

# 钍基熔盐堆对核数据的需求

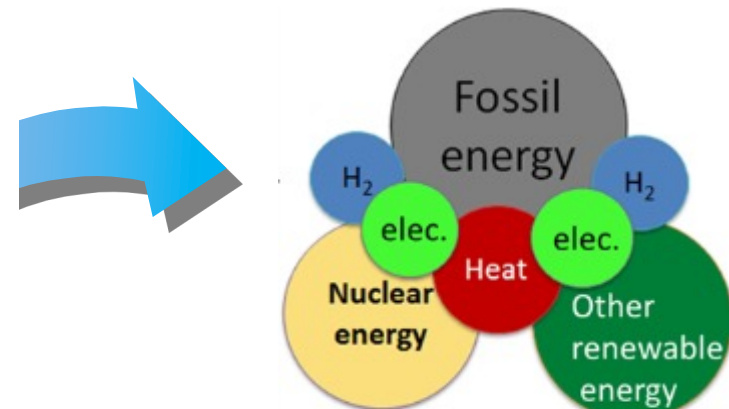
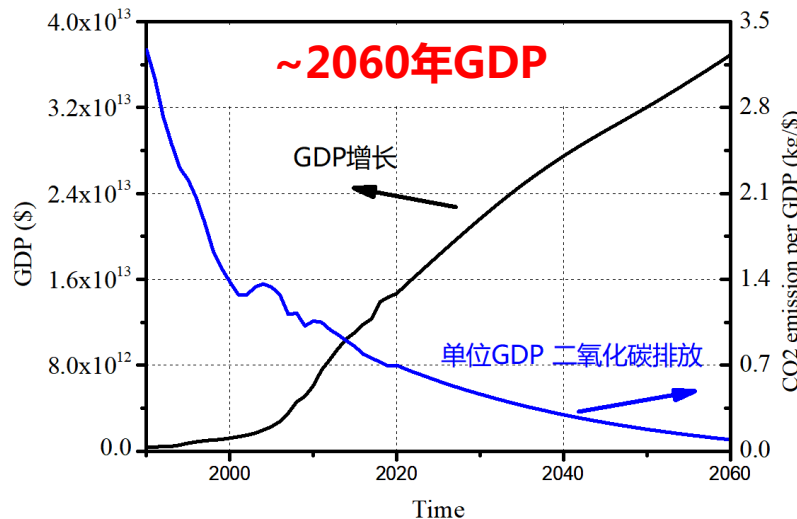
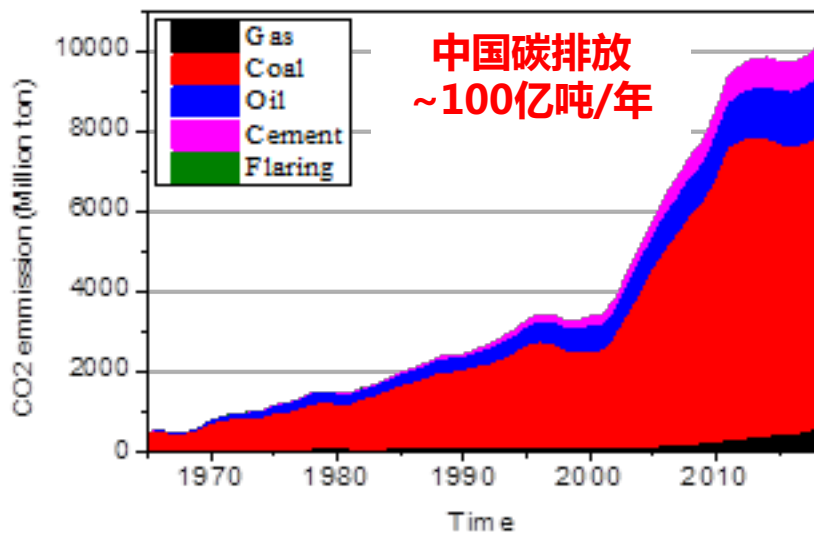
**蔡翔舟**

**中国科学院先进核能创新研究院**

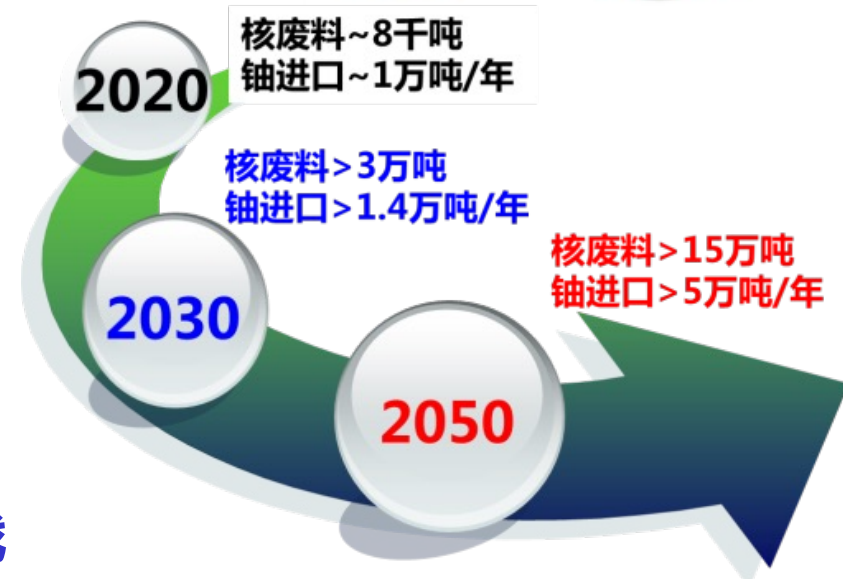
**中国科学院上海应用物理研究所**

01	钍基熔盐堆 ( TMSR ) .....
02	TMSR核数据需求 .....
03	TMSR白光中子源实验装置 .....
04	TMSR核数据测量 .....
05	总结与展望 .....

## 习主席：实现2030年前碳排放达峰及2060年碳中和目标



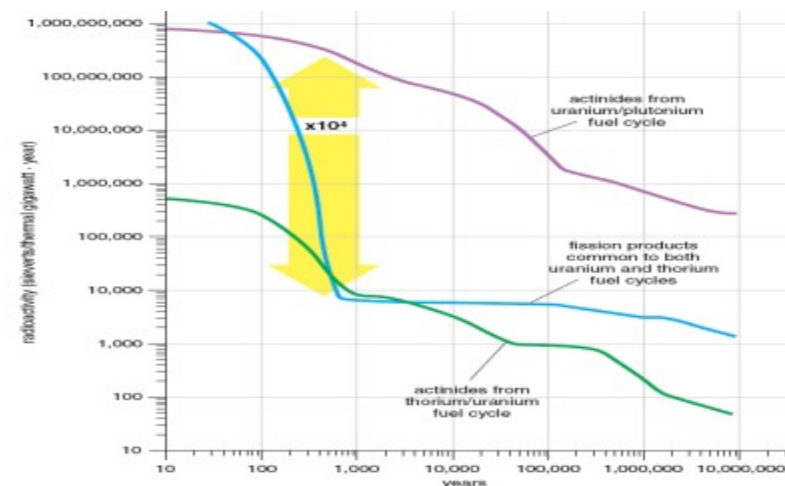
- 2030年总碳排放相对2020年只能略有增加**
- 2030年核电装机容量~200 GWe,核电占比~8.86%**
- 2060年核电装机容量600~900 GWe,核电占比 27%-48%**
- 核燃料供应安全与高放乏燃料堆积成为我国核能大力发展的挑战**



## 钍基核能 (Th)

钍是性能优越的潜在核燃料，可以为能源战略安全提供一个有效途径

- ◆ **资源多**：钍地质储量远超铀（我国尤其显著）
- ◆ **增殖易**：钍铀循环可在热堆中增殖（裂变性能好）
- ◆ **废料少**：钍铀循环的长寿命放射性核废料少
- ◆ **扩散难**：核废料不含足够量的武器级核燃料



钍铀卸料300年后放射毒性比铀钚低一万倍

“中国钍的丰富储量可满足国内2万年的能源需求”

——1984年诺贝尔物理学奖获得者 Carlo Rubbia 教授

每吨乏燃料

铀基反应堆  
产生10公斤钚

钍基熔盐堆  
产生30克钚

## 中国钍资源储量

- **官方钍储量：284000吨**
  - 其中包头白云鄂博占221412吨<sup>[1]</sup>；
- **US Geological Survey：达百万~千万吨**
  - US Geological Survey预估中国稀土矿为8900万吨，钍占稀土矿的2~22%；
- **煤碳中钍储量：6200万吨**
  - 煤炭资源勘查统计我国煤炭总储量5.9万亿吨<sup>[2]</sup>，估计煤中钍储量可达**6200万吨**；
- **煤渣中钍储量：每年~6500吨**
  - **2020年中国**煤电发电量5.3万亿千瓦时<sup>[3]</sup>，所产生**煤渣**钍含量可达约**~6500吨**。

## 中国钍储量

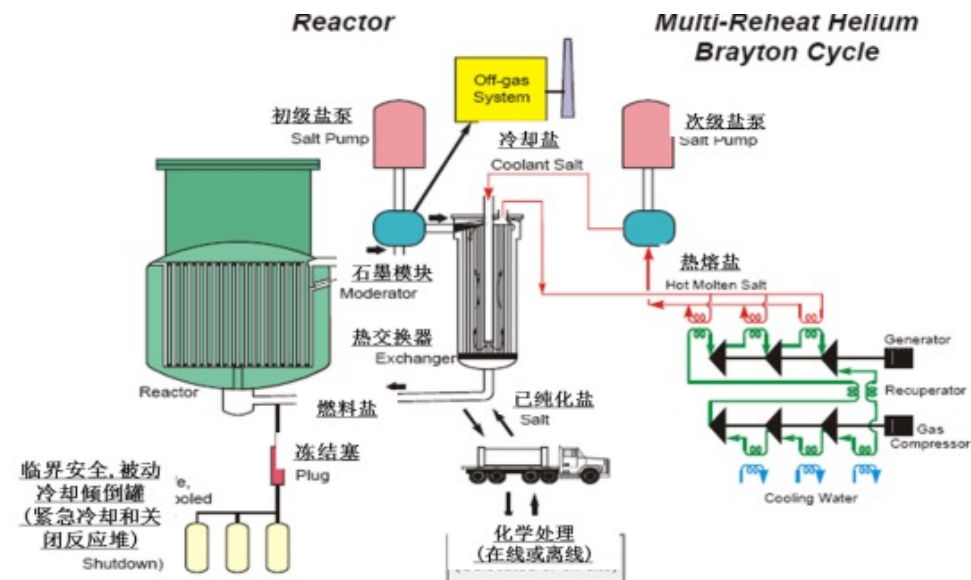


1. 徐光宪. 白云鄂博矿钍资源开发利用迫在眉睫[J]. 稀土信息, 2005(5):4-5; 2. 中国地质调查百项成果, 2016. 004 中国煤炭资源调查报告.  
3. 中国煤炭资源网. <http://www.sxcoal.com/news/4586120/info00>

## 熔盐堆 (MSR)

熔盐堆是四代堆六个候选堆之一，采用液态燃料，是国际公认适合钍资源高效利用的理想堆型

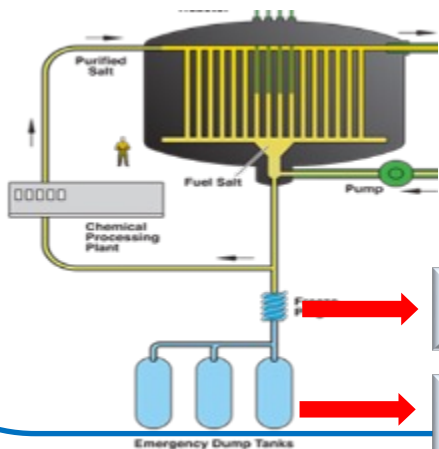
- ◆ **钍的利用**：可在线处理和添加核燃料，堆内即可实现闭循环，物理特性适用于钍基燃料
- ◆ **固有安全**：具有本征安全性、高熔点燃料盐，适于建地下
- ◆ **无水冷却**：适应内陆缺水干旱地区（一带一路）
- ◆ **高温输出**：堆芯输出温度比现有水堆高一倍，除了高效发电，可以应用于高温制氢及其它热过程



## Inherent Safety : 具有无需外加干预的固有安全机制

### 固有安全性

- 大的负温度反应性系数：能自动快速停堆
- 负空泡系数：燃料盐沸腾时溢出堆外，可快速停堆
- 剩余反应性低：得益于在线添料机制
- 停堆简单：熔盐可通过重力直接排入排空罐



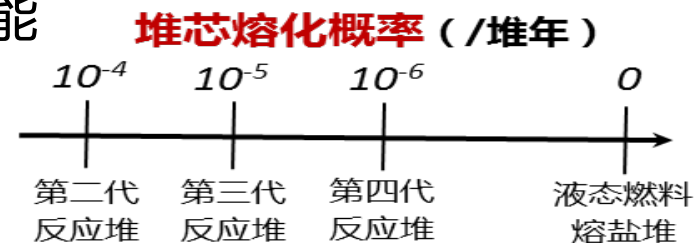
事故下失去电力，  
冷冻阀融通，  
燃料盐通过重力迅速排入排空罐，  
避免超临界事故。

冷冻阀

排放罐

### 无堆芯熔化风险

- 采用液态燃料：从根本上避免了福岛事故发生的可能



### 常压运行

- 减少破口事故：即便发生，高温熔盐在环境温度下会迅速凝固，防止事故进一步扩展
- 低压控制：避免管道高压爆炸
- 不需建压力容器：减少费用和时间

压水堆  
~ 150大气压



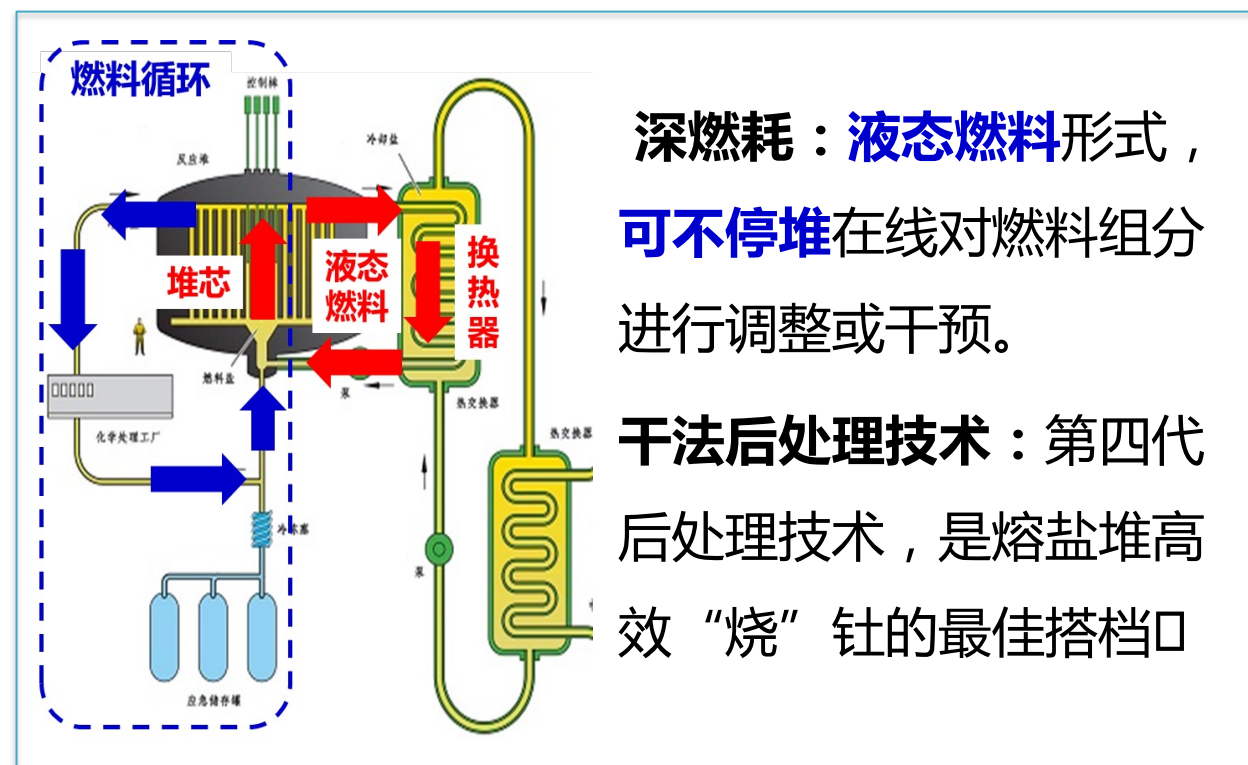
熔盐堆  
~ 2大气压

## 熔盐堆可成功解决钚利用难题（TMSR）

### “烧”钚是历史遗留的技术难题

- **对堆型要求高**：要求钚燃料服役时间足够长，在不后处理的情况下达到高的钚利用率。**对于现有堆型，难！**
- **后处理难**：与商业化PUREX流程同源的THOREX流程过于复杂，无法处理高燃耗、高放射性乏燃料，实际应用不容乐观

