

原子力システム研究開発事業

基盤チーム型(一般)

革新型原子炉開発のための

核データ整備基盤の構築

代表機関研究代表者	京都大学	堀 順一
再委託先機関研究責任者	日本原子力研究開発機構	岩本 修
再委託先機関研究責任者	東京科学大学	片渕 竜也
再委託先機関研究責任者	近畿大学	佐野 忠史

令和7年3月3日

令和6年度原子力システム研究開発事業成果報告会

目次

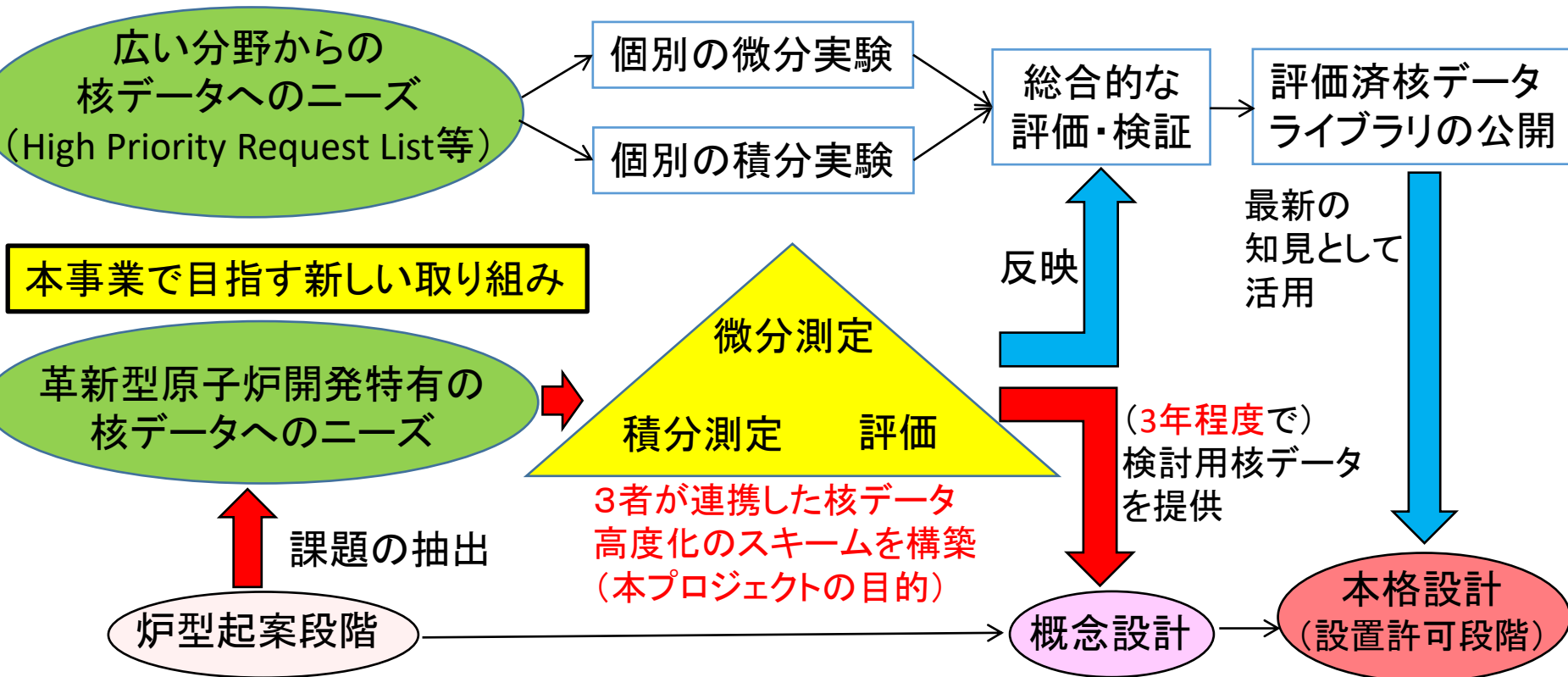
1. 研究の背景
2. 研究目的と全体計画
3. 研究成果
 - (1) 微分実験
 - ① 熱中性子領域の断面積測定
 - ② 構造材に対する高速中性子領域の断面積測定
 - (2) 積分実験
 - ① 熱中性子散乱則データ検証実験
 - ② 研究用原子炉を用いた試料反応度測定
 - (3) 核データ整備及び炉設計への影響評価
 - ① 評価済断面積データライブラリの整備
 - ② 新たな核データを用いた革新型原子炉の核特性計算
4. まとめ

1. 研究の背景

小型モジュール原子炉(SMR)のような革新型原子炉の研究開発を加速させるためには、炉の概念設計の進捗に合わせて、核データを迅速且つ柔軟に高度化していくスキームの構築が重要。

通常の核データ開発の流れ

ニーズの提案から核データに反映されるまでに10年程度かかることが多い。



2. 研究目的と全体計画

- 革新型原子炉開発において核データの高度化の必要性が想定される**代表的な材料、核種**を選定し、**基盤データ**を取得する。
 - 軽水、黒鉛、固体減速材等に対する**熱中性子散乱則データ**
 - 廃棄物管理上問題となる核種生成に寄与する構造材の**荷電粒子放出反応断面積**
- 微分実験、積分実験、評価の3項目を並行して実施**することにより、産業界からの要求に迅速且つ柔軟に対応し、必要な核データを高度化するスキームを構築する。

		令和3年度	令和4年度	令和5年度
(1)微分測定	①熱中性子領域の断面積測定 (JAEA)	昇温装置等の製作・評価 ← J-PARCでの測定・解析 →		
	②構造材に対する高速中性子領域の断面積測定 (東京科学大学)	検出器開発・試験 ← 断面積測定・解析 →		
(2)積分測定	①熱中性子散乱則データ検証実験 (京大)	手法検討・予備実験 ← 熱中性子散乱則検証実験 →		
	②研究用原子炉を用いた試料反応度測定 (近大)	事前解析・予備実験 ← 試料反応度測定 →		
(3)核データ整備及び炉設計への影響評価	①評価済断面積データライブラリの整備 (JAEA)	文献調査・手法検討 ← 核データ評価 →		
	②新たな核データを用いた革新型原子炉の核特性計算 (近大)	既存データによる核特性計算		新データによる核特性計算

