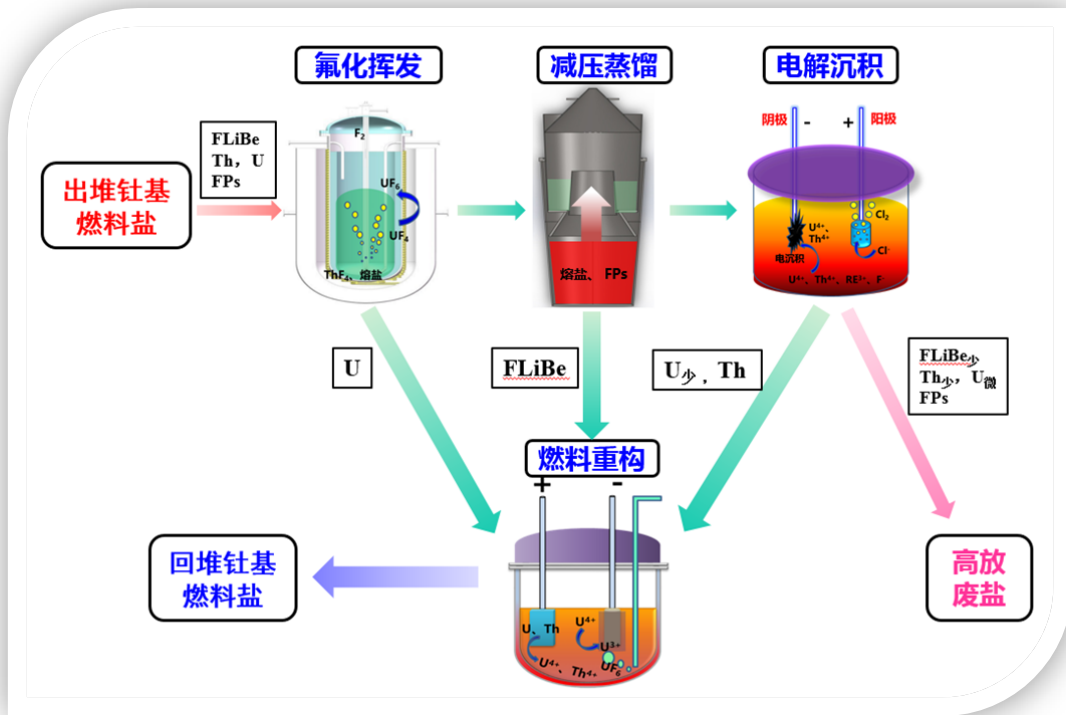
### ◆ 燃料处理是实现熔盐堆中钍燃料增殖利用的必要措施

- 熔盐堆运行时，裂变产物也溶解于燃料盐中；
- 去除Xe, Kr, 和镧系元素等裂变产物（中子毒物），增加Th/U增殖比，提高燃料燃耗和熔盐堆经济性；
- 在线处理：对反应堆干扰大、技术不成熟，离线处理是合适选择。

