

ADS次临界反应堆中子学研究中的核数据问题

普能

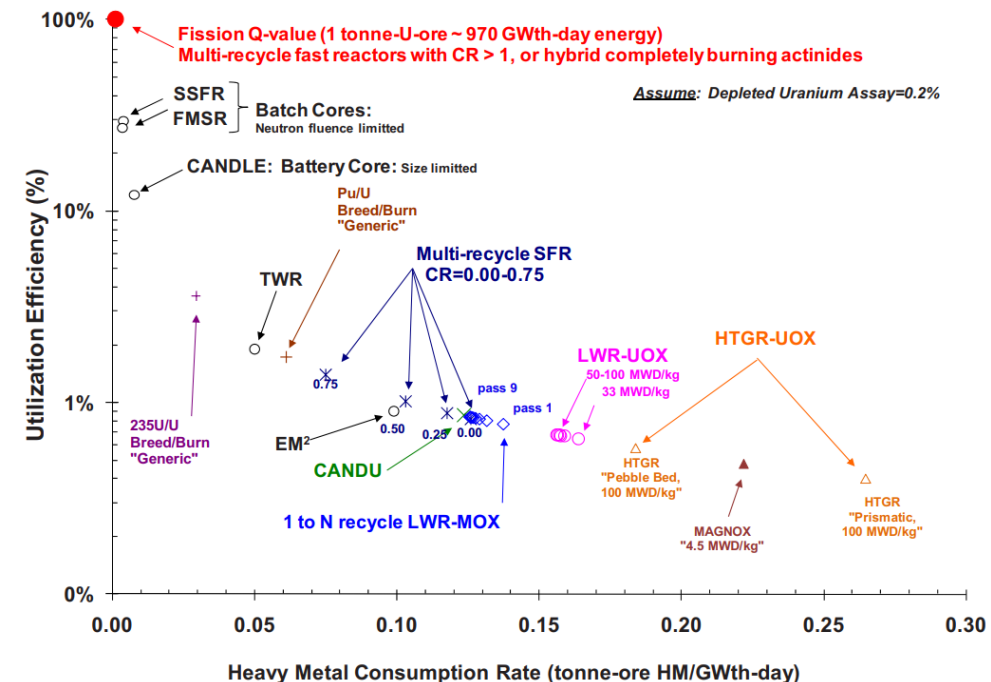
罗心元，朱晓冲，张勋超，贾欢，何源

中科院近代物理研究所

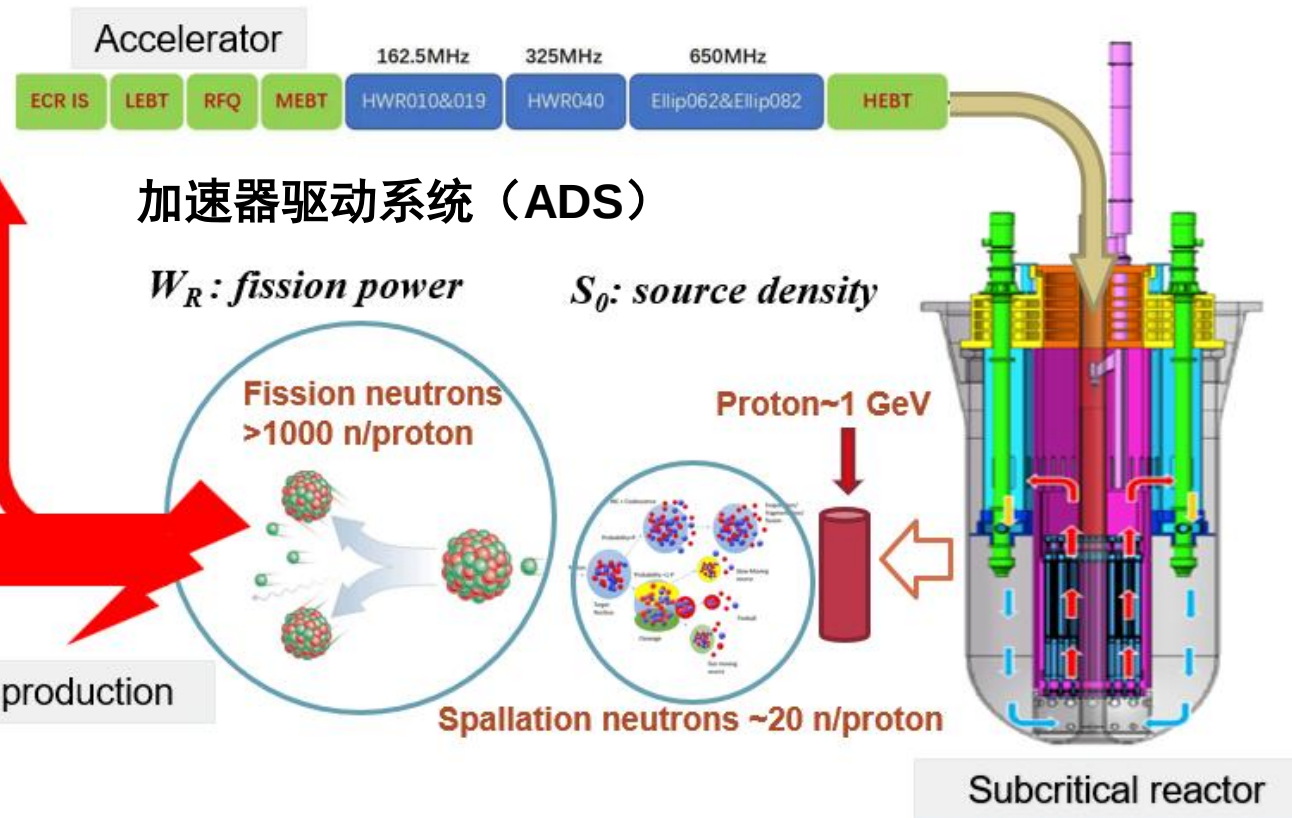
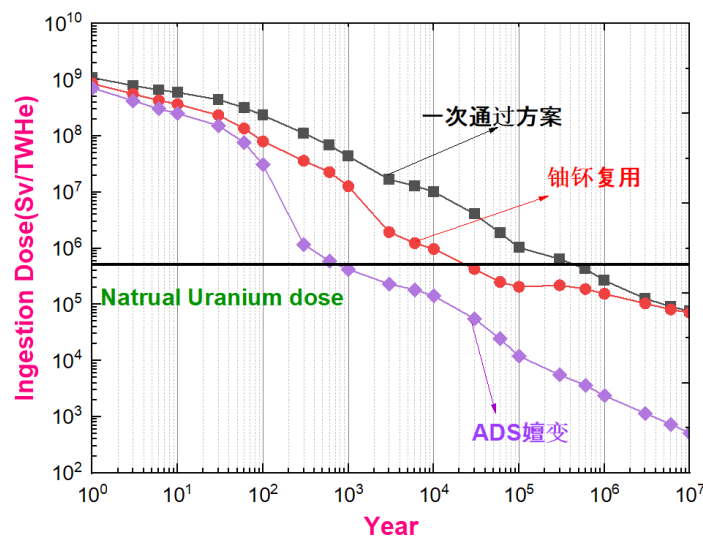
2025-07-24

- 背景介绍
 - ADS与核能可持续发展
 - ADS高能中子核截面数据需求与现状
 - 燃料循环计算中的核数据问题
- ADS中 k_{eff} 计算的核数据敏感性与不确定性分析
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算分歧
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算的不确定量化
 - ADS的 k_{eff} 计算中核数据敏感性分析
- 基于CSNS反角白光中子的Am-243裂变截面测量实验准备工作
 - Am-243裂变截面测量的重要性
 - CSNS反角白光中子源的裂变截面测量经验
 - Am-243裂变截面测量实验准备工作
- 总结

- 背景介绍
 - ADS与核能可持续发展
 - ADS高能中子核截面数据需求与现状
 - 燃料循环计算中的核数据问题
- ADS中 k_{eff} 计算的核数据敏感性与不确定性分析
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算分歧
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算的不确定量化
 - ADS的 k_{eff} 计算中核数据敏感性分析
- 基于CSNS反角白光中子的Am-243裂变截面测量实验准备工作
 - Am-243裂变截面测量的重要性
 - CSNS反角白光中子源的裂变截面测量经验
 - Am-243裂变截面测量实验准备工作
- 总结

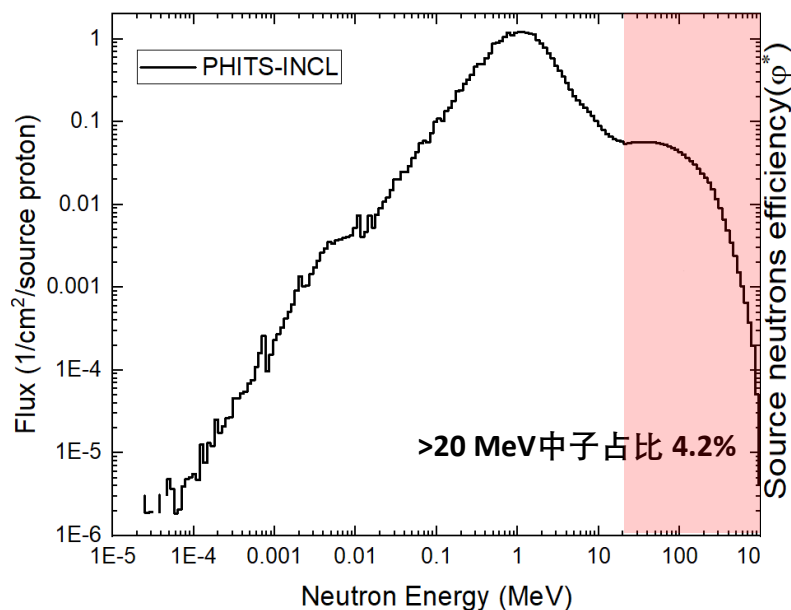


Samuel Bays Steven Piet, The Effect of Burnup and Separation Efficiency on Uranium Utilization and Radiotoxicity

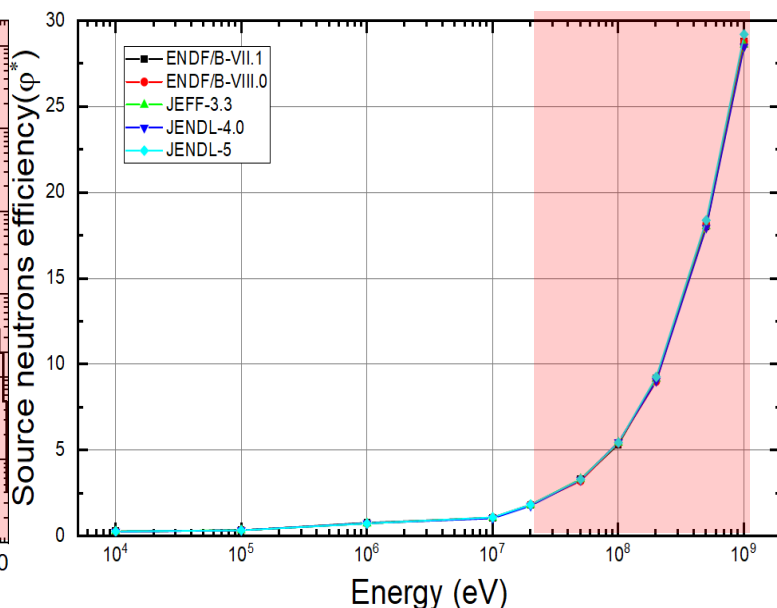


- 传统热堆核能系统由于燃料利用率较低，同时伴随大量剧毒高放废物（HLW）产生，威胁人类生存和环境生态系统。
- ADS利用加速器外源驱动次临界快中子堆，可以装载大量次锕系核素（MA），利用快中子谱高效的嬗变效率实现HLW焚烧，同时可以用于产能和燃料增殖。
- 因此ADS将是Gen III+向Gen IV四代堆过渡中的整个核能系统可持续发展不可缺少的重要环节。