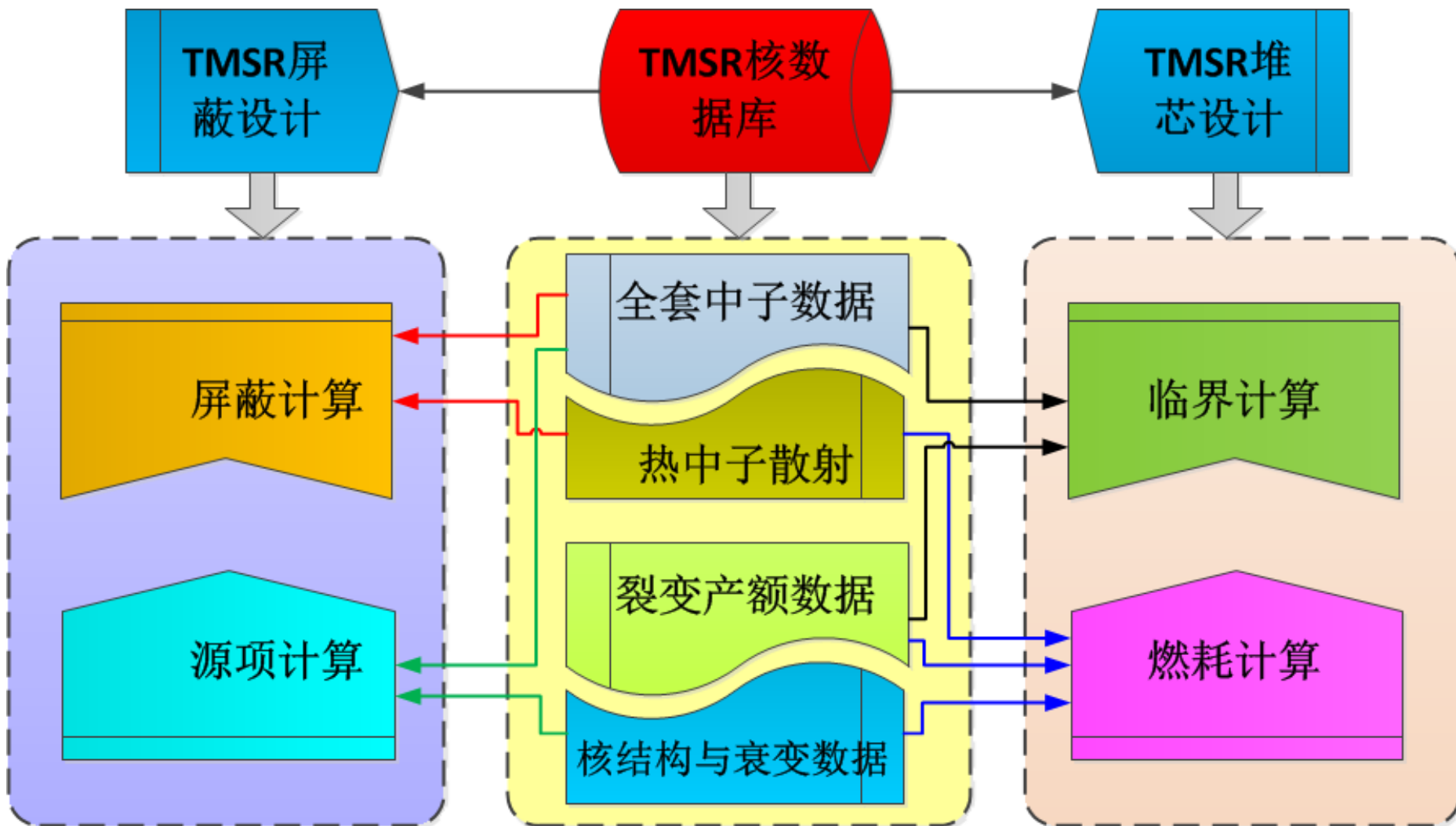
### 熔盐堆是解决“烧”钚难的利剑



**熔盐堆解决“烧”钚难题方案：TMSR+在线除气+干法后处理+回堆再利用**

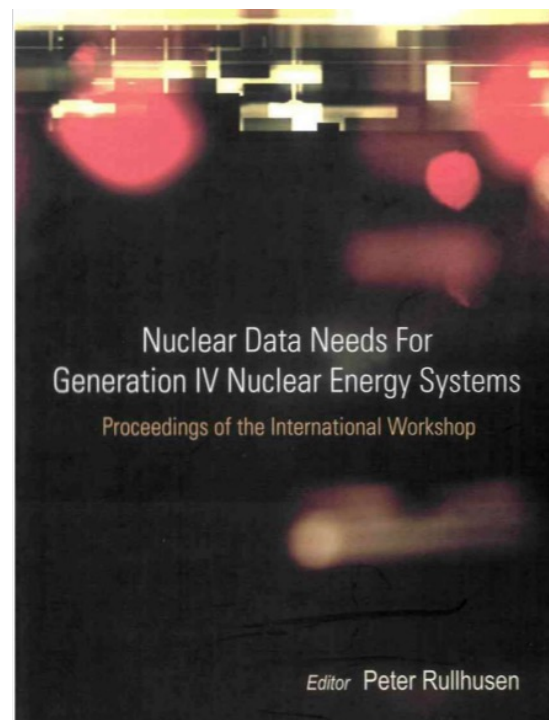
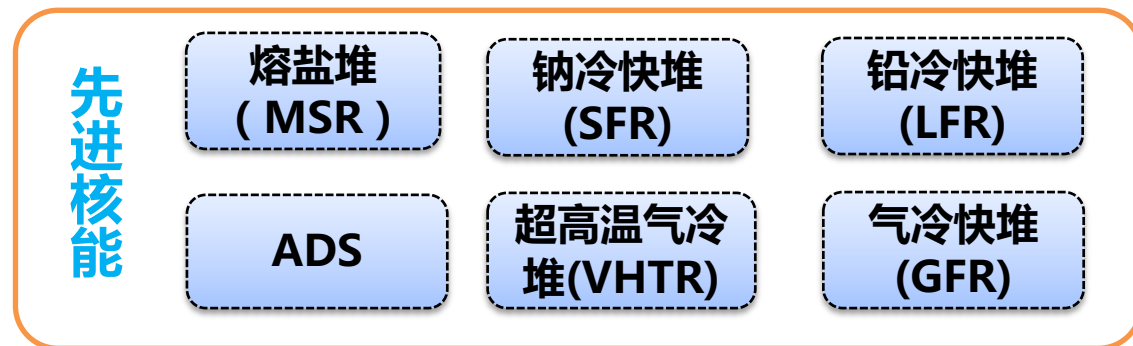
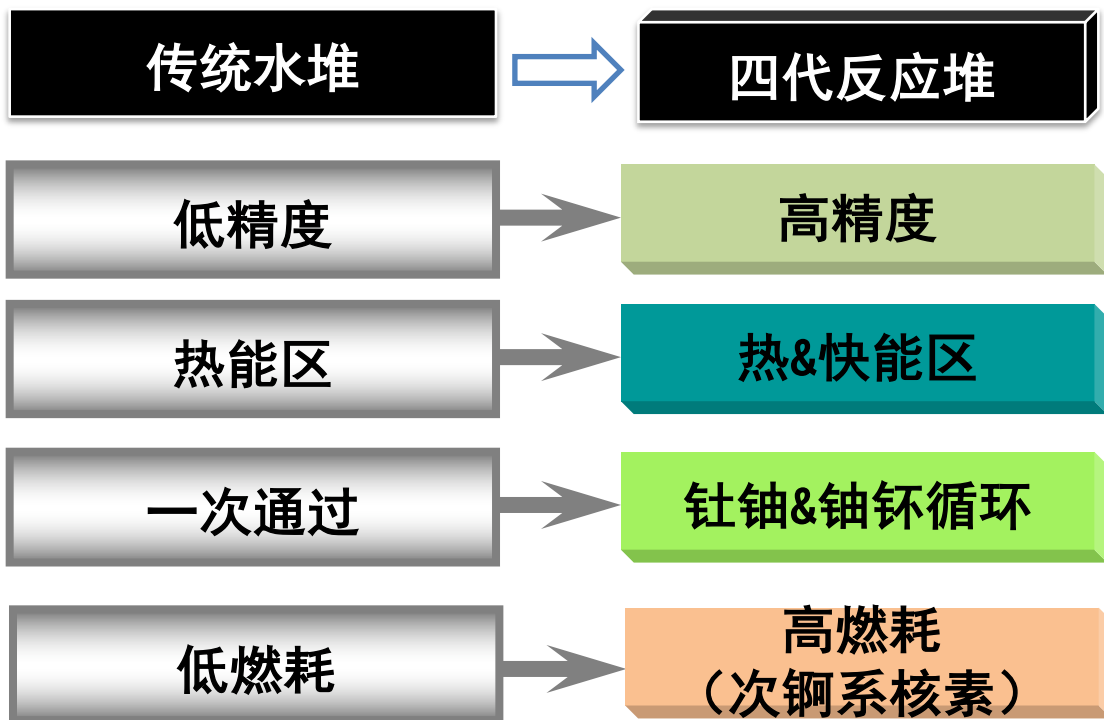


核数据是核能开发、核技术应用以及核基础研究相关的**重要基础参数**，是连接核物理基础研究与核工程及核技术应用的**重要桥梁**。



## 先进核能研究对核数据的要求

- 核数据的能区**更宽**！
- 核数据关键核素**更多**！
- 核数据的精度**更高**！



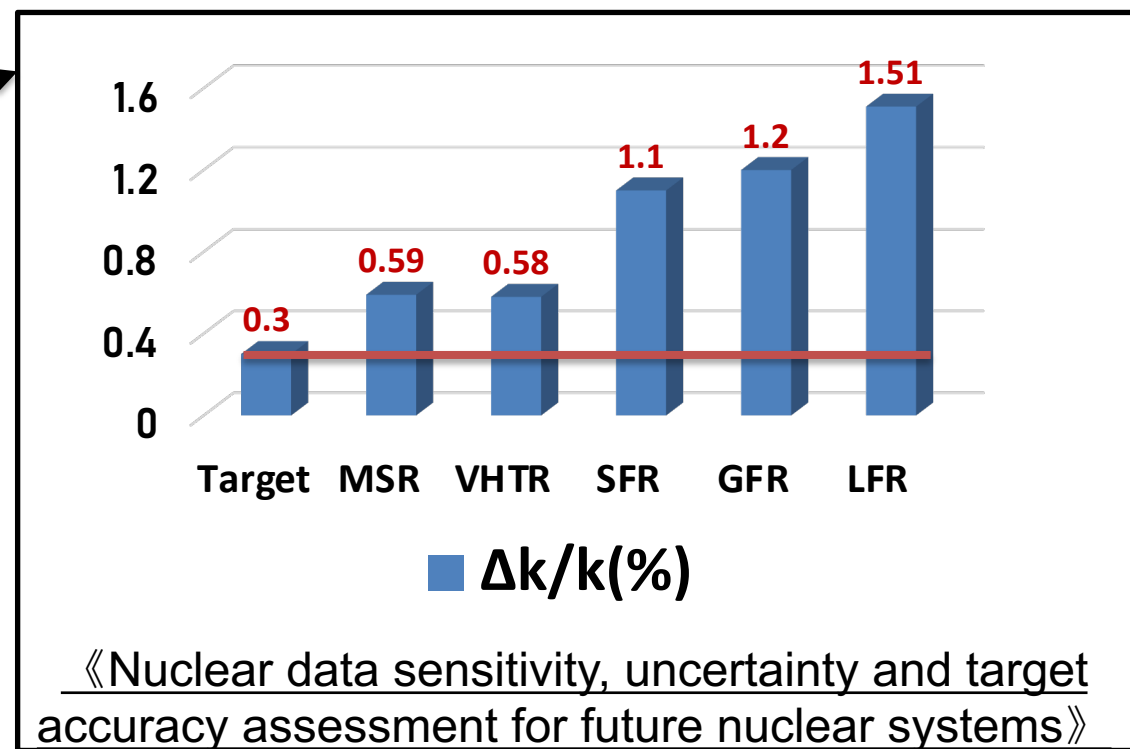
## 第四代先进核能系统核数据研究目标

### 第四代核能系统主要堆型核数据不确定度

四代堆核数据目标精度

Uncertainties at $1\sigma$ Parameter	System Development Phase	
	Viability	Performance
Multiplication factor, $k_{eff}$ BOL	< 0.7%	< 0.3%
Local power density	< 5%	< 3%
Structure Damage	< 15%	< 9%
Reactivity Swing ( $k_{eff}$ EOL)	(<1.0%)	(< 0.5%)
Breeding Gain	< +/-0.06	< +/-0.04
Void Reactivity Effect on each component (leakage; non-leak.)	< 16%	< 10%
Doppler Reactivity Effect	< 16%	< 10%
Delayed Neutron Fraction	< 13%	< 7%
Control Rod Worth	< 16%	< 10%
$\gamma$ heating	< 16%	< 10%

