

# 日本原子力研究開発機構における 核変換技術に関する研究開発の現状について — 共通基盤技術（核データ・炉物理） —

平成20年12月19日

日本原子力研究開発機構

# 共通基盤技術に関する平成12年のC&Rでの要求事項と対応状況

前回オメガ計画チェックアンドレビューでの記載	対応状況
<p>当面は、炉心設計やシステム制御方法の開発、ビーム窓の開発、構造・材料の設計、核データやモデルの整備・検証が重点課題である。(旧原研)</p> <p>マイナーアクチニド及び核分裂生成核種の核データ及び物性データの充実・精度向上、マイナーアクチニド燃料の照射挙動評価、マイナーアクチニド燃料製造施設による製造技術開発等が当面の課題である。(旧サイクル)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ JENDL核データファイルの整備や核データの積分テストを実施</li> <li>▶ MA及びLLFPの熱中性子捕獲断面積を系統的に測定するとともに、共鳴領域、高速中性子領域の核データ測定技術を開発</li> <li>▶ マイナーアクチニドサンプルの照射後試験解析による核データ検証やkgオーダーのNp装荷炉心解析などを実施</li> </ul>



核変換技術の研究開発では、核変換の対象となるMAやLLFPの核データ整備、核設計コードの整備及び炉物理実験による設計精度の向上を進める。(平成17年10月 JAEA中期計画)

## 核データの測定研究

### 実績・成果の概要

・ MA及びFPの熱中性子捕獲断面積について、放射化法により、 $^{237,238}\text{Np}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ , 等の測定を実施するとともに、即発ガンマ線法により  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  等のデータを整備した。世界初となるデータを多数取得するとともに精度向上に貢献した。

(平成17年原子力学会論文賞)

・ 共鳴エネルギー領域の中性子捕獲断面積を $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241,243}\text{Am}$ について低エネルギー領域の範囲で測定した。

### 測定例1: $\text{Np-237}$ の熱中性子捕獲断面積

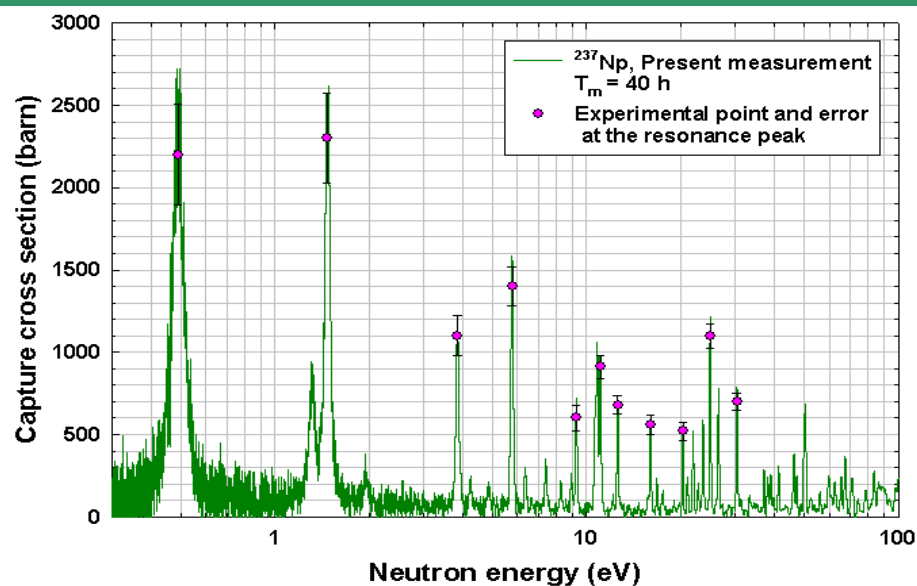
・測定値間及び評価値間に10%以上のバラツキが存在した。



・熱中性子捕獲断面積測定への第1共鳴の寄与を明確に分離するとともに、 $\gamma$ 線分光、 $\alpha$ 線分光法を組み合わせることで従来の測定値間の矛盾の主要因を解明