1 GeV 质子打铅铋靶的散裂中子谱



ADS单能中子外源价值



不同直径的铅铋靶泄露高能中子占比

Target diameter (cm)	<S> (n/proton)	Energy group (MeV)				
		<0.1	0.1~5	5~20	20~200	>200
15	17.91	1.25%	80.19%	10.17%	7.17%	1.21%
20	19.03	1.47%	82.94%	8.69%	6.00%	0.91%
30	20.63	1.92%	86.34%	6.59%	4.56%	0.59%
45	22.35	2.72%	88.97%	4.69%	3.24%	0.38%
50	22.74	3.03%	89.42%	4.25%	2.96%	0.34%
60	23.97	3.69%	89.92%	3.58%	2.53%	0.28%

- 1 GeV中子的外源价值是10 MeV中子的**29**倍，是1 MeV中子的**40**倍左右。
- 20 MeV以上中子对束流需求的贡献在**25%~30%**左右，200MeV与20 MeV束流差异**15~18%**左右。
- 因此**高能中子**截面对ADS基本参数设计和运行实验校验至关重要。

Library	Fission to absorption	Source strength (n/s)	ν	η	Mean energy (MeV)	ϕ^*	Neutron yield (n/s)	Beam current (mA)	差异	G
JENDL-4.0/HE 20MeV	1.331	1.06E+18	3.02	1.72	0.517	0.91	3.68E+19	7.46	0.00%	50.5
ENDF/B-VII 20MeV	1.317	1.53E+18	3.01	1.71	0.521	0.92	3.67E+19	10.8	-30.93%	34.9
JENDL-4.0/HE 200MeV	1.331	9.19E+17	3.02	1.72	0.521	1.05	3.68E+19	6.49	14.95%	58.1



背景——ADS高能中子核截面数据现状



ADS燃料高能中子数据

Nuclides	ADS-HE	ENDF/B-VIII.0	JENDL-5	JEFF-3.3	CENDL-3.2	Nuclides	ADS-HE	ENDF/B-VIII.0	JENDL-5	JEFF-3.3	CENDL-3.2
U-233		20.MeV	20.MeV	30.MeV	20.MeV	Pu-240		30.MeV	200.MeV	30.MeV	20.MeV
U-235	1 GeV	30.MeV	200.MeV	30.MeV	20.MeV	Pu-241		20.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
U-236/7		30.MeV	20.MeV	30.MeV	20.MeV	Am-240		20.MeV	20.MeV		20.MeV
U-238	1 GeV	30.MeV	200.MeV	30.MeV	20.MeV	Am-241		30.MeV	200.MeV	30.MeV	20.MeV
U-239		30.MeV		20.MeV	20.MeV	Am-242	1 GeV	20.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
Np-237	1 GeV	20.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV	Am-242m		20.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
Np-238		20.MeV	20.MeV	20.MeV	20.MeV	Am-243		30.MeV	20.MeV	20.MeV	20.MeV
Pu-237		20.MeV	20.MeV	20.MeV	20.MeV	Am-244		20.MeV	20.MeV	20.MeV	20.MeV
Pu-238		30.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV	Cm-244/6		20.MeV	20.MeV	20.MeV	
Pu-239	1 GeV	20.MeV	200.MeV	30.MeV	20.MeV	Cm-245	1 GeV	20.MeV	20.MeV	20.MeV	

- 目前核评价数据中大多数中子核反应数据能量上限只到200 MeV：
 - ✓ CENDL-3.2全部核素只到20 MeV；
 - ✓ ENDF/B-VII.1或VIII.0只有少数核素到150或200 MeV；
 - ✓ 只有ADS-HE有10个核素达到1 GeV；
 - ✓ JEFF-3.3有部分核素达到200 MeV；
 - ✓ TENDL-2019的2813个核素到200 MeV，但与各评价库计算结果偏差较大。

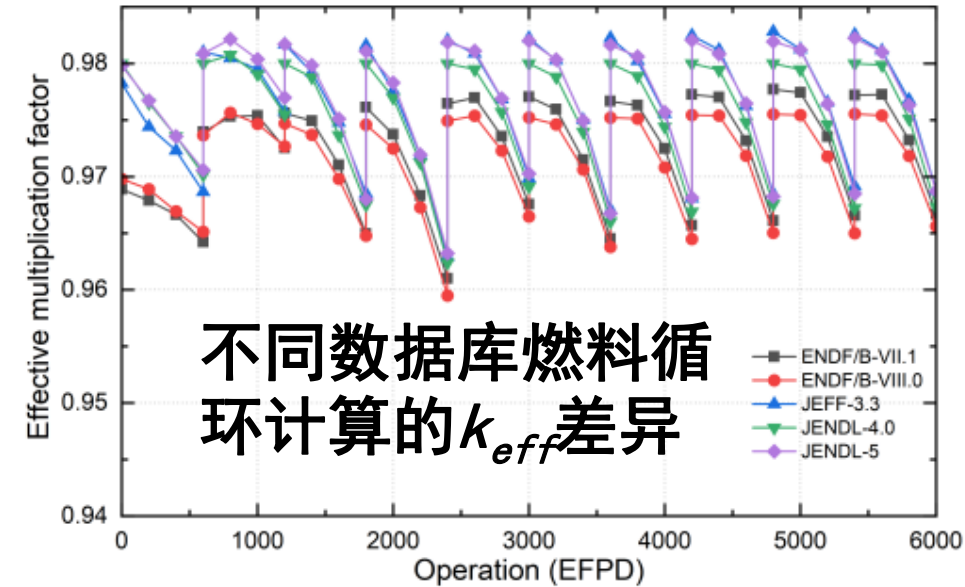
Nuclides	ADS-HE	ENDF/B-VIII.0	JENDL-5	JEFF-3.3	CENDL-3.2
Pb-204		200.MeV	200.MeV	200.MeV	20.MeV
Pb-206		200.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
Pb-207		200.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
Pb-208	1 GeV	150.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV
Bi-209	1 GeV	150.MeV	200.MeV	20.MeV	20.MeV

- JENDL-5的靶、结构材料基本能满足200 MeV 中子核反应高能截面数据要求。
- JENDL-5 中只有**U-235/238/240、Np-237、Pu-238到Pu-242、Am-241和242(m)**有200MeV数据
- JENDL-5 中U-230到234和U236/237、Np-234到239（除237）、Am-243/244和所有Cm和Th都是20 MeV以下。
- ADS中子学研究至少需要**Cm、Np-238、Am-243/244和U-233、U-234、U-236、U-237**等核素的高能中子截面数据。6

- 燃烧产生的裂变产物主要有金属，气体，镧系等。
- 针对它们分离方式的不同，主要是高温下可挥发的气体，高温氧化后可挥发的金属，金属，镧系。

气体&半挥发				
Kr83	Cs137	Cs133	Rb87	Mo92
Kr84	Ru100	Cs134	Rh103	Mo94
Kr86	Ru101	Cs135	Tc99	Mo95
Xe130	Ru102	Cd113	Mo100	
Xe131	Ru103	Te128	Mo98	
Xe132	Ru104	Te130	Mo97	
Xe134	Ru106	I129	Mo96	
Xe136	Cd110	Cd112		
I127	Cd111	Rb85		

金属		
Rb85	Pd104	Ba140
Rb87	Pd105	Zr95
Sr88	Pd106	Zr96
Sr89	Pd107	Pd110
Sr90	Pd108	
Y89	Nb95	
Y91	Tc99	
Zr90	Ba134	
Zr91	Ag109	
Zr92	Ba136	
Zr93	Ba137	
Zr94	Ba138	

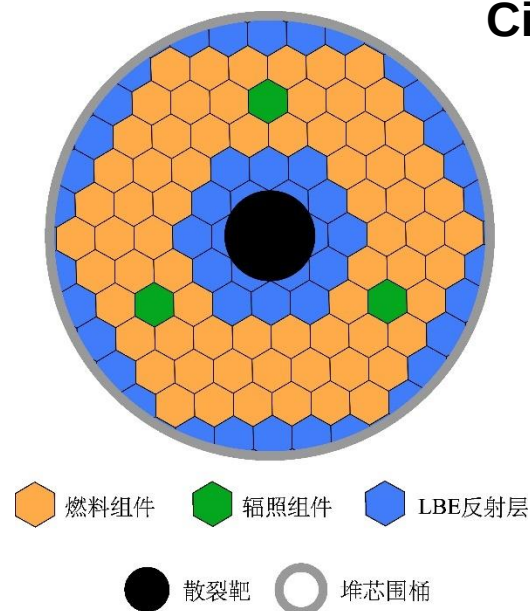


镧系		
La139	Nd150	Nd144
Ce140	Pm147	Nd145
Ce141	Sm147	Nd146
Ce142	Sm148	Nd148
Ce144	Sm149	Eu153
Pr141	Sm150	Eu154
Pr143	Sm151	Eu155
Nd142	Sm152	Gd156
Nd143	Sm154	

