



# 加速器駆動システムによる核変換処理の 実現に向けた要素技術の基盤構築

卡 哲浩

京都大学原子炉実験所

静岡県防災・原子力学会 2015年3月25日(水)

京大炉・卡 哲浩 1



## 発表内容



- 背景と目的
- 加速器駆動システム (ADS: **A**ccelerator-**D**riven **S**ystem) の核変換技術への応用
  - 核変換およびADSの原理の紹介
  - ADS研究の国内および世界の動向
- 京大炉におけるADS実験設備
  - **K**yoto **U**niversity **C**ritical **A**ssembly (KUCA) および **F**ixed-**F**ield **A**lternating **G**radient (FFAG) 加速器
  - $^{235}\text{U}$  装荷ADS実験および  $^{232}\text{Th}$  装荷ADS実験: IAEA ADS実験ベンチマーク
- ADS基礎研究の概要、現状および今後の計画
- まとめ



## 背景と目的



### 背景

- ADS(核破砕中性子)の核変換技術への応用(MAおよびLLFPの消滅処理)
- 京大炉では、ADS実験研究(14 MeV中性子)を2003年から開始
- 2008年のFFAG加速器導入以降、 $^{235}\text{U}$ 装荷および $^{232}\text{Th}$ 装荷ADS実験を継続して行っている。(KUCAの特徴を生かし、以下に着目)
- 炉心スペクトル: 燃料 -> 高濃縮ウラン (HEU)、トリウム (Th)、天然ウラン (NU)  
減速材・反射材 -> ポリエチレン、C、Be、Al、F、Pb、Pb-Bi等
- 外部中性子源: 14 MeV中性子  
核破砕中性子(100 MeV陽子+重金属)

### 目的

- 本公募研究では、KUCAでのADS基礎実験を通して、
- ADSの要素技術(加速器、炉物理・核データ、放射線計測)の基礎基盤の構築
- TEF(JAEA)およびMYRRHA(ベルギー)での工学的課題解決に向けての準備



## 燃料サイクルにおける核変換技術



### ➤ 核変換技術

放射性廃棄物に含まれるいくつかの核種を分離した後、長寿命半減期の核種を短寿命または非放射性の核種に変換する技術

### ➤ 方法(日本の旧「OMEGA計画」)

- 軽水炉での使用済み燃料を再処理して得られるPuを含んだMOX燃料
- 高速炉(「もんじゅ」)において燃料としてPuおよびMA(少量)を使用する。
- 加速器を使って発生する核破砕中性子を用いて、マイナーアクチナイド(MA:  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ...)を核(種)変換する。