この結果、測定値の信頼性が約2倍向上

### 測定例2: 共鳴エネルギー領域の中性子捕獲断面積測定



## 核データの測定研究

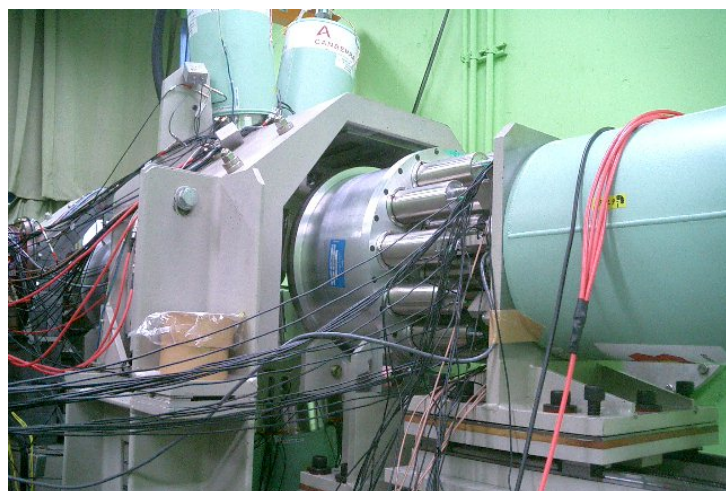
### C&R以降のMA及びLLFP核データ測定研究の成果一覧

核種	核データ	成果
$^{237}\text{Np}$	熱中性子捕獲断面積	従来の測定値間の差異の原因を明確にし精度を2倍向上
$^{237}\text{Np}$	共鳴積分値	薄い <b>Cd</b> 箔内での照射で第1共鳴の寄与を明確に分離
$^{237}\text{Np}$	エネルギー依存性	0.005eV～約1keVまでの測定データ取得
$^{238}\text{Np}$	実効熱中性子捕獲断面積	世界初のデータ取得、2重中性子捕獲反応適用
$^{241}\text{Am}$	熱中性子捕獲断面積	<b>Gd</b> 箔内での照射で第1共鳴の寄与を明確に分離
$^{241}\text{Am}$	共鳴積分値	従来の測定値間の差異の原因を明確化
$^{241}\text{Am}$	エネルギー依存性	約0.1eV～約100eVまでの測定データ取得
$^{243}\text{Am}$	実効熱中性子捕獲断面積	評価値より14%大きな値を提示
$^{243}\text{Am}$	エネルギー依存性	約0.01eV～約400eVまでの測定データ取得
$^{99}\text{Tc}$	熱中性子捕獲断面積	ガンマ線放出率の高精度測定により、精度向上
$^{107}\text{Pd}$	熱中性子捕獲断面積	即発 $\gamma$ 線法により世界初のデータ取得
$^{93}\text{Zr}$	熱中性子捕獲断面積	即発 $\gamma$ 線法により世界初のデータ取得
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	熱中性子捕獲断面積	世界初のデータ取得、2段階照射
$^{166\text{m}}\text{Ho}$	共鳴積分値	世界初のデータ取得
$^{137}\text{Cs}$	熱中性子捕獲断面積	アイソマー生成断面積について世界初のデータ取得
$^{90}\text{Sr}$	熱中性子捕獲断面積	測定精度を2倍向上
$^{90}\text{Sr}$	共鳴積分値	照射技術・化学処理の向上により世界初のデータ取得

## 核データ測定技術の開発

### 実績・成果

- ・放射化法による測定技術を高度化し、系統的に熱中性子捕獲断面積測定に適用
- ・高エネルギーガンマ線分光法の開発(平成12年原子力学会論文賞)
- ・多重ガンマ線検出法の開発(平成15年原子力学会技術賞、平成16年文部科学大臣賞)
- ・検出効率の高い即発ガンマ線実験装置をJRR-3のビームホールに整備
- ・飛行時間測定(TOF)法に適用する検出器及び測定技術を開発
- ・J-PARC MLFのビームラインにTOF実験用ビームラインを整備
- ・高速中性子領域の測定技術を開発