核数据导致反应堆有效增值因子 $k_{eff}$ 的不确定度



## TMSR关键核数据

### 特点

### 核数据需求

钚资源高效  
利用

钚基燃料

钚铀循环核数据

深燃耗模式

次锕系核数据

熔盐堆

氟盐冷却

F/Li/Be核数据

高温运行

系列熔盐热散数据

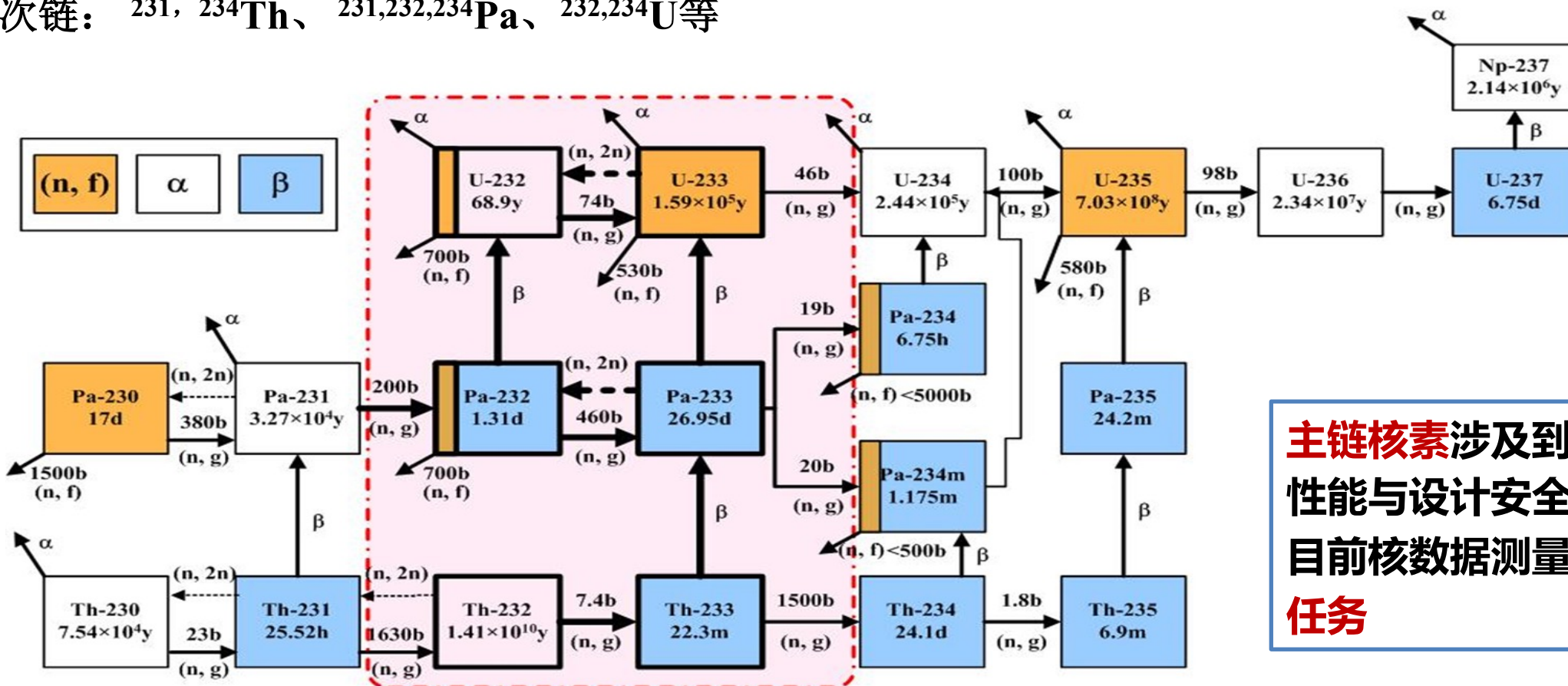
在线处理

高温群常数库

## 钍铀燃料循环关键核素

### ■ 关键核素:

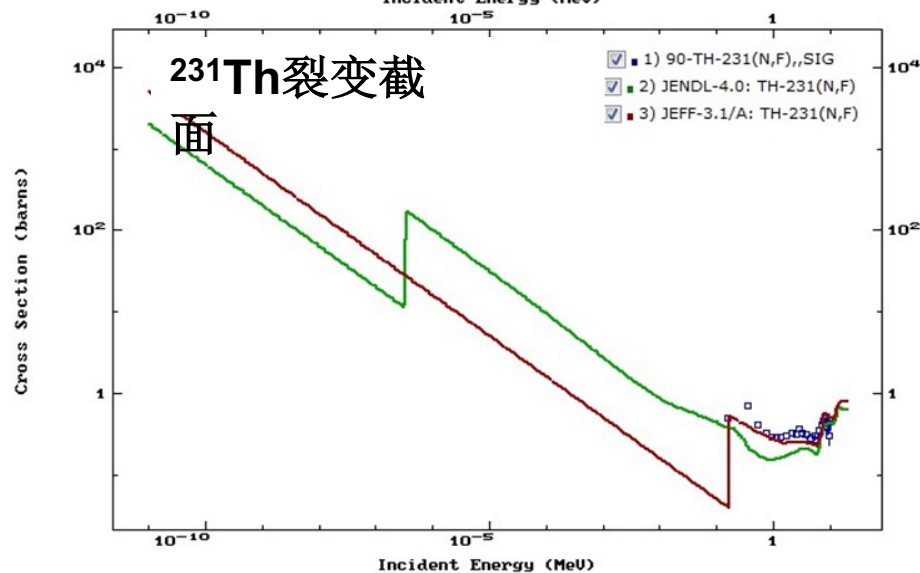
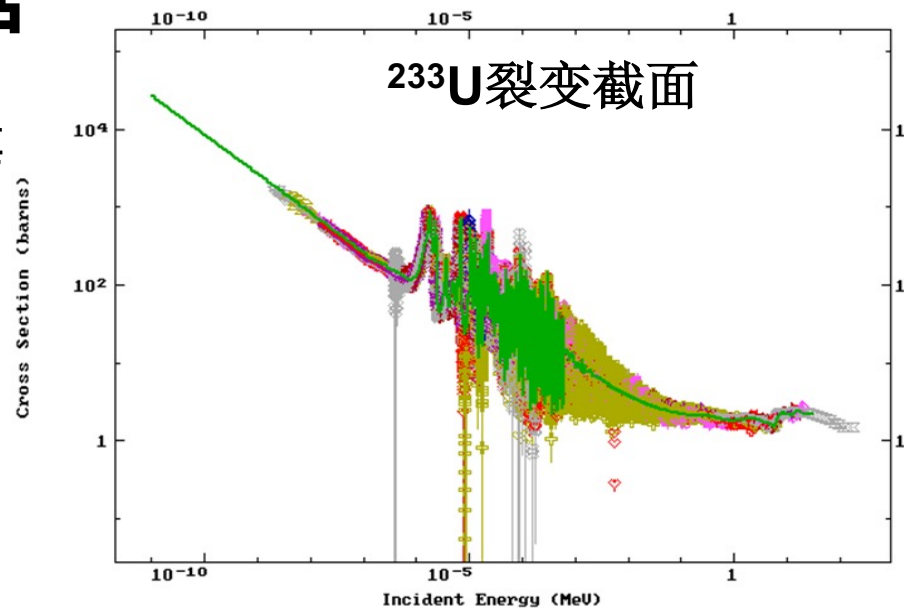
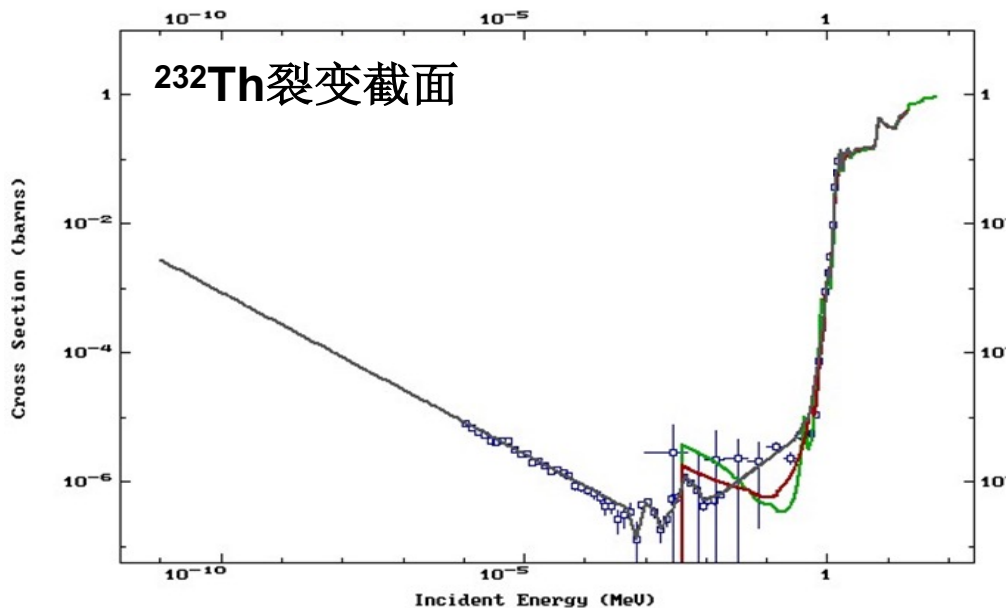
- 主链:  $^{232}, ^{233}\text{Th}$ 、 $^{233}\text{Pa}$ 、 $^{233}\text{U}$
- 次链:  $^{231}, ^{234}\text{Th}$ 、 $^{231,232,234}\text{Pa}$ 、 $^{232,234}\text{U}$ 等



**主链核素**涉及到临界性能与设计安全，是目前核数据测量**首要任务**

## 中子截面数据

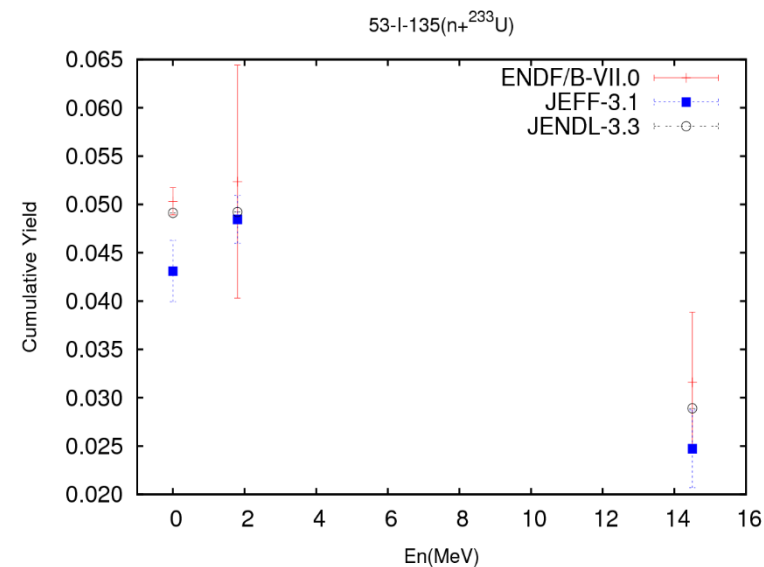
- 实验数据误差大： $^{232}\text{Th}$ 俘获截面、 $^{233}\text{U}$ 裂变截面等
- 实验数据缺少： $^{233,234}\text{Pa}$ 、 $^{233}\text{U}$ 俘获截面、 $^{232}\text{Th}$ 裂变截面等
- 理论数据差异大： $^{232}$ 、 $^{231}\text{Th}$ 裂变截面等



## 裂变产额数据

- 从整体上来看，裂变产额数据的评价还相当不当地不充分，有待将来进一步补充。
- 重要裂变产物的产额存在较大分歧

裂变核	BROND	CENDL	ENDF/ B	JEFF	JENDL	JENDL	EXFOR
	-2	-2.1	-VII.0	-3.1	-3.3	-4.0	
Th-230			(F,H)			(F,H)	无
Th-231			(T,F,H)			(T,F,H)	无
<b>Th-232</b>		<b>F</b>	<b>F, H</b>	<b>F, H</b>	<b>F, H</b>	<b>F, H</b>	<b>15</b>
Th-233			(T,F,H)			(T,F,H)	无
Th-234			(F,H)			(F,H)	无
Pa-230			(T,F,H)			(T,F,H)	无
Pa-231			F,(H)			F,(H)	3
Pa-232							无
Pa-233							无
Pa-234							无
U-232	√		T,(F,H)			T,(F,H)	15
<b>U-233</b>	√	<b>T</b>	<b>T, F, H</b>	<b>T, F, H</b>	<b>T, F, H</b>	<b>T, F, H</b>	<b>64</b>
U-234	√		F, H	F	F, H	F, H	2
U-235	√	T, F, H	T, F, H	T, F, H	T, F, H	T, F, H	



中子诱发<sup>233</sup>U裂变毒物产物核<sup>135</sup>I (<sup>135</sup>Xe) 的累计产额差异较大

## 核结构与衰变数据

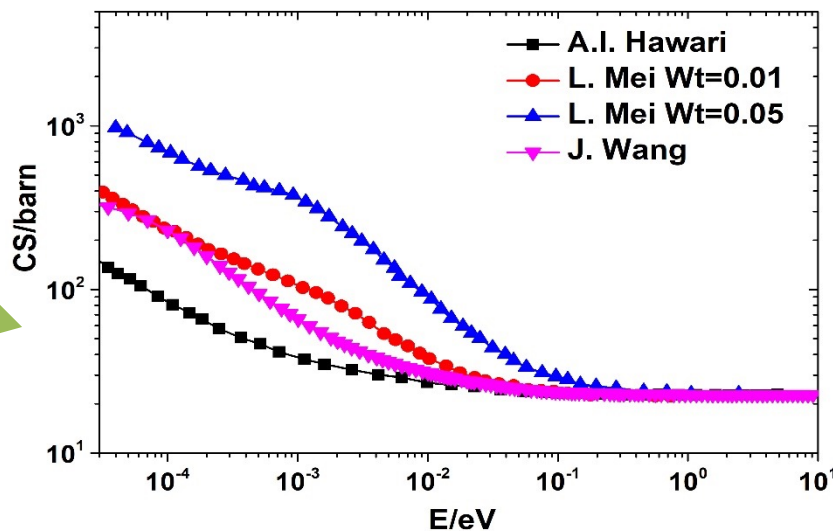
- 一些关键的衰变数据有待更新；
- A=231： $^{231}\text{Th}$ 基态 $T_{1/2}$ 需更新；
- A=232： $^{232}\text{U}$ 新的能级数据，基态 $T_{1/2}$ 需更新；
- A=233： $^{233}\text{Th}$ 、 $^{233}\text{Pa}$ 基态 $T_{1/2}$ 需更新；
- A=234： $^{234}$ 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 有新实验数据，需要更新。

数据类型	无实验数据无更新	有实验数据无更新
衰变数据	$^{231}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{Th}$ 、 $^{232}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{Th}$ 、 $^{234}\text{U}$	$^{231}\text{Th}$ 、 $^{232}\text{U}$ 、 $^{233}\text{Th}$ 、 $^{233}\text{Pa}$ 、 $^{233}\text{U}$ 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$
结构数据	$^{232}\text{Th}$ 、 $^{232}\text{Pa}$ 、 $^{233}\text{U}$ 、 $^{234}\text{Th}$ 、 $^{234\text{m}}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{U}$	$^{231}\text{Th}$ 、 $^{231}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{U}$ 、 $^{233}\text{Th}$ 、 $^{233}\text{Pa}$ 、 $^{234}\text{Pa}$

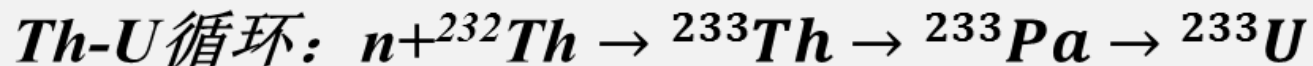


## 熔盐热中子散射数据

- ◆ **熔盐的结构信息**：固态晶格结构、液态离子团
  - 高温下密度粘度、扩散系数、声子态密度等结构信息实验**数据缺乏**；
  - 基于第一性原理开展理论计算，**计算量大，效率低**；
- ◆ **计算模型**：
  - 现有理论近似较多（立方近似、非相干近似），**计算误差大**；
  - 已有理论计算结果之间**差异较大**；
- ◆ **热中子散射截面测量**：
  - 国内高温材料热中子散射截面测量系统少；
  - 熔盐热中子散射**实验数据缺少**，无法检验计算结果；

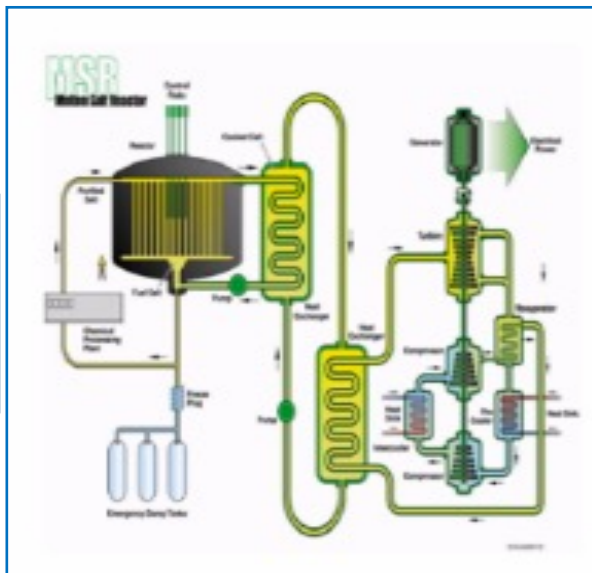


## 核数据对TMSR的宏观参数影响

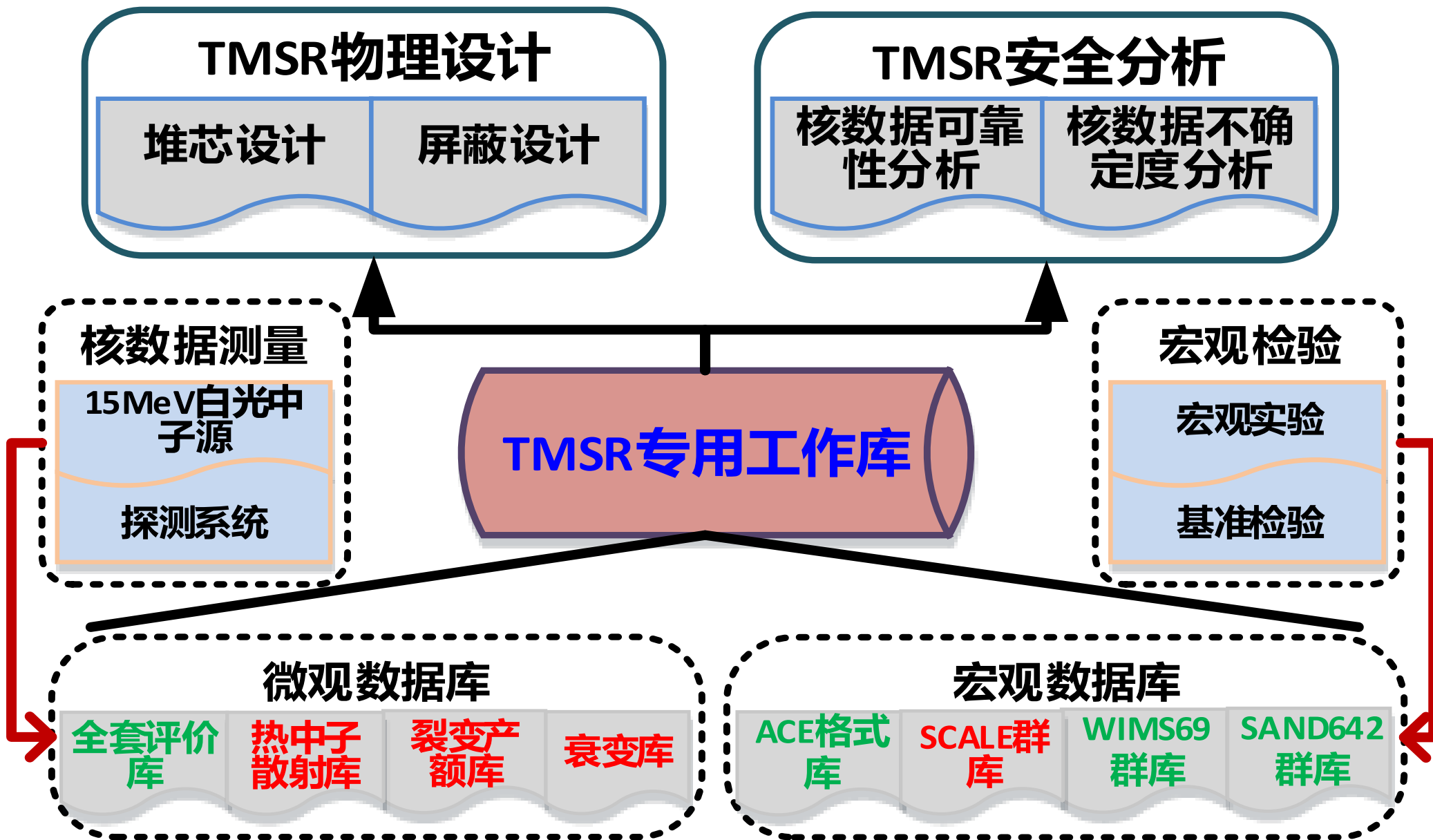


循环链主核素：差异大

熔盐材料：数据缺，精度差

不同数据库  $k_{\text{eff}} \sim 500\text{pcm}$ 熔盐热散射影响  $\sim 300\text{pcm}$ 核数据不确定度  
 $\sim 900\text{pcm}$ 缺乏熔盐核数据的基  
准检验