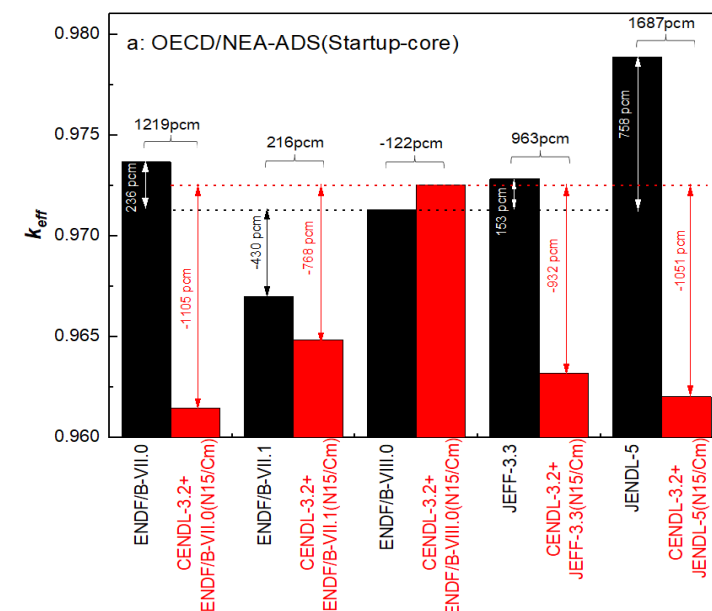
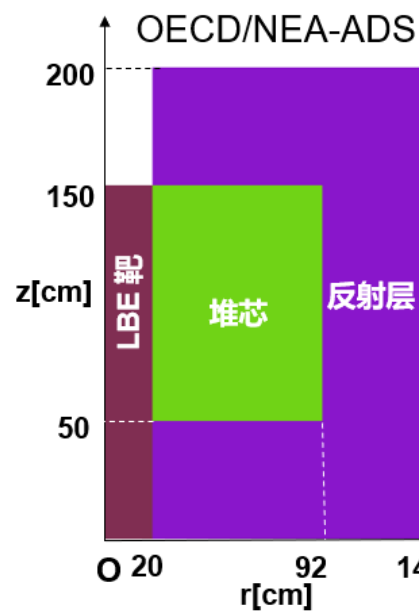
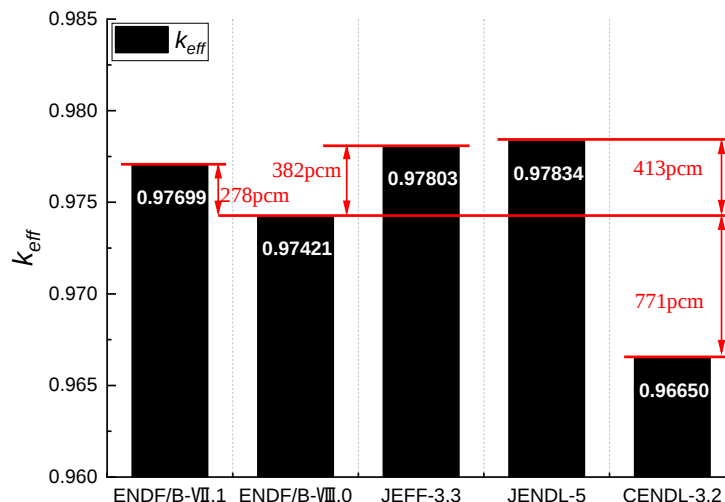
Table 1. Removal percent (%) of fission products by the Advanced Voloxidation process.

H-3	C-14	Kr-85	I-129	Cs	Tc	Ru	Rh	Te	Mo	Rb	Xe
100	100	100	100	98	92.3	97.6	82.7	53.3	61.7	96	100

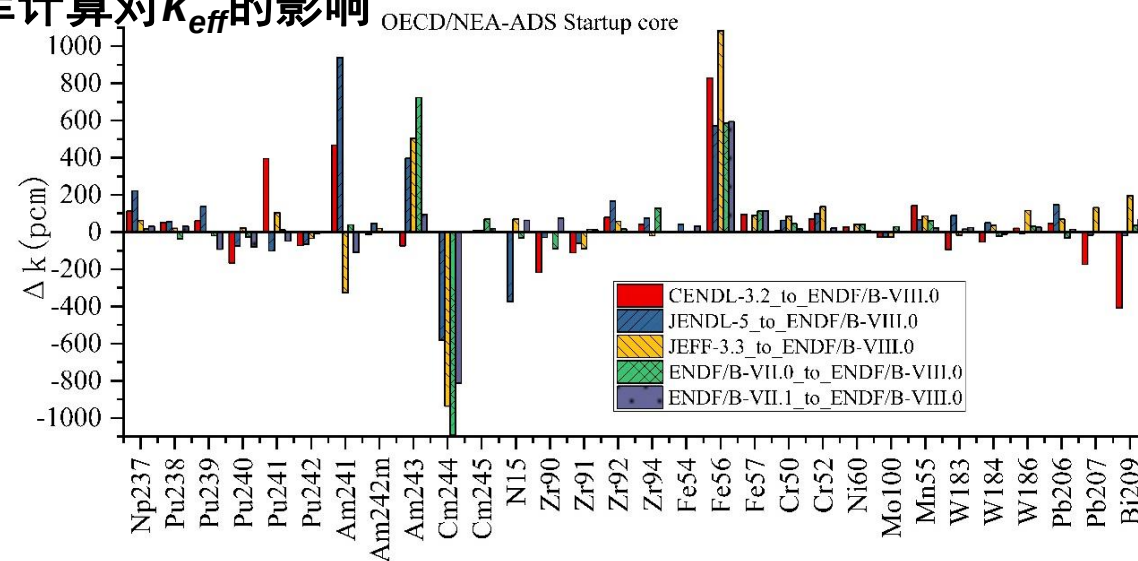
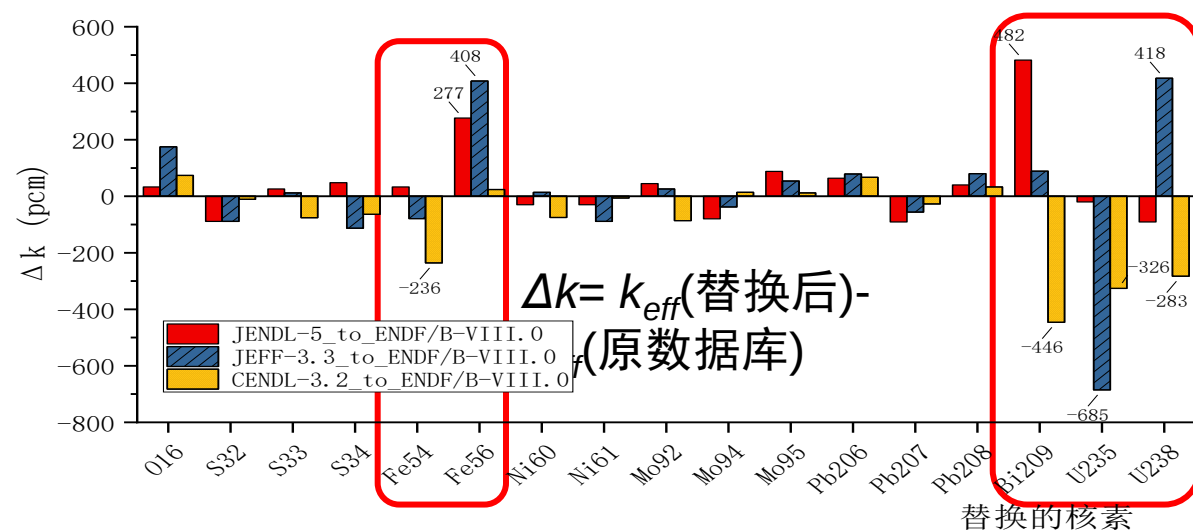
- 背景介绍
 - ADS与核能可持续发展
 - ADS高能中子核截面数据需求与现状
 - 燃料循环计算中的核数据问题
- **ADS中 k_{eff} 计算的核数据敏感性与不确定性分析**
 - **不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算分歧**
 - **不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算的不确定量化**
 - **ADS的 k_{eff} 计算中核数据敏感性分析**
- 基于CSNS反角白光中子的Am-243裂变截面测量实验准备工作
 - Am-243裂变截面测量的重要性
 - CSNS反角白光中子源的裂变截面测量经验
 - Am-243裂变截面测量实验准备工作
- 总结



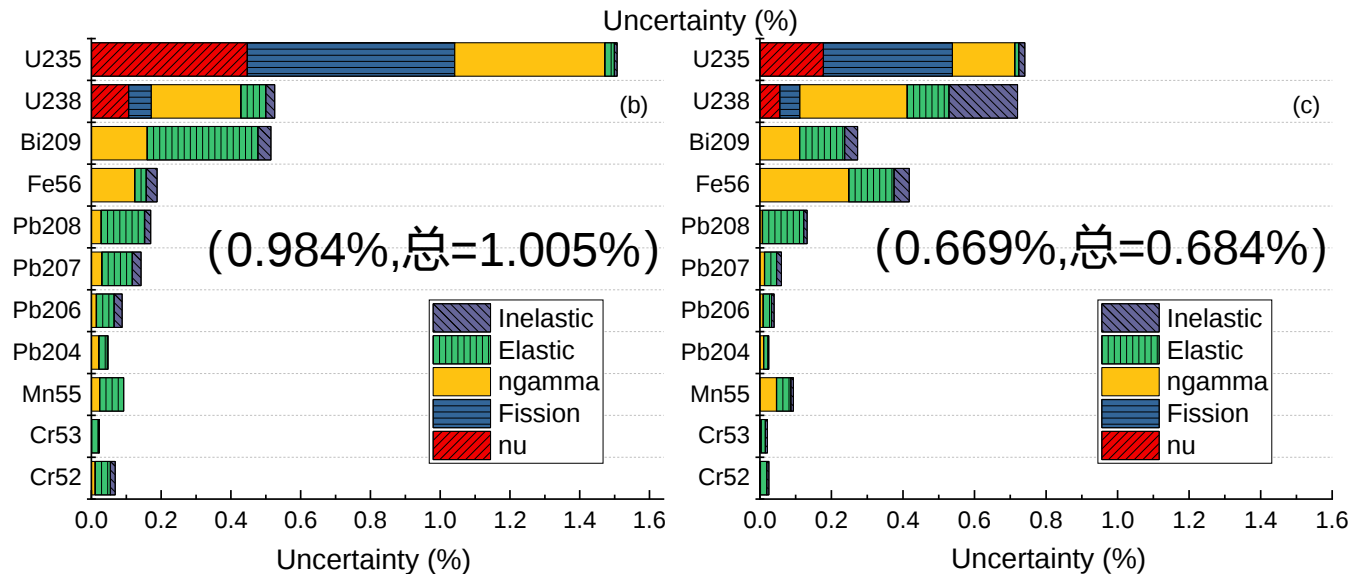
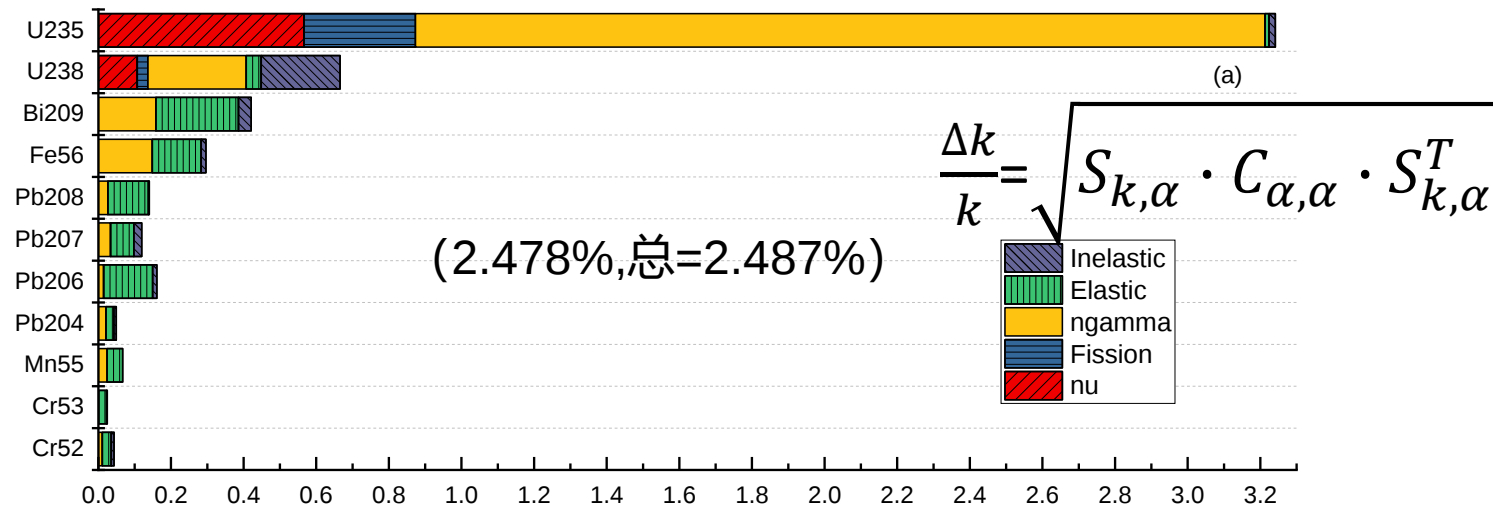
CiADS