### ➤ 目標

- 長期貯蔵リスクの低減: 使用済み燃料の放射性毒性の低減
- 処分場の貯蔵容量の拡充: 発熱物質の低減



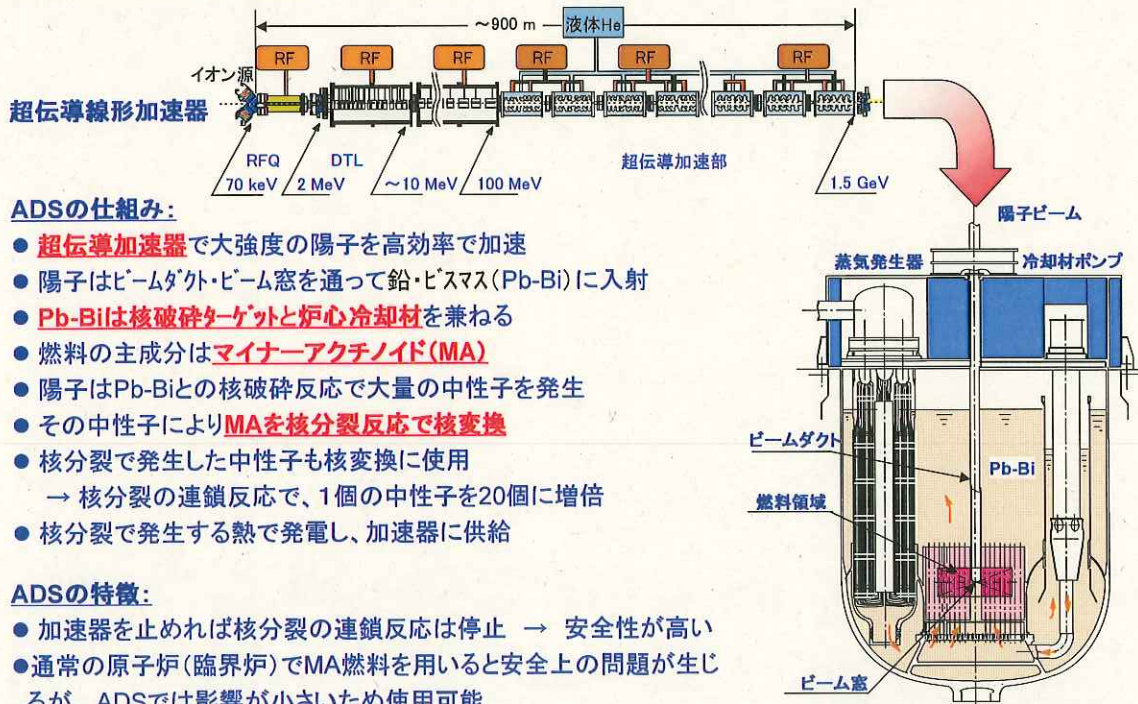
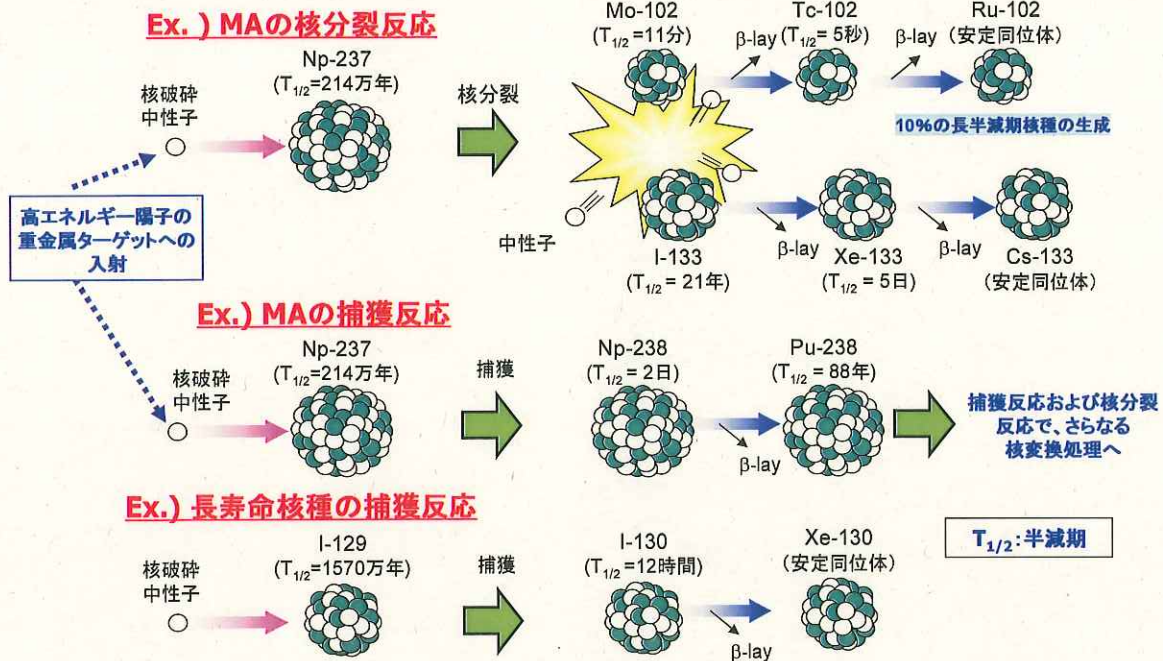