建立钍基熔盐堆专用数据库是TMSR研究核心任务之一！



## 钚铀循环

- ◆ 关键核素的高精度测量及改进
- ◆ 不稳定核素测量及评价方法研究
- ◆ 次锕系核素的核数据更新




## 熔盐堆

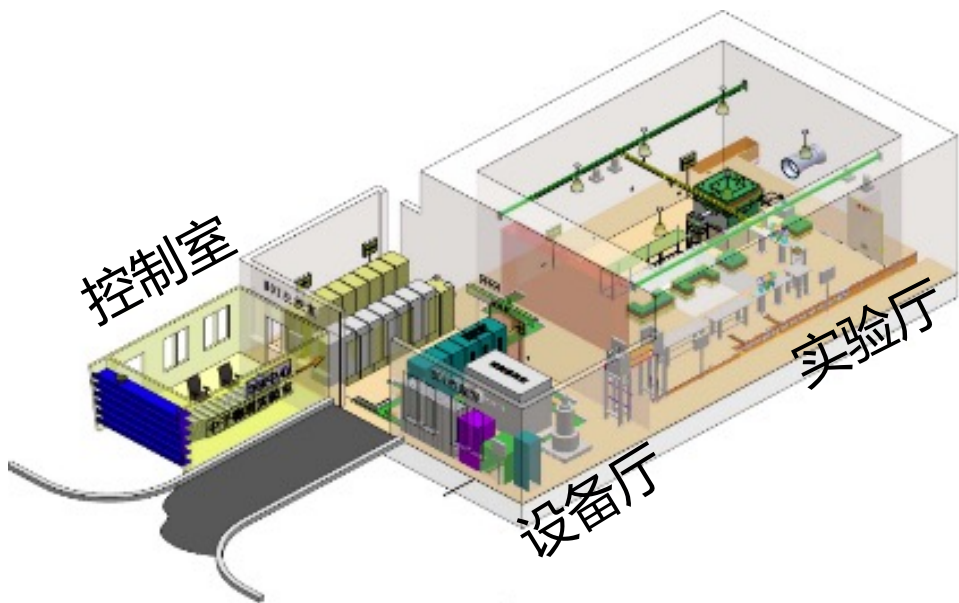
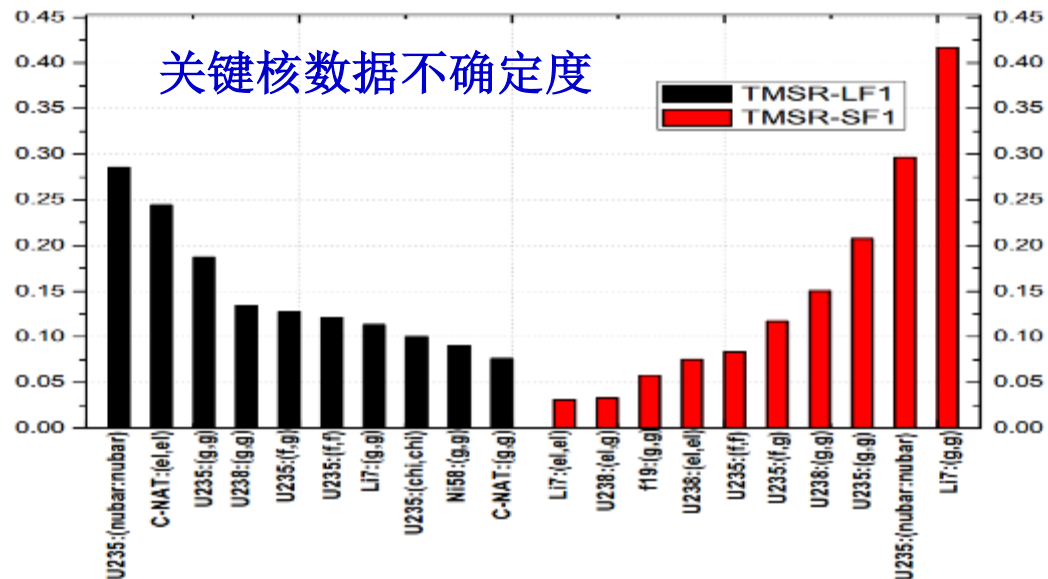
- ◆ 多元素多形态（熔盐、GH3535）热中子散射机理研究
- ◆ 高温核数据的宏观检验研究
- ◆ 重要核素的改进

## 钍基熔盐堆

- ◆ 完备的TMSR数据库研制
- ◆ 多参数核数据不确定度分析方法研究
- ◆ 基于实验堆运行的核数据调整

TMSR核数据研究关键科学问题

-  实验数据是核数据研究的基础；
-  基于核数据改进要求，需研制专用热区和共振区核数据测量系统；
-  研制白光中子源。



反应截面	能区	评价数据	实验数据
U-233(n,f)	10-200eV		
	500eV以上		与评价数据符合不好
U-233(n,γ)	5-50eV		误差大
	500eV以上		与评价数据符合不好
Th-232(n,γ)	10eV-5KeV		实验数据太少
Th-232(n,f)	60KeV以下	JEFF-3.1没有评价数据	
	1-500KeV		误差较大
F-19 (n,inf)	0.23~2.8MeV	各数据库符合不好	1家，实验数据缺乏
Li-6 (n,T)	0.1~10MeV	各数据库符合不好	误差较大
Be-9(n, γ)	100eV以上	各数据库不一致	0.0253/35.7keV有

在传统单能中子源的基础上初步建成了大型白光中子源、激光伽马源及大型伽马中子谱仪（氟化钡探测器阵列、He-3球等），拓展了核数据研究领域。

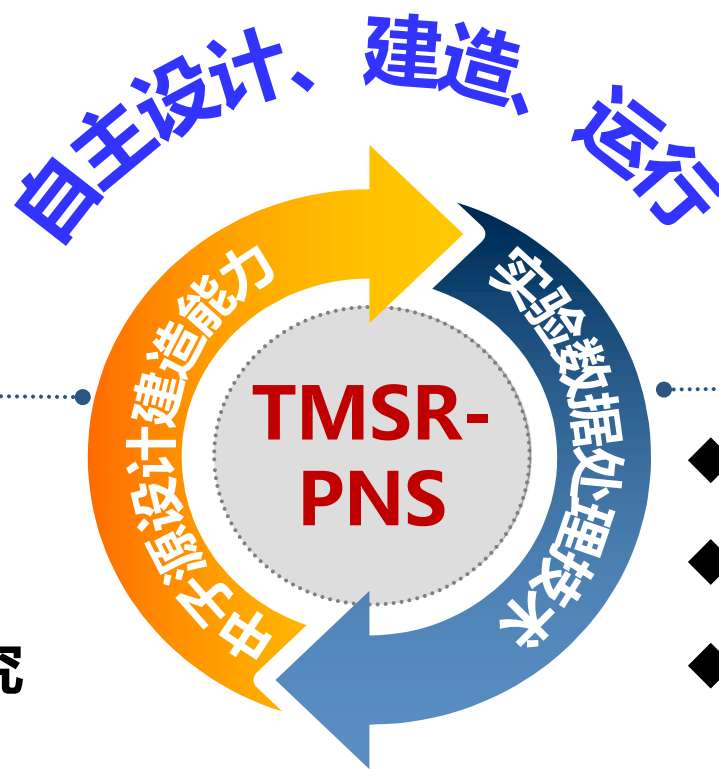
- **反应堆中子源**：西安脉冲堆（热堆）、实验快堆等
- **加速器源**
  - 单能中子源：高压倍加器中子源、HI-13串列加速器源等
  - 白光中子源：CSNS反角白光中子源、TMSR-PNS、ADS实验终端等
  - 伽马源：激光伽玛源光束线（SLEGS）



	FZD	FZD	IRMM	PAI	SINAP
	ELBE	ELBE (SRF)	GELINA	PNE	-
类型/国别	大型源/德国	大型源/德国	大型源/欧洲	紧凑型/韩国	紧凑型/中国
电子能量/MeV	40	40	100	70	15
电子平均流强/μA	0.125	1.000	0.096	0.004	0.100
功率/kW	5.00	40.00	9.60	0.26	1.50
脉冲频率/Hz	1.6E+06	5.0E+05	800	15	266
中子脉冲宽度/μs	0.4	0.4	0.67-11	1000	3-3000
靶	Liquid Pb	Liquid Pb	U-Mo	Ta	W
中子产额*10 <sup>14</sup> /s	0.54	2.70	3.20	0.05	0.07
飞行距离/m	4	4	8-400	12	6
中子能量范围	50KeV -10 MeV	50KeV -10 MeV	0.01 eV -10 MeV	0.1 eV -200 keV	0.01 eV -400 keV

## 国内首台电子加速器驱动脉冲型白光中子源

在热中子能区性能指标优于国外同类装置！！



### 物理规律研究

- ◆ 关键核数据测量
- ◆ 新型探测器研发测试
- ◆ 燃料转换性能实验研究

### 工程应用研究

- ◆ 堆材料硼当量测量
- ◆ 新型屏蔽材料性能测试
- ◆ 半导体、合金、生物等辐照

宽能谱

高产额

空间紧凑

中子/γ辐射场

## ❖ 关键技术

脉冲型高功率电子加速器 ( 峰值功率  
10 MW )

多脉冲宽度工作模式  
(热、超热、共振区中子测量)

高剂量率复合屏蔽体设计

水冷铜-钨金属复合  $\gamma$  -中子转换靶



## ❖ 主要系统：

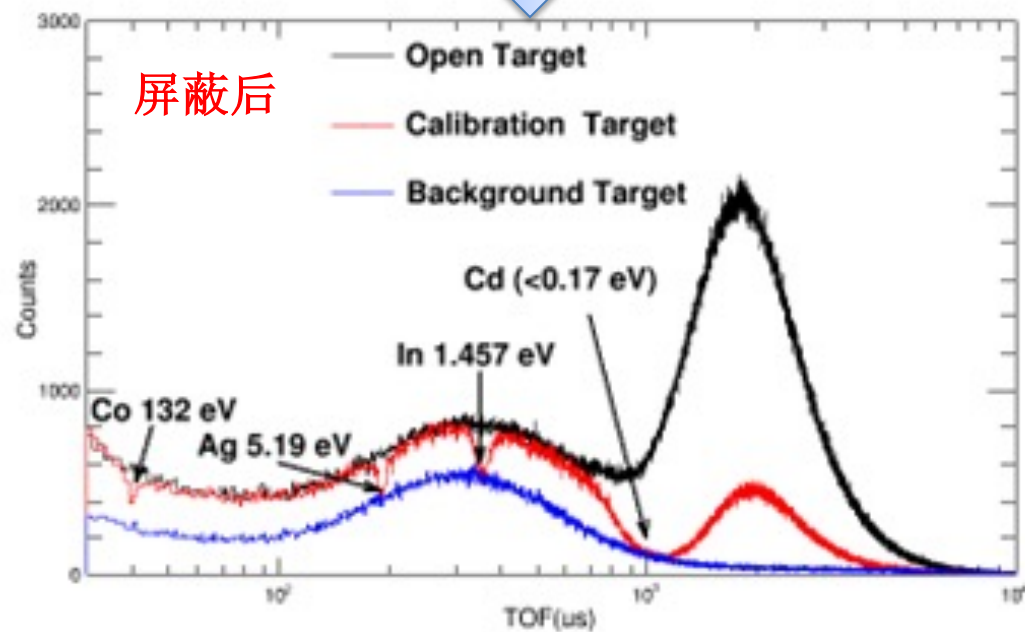
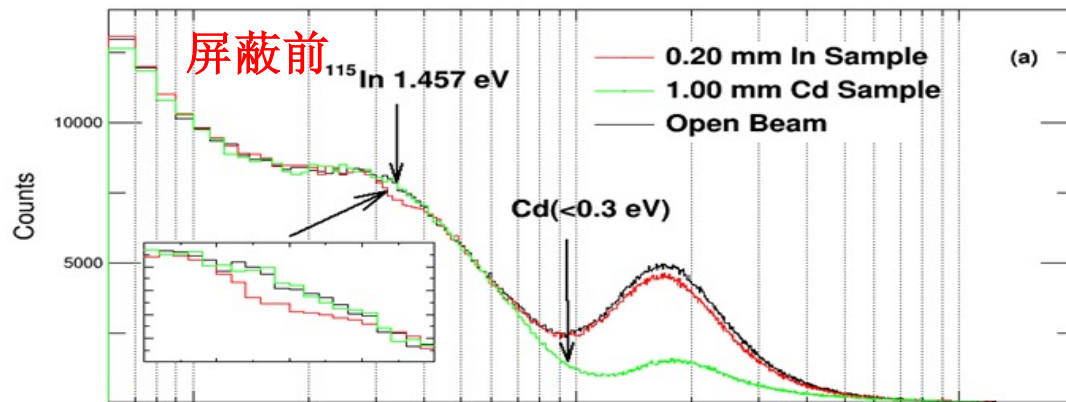
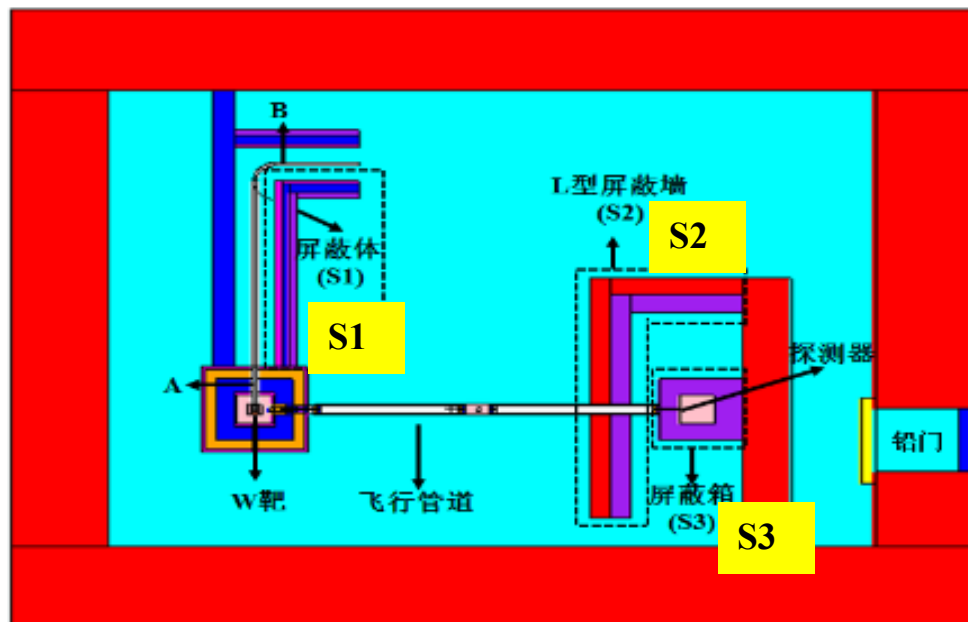
- 15 MeV脉冲型高功率电子直线加速器及辅助系统
- $\gamma$  -中子转换靶系统
- 自动换样系统
- 探测系统