TOF法に適用する高分解能検出器を開発  
→ 共鳴領域の核データ @京大炉



J-PARC MLFのビームラインに  
TOF実験用ビームラインを整備

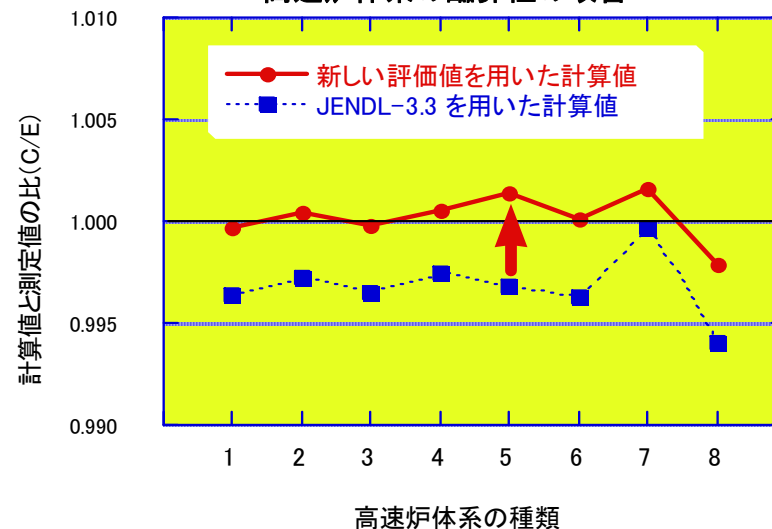
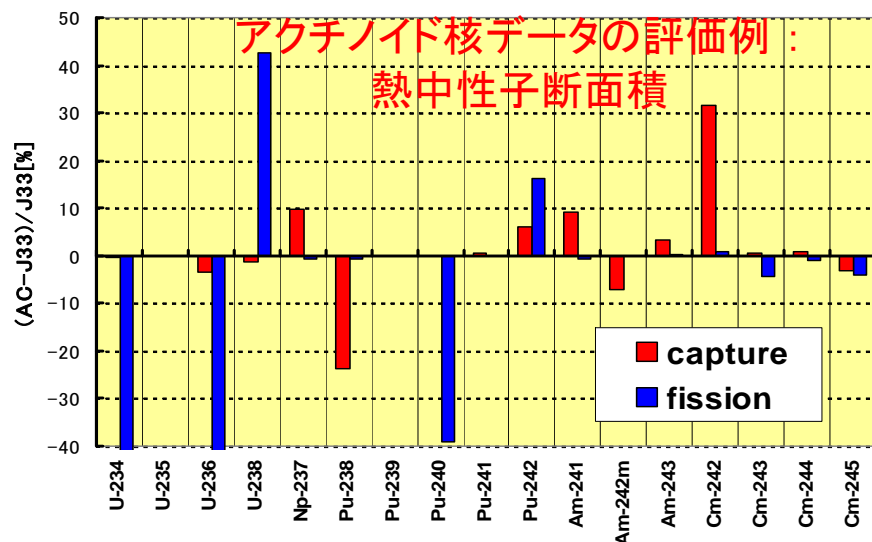
# 核データ評価研究

## 実績・成果

- ・ JENDL-3.3 (平成16年原子力学会論文賞)に、アクチノイド核種として $^{225}\text{Ac}$ から $^{255}\text{Fm}$ まで62核種の核データ整備
- ・ 79核種に対象を広げたJENDLアクチノイドファイル(JENDL/AC-2008)を整備
- ・ 最新の実験データを反映したJENDL-4を、整備中
- ・ 入射エネルギー3 GeVまでの、中性子及び陽子反応の核データを収納したJENDL高エネルギーファイルJENDL/HE-2007を整備
- ・ 計算コードCCONE (平成20年原子力学会特賞・技術賞), PODを開発

### JENDL-3.3 からJENDL Actinoid File (2008年3月公開)への変更

JENDL Actinoid Fileについては、ベンチマーク計算を実施し、高速炉体系での臨界性等の**予測性能の改善**が見られる事を確認した。高速炉体系の臨界性の改善