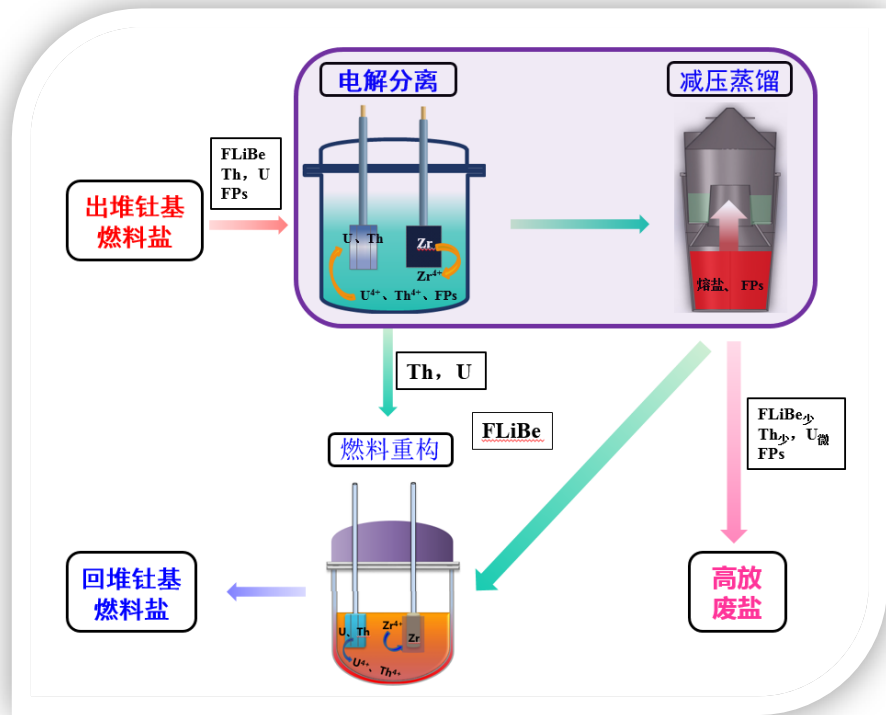


## 干法批处理技术

- 基于氟化挥发、减压蒸馏、电解沉积和燃料重构等单个干法技术的研发，建立熔盐堆燃料处理与循环技术链。
- 离线批处理方案目标：**出堆燃料盐（乏）-回堆燃料盐（新）**。

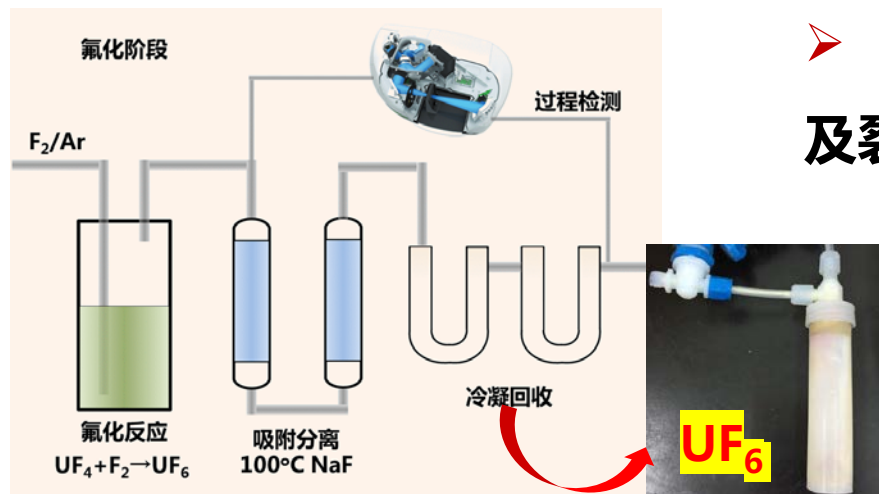


第一代批处理方案



第二代批处理方案

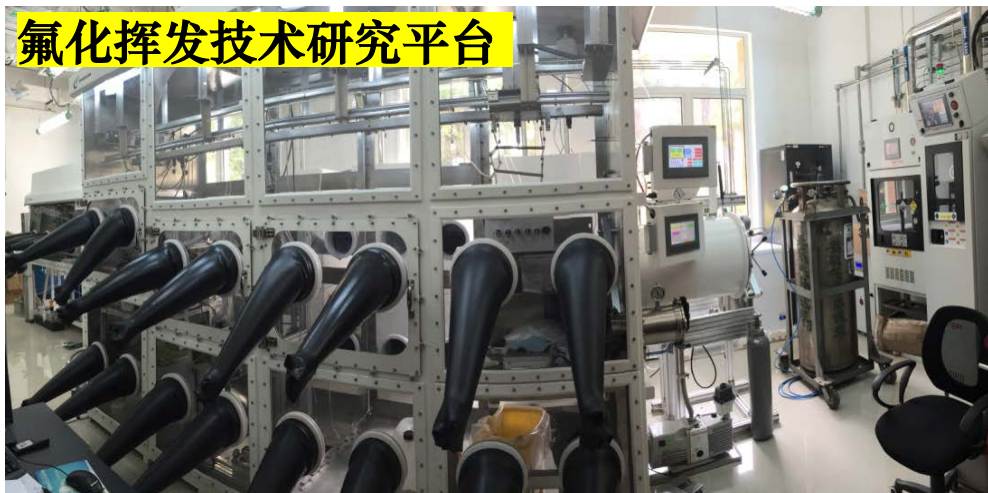
## 氟化挥发



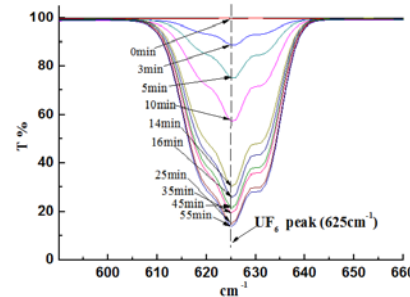
➤ 利用不同元素氟化物的挥发度差异来实现铀与熔盐、锕系元素及裂变产物的分离

- 掌握了FLiNaK、FKZr、FLiBe等熔盐体系铀氟化挥发分离技术，过程可在线监测（红外原位分析），铀分离率可达99.9%， $UF_6$ 产物去污 $10^3$ 以上；
- 进行氟化反应器自主化研制，发展了冷冻壁腐蚀防护技术。