## ❖ 解决的关键问题

### ◆ 实验大厅的复合屏蔽设计

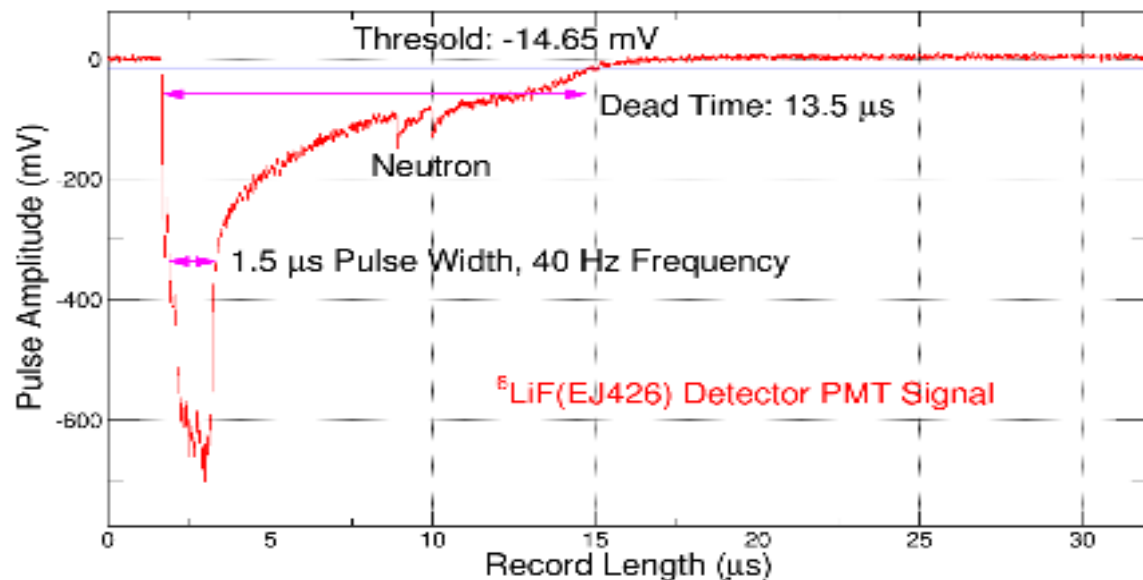
- 由于加速器、中子产生靶和探测系统在一个大厅内，导致本底偏高；
- 设计了复合屏蔽系统：S1/S2/S3；
- 在运行功率1000W下，在能量 0.005~1eV 之间，信噪比从1.5变成100，满足实验要求。



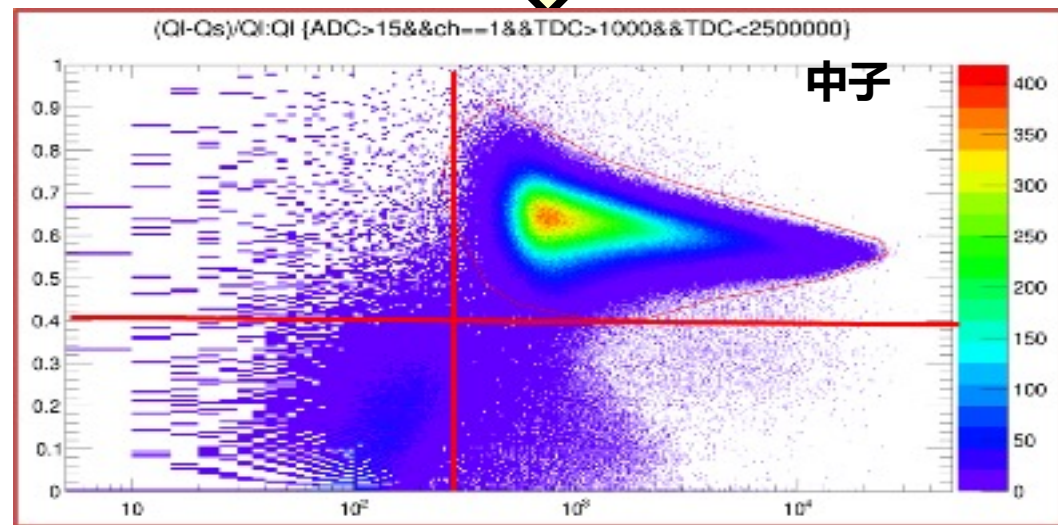
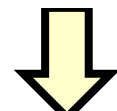
## ❖ 解决的关键问题

### ◆ 复杂辐射场n/ $\gamma$ 分辨

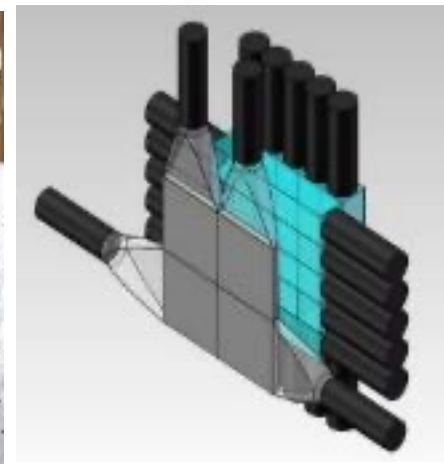
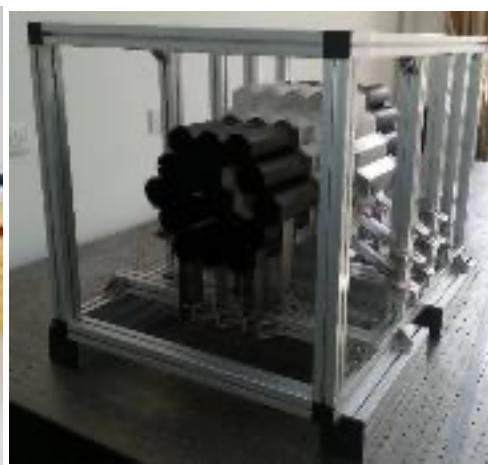
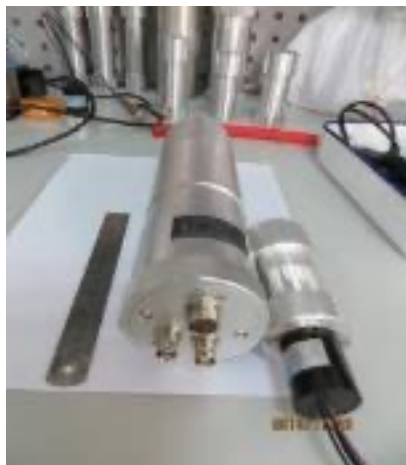
- 自主开发数字化波形采集系统，消除系统的死时间；
- 针对中子/ $\gamma$ 输出的脉冲信号不同，基于开发的处理程序，利用脉冲信号甄别法（Pulse Shape Discrimination, PSD）去除 $\gamma$ 信号的干扰；
- 热区测量误差小于4%，达到国际同类装置水平。



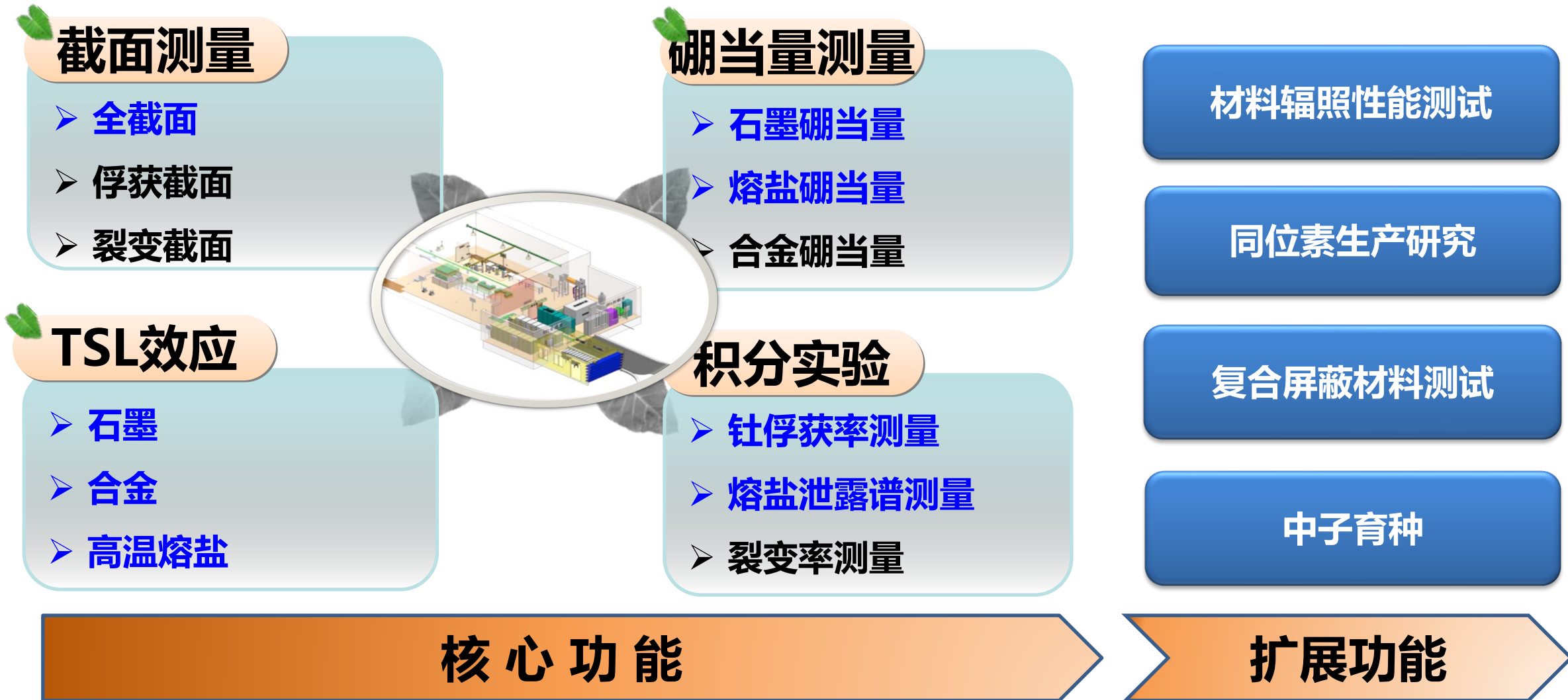
脉冲形状识别法



测量类型	探测器系统	状态
总截面 微分截面	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <math>^6\text{LiF}</math>、<math>^6\text{LiI}</math>、<math>^6\text{Li}</math>玻璃、液烁等。</li> <li>● 基于透射法测量反应总截面。</li> <li>● 多单元中子阵列（锂玻璃+塑料闪烁体）。</li> </ul>	已使用
裂变截面	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 时间投影室（TPC）。</li> <li>● 基于出射粒子径迹重建碎片A、Z，测量裂变截面。</li> </ul>	已完成研制
俘获截面	● $\sim 4\pi$ NaI Gamma阵列。	已完成研制
	● HPGe高纯锗（活化法）。	已使用
	● 中子伽玛复合测量谱仪。	计划

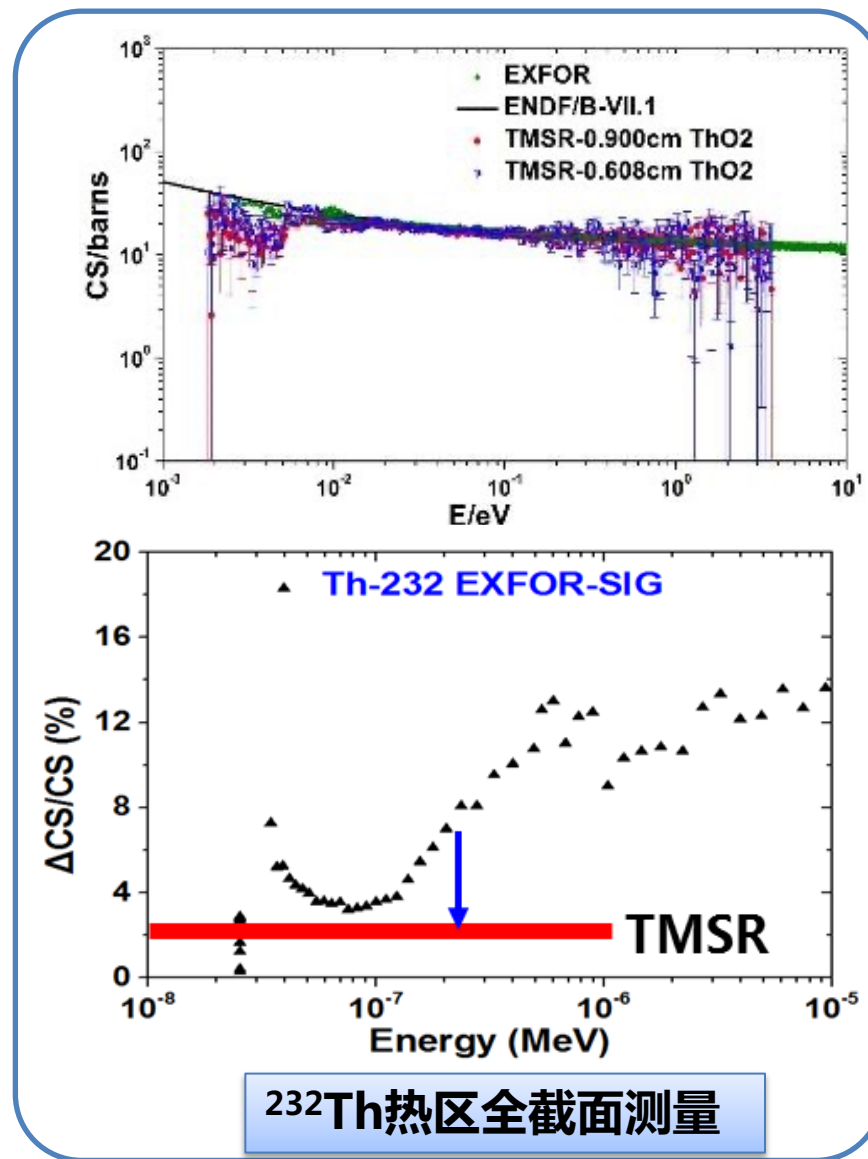
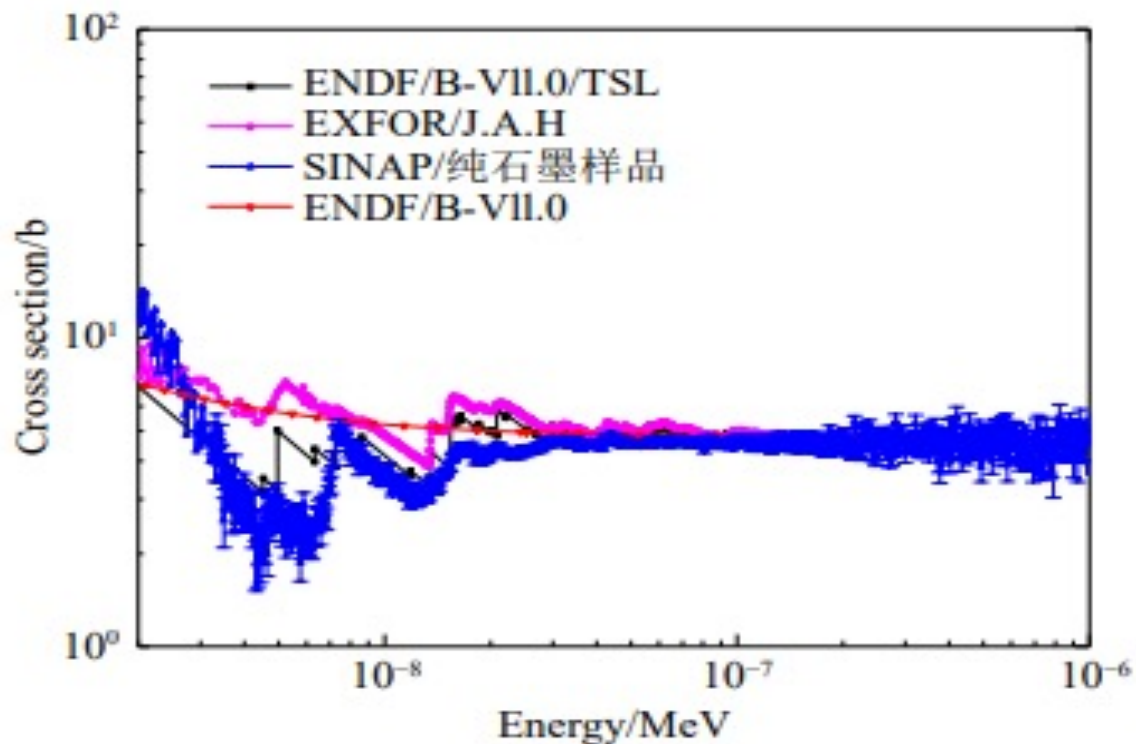