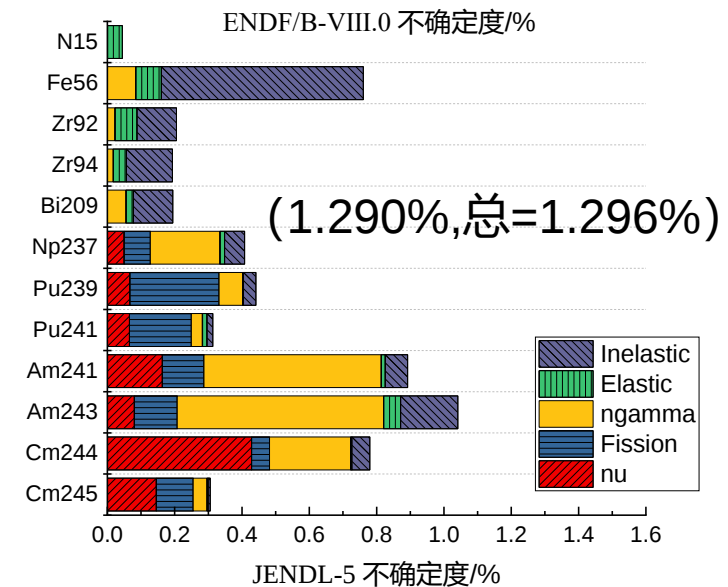
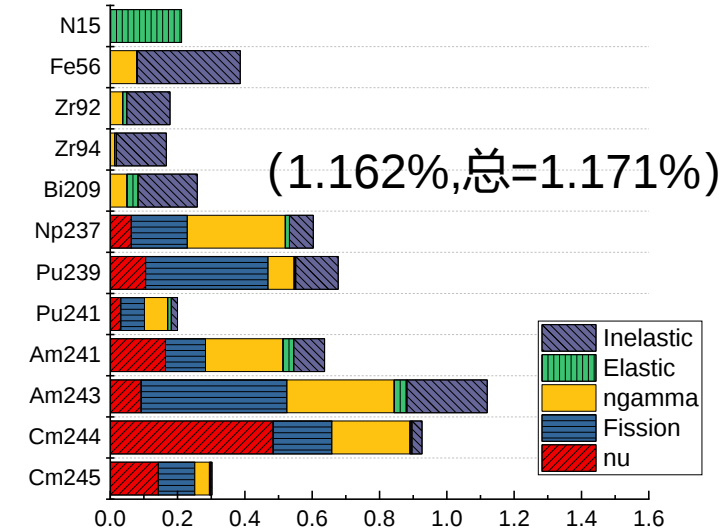
核素替换法寻找不同评价库计算对 k_{eff} 的影响



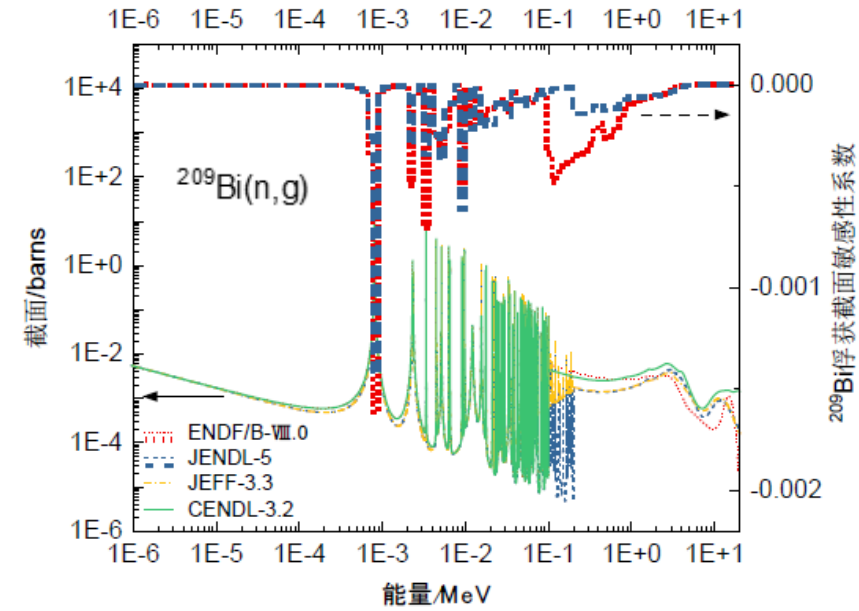
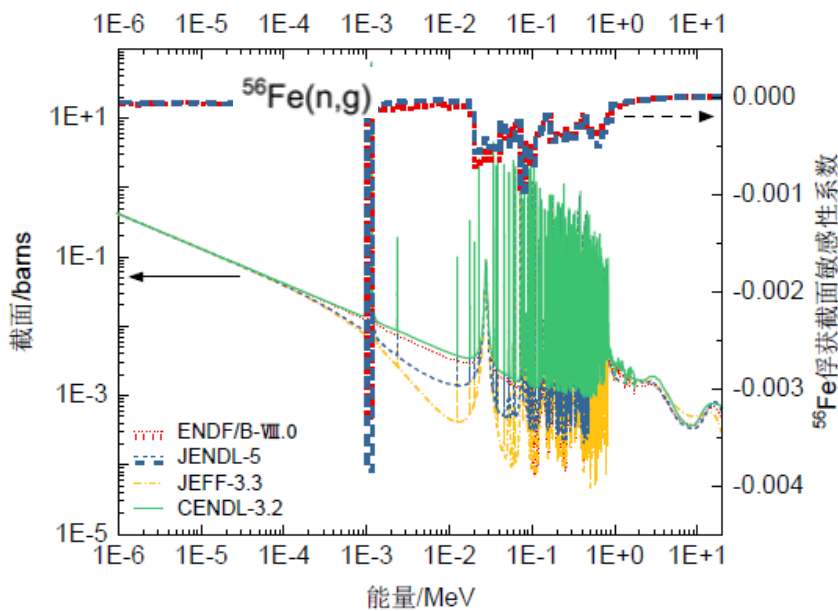
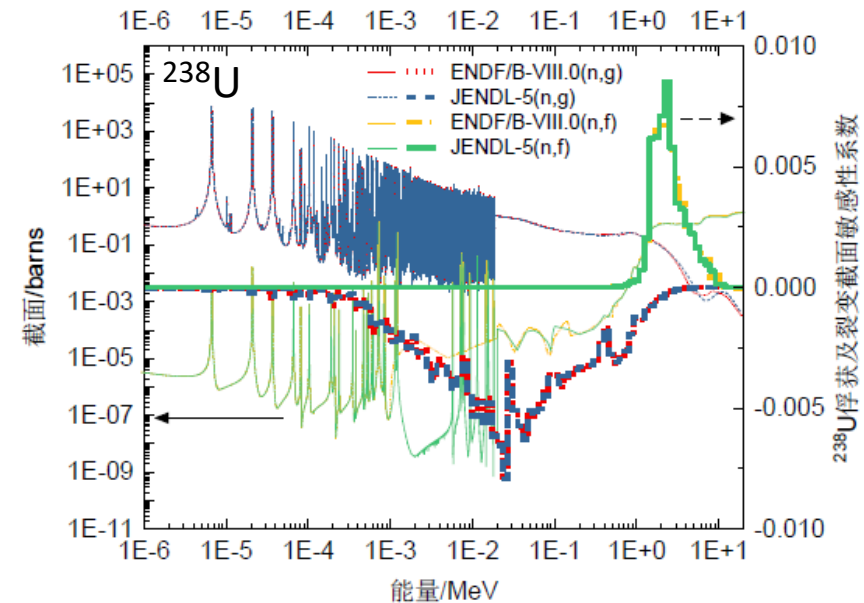
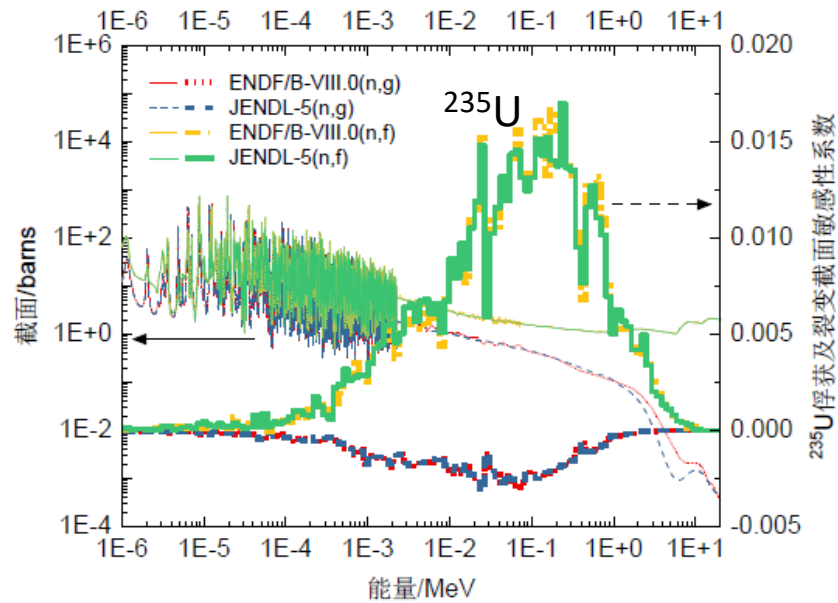
CiADS不同核素不同反应道不确定度量化