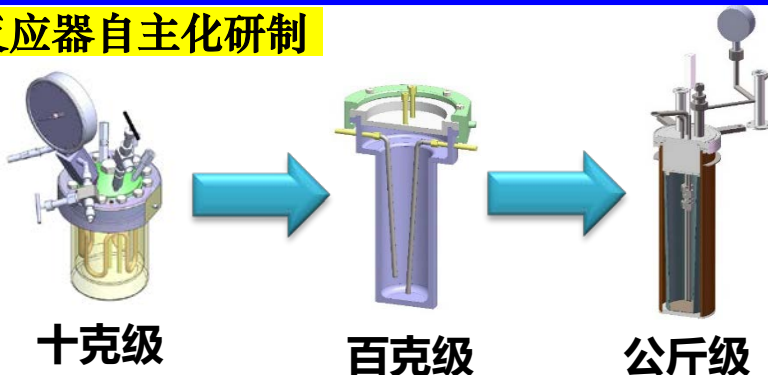
氟化挥发技术研究平台



红外光谱在线分析仪



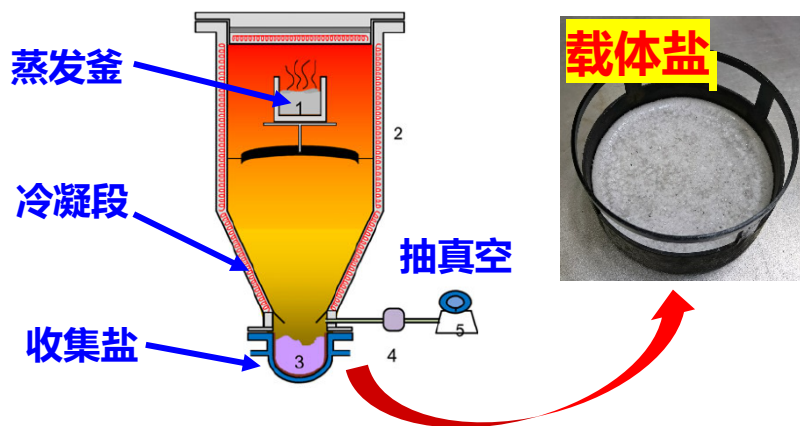
反应器自主化研制



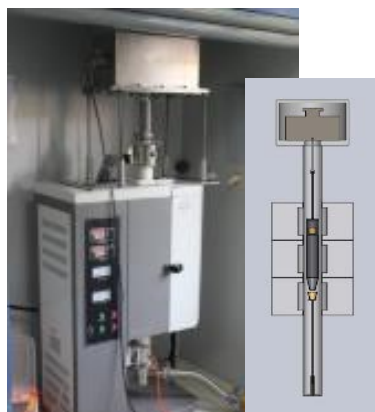
熔盐冷冻壁-腐蚀防护技术



## 减压蒸馏



- 利用蒸汽压差异来实现**载体盐**与其它裂变产物的分离
- 掌握了氯化物、氟化物熔盐的减压蒸馏分离技术，以温度、压力、质量等进行过程实时监测，载体盐回收率达98%以上，裂变产物去污达 $10^2$ 以上；
- 研发了克级至公斤级熔盐减压蒸馏装置，开展了热室内操作验证。