- ◆ 关注Th-U循环和熔盐堆关键核素；期望从总截面测量入手，完成相关**核数据的自主测量**；
- ◆ 特点：**紧凑灵活、能区互补**（与n-back）、**高温空白**；



## 1-1、热区关键核素全截面测量

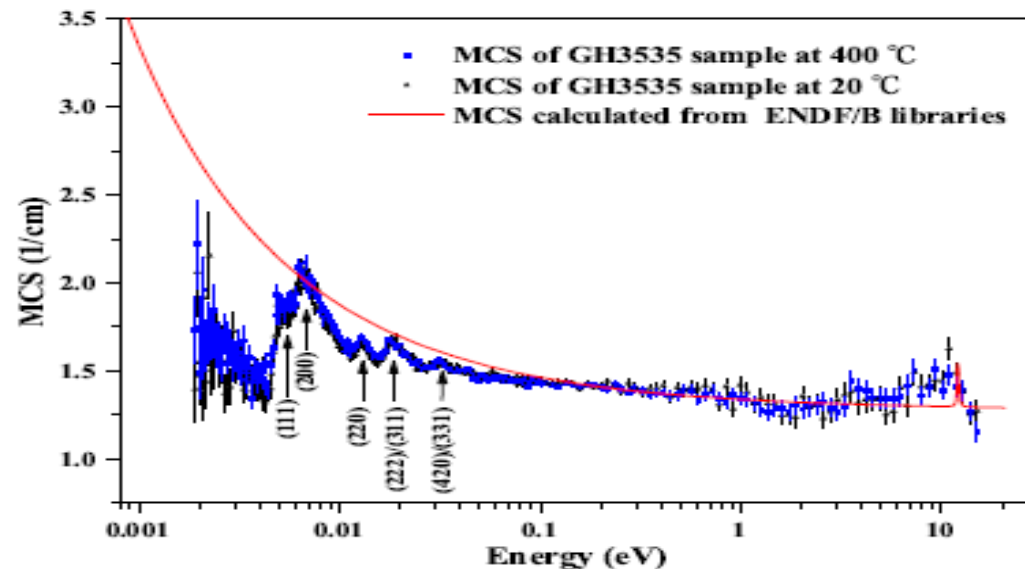
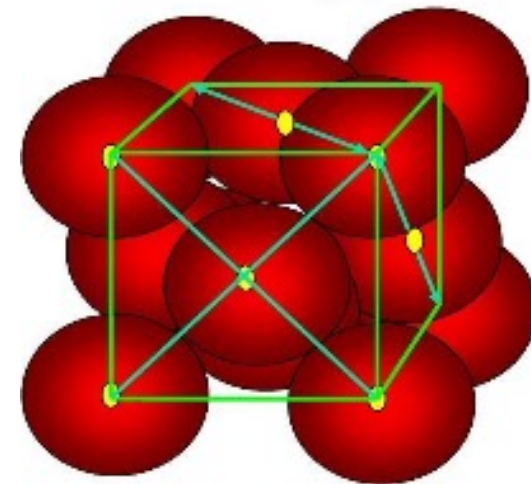
- ◆ 已测量的关键核素： $^{232}\text{Th}$ 、石墨、 $^7\text{Li}$ 、 $\text{Be}$ 、 $\text{Fe}$ ；
- ◆ 热区测量精度明显提高：以 $^{232}\text{Th}$ 为例；



$^{232}\text{Th}$ 热区全截面测量

## 1-2、热中子散射截面测量

- ◆ 石墨、合金等材料热中子散射数据 ( TSL ) 对反应堆影响较大 ( 约 2000pcm ) , 可能会导致反应堆不临界 ;
- ◆ 已完成石墨、金属Be、Fe、Ni和GH3535、固态熔盐的TSL测量 ;
- 📖 首次测量了高温GH3535合金TSL截面 ( 最高温度850°C ) ;
- 📖 测量结果得到的TSL布拉格峰边界与理论值一致。



## 1-3. 基于TMSR-PNS的屏蔽性能测试

### ■ 测量特点：

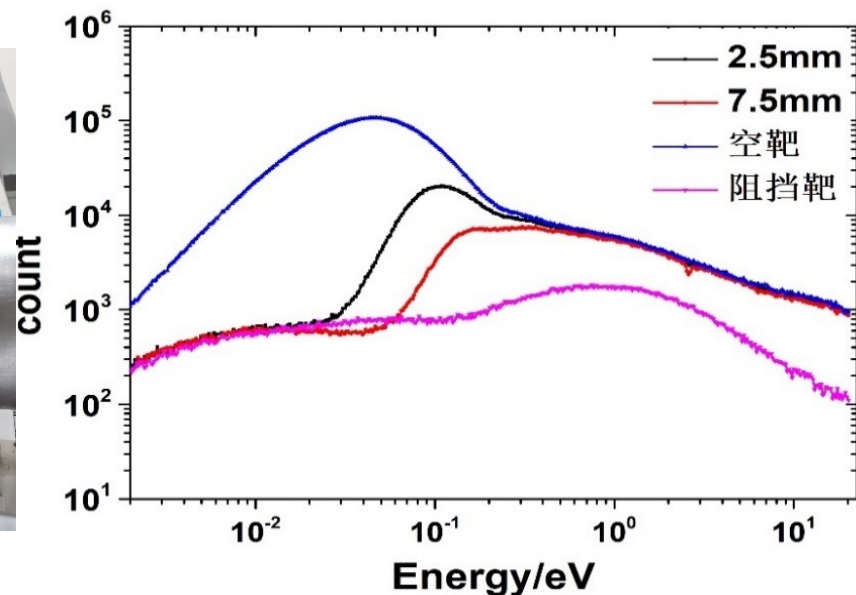
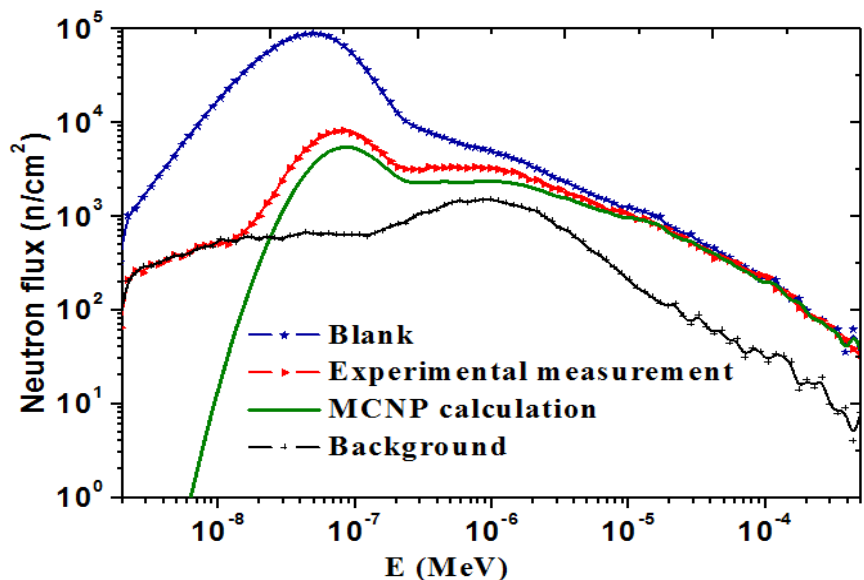
- 宽能谱，多样品一次测量
- 中子/ $\gamma$ 辐射场复合测量

### ■ 铝基碳化硼复合材料的屏蔽性能测：

- 1.5mm厚， $B_4C$ 含量31%（质量百分比）的复合材料可屏蔽90%的热中子。

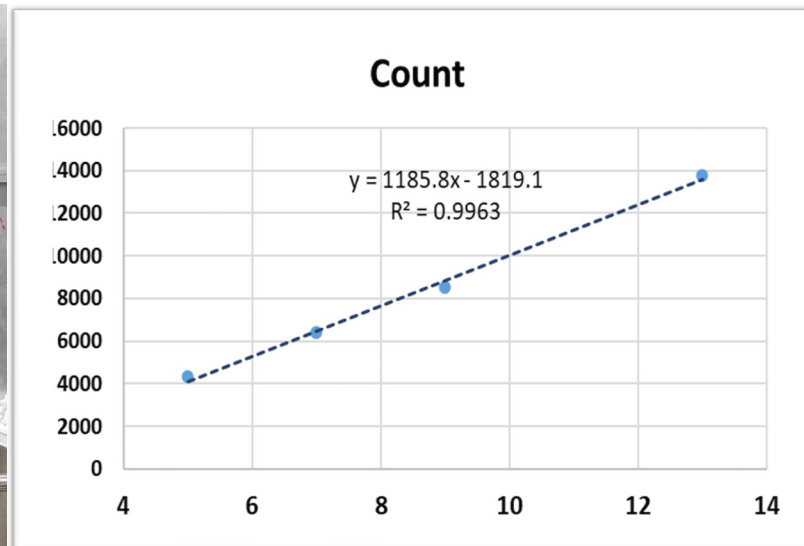
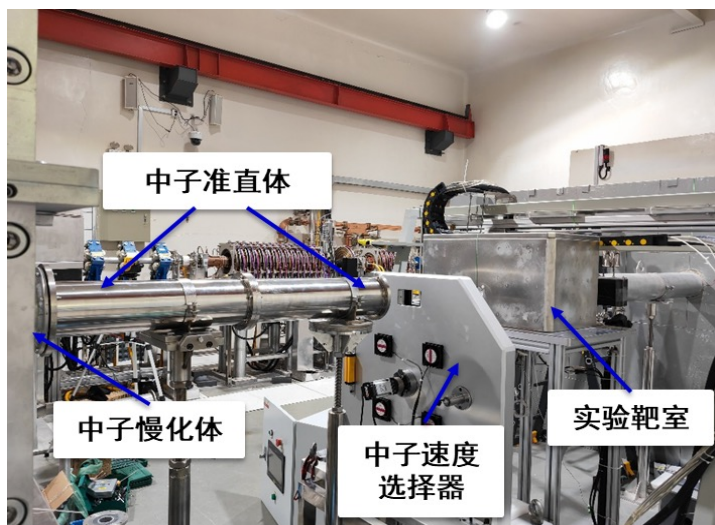
### ■ Mg-Gd合金屏蔽性能测试：

- 2.5/7.5 mm厚度，Gd含量9%
- 中子能量小于0.1 eV，透射率小于1%，99%中子被吸收；
- 对于能量较高的中子（大于0.02eV），样品越厚，泄露率约小，屏蔽性能越好。



## 1-4. 样品辐照及探测器性能测试

**目标：**基于TMSR-PNS，研制一套宽能谱、多用途、可拆卸的中子辐照通道，开展材料辐照损伤研究及探测器的性能测试。



中子注量累计到 $10^{14} \text{n/cm}^2$ ，伽马剂量大于 $10^5 \text{rad}$

- 提供中子伽马混合场
- 中子能谱与传统压水堆类似，真实模拟反应堆的辐射场

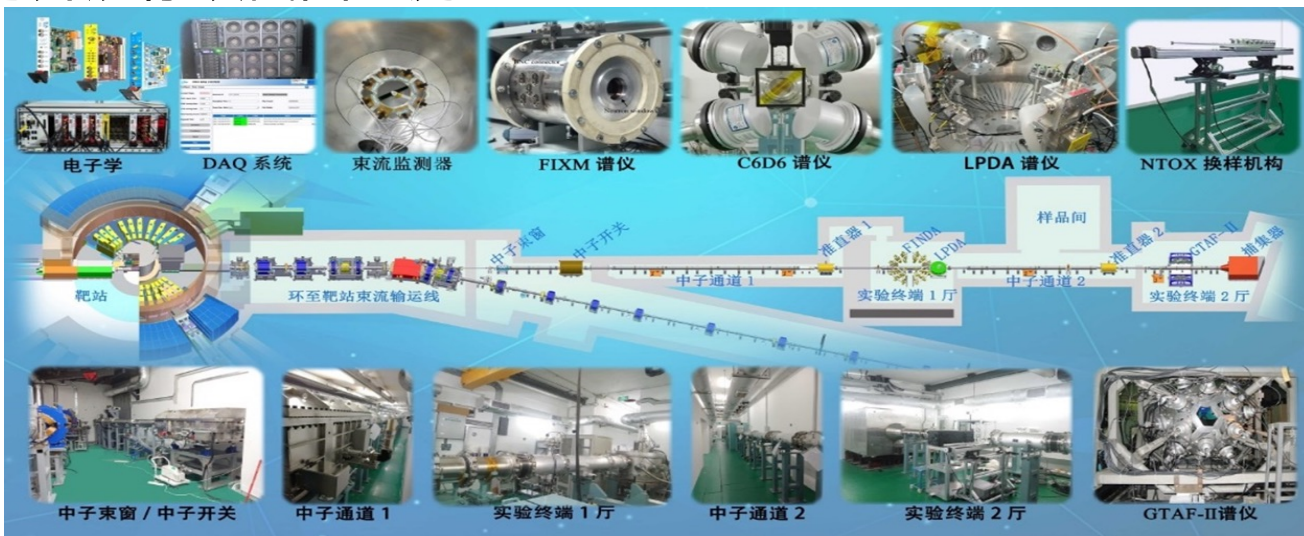
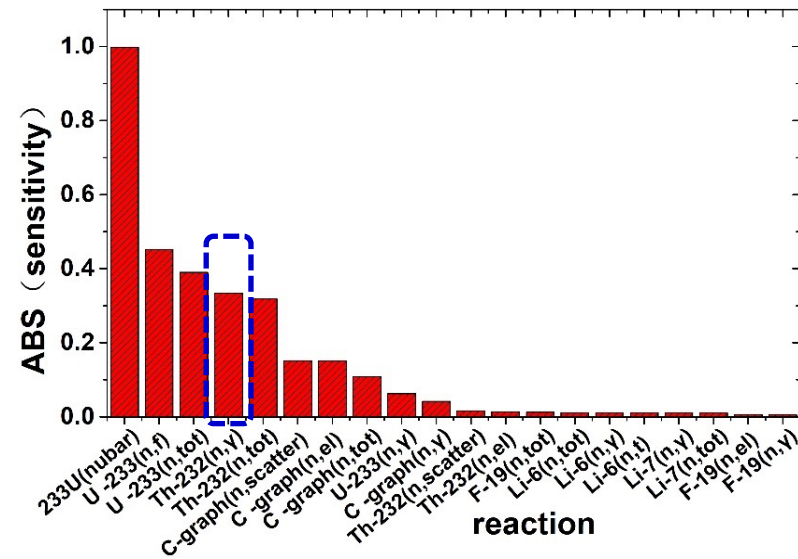
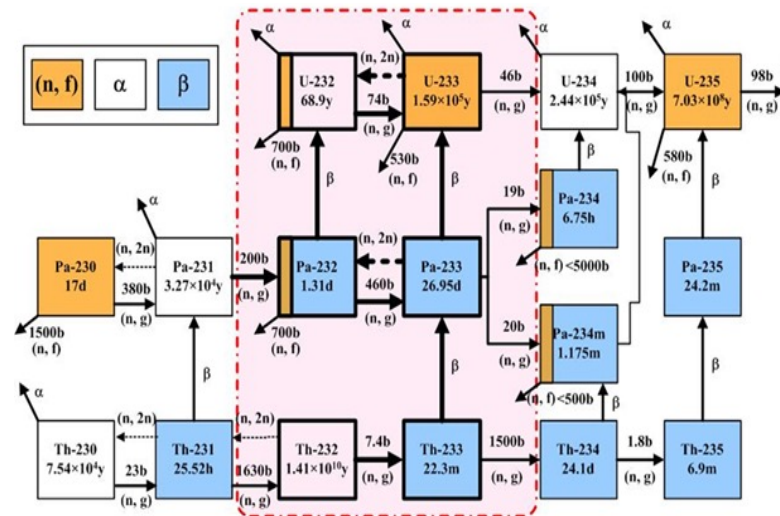
探测器响应随中子注量率的线性变化：