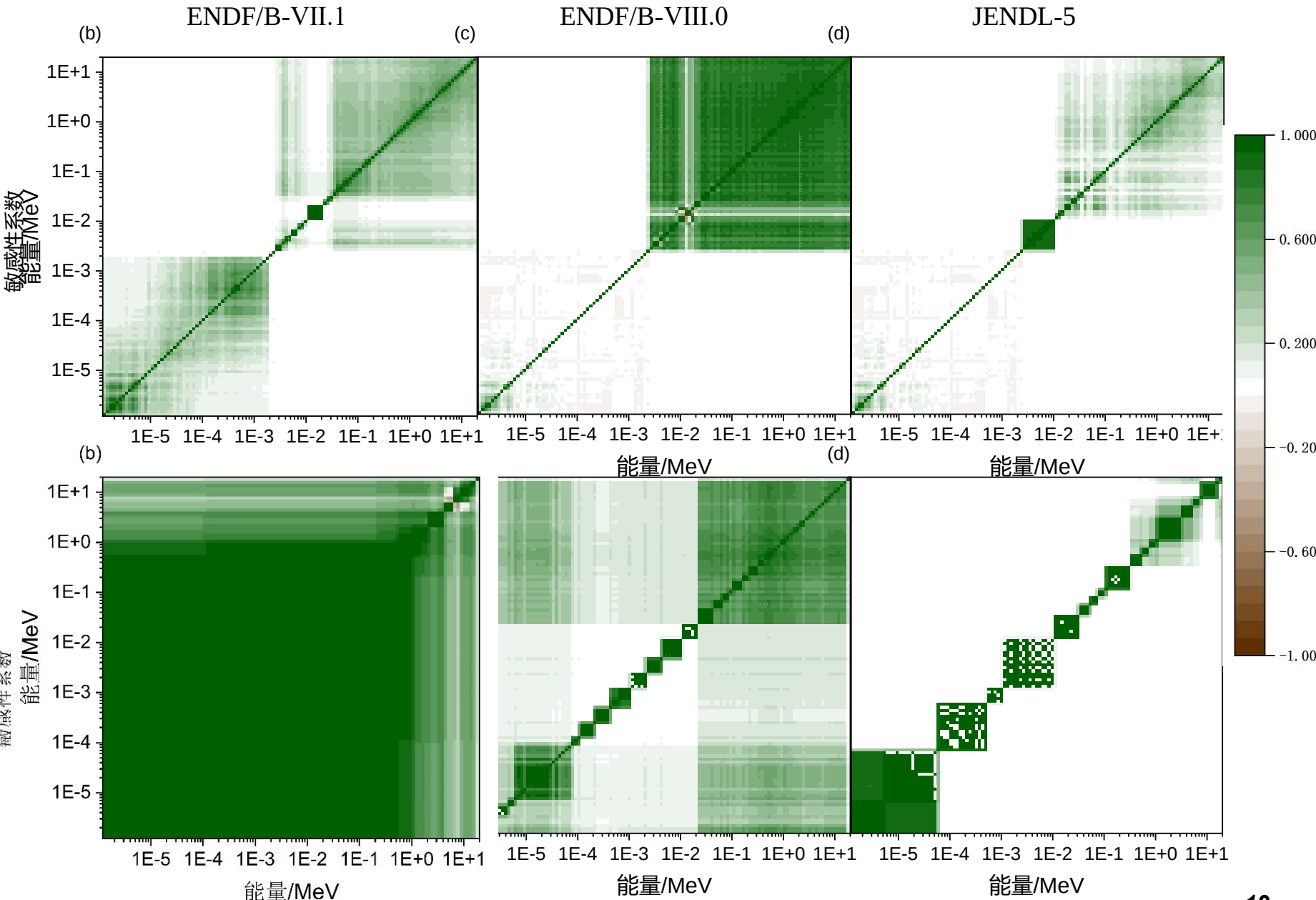
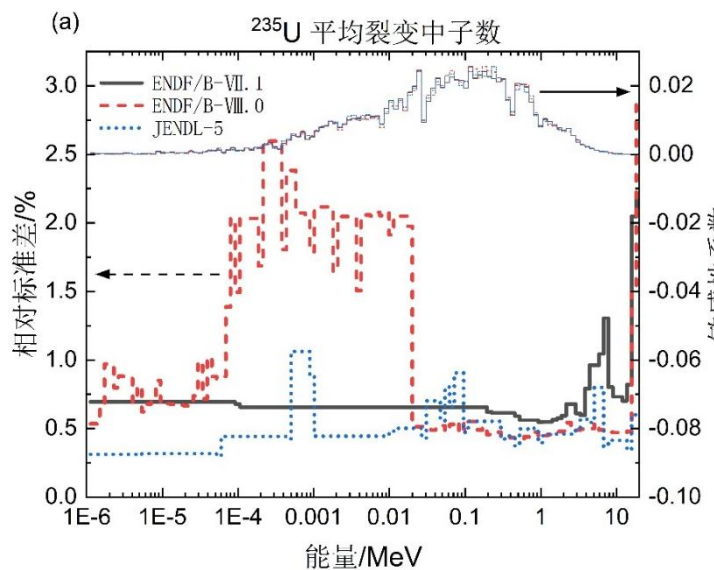
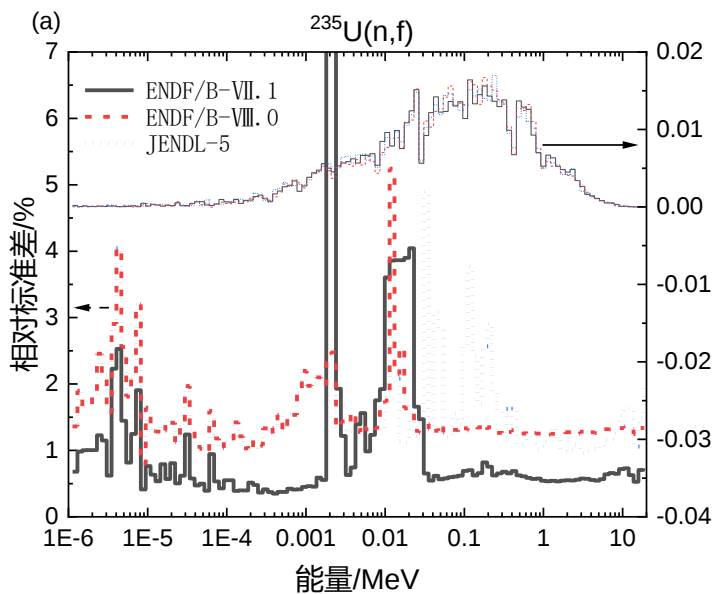