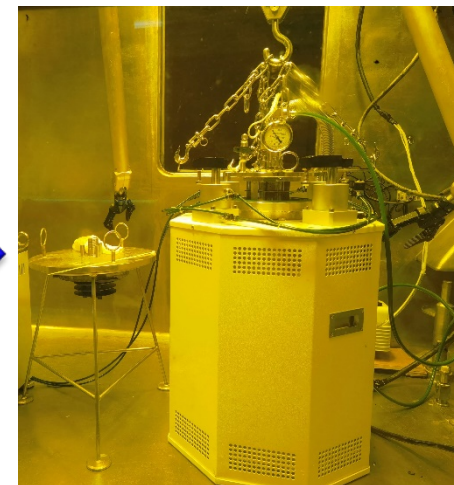
克级熔盐蒸馏技术



百克级熔盐蒸馏技术



公斤级熔盐蒸馏技术

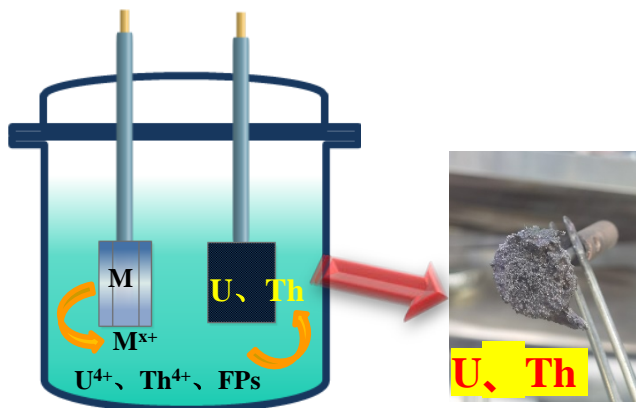


热室内熔盐蒸馏技术



## 电解沉积

### 电解分离



➤ 利用熔盐介质中离子还原电位的差异，实现**钍铀等锕系元素**与裂变产物和熔盐的分离。

➤ 在FLiBe燃料盐体系中开展了钍铀的电解分离研究，成功实现钍铀的电化学分离。

➤ 完成了热室内熔盐电解法分离钍铀的实验验证和电解装置的机械手远程操作验证。

**电解反应：**

阴极： $U^{4+} + 4e^- \rightarrow U$   
 或  $Th^{4+} + 4e^- \rightarrow Th$ ；

阳极： $Zr \rightarrow Zr^{4+} + 4e^-$   
 或  $Be \rightarrow Be^{2+} + 2e^-$

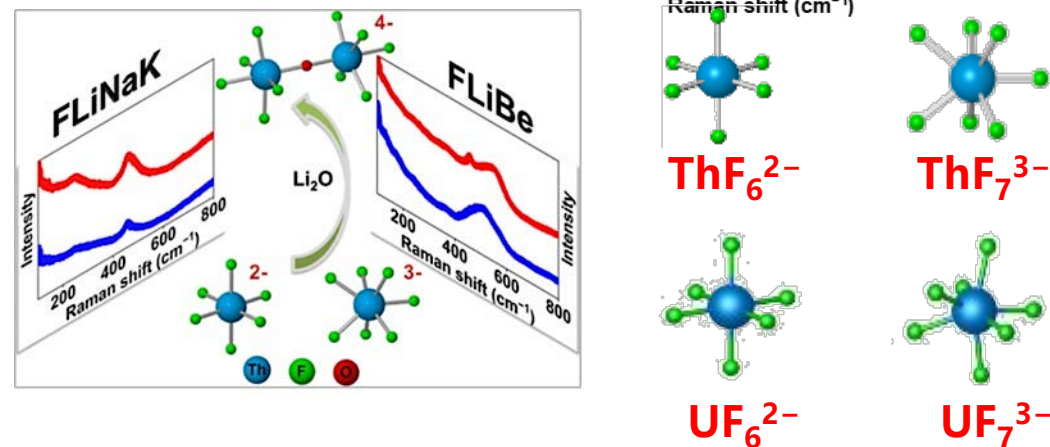
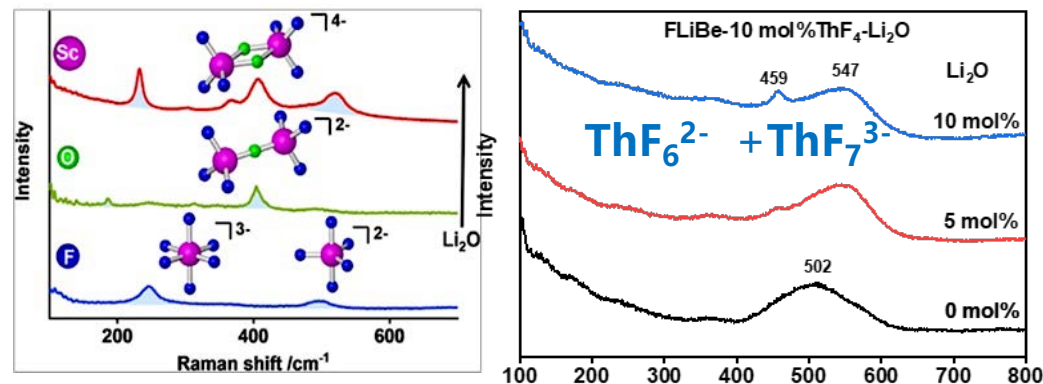
### 热室内电解分离装置