図 タンク型ADS概念図



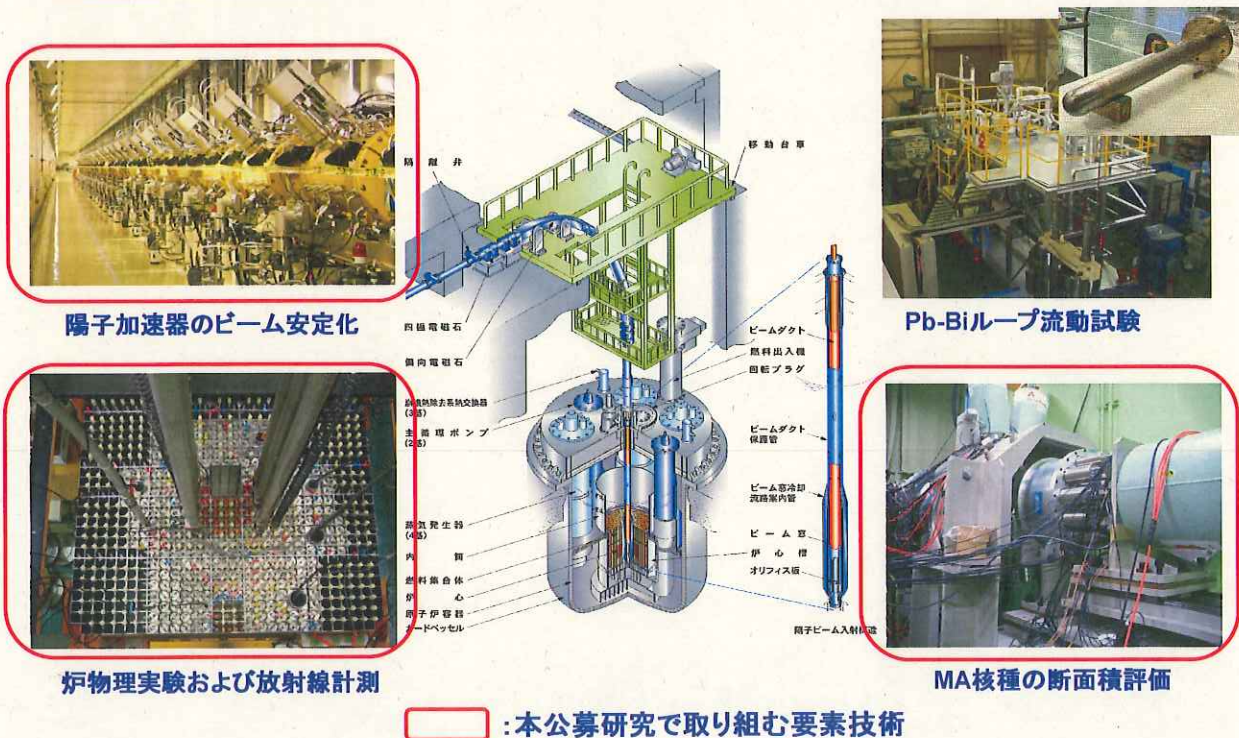