3. 研究成果

(1) ① 熱中性子領域の断面積測定 (1/2)

熱中性子散乱則の精度向上のため、黒鉛及び固体減速材 (ZrH₂, YH₂及びZrH₂) について、J-PARC・MLF施設のビームラインNo.4(ANNRI)にて全断面積測定を、ビームラインNo.14(AMATERAS)にて散乱断面積の測定を複数の温度で実施し、全断面積及び散乱断面積を導出した。

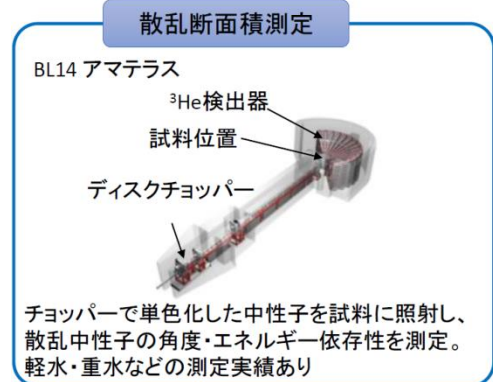
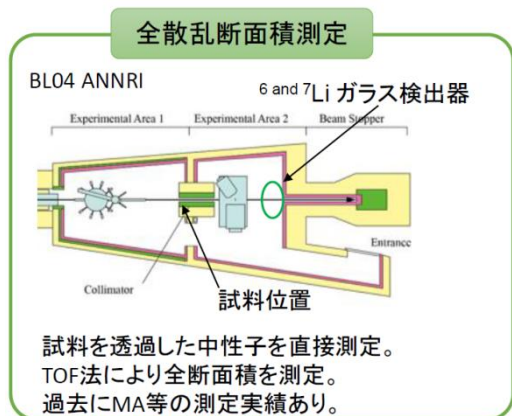
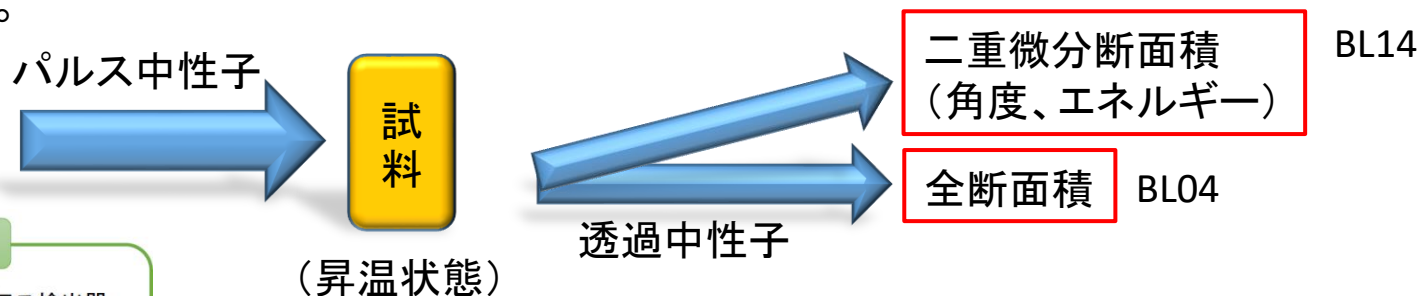


表 測定に用いた黒鉛試料の各諸元

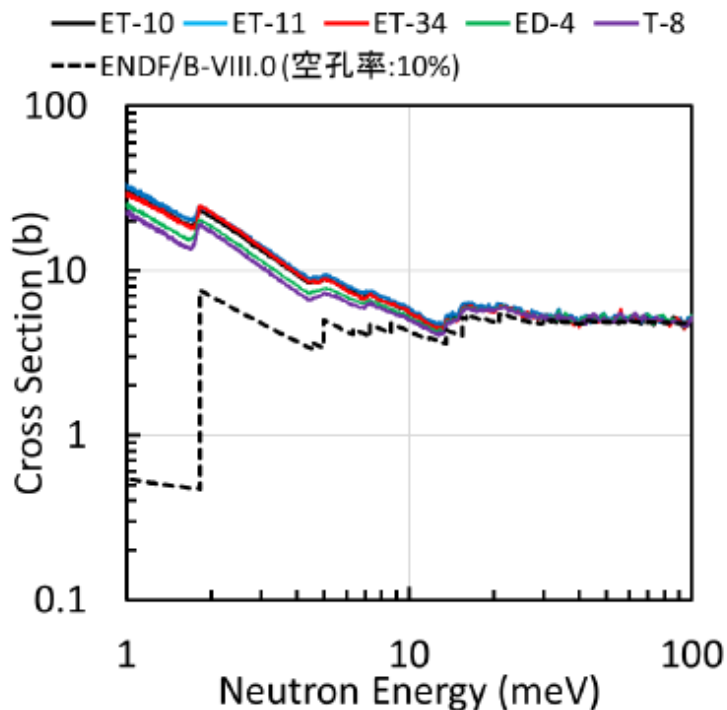
試料名	気孔率 (公称値 : %)	粒子径 (公称値 : μm)	重量 (実測値 : g)	密度 (実測値 g/cm ³)	用途
ET-10	15	15	1.376	1.75	エネルギー、工業炉材料 (大型加工可能)
ET-11	14	13	1.351	1.72	
ET-34	11	15	1.442	1.84	
ED-4	9	1	1.491	1.90	放電加工用電極材
T-8	9	5	1.499	1.90	半導体製造分野

粒子径や密度、用途の異なる5種類の等方性黒鉛を使用

3. 研究成果

(1) ① 熱中性子領域の断面積測定 (2/2) 代表的な結果: 黒鉛

全断面積



散乱断面積

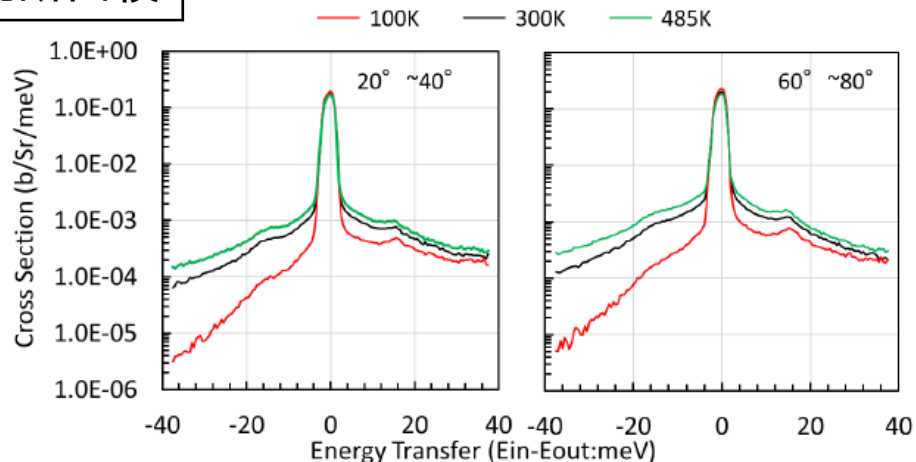


図 ET-34試料の二重微分散乱断面積の温度依存性 (Ein=41.98meV)