- 变化脉冲频率，同一位置提供多个测量点
- 不同实验通道，提供不同能谱



## 2-1、基于CSNS的Back-n中子源开展 $^{232}\text{Th}$ 俘获截面测量

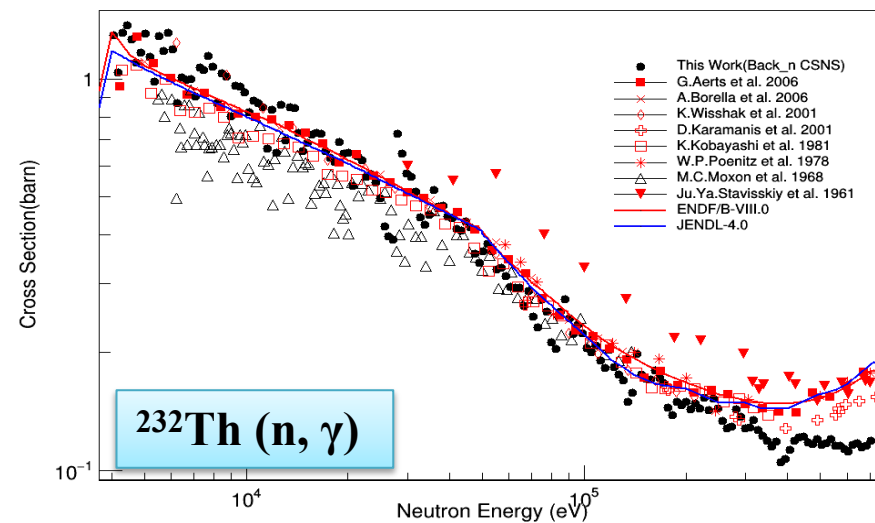
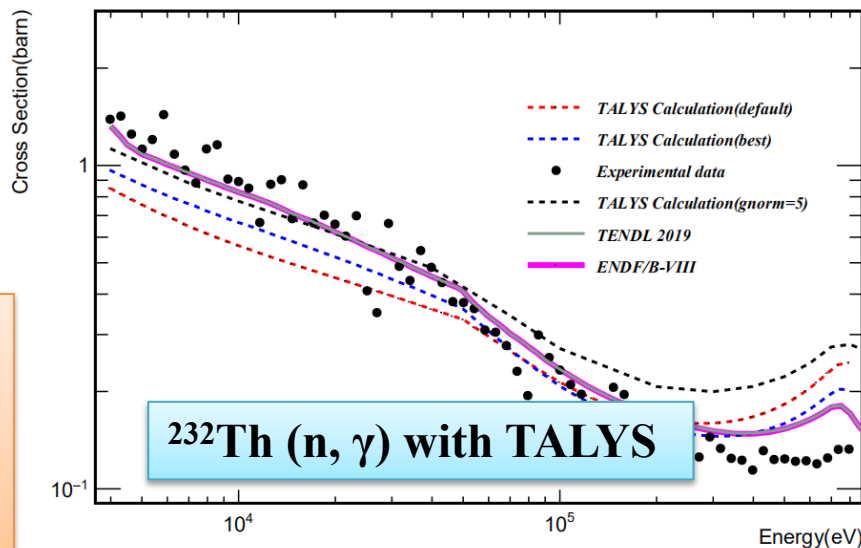
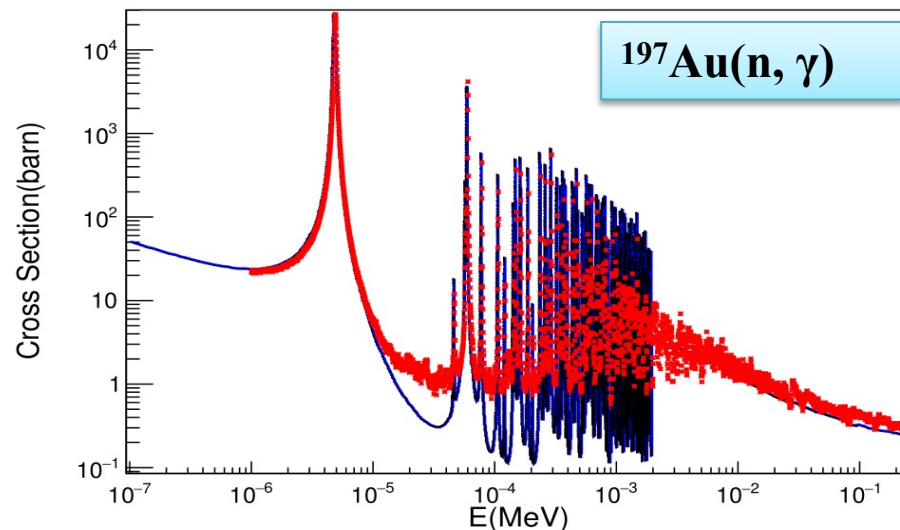
- $^{232}\text{Th}$ 是钍铀循环起始核素，俘获截面的精度直接关系到钍铀转换和熔盐堆的运行安全；
- 通过对熔盐堆核数据不确定度分析显示， $^{232}\text{Th}$ 俘获截面导致的反应堆 $k_{\text{eff}}$ 不确定度较大；
- 现有时间数据误差最大为20%；
- CSNS的Back-n中子源具有较好的能量分辨和束流强度，可开展俘获截面的测量。



## 232Th俘获截面测量

### 测量结果

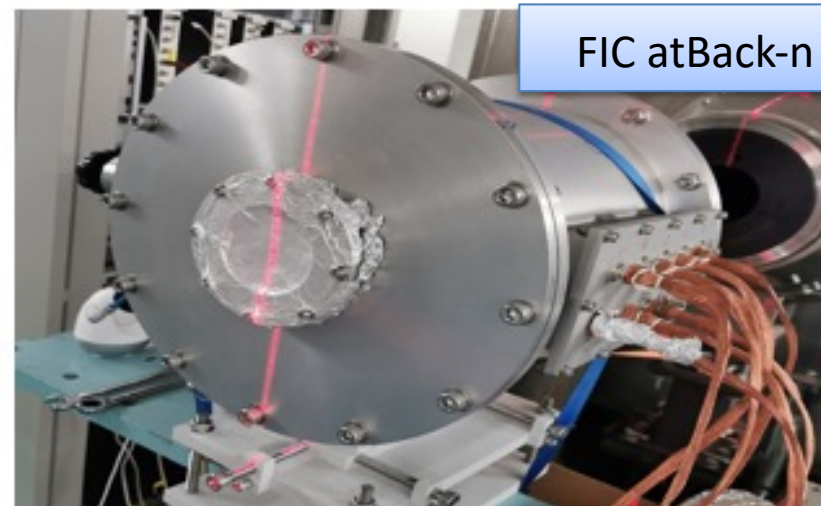
- 得到 $^{232}\text{Th} / ^{197}\text{Au}(n, \gamma)$  俘获截面，并与ENDF/B-VIII.0进行了对比；
- SAMMY程序对共振能区实验数据进行了处理，初步拟合得到了共振参数；
- 利用TALYS计算了不可分辨共振区的 $^{232}\text{Th}(n, \gamma)$  俘获截面数据。



第二次实验数据初步分析详黄勃松报告见《基于CSNS的Back-n中子源开展 $^{232}\text{Th}$ 俘获截面测量》

2-2、 $^{nat}\text{Li}$  全截面测量

- Li是熔盐堆中重要元素，其核数据的全截面实验数据关系到全套中子核数据评价的质量
- 基于TMSR-PNS & Back-n实验装置实现了从0.001eV~20MeV能区全覆盖
- 实验布置：
  - ✓ 能谱: ToF
  - ✓ 方法: 透射法 ( 相对测量, 精度高 )
  - ✓ 探测器:  $^6\text{LiF}$  at TMSR-PNS , Multilayer fast ionization chamber (FIC) at Back-n
  - ✓ 样品:  $^{nat}\text{Li}$ (92.5%  $^7\text{Li}$ , 7.5%  $^6\text{Li}$ ,  $\Phi=50\text{ mm}$  ,  $h=15\text{ mm}$  &  $8\text{ mm}$  ) , 铝膜密封



## $^{nat}\text{Li}$ 全截面测量

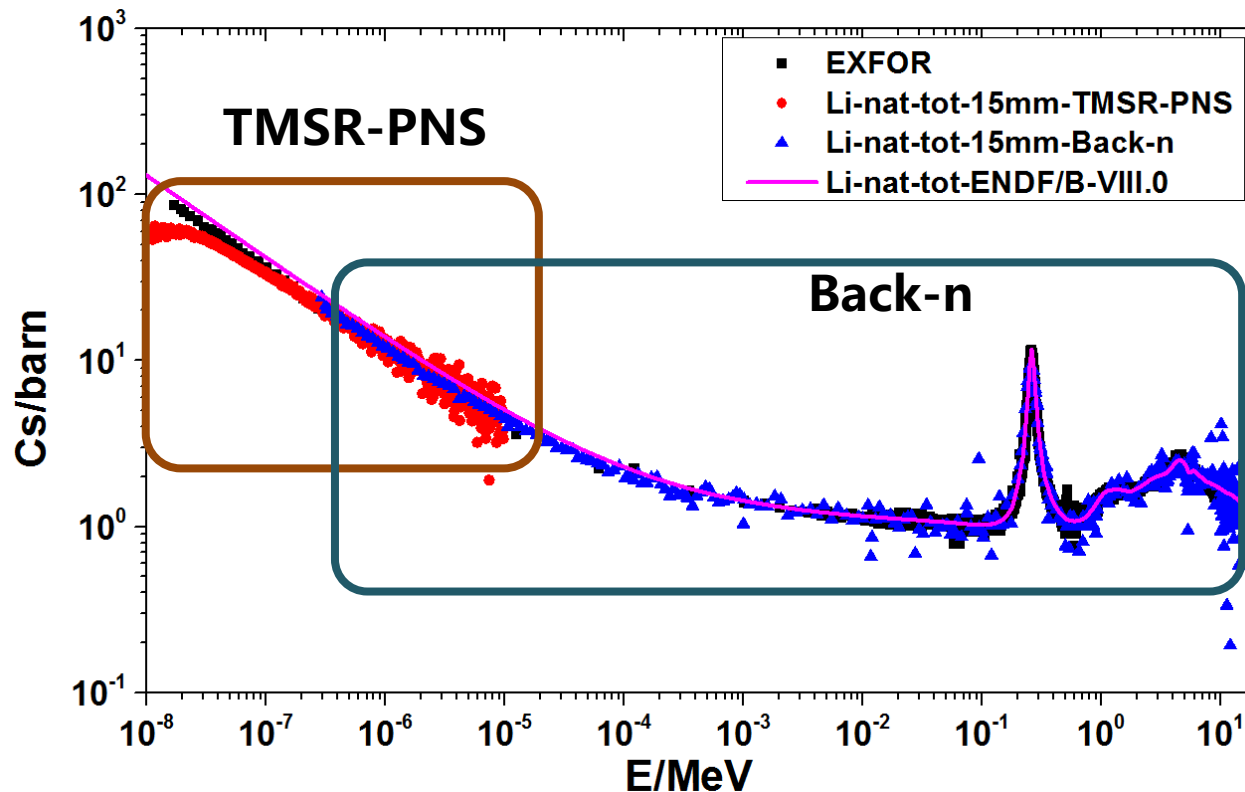
### □ 数据分析

#### ◆ Back-n

- 中子信号筛选: 信号幅度
- 能量刻度:  $^{235}\text{U}$ 的 8.77 eV 吸收峰
- 双速团解谱: 双速团间隔410ns
- 中子通量归一: 质子束流

#### ◆ TMSR-PNS

- 甄别n/ $\gamma$ : PSD
- 能量刻度: Co, Ag, In, Cd刻度片
- 散射本低: PE样品
- 中子通量归一: 等时间法



**宽能区覆盖 (  $10^8 \sim 20\text{MeV}$  )、能区互补**

## TMSR关键核数据

### ◆ 全套中子数据（协方差）

- $^{231,232,233,234}\text{Th}$ 、 $^{231,232,233,234}\text{Pa}$ 、 $^{232,233,234}\text{U}$
- $^6, ^7\text{Li}$ 、 $\text{F}$ 、 $\text{Be}$
- $^{155,153}\text{Gd}$ 、裂变产物



- ◆ 全截面、俘获截面测量（红色）
- ◆ 部分核素全套数据更新（红色、蓝色）
- ◆ 下一步裂变截面测量、替代反应测量

### ◆ 裂变产额数据

- $^{232}\text{Th}$ 、 $^{231,232,233}\text{Pa}$ 、 $^{233,234,235,236}\text{U}$



- ◆ 部分核素数据更新（蓝色）
- ◆ 下一步裂变产额测量（活化法）

### ◆ 热中子散射数据

- $\text{LiF}$ 、 $\text{BeF}_2$ 、 $\text{Flibe}$ （固态、液态熔盐）
- 石墨、GH3535合金



- ◆ 大部分已开展初步测量（红色）
- ◆ 下一步精确测量和评价

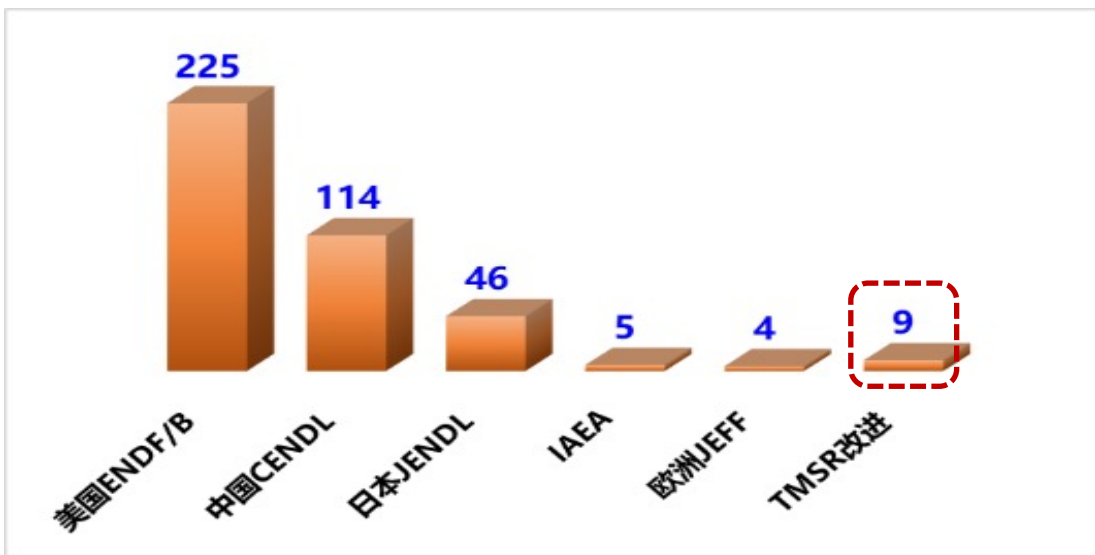
### ◆ 核结构与衰变数据

- 衰变数据： $^{231,233,234}\text{Th}$ 、 $^{232,233,234,234\text{m}}\text{Pa}$ 、 $^{232}\text{U}$   
衰变链、重要裂变产物
- 评价全套中子数据和衰变数据所需的核结构数据。



- ◆ 尚未开展相关研究，难度较大

基于上述实验数据和改进数据，于2018年完成 CENLD-TMSR-V1 (包含403种核素) 建设，作为 CENDL库的工作子库，供国际国内同行检索和检验；  
 利用该库开展了核数据适用性，结果显示总体优于美国ENDF/B-VII.0，已用于TMSR实验堆设计校核和钍铀循环分析。



**核物理主题数据库**  
 The Database of Nuclear Physics

**《中国评价核数据库》最新版CENDL-3.2正式发布**  
 中国评价核数据库是用于核工程、核能开发、核技术应用与基础研究等领域的通用评价核数据库。主要包含中子诱发核反应的各种评价核反应数据，是核反应重要基础数据库。中国评价核数据库最新版CENDL-3.2于2020年6月12日正式对外发布。

**数据库目录**

- 评价核数据库
- 钍铀循环专用核数据库
- 原子核特性数据库
- 实验核数据库
- 裂变产额数据库
- 常用核衰变数据库
- 核天体数据库
- 医用同位素数据库

**特色软件**

- NDPlot
- CTOM
- GDGraph


**联系方式**  
 联系人: 葛智刚, 金永利  
 电话: 010-69357275  
 传真: 010-69358119  
 地址: 北京市房山区新镇  
 邮编: 102413  
 E-mail: gezg@ciae.ac.cn

**数据库推荐**  
**评价核数据库**  
 国际上五个评价中子数据库ENDF/B-6格式, 中子入射, 10-5eV到20MeV, 包括综合说明信息, 共振参数, 中子截面, 角分布, 能谱和双微分截面, gamma产生截面, 角分布, 能谱及部分核素核素的协方差数据等。由各国或地区各自评价建立给出... [详细]  
 元数据 | 访问此库


**钍铀循环专用核数据库**  
 为满足钍基熔盐堆核能系统(TMSR)设计和分析需求, 中国核数据中心与上海应用物理研究所合作研制了一套核素种类完整的评价核数据库CENDL-TMSR。CENDL-TMSR包括3个子库, 即评价中子数据库(405个核素)、裂变产额数据库(约1100个产物核)、衰变数据库(54个核素)。 [详细]  
 元数据 | 访问此库


**原子核特性数据库**  
 核素图至2006年已知所有核素的基本核数据, 由中国和俄罗斯2国共同合作完成。与其它版本核素图不同的是, 核素图2006版全部采用评价核数据, 主要有, 质量亏损、稳定核素之丰度、稳定核素或长寿命放射性核素之热中子俘获截面、半衰期、衰变能... [详细]  
 元数据 | 访问此库