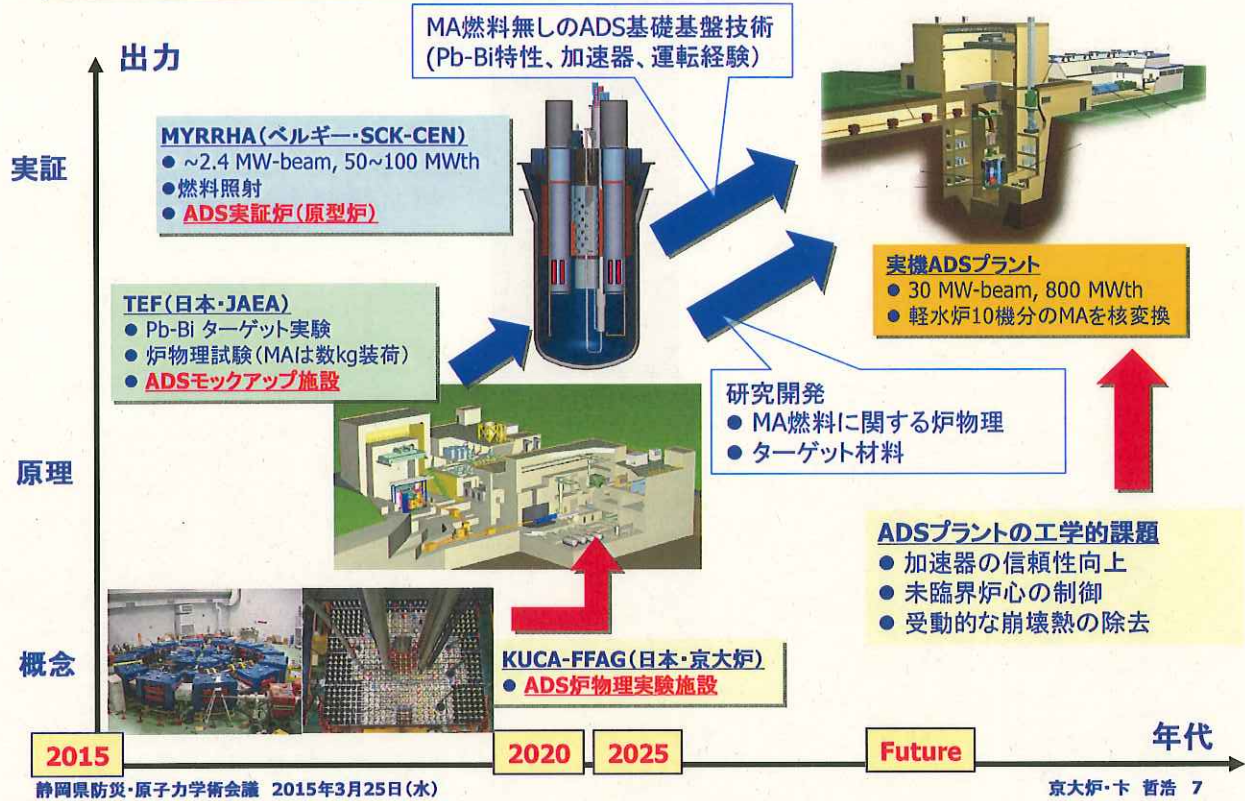
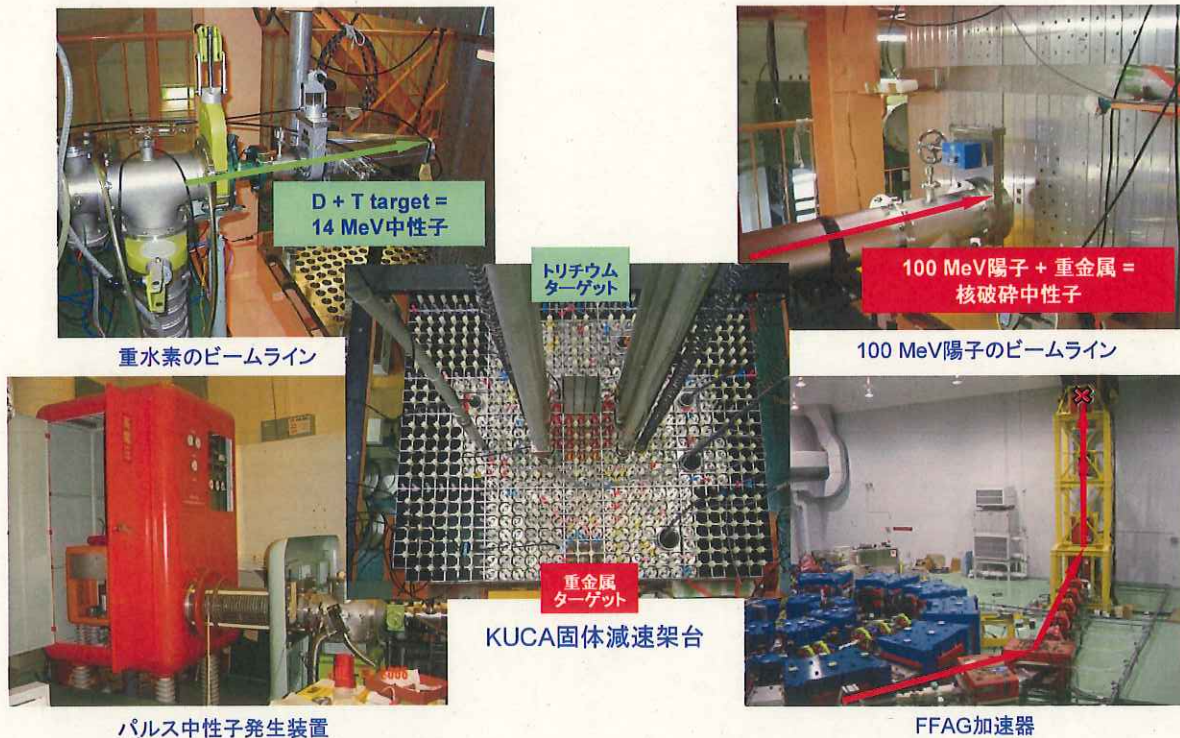