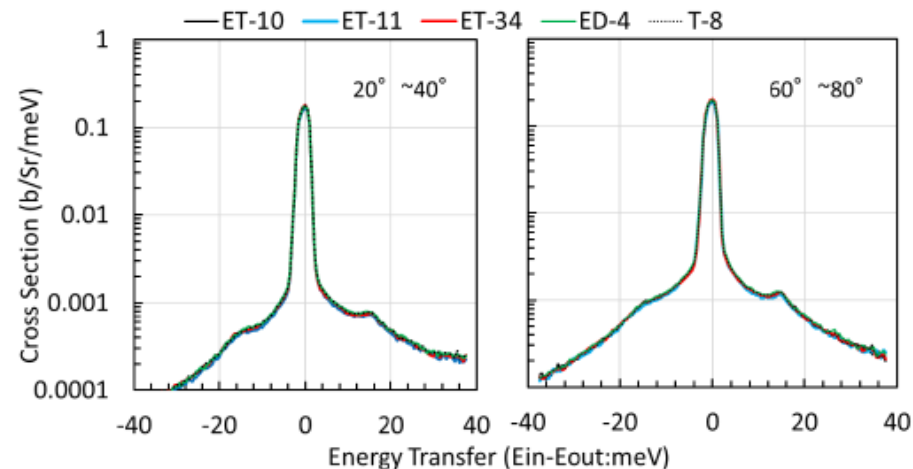


図 二重微分散乱断面積の試料依存性 (Ein=41.98meV)

全断面積

- ・20meV以上の領域では評価値と良く一致。
- ・20meV以下の領域での不一致は小角散乱の影響と考察。

散乱断面積

- ・温度上昇により断面積は上昇するが、その傾向はエネルギーを与える側(負側)で大きいことを確認。

・黒鉛については、従来の評価済核データライブラリでは空孔率に依存した断面積が与えられていたが、今回の実験結果では空孔率が異なる試料間で断面積に大きな差異は確認できず、黒鉛の断面積には空孔率による依存性はないとの結果が得られた。

3. 研究成果

(1) ② 構造材に対する高速中性子領域の断面積測定 (1/2)

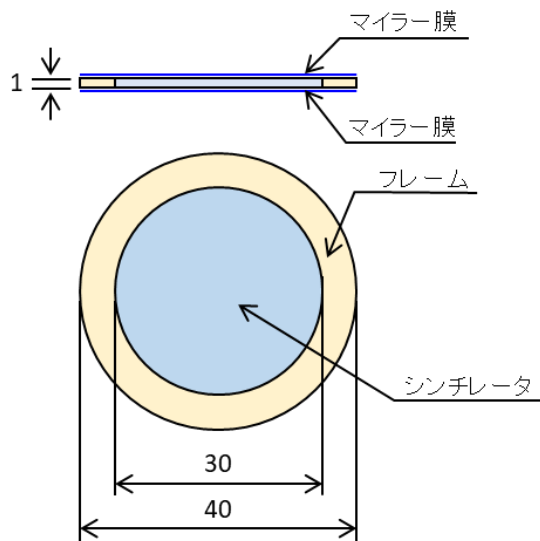
革新型原子炉材料で使われる構造材の荷電粒子発生断面積測定のための検出器を開発した。

測定対象としたのは、長寿命の核種が生成され廃棄物管理上問題となる以下の反応。 $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$ (半減期30万年), $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ (半減期100年)

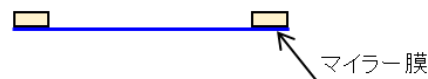
表 核データ測定現状

	(n,tot)	(n, γ)	(n,p)	(n, α)
K-39	3例	熱とkeV領域のみ	2.5 MeV以上のみ	2.5 MeV以上のみ
Cu-63	5例	熱とkeV領域のみ	MeV領域のみ	MeV領域のみ

採用したシンチレータの構造と作製法



1. マイラー膜とフレームの接着



2. 液状シンチレータ材料の充填



3. シンチレータの封入



4. 紫外線照射



3. 研究成果

(1) ② 構造材に対する高速中性子領域の断面積測定 (2/2)