## (2) 核データ評価

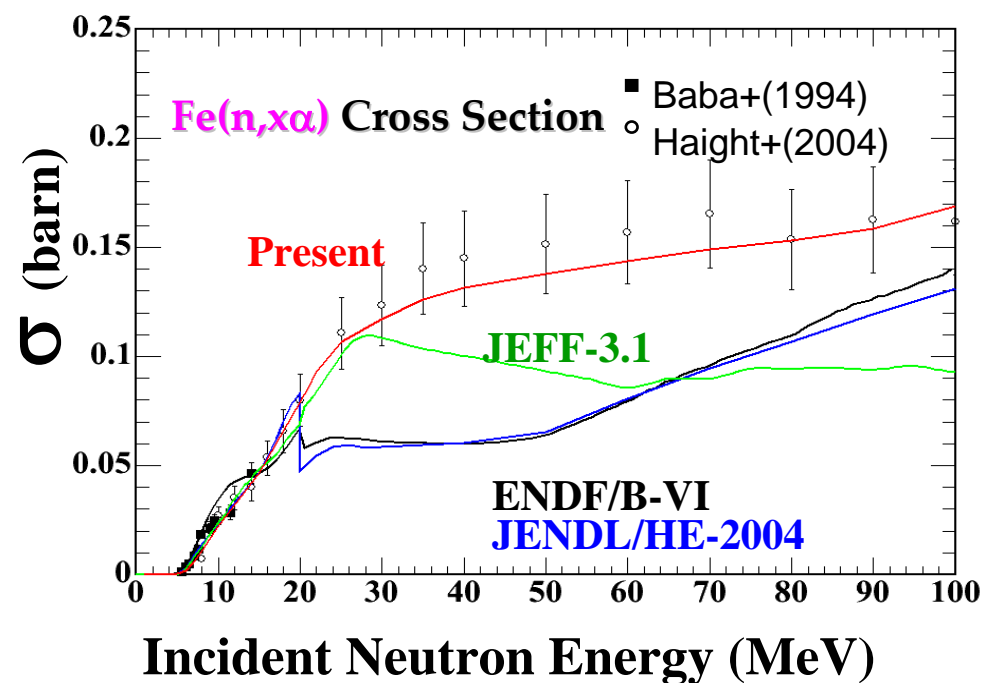
# 核データ評価研究

・ 入射エネルギー3 GeVまでの、中性子及び陽子反応の核データを収納したJENDL高エネルギーファイル JENDL/HE-2007を整備

JENDL 高エネルギーファイルの整備に、改良した計算モデルを適用

1st priority (39)	<sup>1</sup> H, <sup>12</sup> C, <sup>14</sup> N, <sup>16</sup> O, <sup>27</sup> Al, <sup>50,52,53,54</sup> Cr, <sup>54,56,57,58</sup> Fe, <sup>58,60,61,62,64</sup> Ni, <sup>63,65</sup> Cu, <sup>180,182,183,184,186</sup> W, <sup>196,198,199,200,201,202,204</sup> Hg, <sup>204,206,207,208</sup> Pb, <sup>209</sup> Bi, <sup>235,238</sup> U
2nd priority (43)	<sup>9</sup> Be, <sup>10,11</sup> B, <sup>24,25,26</sup> Mg, <sup>28,29,30</sup> Si, <sup>39,41</sup> K, <sup>40,42,43,44,46,48</sup> Ca, <sup>46,47,48,49,50</sup> Ti, <sup>51</sup> V, <sup>55</sup> Mn, <sup>59</sup> Co, <sup>90,91,92,94,96</sup> Zr, <sup>93</sup> Nb, <sup>92,94,95,96,97,98,100</sup> Mo, <sup>238,239,240,241,242</sup> Pu
3rd priority (40)	<sup>2</sup> H, <sup>6,7</sup> Li, <sup>13</sup> C, <sup>19</sup> F, <sup>23</sup> Na, <sup>35,37</sup> Cl, <sup>35,38,40</sup> Ar, <sup>64,66,67,68,70</sup> Zn, <sup>69,71</sup> Ga, <sup>70,72,73,74,76</sup> Ge, <sup>75</sup> As, <sup>89</sup> Y, <sup>181</sup> Ta, <sup>197</sup> Au, <sup>232</sup> Th, <sup>233,234,236</sup> U, <sup>237</sup> Np, <sup>241,242,242m,243</sup> Am, <sup>243,244,245,246</sup> Cm
4th priority (10)	<sup>15</sup> N, <sup>18</sup> O, <sup>74,76,77,78,80,82</sup> Se, <sup>113,115</sup> In