表 世界におけるADS実験施設

プロジェクトまたは施設	国名	燃料	反射材または冷却材	スペクトル	加速器(ターゲット)	出力	備考
MUSE	フランス	MOX	Na	高速	14 MeV中性子	Zero	終了
VENUS-F	ベルギー	UO <sub>2</sub> (MOX)	Pb	高速	14 MeV中性子	Zero	進行中
KUCA	日本 (京大炉)	HEU	ポリエチレン	熱	14 MeV中性子 100 MeV陽子 (W, Pb-Bi...)	Zero	進行中
CLEAR-0	中国	UO <sub>2</sub>	Pb	高速	14 MeV中性子	Zero	計画中
TEF	日本 (JAEA)	LEU (Pu) + MA	Pb-Bi	高速	400 MeV陽子 (Pb-Bi)	500 Wth	計画中
MYRRHA	ベルギー	MOX + MA	Pb-Bi	高速	600 MeV陽子 (Pb-Bi)	100 MWth	計画中

※ KUCAは世界的に稀有なADS実験施設であり、TEF(日本)およびMYRRHA(ベルギー)の実現まで世界のADS実験研究をリードすることが期待されている。





➤ **<sup>235</sup>U(ウラン)装荷ADS実験ベンチマーク(14 MeV中性子)**

→ IAEA ADS Benchmarks CRP として採択(2007年から2011年まで)

C. H. Pyeon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 44, 1368 (2007).  
 C. H. Pyeon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 45, 1171 (2008). → 日本原子力学会論文誌(英文誌)2014年度「最多引用論文賞」受賞  
 C. H. Pyeon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 46, 965 (2009).  
 H. Shahbunder, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 37, 592 (2010).  
 H. Taninaka, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 47, 376 (2010).  
 H. Shahbunder, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 37, 1214 (2010).  
 H. Shahbunder, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 37, 1785 (2010).  
 H. Taninaka, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 48, 873 (2011).  
 H. Taninaka, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 48, 1272 (2011).  
 C. H. Pyeon, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 40, 229 (2012).  
 A. Sakon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 52, 204 (2015).