粒子識別

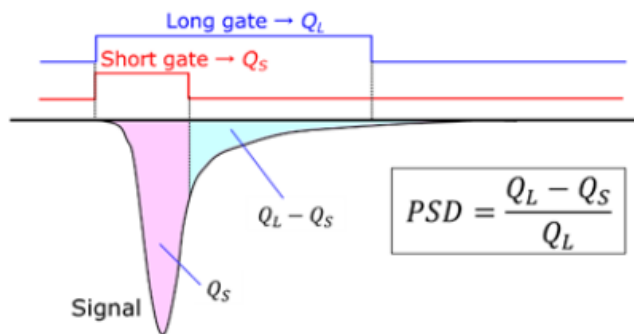


図 波高弁別のための電荷積分ゲートの設定

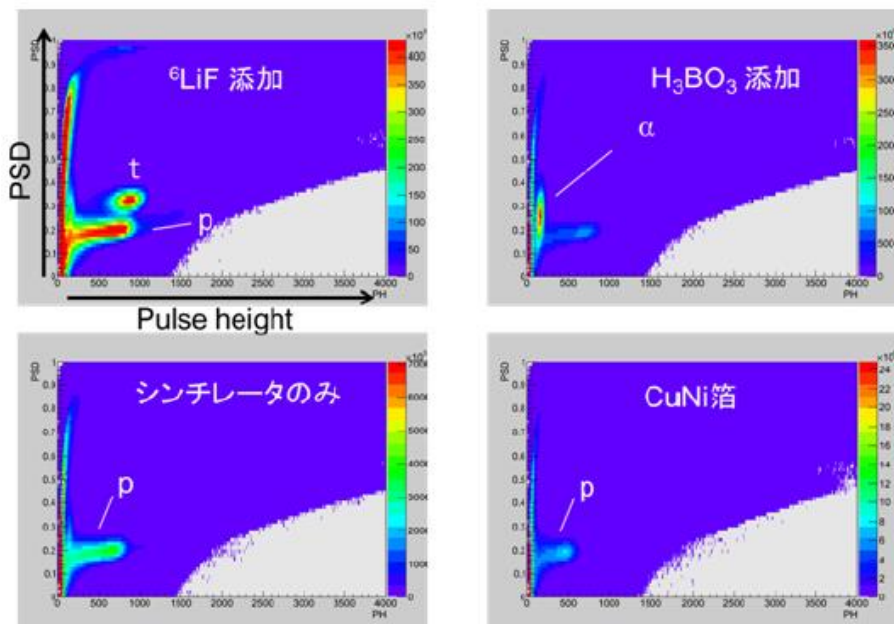


図 波高-波形弁別値 (PSD) の2次元プロット

J-PARC/MLF施設において測定を実施

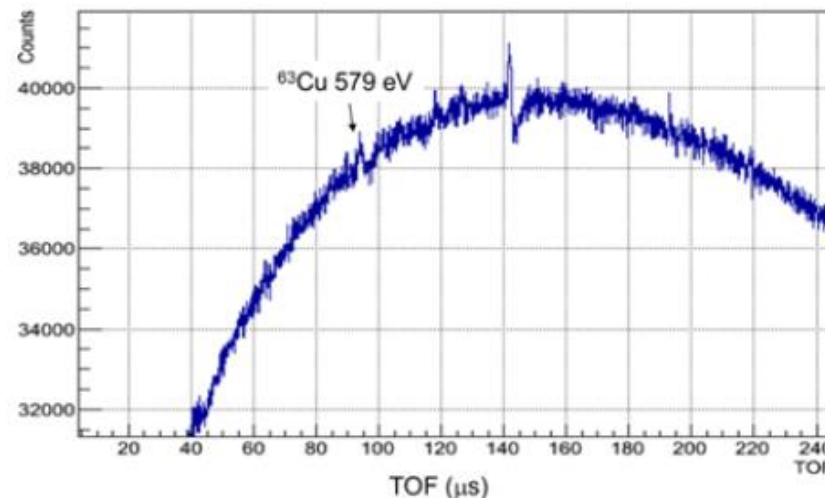


図 ${}^{63}\text{Cu}$ の陽子イベントの飛行時間スペクトル
観測された共鳴ピークの計数值から
第1共鳴ピーク面積の上限値を算出

核種	共鳴エネルギー (keV)	共鳴ピーク面積上限値 (barn·eV)
${}^{63}\text{Cu}$	0.579	0.53
${}^{39}\text{K}$	1.11	0.55
${}^{39}\text{K}$	9.37	0.53

↓
核データ評価に反映

3. 研究成果

(2) ① 熱中性子散乱則データ検証実験(1/2)

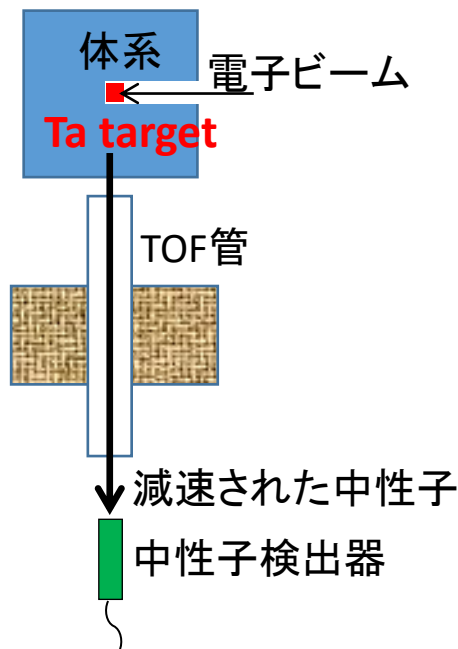
熱中性子散乱則データを検証するための積分測定を、京大複合研ライナック(KURNS-LINAC)を用いて行った。

測定対象: 軽水、固体減速材(ZrH_2 , CaH_2)、黒鉛、フッ化物、塩化物

実験方法: 体系からの中性子スペクトルをTOF法で測定し、 $S(\alpha, \beta)$ を考慮した計算結果と比較。

従来法

Pulsed Slowing-Down-Time(PSDT) experiment



新たな方法

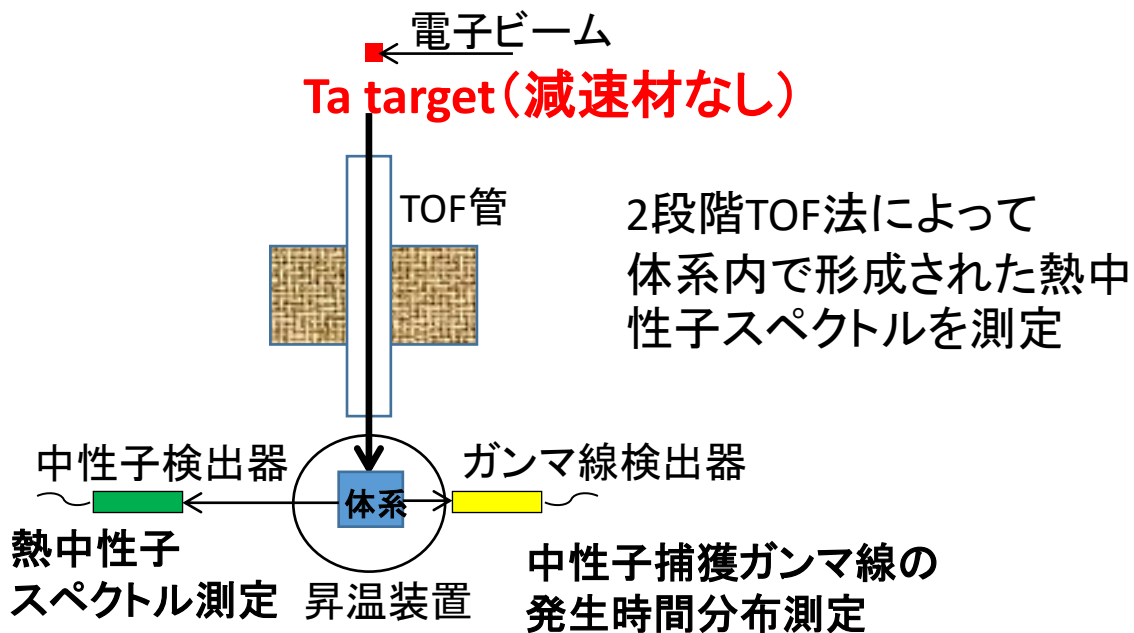


図 熱中性子散乱則データ検証のための測定法の概念図

3. 研究成果

(2) ① 熱中性子散乱則データ検証実験 (2/2)