## 问题：不稳定核素 $^{233}\text{Pa}$ 核数据测量

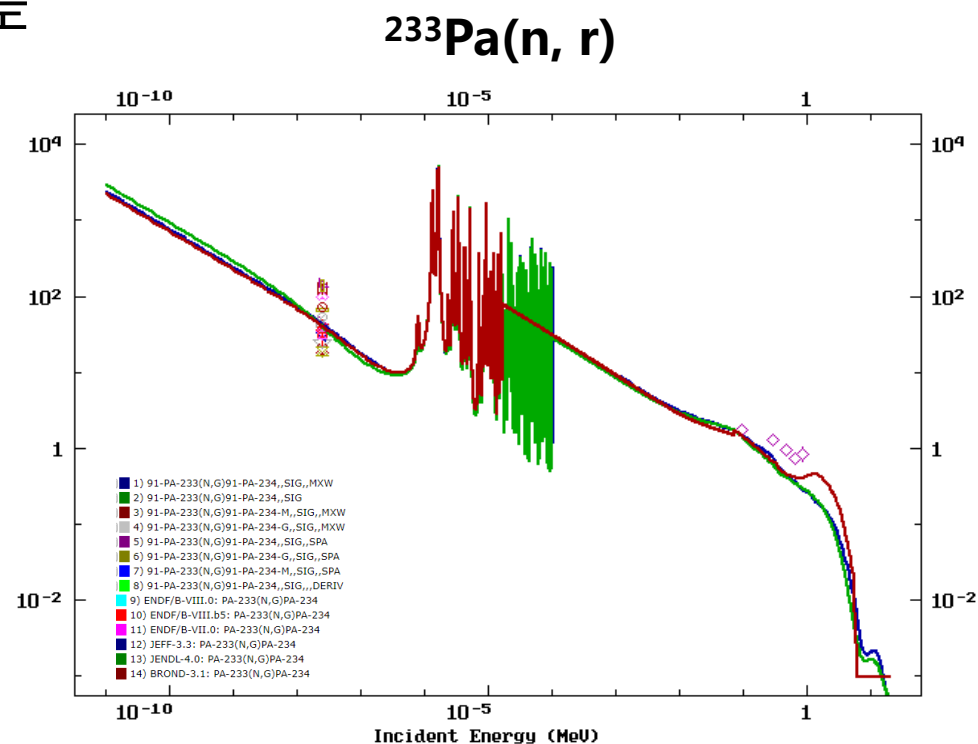
 **重要意义**： $^{233}\text{Pa}$ 是Th/U循环的重要中间核素。 $^{233}\text{U}$ 主要由 $^{233}\text{Pa}$ 衰变而来，其产额受到 $^{233}\text{Pa}$ 的控制，影响Th/U转换效率。

 **影响因素**： $^{233}\text{Pa}$ 的俘获截面很大，对 $^{233}\text{U}$ 的产额具有重要影响。

 **数据现状**：评价数据，各家数据库之间存在明显差异，尤其是在热区与不可分辨共振区；**实验数据**：共8家数据，仅一家在0.1 MeV附近开展测量，其余七家均仅为一个热能点数据，且各家数据差异巨大。

 **主要困难**： $^{233}\text{Pa}$ 半衰期短；高活度

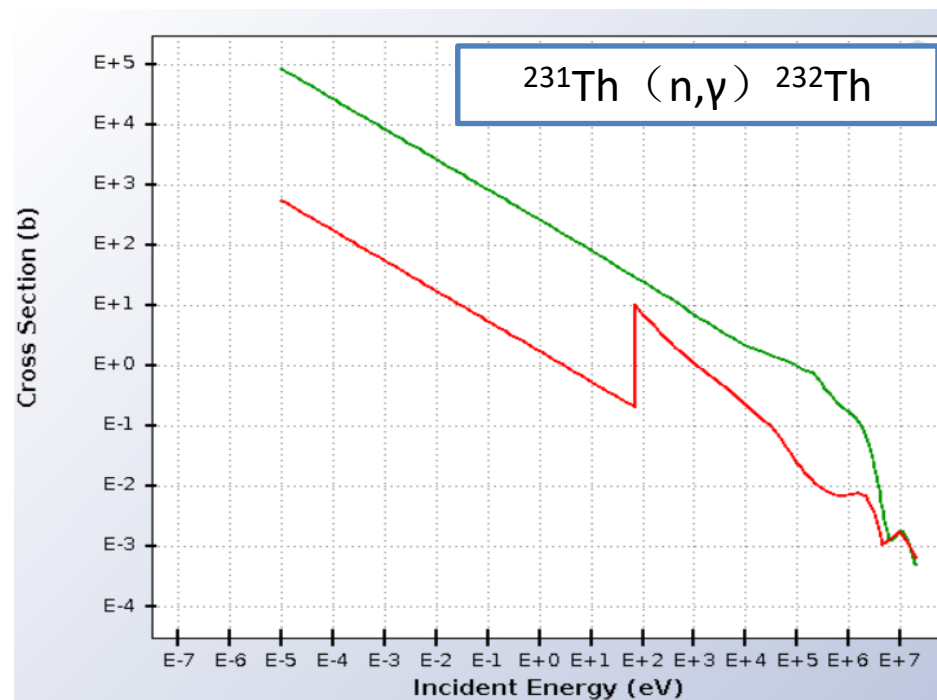
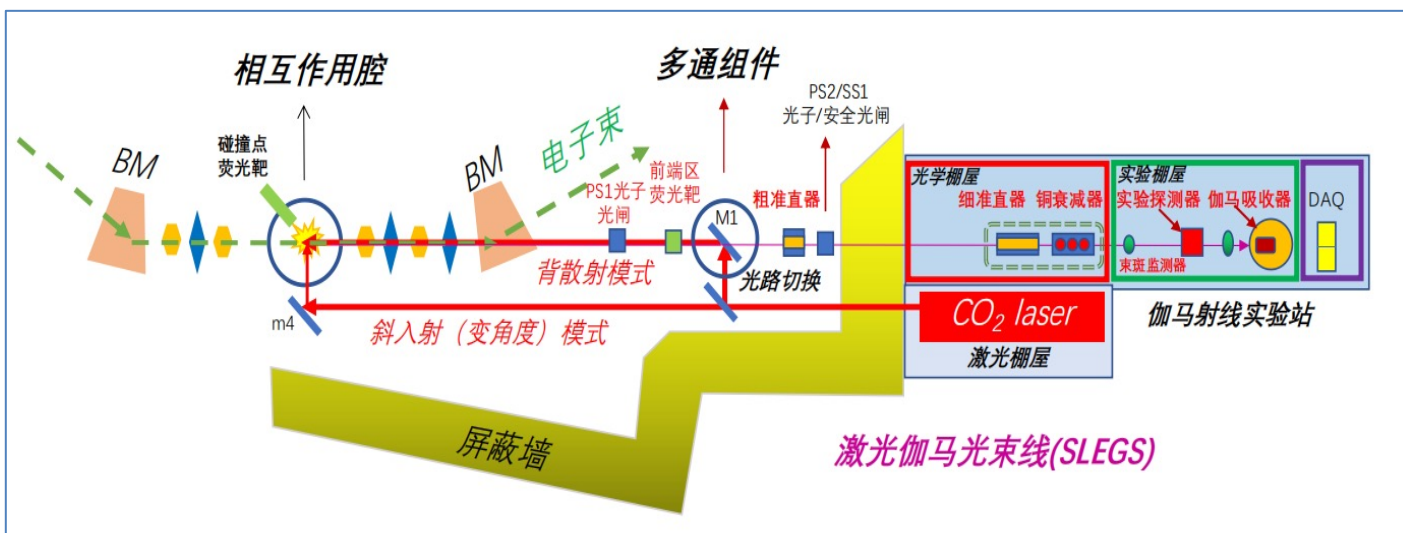
 **测量方法**：替代反应测量、质谱仪



基于上海光源的激光伽马光束线站 (SLEGS) 开展 $^{232}\text{Th} (\gamma, n) ^{231}\text{Th}$ 截面测试，从而研究 $^{231}\text{Th} (n, \gamma) ^{232}\text{Th}$ 反应截面，拓展中子俘获截面的测量手段。

## □ $^{232}\text{Th} (\gamma, n) ^{231}\text{Th}$ 测量方法

- ◆ 离线活化测量： $^{231}\text{Th}$  特征伽马射线
- ◆ 直接中子法测量：利用 $^3\text{He}$ 计数管及慢化体搭建中子总探测效率恒定探测系统开展多中子测量

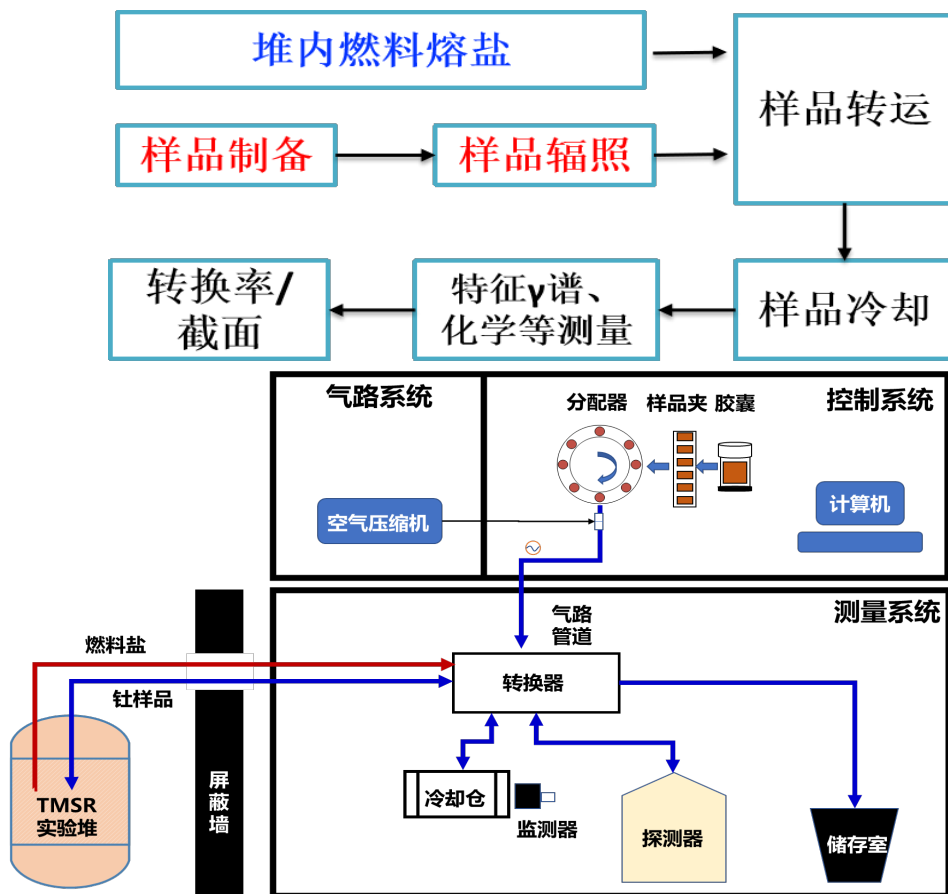




# 问题：基于TMSR实验堆的活化法测量

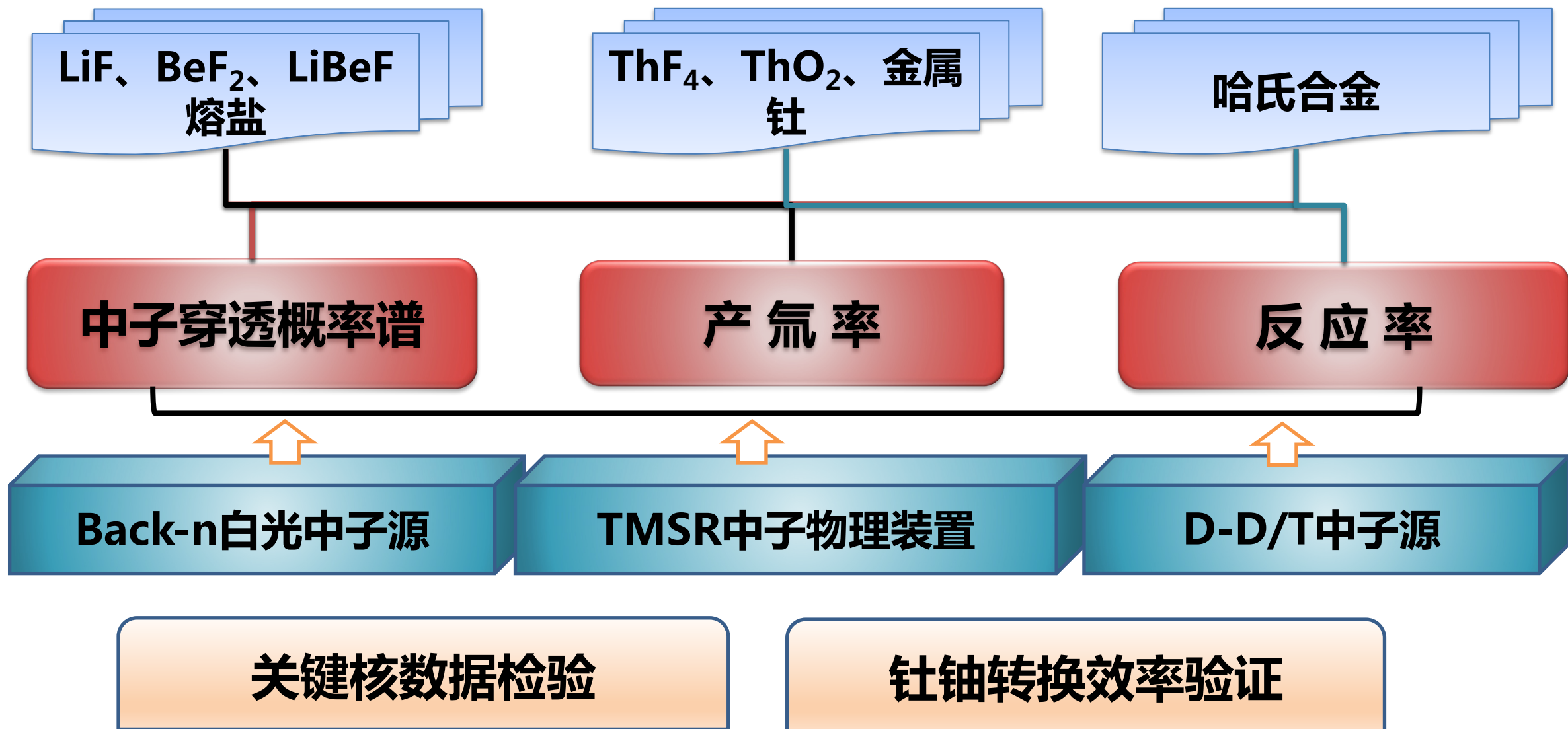
采用活化法、质谱等方法，测量辐照后的钍样品及燃料熔盐钍铀关键核素量，研究不同运行时间及能谱下中子反应截面。

结合熔盐堆特点，实时在线取样，有利于测量半衰期短核素的特征伽马



	$^{233}\text{Th}$	$^{233}\text{Pa}$	$^{233}\text{U}$
衰变/半衰期	$\beta^-/22.3\text{m}$	$\beta^-/6.975\text{d}$	$\alpha/159,200\text{y}$
辐照时间	数百分钟	数百分钟	数百分钟~数天
放射性活度 (Bq)	$1.2\sim 4.1 \times 10^6$	2000~80000	$7.2 \times 10^{-4} \sim 7.2 \times 10^{-2}$
衰变特征峰	$\gamma: 86.5\text{keV}, 2.7\%$	$\gamma: 311.9\text{keV}, 38.5\%$	$\gamma: 42\text{keV}, 0.072\%$
	$\gamma: 459\text{keV}, 1.4\%$		$\gamma: 97\text{keV}, 0.02\%$
	$\beta: 260\text{keV} \sim 1.2\text{MeV}$		$\alpha: 4.824\text{keV}, 84.3\%$
测量系统	高纯锗谱仪 质谱仪 硅探测器	高纯锗谱仪	高纯锗谱仪 质谱仪 硅探测器

## 问题：TMSR核数据积分实验研究



## 核数据测量 研究重点

高精度核数据测量：高亮度中子源+大型谱仪

宽能区核数据测量：大型白光中子源（ $10^{-9} \sim 10^2 \text{MeV}$ ）

短寿命核数据测量：锕系→次锕系；稳定核→不稳定核

新测量谱仪应用：高精度质谱仪、多种探测组合谱仪

新测量方法探索：替代反应测量、逆反应测量



# 请批评指正!