熔盐规模：百克级  
 操作方式：机械手+远程控制

## (1) 钍铀和镧系氟化物与氟氧化物在熔盐中的结构

锕系和裂变产物氟化物在氟盐中的存在形式及其与氧的反应规律对于锕系和裂变产物的分离至关重要。

利用拉曼光谱结合理论计算，确定了在FLiNaK熔盐中钍、铀和镧系氟化物主要以 $MF_n^{2-}$ 和 $MF_m^{3-}$ 形式存在；在FLiBe熔盐中，金属氟化物结构取决于Be-F键和M-F键的键能；对于氟氧化物，Ln和Th主要形成桥氧结构，U主要形成端基氧结构。



- 是什么 (组成结构)
- 为什么 (反应机理)
- 怎么办 (控制方法)

水氧杂质

出现沉淀

影响堆的运行和干法分离效率



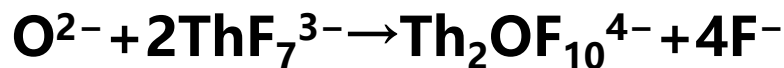
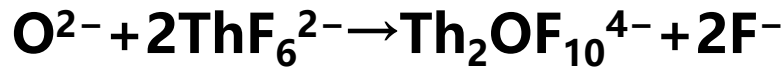
熔盐中沉淀的累积

LiF-BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub>

*J. Phys. Chem. B* **2021**, *125*,1640. *J. Mol. Liq.* **2021**, *325*, 115208.

*J. Phys. Chem. B* **2020**, *124*, 6671. *J. Raman Spectrosc.* **2021**, *52*, 1148.

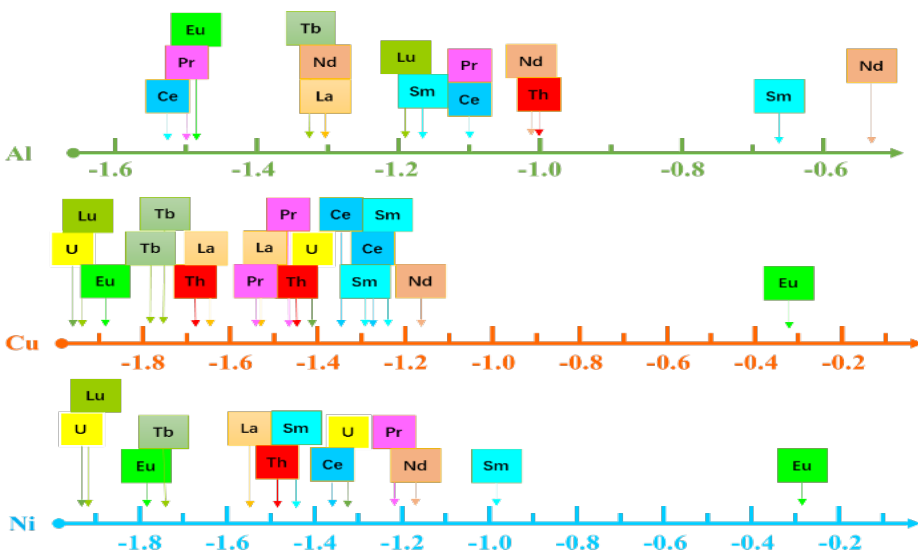
*J. Mol. Liq.* **2021**, *342*, 117476. *J. Mol. Liq.* **2021**, *337*, 116409.