ZrH₂

CaH₂

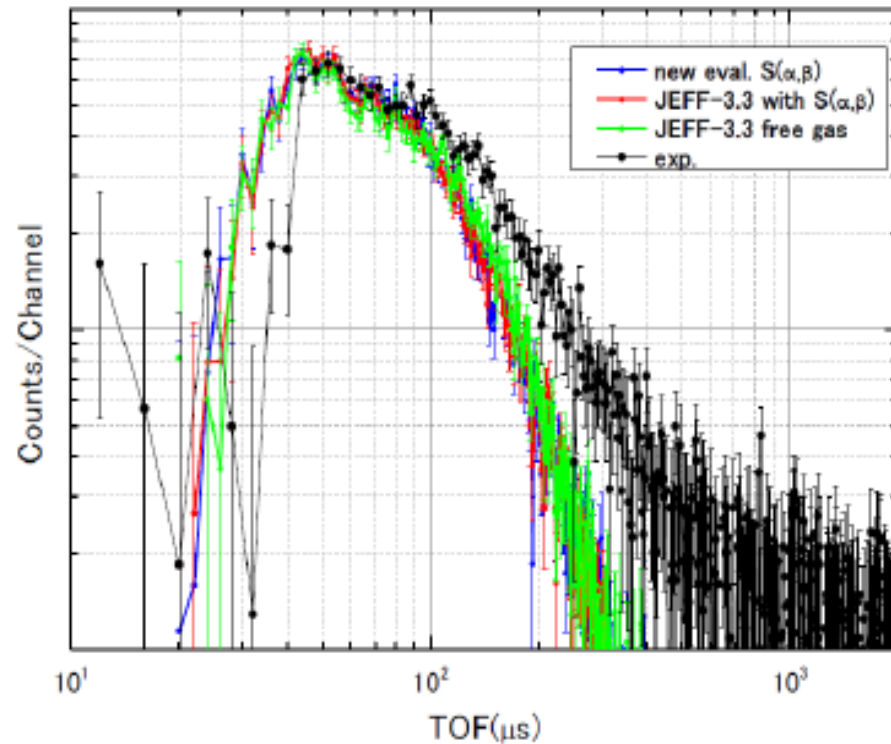
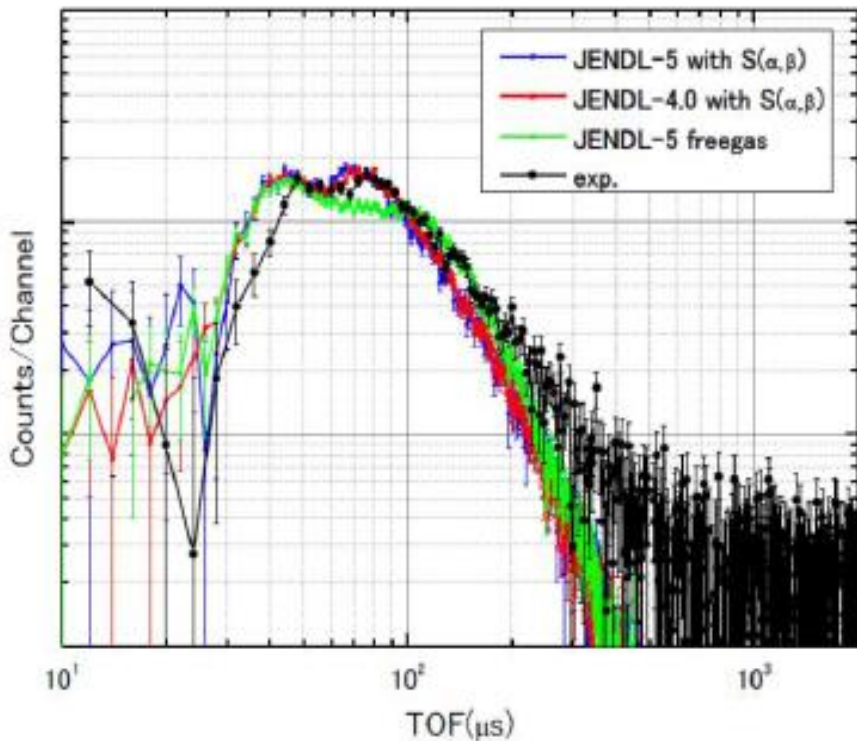


図 ZrH₂に対する正味の中性子TOFの実験値と計算値の比較

図 CaH₂に対する正味の中性子TOFの実験値と計算値の比較

評価値の $s(\alpha,\beta)$ を用いた計算で予測した熱平衡ピークの位置を実験で概ね再現できていることを確認できた。

3. 研究成果

(2) ② 研究用原子炉を用いた試料反応度測定 (1/2)