Red: Released in 2004    Blue: Released in 2007    Black: To be released



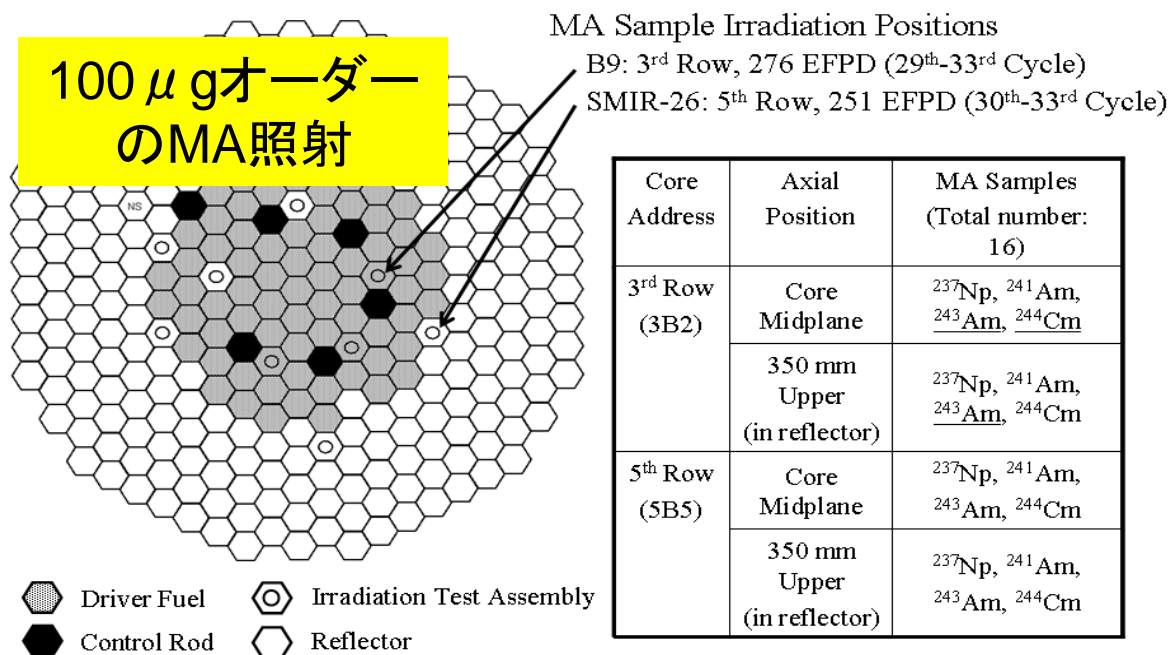
積分実験解析の精度は不十分  
未整備核種の評価が必要

## MA照射試験解析

### 実績・成果

・高速実験炉「常陽」及び英国の高速増殖原型炉PFRを用いて実施されたMAサンプル照射試験の解析・評価を実施

- ➡  $^{241}\text{Am}$ の捕獲反応の分岐比 $^{242\text{m}}\text{Am}/^{242}\text{Am}$ について、従来値の約0.80より、約0.85の方が確かなことを確認した
- ➡ 本実験解析のC/E値を用いて炉定数調整を行えば、MA核種の照射後原子数比( $^{245}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}$  $^{243}\text{Am}/^{242\text{m}}\text{Am}$ )などの予測精度が向上する可能性があることを見出した