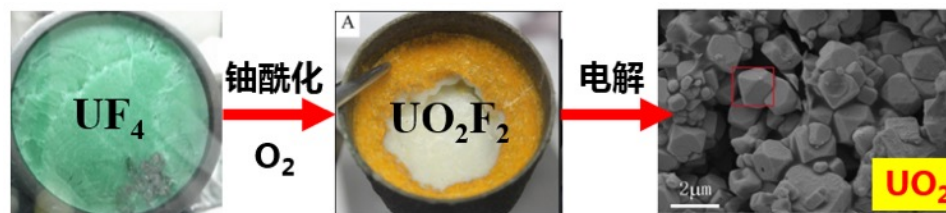
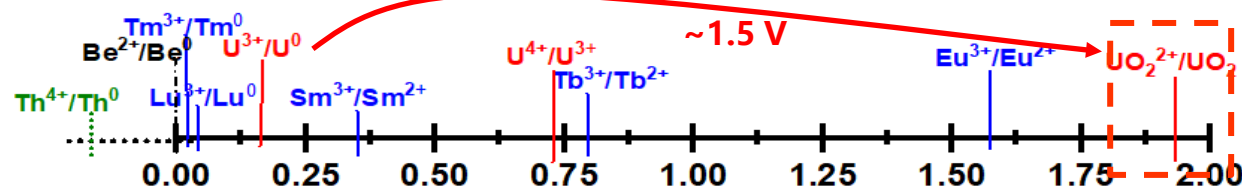
## (2) 熔盐中镧系和锕系元素的电化学分离行为

FLiBe熔盐体系中镧系元素在不同电极上的电化还原电位差异，是实现分离的科学基础

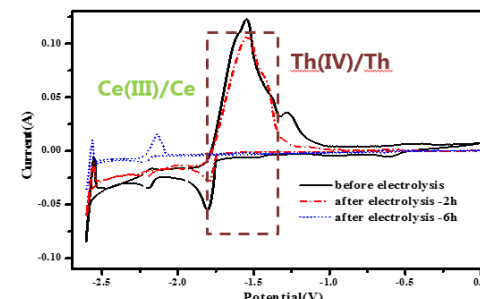
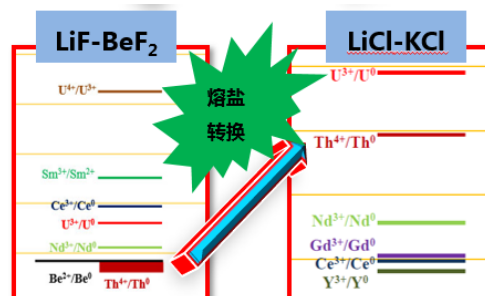
根据不同熔盐体系中的镧系离子电化学行为，提出了基于氟盐体系铀分离和基于氯盐体系钍分离的电解沉积技术。