近畿大学原子炉(UTR-KINKI)を用いて試料反応度測定を実施した。

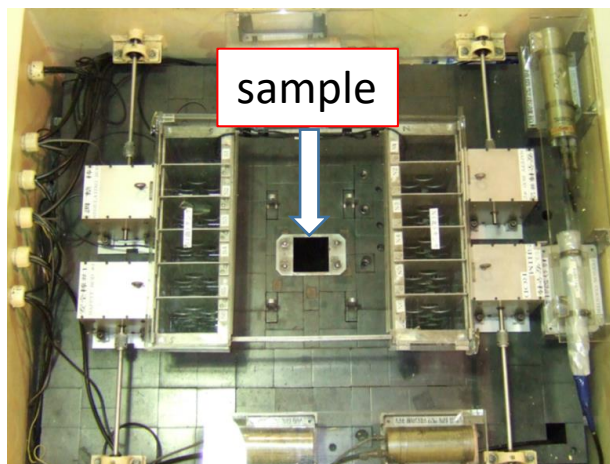


図 実験体系

✓ 測定対象は、 CaH_2 、 ZrH_2 、 H_2O 、 NaCl

✓ UTR-KINKIの中央ストリンガーにアルミ製容器に封入した試料を設置し余剰反応度を測定

✓ 試料が無いBlank容器との余剰反応度の差を試料反応度と定義

表 CaH_2 試料反応度測定結果

Sample ID	試料重量 (g)	試料反応度(%dk/k)
A	21.20	-0.0042 ± 0.0003
B	41.00	-0.0086 ± 0.0003
C	78.72	-0.0158 ± 0.0004
E	164.40	-0.0322 ± 0.0008

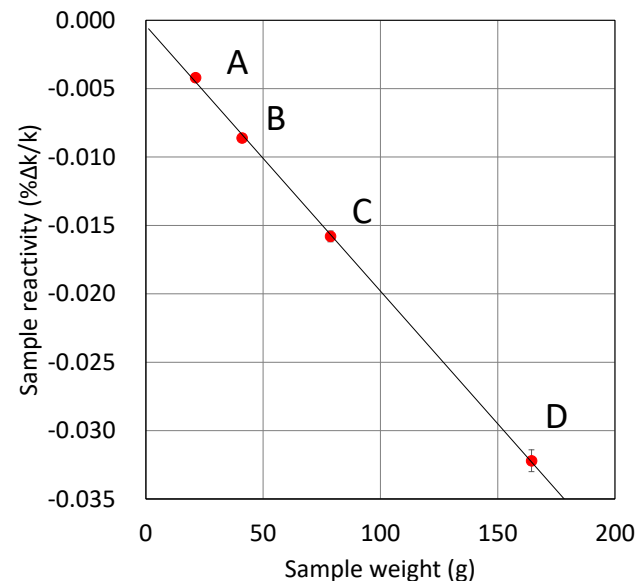


図 CaH_2 試料反応度と試料重量

3.研究成果

(2)②研究用原子炉を用いた試料反応度測定(2/2)

CaH₂の試料反応度について、本研究開発事業においてJAEAが作成した新断面積を用いて数値解析を実施

計算条件 MCNP6.3+JENDL-5(燃料、構造材)+**新断面積(CaH₂)**またはJEFF-3.1
CaH₂の不純物の考慮無し、数密度はCaH₂:95%*として作成 *ミルシートより

$$\text{Sample Reactivity} = \frac{1}{k_{eff,blank}} - \frac{1}{k_{eff,sample}}$$

表 計算結果

Sample ID	試料重量(g)	C/E (新断面積)	C/E (JEFF-3.3)
A	21.2	0.997 ± 0.590	1.108 ± 0.590
B	41.0	0.852 ± 0.332	0.831 ± 0.333
C	78.7	0.895 ± 0.146	0.882 ± 0.144
D	164.4	0.868 ± 0.110	0.888 ± 0.110

● サンプル反応度数値計算値は誤差範囲内で一致

➡ 新断面積を使用してもC/Eに大きな変化なし

計算結果の差について感度解析を用いて検討

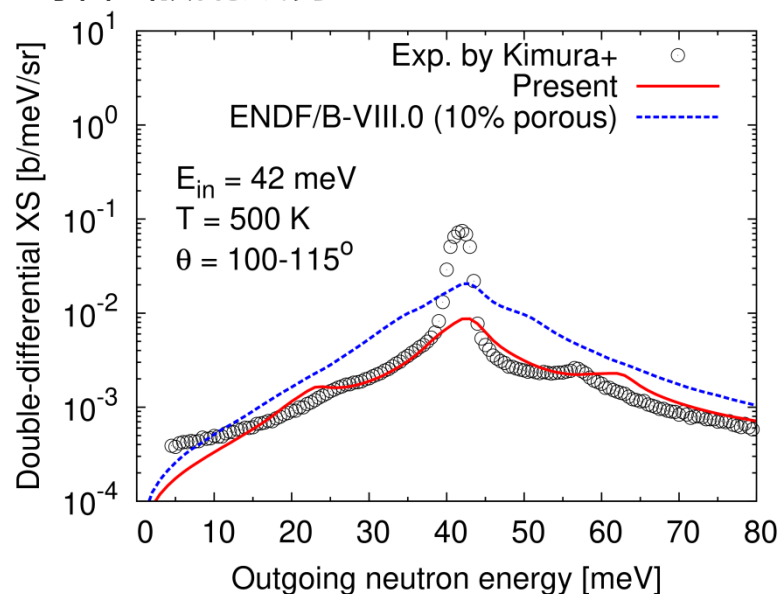
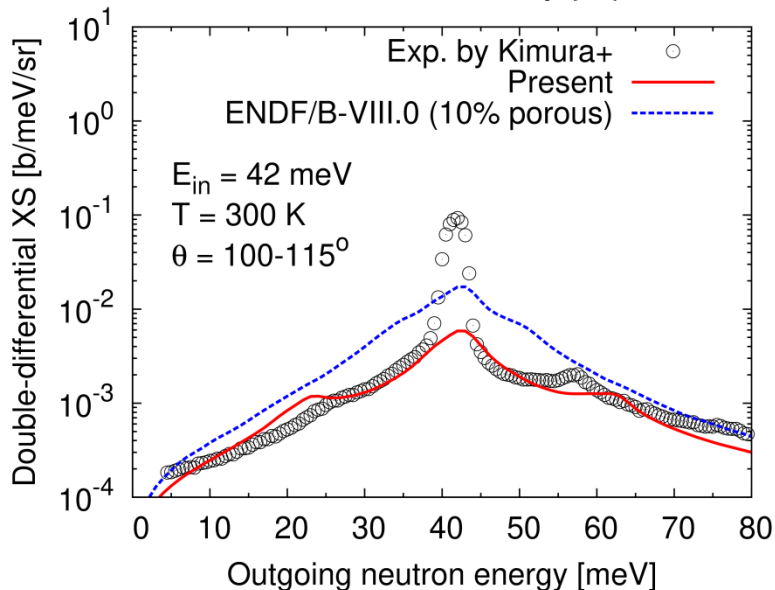
3. 研究成果