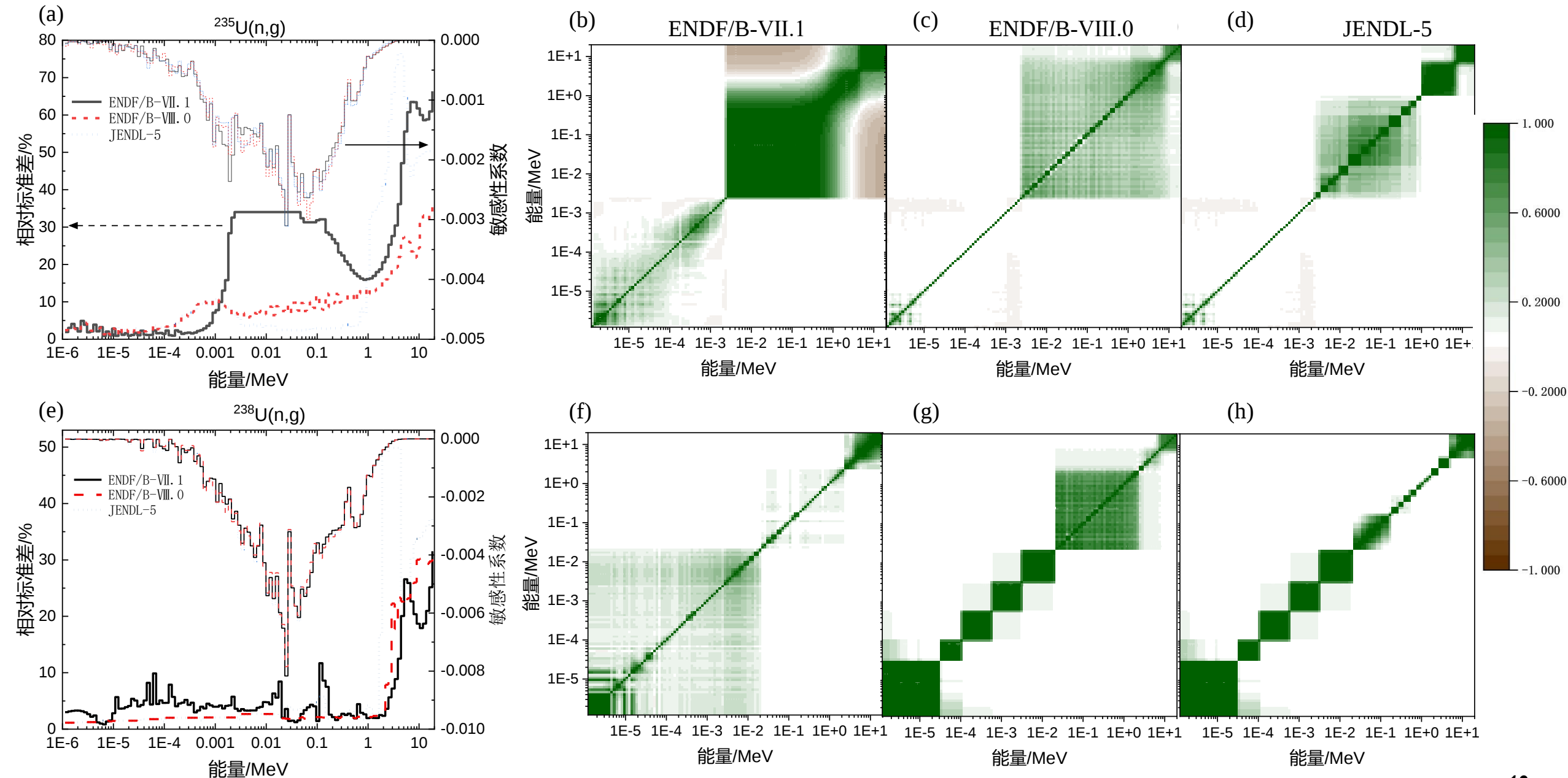
OECD/NEA-ADS不确定度量化

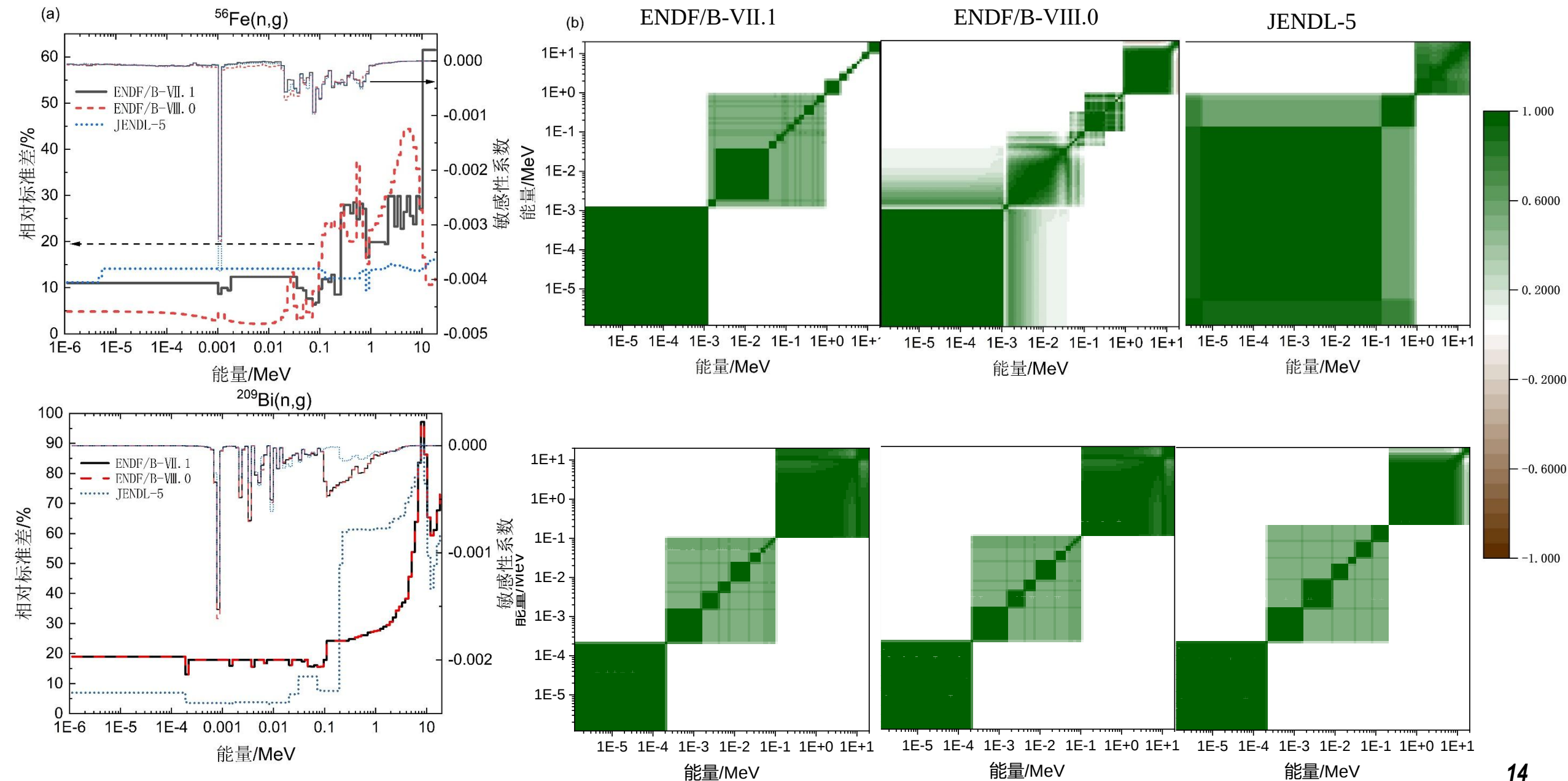


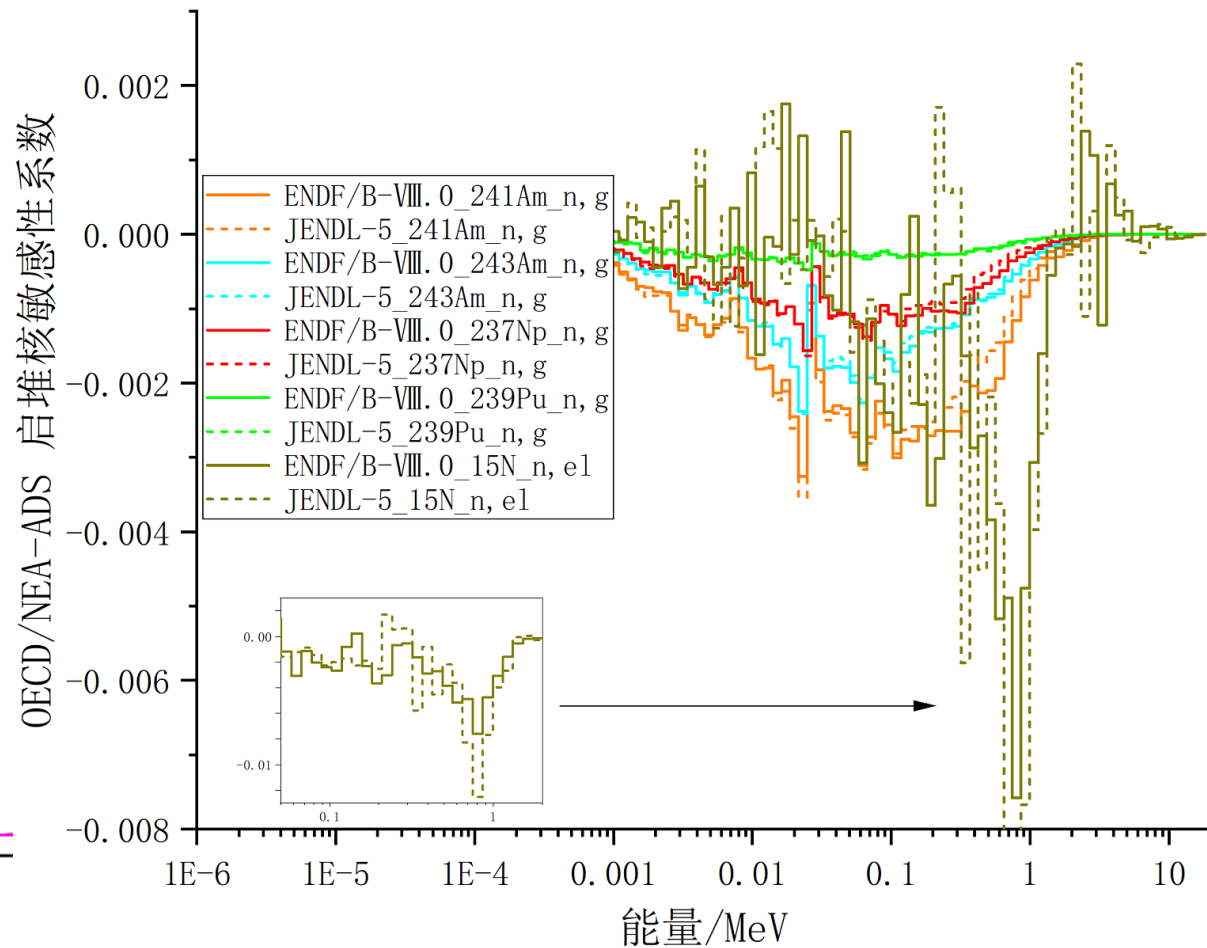
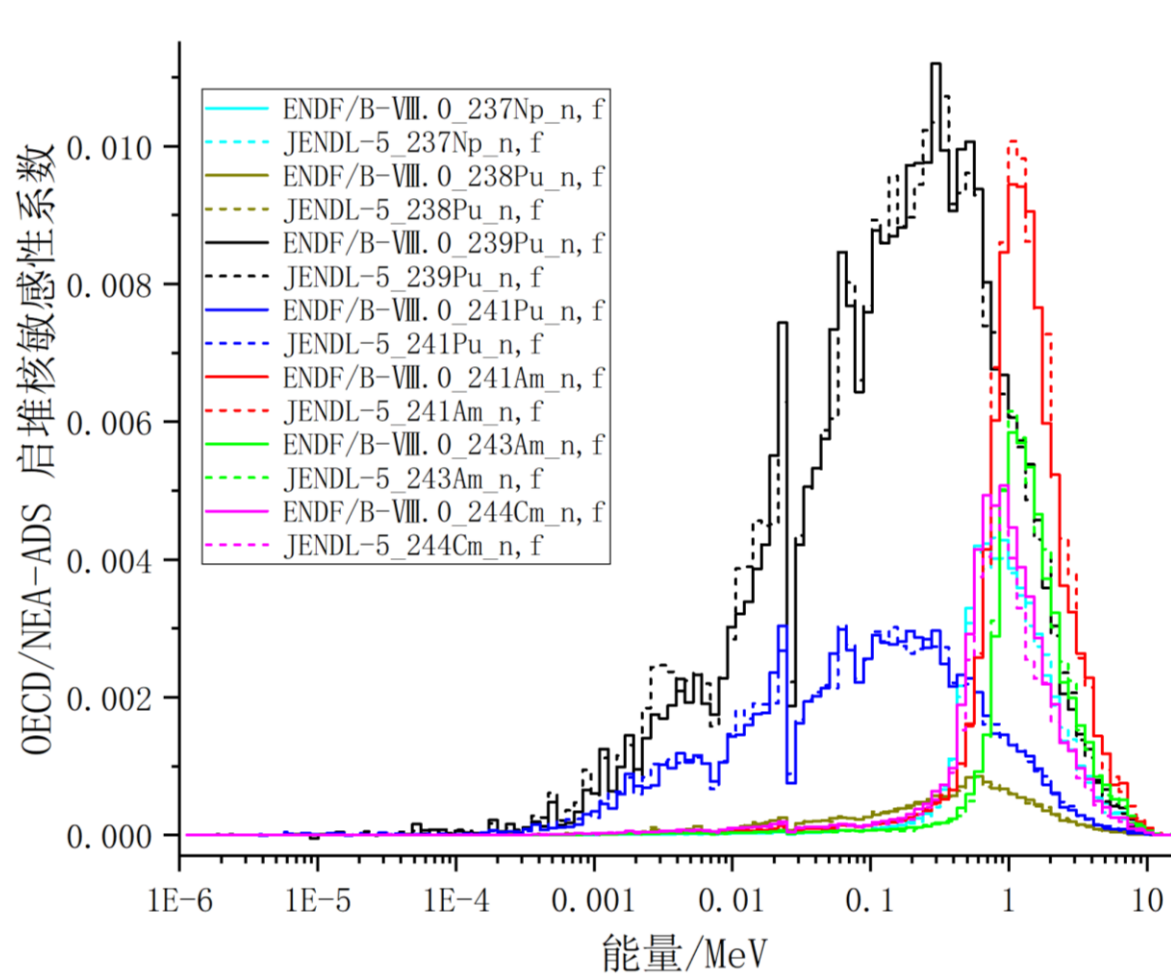
JENDL-5 不确定度/%