效率低；  
与稀土分离困难

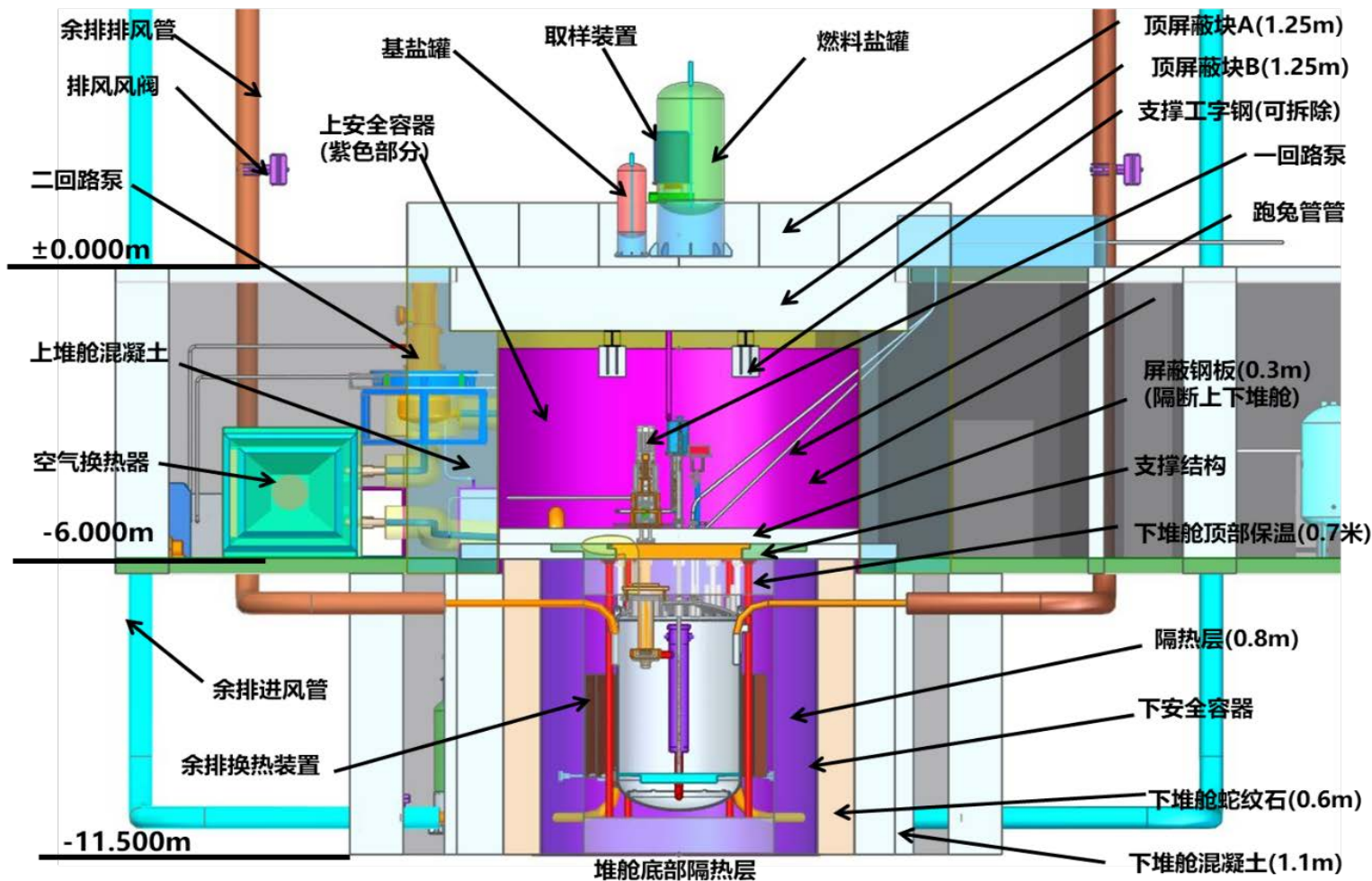


$UO_2^{2+}/UO_2$ 还原电位正：  
与稀土易分离  
产物 $UO_2$ ： $UO_2 \rightarrow UF_4$ 转化  
工艺成熟，便于燃料重构



转换熔盐体系，  
实现了Th的回收  
和与稀土的分离。

# 2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆 (TMSR-LF1)



堆型	一体式熔盐堆
热功率	2 MW
进/出口温度	630°C/650°C
燃料富集度	19.75wt%
燃料盐	LiF-BeF <sub>2</sub> -ZrF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub> -(ThF <sub>4</sub> )
燃料通道 结构材料	超细孔径核石墨
金属结构材料	UNS-N10003合金
覆盖气体	氩气

## 厂址：甘肃武威民勤红砂岗工业区



# 戈壁“变身记”——武威2MWt实验堆建设进展



2018年9月原始地貌



2019年10月



2020年4月



2020年6月



2021年11月

## 举全所之力，保证实现原理验证近期目标

- **安审**：国家核安全局2018年11月批准实验堆选址，2020年1月颁发建造许可证。应物所2020年3月启动实验堆建造，现正申请运行许可证，预计2022年初获批。
- **燃料**：国防科工局2021年8月颁发核材料许可证。
- **设备**：核安全级设备陆续到场安装，计划2022年上半年完成安装，进入调试阶段。



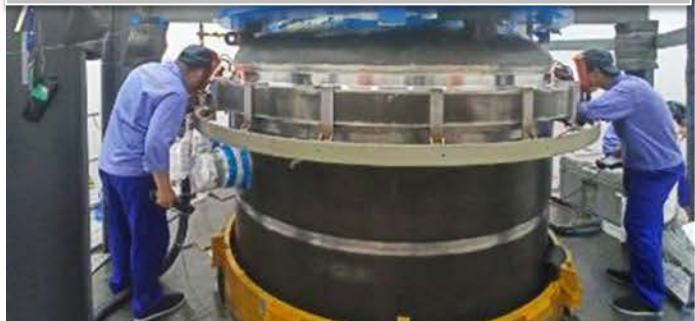
堆本体离线安装于2020年12月启动



下堆舱设备安装于2020年8月启动






主控室已安装就位



**将于2022年  
建成 2MWt  
钍基熔盐实  
验堆**

## 总结和展望

-  中科院先导：2MWt液态燃料钍基熔盐实验堆（TMSR-LF1）
-  “十四五”大科学装置：小型模块化钍基熔盐堆研究设施
-  钍基熔盐堆关键基础科学问题研究