(3) ① 評価済断面積データライブラリの整備 (1/3)

- 革新型原子炉設計に重要な熱中性子散乱則と荷電粒子放出断面積について、評価手法の調査・検討を行い、第一原理によるフォノン状態密度計算に基づく評価システムを構築した。
- 熱中性子散乱則について黒鉛、 CaH_2 、 YH_2 、 NaCl の4物質、荷電粒子放出反応断面積についてはK-39、Cu-63の2核種に対して核データファイルを整備した。

黒鉛（空孔率11%）に対する二重微分断面積（左：300K, 右：500K）

※ 中央のピークは弾性散乱成分



- ENDF/B-VIII.0のデータよりも、(1) ①で取得された二重微分断面積の実験値を良く再現しており信頼性を向上させることができた。

3. 研究成果

(3) ① 評価済断面積データライブラリの整備 (2/3)

CaH₂の熱中性子散乱則データの評価

✓ 現状で存在するCaH₂のTSLはJEFF-3.3 (= -3.1) のみ

→ JEFF-3.3では、散乱中性子のエネルギースペクトルを測定し、そこから推定されたフォノンDOSを使用している^[1]

[1] O. Serot, Proceedings of ND2004.

→ **評価手法は大きく異なるが**、今回の結果とおおむね一致

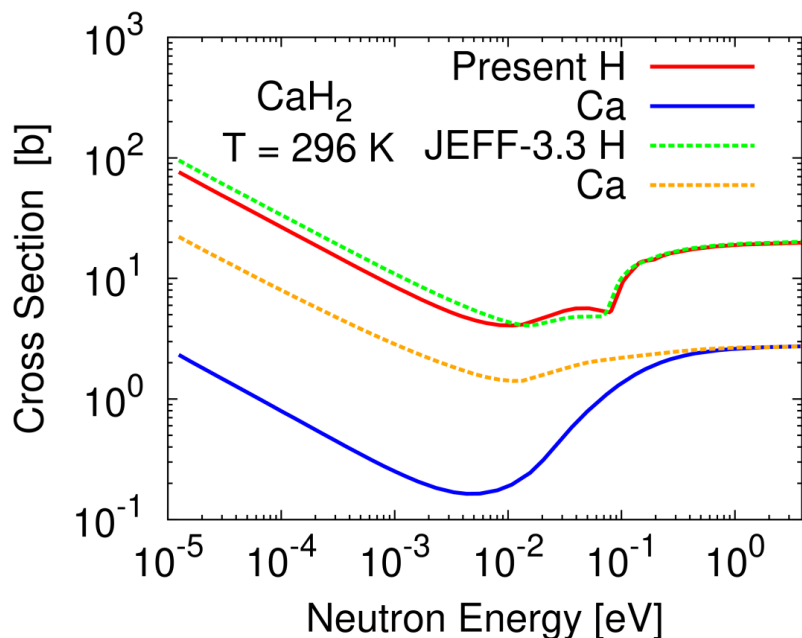


図 水素化カルシウムの非弾性散乱断面積

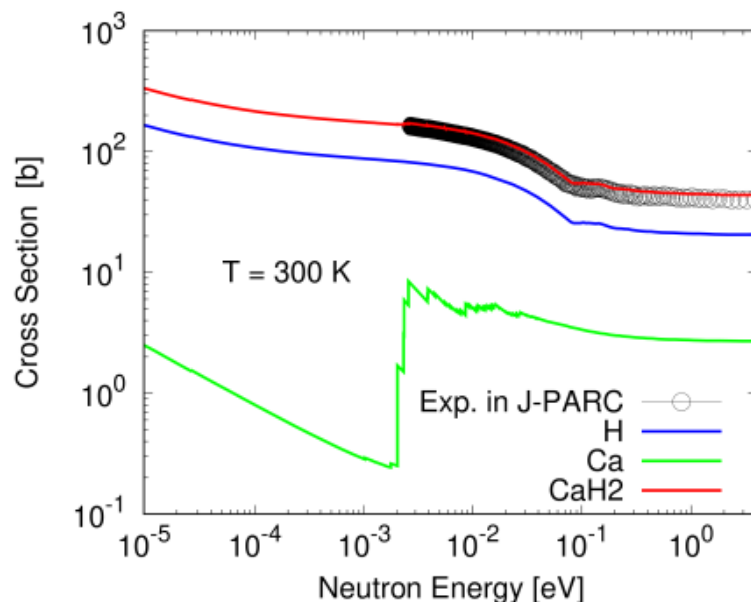


図 水素化カルシウムの全断面積

これまでは固体に対する熱中性子散乱則の評価技術がなかったが、本事業において評価手法を確立し、実験値と整合する信頼性の高い核データファイルを完成させた。

3. 研究成果

(3) ① 評価済断面積データライブラリの整備 (3/3)

荷電粒子放出反応断面積の評価

- 共鳴構造をもった断面積の評価を行い、(1)②で得られた共鳴面積の上限値と整合するかどうかにより評価の妥当性を判断した。
- 1MeV以上の領域はJENDL-5で既に実験値を再現する値が評価されており特に問題がないため、JENDL-5の値を採用した。