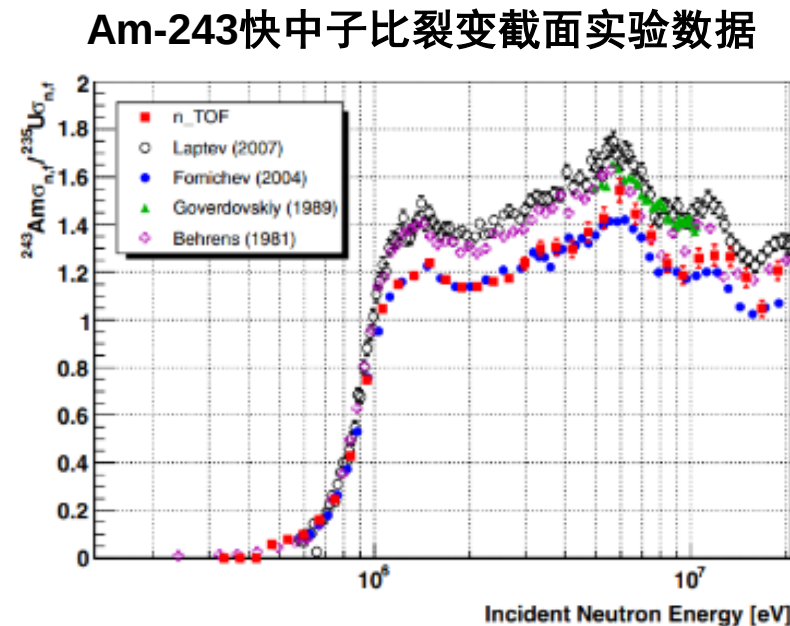
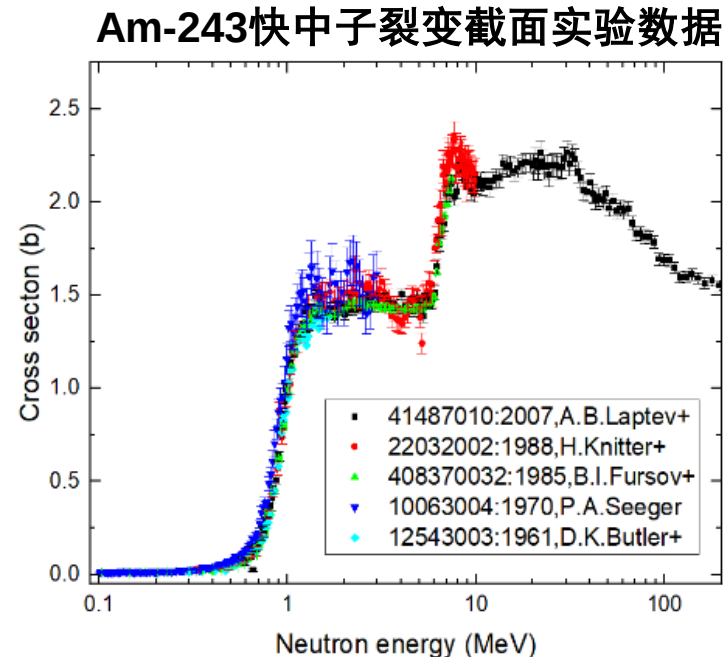
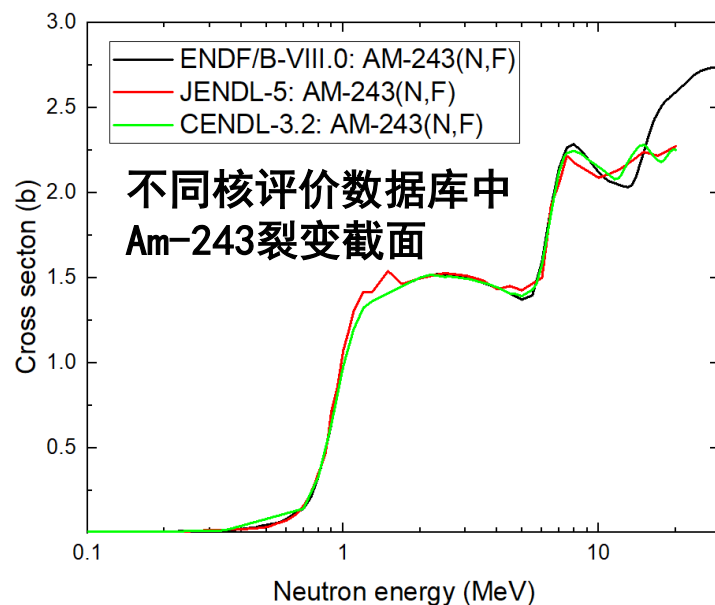




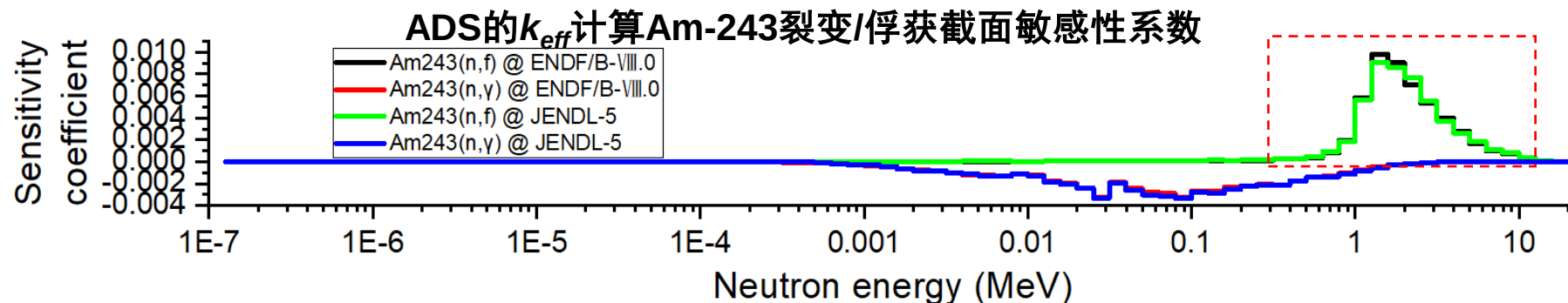
- $^{239}\text{Pu}(n,f)$ 、 $^{241}\text{Pu}(n,f)$ 、 $^{241}\text{Am}(n,f)$ 、 $^{243}\text{Am}(n,f)$ 、 $^{241}\text{Am}(n,g)$ 、 $^{15}\text{N}(n, el)$ 敏感性系数比较显著;
- $^{239}\text{Pu}(n,f)$ 、 $^{241}\text{Pu}(n,f)$ 、 $^{241}\text{Am}(n,g)$ 敏感区在1keV至10MeV内;
- $^{241}\text{Am}(n,f)$ 、 $^{243}\text{Am}(n,f)$ 、 $^{15}\text{N}(n, el)$ 敏感区在0.1MeV至10MeV内;

- 背景介绍
 - ADS与核能可持续发展
 - ADS高能中子核截面数据需求与现状
 - 燃料循环计算中的核数据问题
- ADS中 k_{eff} 计算的核数据敏感性与不确定性分析
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算分歧
 - 不同核评价数据库ADS的 k_{eff} 计算的不确定量化
 - ADS的 k_{eff} 计算中核数据敏感性分析
- 基于CSNS反角白光中子的Am-243裂变截面测量实验准备工作
 - Am-243裂变截面测量的重要性
 - CSNS反角白光中子源的裂变截面测量经验
 - Am-243裂变截面测量实验准备工作
- 总结

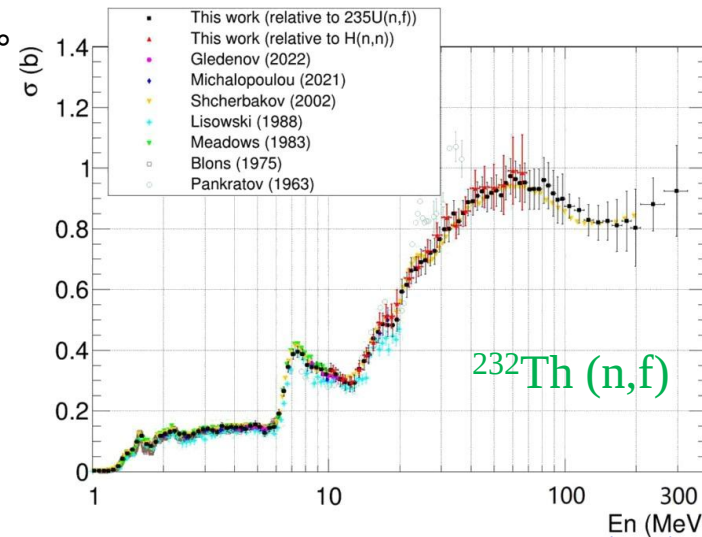
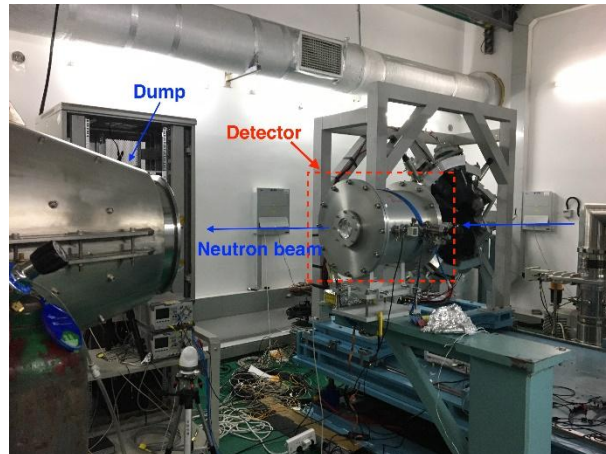
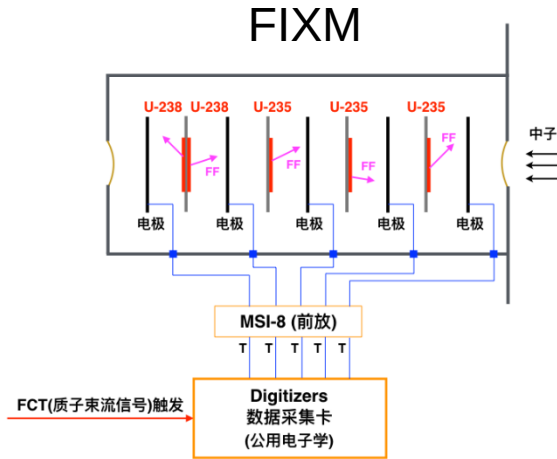
- 一方面，核评价库中**Am-243**对 k_{eff} 的计算影响较大，且Am-243裂变截面不确定度较大，应当优先针对Am-243裂变截面进行测量。
- 另一方面，虽然国际上有Am-243裂变截面的实验测量数据，但各国测量数据存在一定分歧，特别在**1 MeV**和**10 MeV**附近分歧较大，而且对于U-235标准裂变截面的比截面数据不同测量呈现不同趋势；我国缺乏Am-243裂变截面实验数据，核数据评价受制于人。