### $^{242\text{m}}\text{Am} / ^{241}\text{Am}$ 照射後残存比のC/E 値

Isotopic Abundance Ratio	MA Sample	$^{241}\text{Am}$ Isomeric Ratio (g/(g+m)) IR	C/E Value			Experimental Error (1σ)	
			JENDL-3.2	JENDL-3.3	ENDF/B JEF-2.2		
$^{243}\text{Am} / ^{241}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$ (3 <sup>rd</sup> Row, 350mm Upper)	0.85	1.28	1.30	1.19	1.32	2%
	$^{243}\text{Am}$ (3 <sup>rd</sup> Row, Core Midplane)	0.80	1.67				
$^{242\text{m}}\text{Am} / ^{241}\text{Am}$	$^{243}\text{Am}$ (3 <sup>rd</sup> Row, 350mm Upper)	0.88	0.81				
	$^{243}\text{Am}$ (3 <sup>rd</sup> Row, Core Midplane)	0.85	0.99	1.07	0.94	1.15	<1%
		0.80	1.30				

高速実験炉「常陽」Mk-II炉心の第33サイクル構成とMAサンプル照射位置

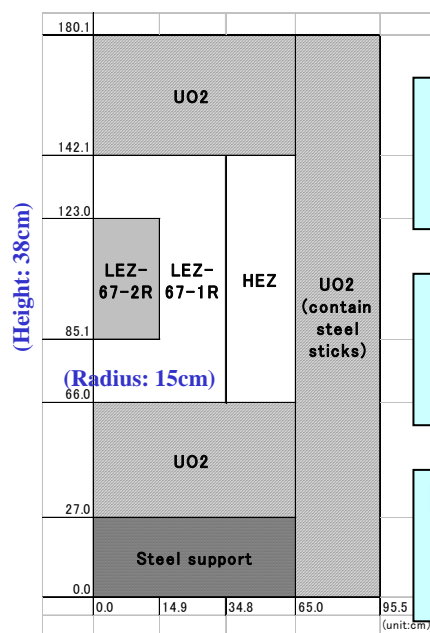
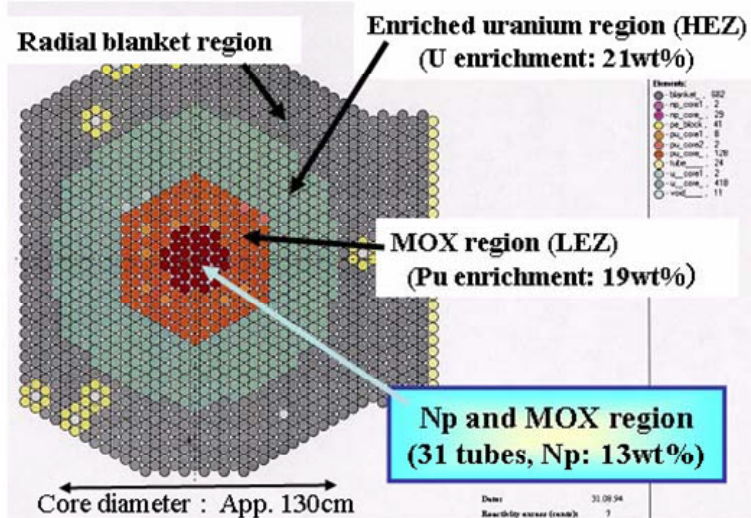


# MAを装荷した臨界実験解析

## 実績・成果

- 我が国には大量のMA核種を装荷した炉心臨界実験が存在しなかったため、ロシアIPPE研究所から、 $^{237}\text{NpO}_2$ を約10kg装荷した臨界実験データを入手し、世界の最新核データライブラリ3種と、我が国の詳細解析手法の組み合わせで解析を行った
  - $^{237}\text{Np}$ の存在により中性子束スペクトルが硬くなり、Naボイド反応度や制御棒価値が変動することが、実験及び解析の両面で確認できた
  - 使用した我が国の汎用ライブラリJENDL-3.3、米国のENDF/VII.0、欧州のJEFF-3.1とも、 $^{237}\text{Np}$ の存在により解析精度が悪化する傾向はとくに見られなかった