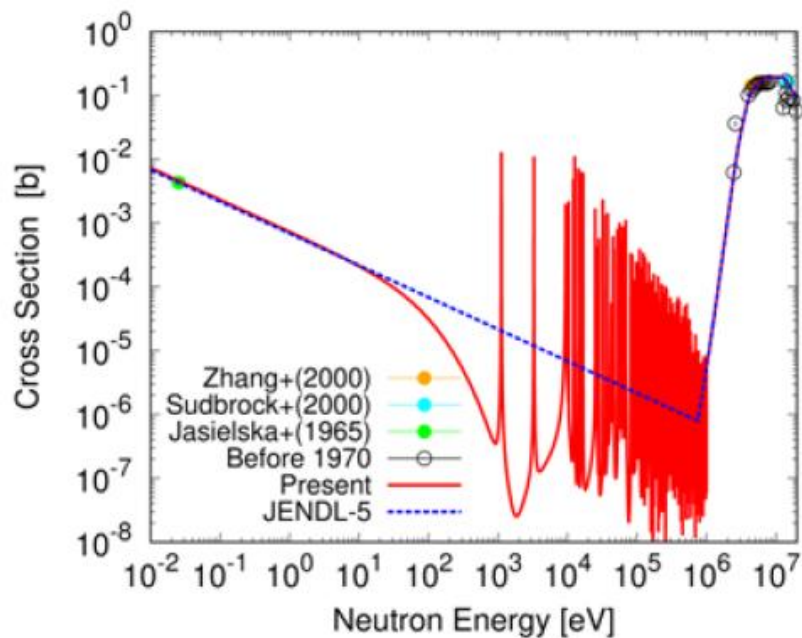


図 $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$ 反応断面積

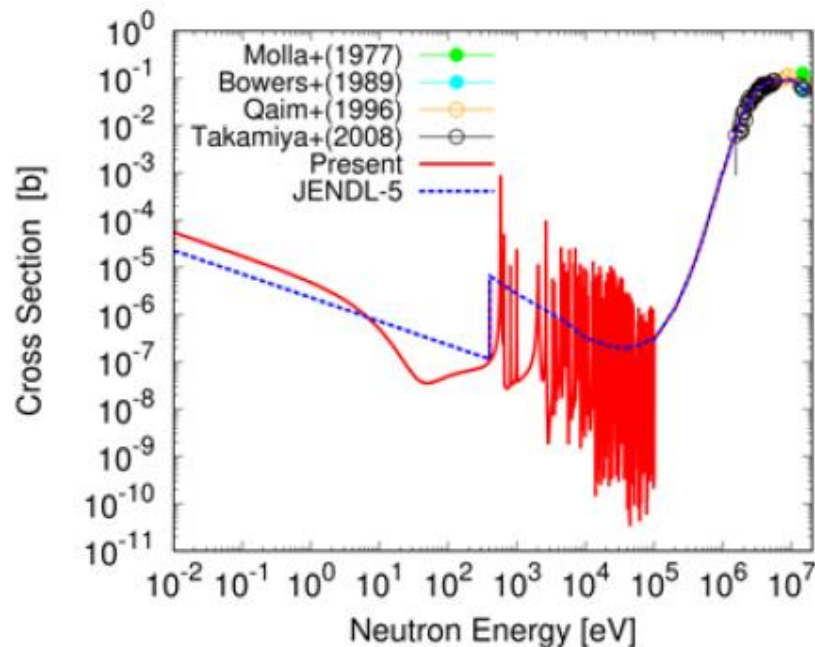


図 $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ 反応断面積

3. 研究成果

(3) ② 新たな核データを用いた革新型原子炉の核特性計算(1/2)

■ 対象炉心はCaH₂固体減速材を用いた小型モジュール炉[2]とした。

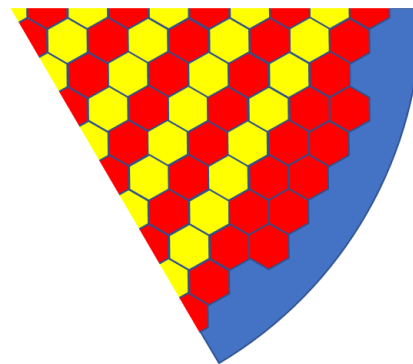
● 計算条件

MCNP6.3+JENDL-5(燃料、構造材)+新断面積(CaH₂)

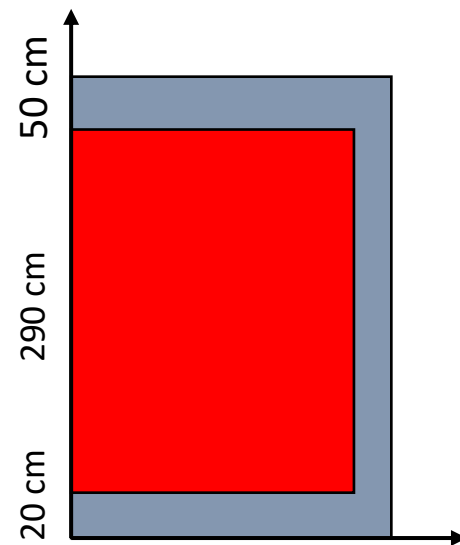
CaH₂の不純物の考慮無し、数密度はCaH₂:100%として作成

表 炉心条件[2]

パラメータ	諸元
燃料組成	U3Si2
濃縮度	4.8 wt%
被覆管肉厚(cm)	0.10
燃料ピッチ(cm)	10.0
燃料配列	Hex.
燃料温度(K)	300
減速材	CaH ₂



赤: 燃料領域、黄: CaH₂



R-Z断面

パラメータ	諸元
炉心直径(cm)	200
燃料長(cm)	220

図 計算体系図[2]

3.研究成果

(3)②新たな核データを用いた革新型原子炉の核特性計算(2/2)

計算結果

表 計算結果

CaH ₂ 断面積	keff
JEFF-3.1	1.15585 ± 0.00135
新断面積	1.15601 ± 0.00132

- 今回の計算では、JEFF-3.1と新断面積を用いたkeffの差は+65.8 pcmであり数値計算の統計誤差内であった。



CaH₂サンプル反応度実験の解析と整合



計算結果の差について感度解析を用いて検討

4. まとめ

- 測定、検証、評価を総合的に行い、短期間に信頼性の高い核データの提供を可能とするスキームを構築することができた。
- 熱中性子散乱則データ(TSL)については、黒鉛、水素化カルシウム、水素化イットリウム、塩化ナトリウムの4物質に対して、J-PARCで実施した全断面積測定、散乱断面積測定で得られた結果に基づき評価を行い、核データファイルを整備した。特に、水素化カルシウムは革新型原子炉で減速材候補となっているにもかかわらずJENDL-5では未収納であったが、本研究を通じて整備することができたのは特筆すべき点である。
- これまで未着手であった結晶性物質のTSL評価法を確立した。空孔黒鉛のTSLにおける空孔率の取り扱いについて新たな知見が得られた。
- 荷電粒子放出反応については、効率的に荷電粒子を検出するための検出器の作製法を確立し、廃棄物管理上問題となる荷電粒子放出反応である $^{63}\text{Cu}(n,p)^{63}\text{Ni}$ 及び $^{39}\text{K}(n,\alpha)^{36}\text{Cl}$ の共鳴断面積上限値を算出し、核データファイルを整備することができた。