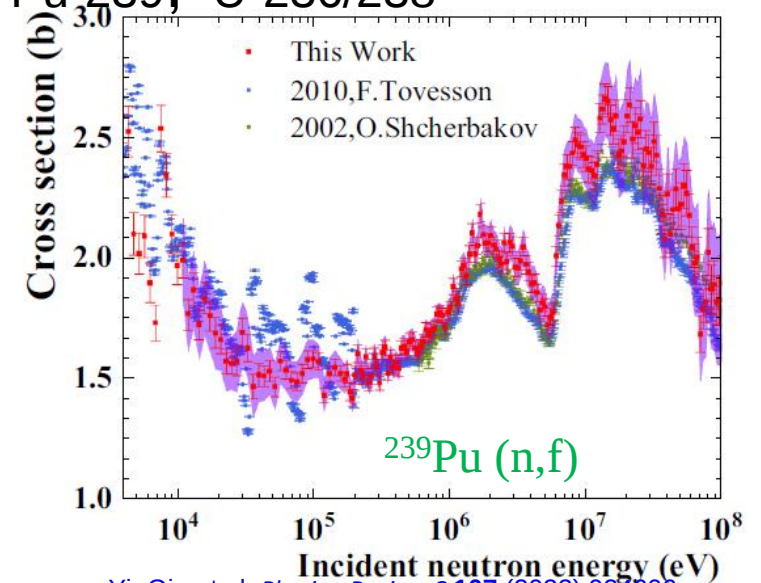
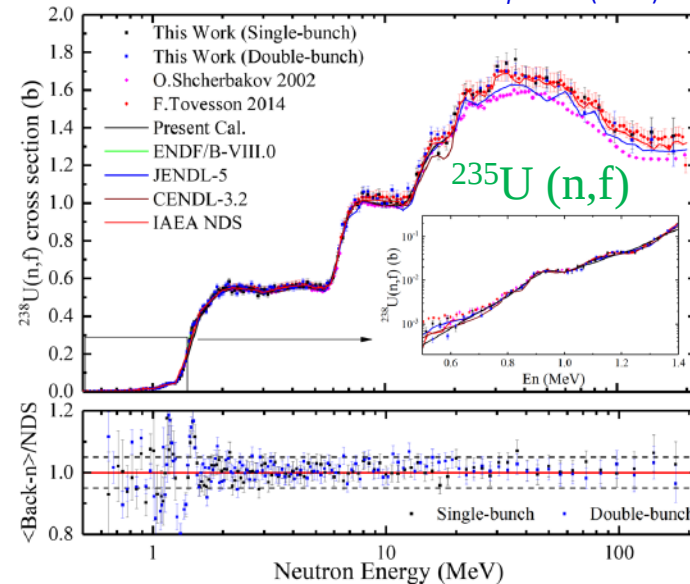
- ADS的快堆系统中，**Am-243**裂变截面从**500 keV**到**10 MeV**敏感性较大，应当特别针对这一能区和高能中子能区开展Am-243裂变截面测量工作。



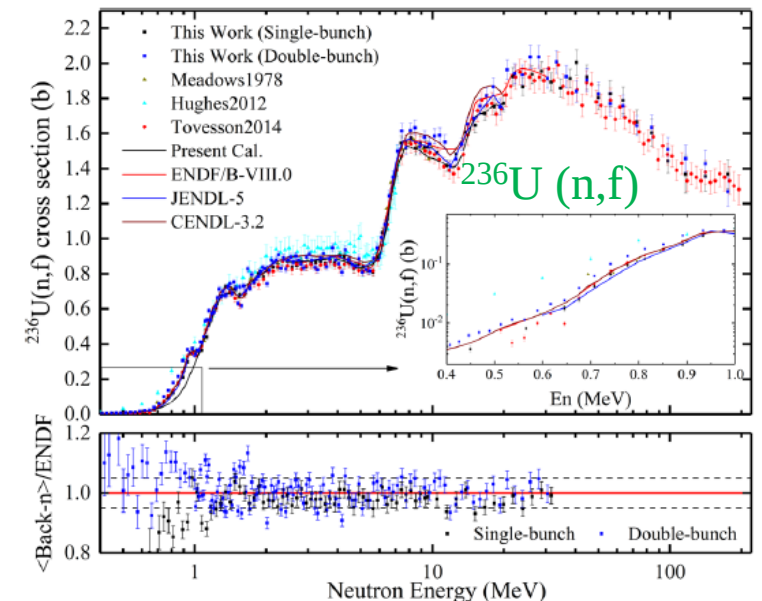
CSNS反角白光中子源上已经利用多层裂变室 (FIXM) 探测器开展了Th-232, Pu-239, U-236/238从快中子至300 MeV的裂变截面测量工作。



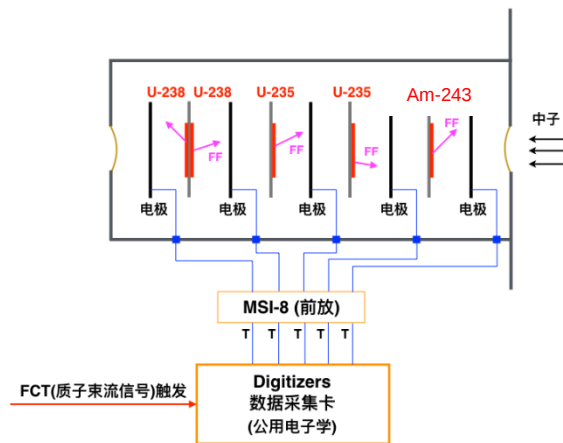
Y. Chen, Y. Yang, Z. Ren et al. *Physics Letters B* **839** (2023) 137832
Z.-Z. Ren et al. *Nuclear Science and Techniques* **34** (2023) 115



Yi. Qiu et al. *Physics Review C* **107** (2023) 024606



自研类似多层裂变电离室探测器开展实验



电沉积制靶U-235示意图

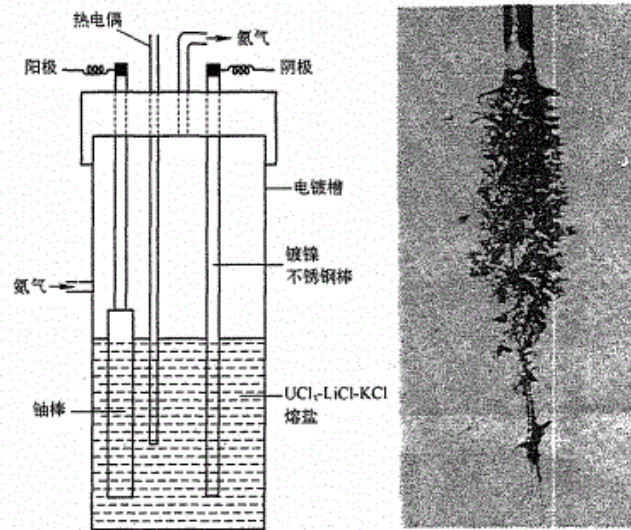
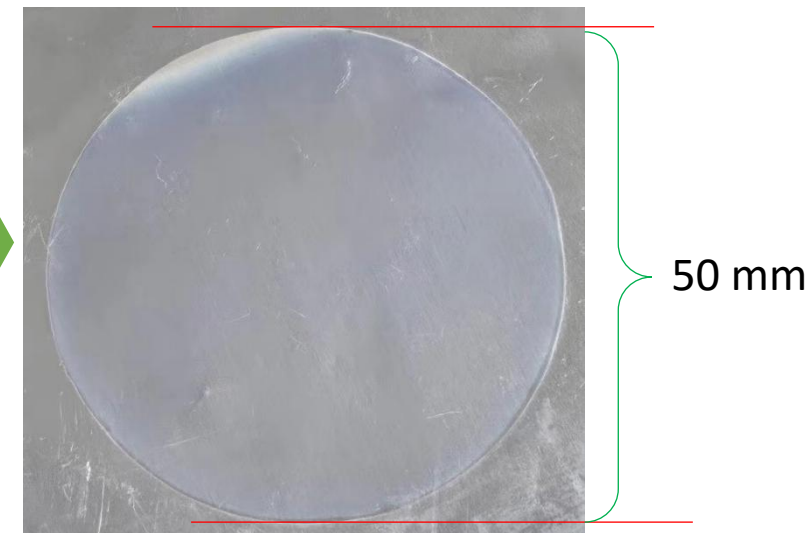


图2 从熔盐中电沉积铀的实验装置及阴极沉积的树枝状金属铀

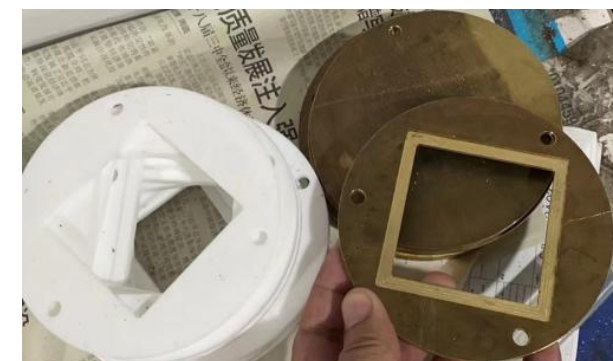
$^{243}\text{AmO}_2$ 靶



- 依托CSNS的反角白光中子源，利用FIXM开展Am-243的裂变截面测量。
- 根据Am-243含量（探测效率）和活度（ α 信号脉冲堆积率）权衡需要制备两块100 μg 左右的 $^{243}\text{AmO}_2$ 靶进行实验。
- 在近物所进行Am-243的电沉积制靶，制靶后进行 α 活度测量以确定实际靶核Am-243含量。

Am-243质量	活度(Bq)	ES#2大厅140 kW	
		裂变事件CPS	200小时总裂变计数
100 μg	7.38e5	~3.6	~1.3e6

FIXM电极已经完成加工



- ADS计算中当前评价库缺少大于20MeV的高能核数据，直接影响ADS装置的参数设计。
- ADS以MA为燃料，损耗中产生大量金属、镧系核素，对于这些核素的核数据（特别是俘获截面和衰变数据）精度有待提高。
- 不同评价核数据库计算ADS的 k_{eff} 差异较大，不满足ADS最基本设计需求。
- 通过核素替换法找出对计算 k_{eff} 影响较大的核数为： ^{56}Fe 、 ^{209}Bi 、 ^{15}N 、 $^{235/8}\text{U}$ 、 $^{241/3}\text{Am}$ 、 ^{244}Cm 等。
- 对 k_{eff} 计算的不确定度量化表明 ^{235}U 的nu、(n,f)、(n,g)， ^{238}U 的(n,g)、(n,inel)， ^{209}Bi 的(n,g)、(n,el)，和 ^{56}Fe 的(n,g)、(n,el)、(n,inel)， ^{15}N (n,el)， ^{237}Np 的(n,f)、(n,g)， ^{239}Pu (n,f)， ^{241}Am (n,g)， ^{243}Am (n,f)、(n,g)、(n,inel)， ^{244}Cm 的nu、(n,f)、(n,g)等反应道不确定较大。
- 不同评价库的 ^{56}Fe 和 ^{209}Bi 在ADS主要中子分布能区(10keV至1MeV)截面差异明显；
- ^{235}U (n,f)(n,g)、 ^{238}U (n,f)(n,g)、 ^{239}Pu (n,f)、 ^{241}Pu (n,f)、 ^{241}Am (n,f)、 ^{243}Am (n,f)、 ^{241}Am (n,g)、 ^{15}N (n, el)敏感性系数比较显著，应当优先进行高精度测量；
- 针对重要性较大的MA核数中的 ^{234}Am ，基于CSNS反角白光的 ^{234}Am 裂变截面测量的实验准备已经开展.....

谢谢关注