大量の $^{237}\text{Np}$ を装荷した高速炉心の臨界実験



## 解析結果例: Naボイド反応度

JENDL-3.2(Np-237はJENDL-3.3)による解析  
C/E値: 1.049  
核データ起因誤差: 5.9%

既存積分データによる断面積調整の結果  
C/E値: 1.052  
核データ起因誤差: 2.3%

Np装荷臨界実験を加えた断面積調整の結果  
C/E値: 1.031  
核データ起因誤差: 1.9%

## 核設計精度の目標設定と現状認識

フランスCEAのM. Salvatores博士による、核設計精度の目標と現状：  
「第10回OECD/NEA分離変換に関する情報交換会議」(2008年10月、水戸)発表資料より抜粋  
TRU燃焼高速炉： 金属燃料、Na冷却、U:Pu:MA = 39:50:11  
MA燃焼ADS： 窒化物燃料、Pb-Bi冷却、U:Pu:MA = 0:32:68

核特性	目標精度	現状精度の評価		影響の大きい核種
		TRU燃焼高速炉	MA燃焼ADS	
実効増倍係数	0.3%	1.82%	2.94%	Pu-241, Am-241, Am-242m, Am-243, Cm-244, Cm-245
出力ピーキング	2%	0.4%	21.4%	Pu-241, Am-241, Cm-244, Cm-245
冷却材ボイド係数	7%	17.1%	15.5%	Pu-241, Am-241, Am-242m, Cm-244
燃焼反応度	300pcm	272pcm	1044pcm	(記載なし)

(1pcm = 0.001% $\Delta k/kk'$ )

- ◆ 核変換システムの設計のためには、共分散データと積分実験の拡張を組み合わせることによる核データの精度向上が不可欠
- ◆ OECD/NEAのNSC(原子力科学委員会)では、
  - WPFC(燃料サイクルの科学的課題に関する作業部会)、
  - WPEC(国際核データ評価協力に関する作業部会)
  - WPRS(原子炉システムの科学的課題に関する作業部会)
の共通課題として、核変換に関わる核データの共分散評価と積分実験に関する今後の国際的な取り組みについて検討中。

日本原子力学会では、「アクチノイドマネジメントに関する炉物理実験施設」研究専門委員会(主査：東北大 岩崎智彦 准教授)を設置して、将来の炉物理実験施設の在り方について検討中。

## 核変換に関する核データ・炉物理の今後の方向性

- 核変換システムの実現のためには、更なる核データの精度向上と炉物理実験による検証が不可欠

### 核データ測定

- ・共鳴領域、高速中性子領域の核データの充実・精度向上  
(J-PARCの核データ測定用ビームラインを始めとする革新的測定装置・測定技術を適用)
- ・測定データの信頼性確認
- ・主要MA核種の全断面積測定(gオーダーのMAが必要)

### 核データ評価

- ・理論計算に用いるパラメータの任意性や信頼性等向上  
(今後、質の高い測定データの取得が期待され、それに伴い、評価データの信頼性向上が期待)
- ・評価データの誤差(共分散)データの信頼性確認
- ・核変換システムに必要な核データライブラリの高精度化

### 炉物理実験

- ・照射後試験解析データの拡充
- ・臨界実験データ拡充と必要な施設整備  
(現状の核データの妥当性検証に資する)

### 炉物理解析システム

- ・次世代炉物理解析システムの完成  
(実機照射後試験解析、実機炉心設計ツールの拡張・整備)

これらの活動を密に連携しながら核設計精度の向上を図る

## 謝辞

---

本報告書は、旧電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、東京工業大学が実施した平成14, 15, 16, 17, 及び18年度「高度放射線技術による革新炉用原子核データに関する研究開発」の成果を含みます。

本報告書は、旧電源開発促進対策特別会計法及び特別会計に関する法律(エネルギー対策特別会計)に基づく文部科学省からの受託事業として、北海道大学が実施した平成17, 18, 19, 及び20年度「高強度パルス中性子源を用いた革新的原子炉用核データの研究開発」の成果を含みます。