➤ **<sup>232</sup>Th(トリウム)装荷ADS実験ベンチマーク(14 MeV中性子および核破砕中性子)**

→ IAEA ADS Benchmarks CWとして採択(2013年から2014年まで)

C. H. Pyeon, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 38, 2298 (2011).  
 C. H. Pyeon, et al., *Nucl. Sci. Eng.*, 177, 156 (2014).  
 M. Yamanaka, et al., *Ann. Nucl. Energy*, (2015). [to be submitted]

➤ **<sup>235</sup>U(ウラン)装荷ADS実験ベンチマーク(核破砕中性子)**

→ IAEA ADS Benchmarks CWとして採択(2015年から2016年まで)

C. H. Pyeon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 46, 1091 (2009).  
 C. H. Pyeon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 47, 1090 (2010).  
 J. Y. Lim, et al., *Sci. Technol. Nucl. Install.*, 2012, ID: 395878, 9 pages, (2012).  
 C. H. Pyeon, et al., *Nucl. Eng. Technol.*, 45, 81 (2013).  
 A. Sakon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 50, 481 (2013).  
 T. Yagi, et al., *Appl. Radiat. Isot.*, 72, 11 (2013).  
 Y. Takahashi, et al., *Ann. Nucl. Energy*, 54, 162 (2013).  
 A. Sakon, et al., *J. Nucl. Sci. Technol.*, 51, 116 (2014).  
 C. H. Pyeon, et al., *Prog. Nucl. Energy*, (2015). [in print]  
 C. H. Pyeon, et al., *Nucl. Technol.*, (2015). [to be accepted]

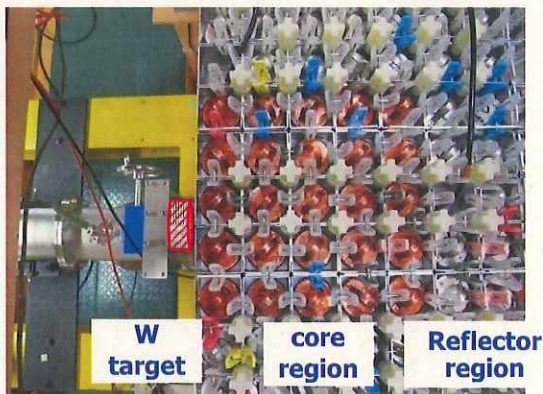


図 トリウム装荷ADS炉心の写真

**実験によって得られる知見**

- 1) 炉心スペクトルの影響
- 2) 外部中性子源による相違  
(14 MeV中性子 vs. 核破砕中性子)

Note: Protons; 100 MeV, 50 mm dia., 0.1 nA

Target; W, 50 mm dia., 9 mm thick

=> **中性子の増倍に影響**

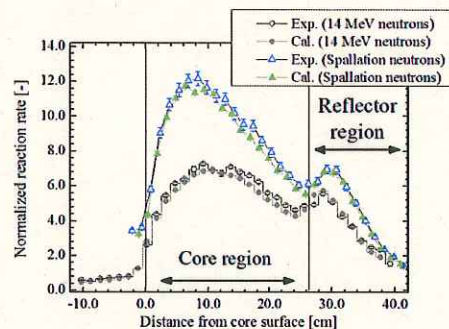


図 <sup>115</sup>In (n, γ)<sup>116m</sup>In 反応率の結果 (keff=0.854)

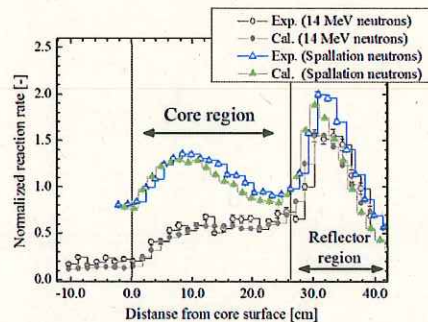


図 <sup>115</sup>In (n, γ)<sup>116m</sup>In 反応率の結果 (keff=0.588)

M. Yamanaka, et al., *Ann. Nucl. Energy*, (2015). [to be submitted]



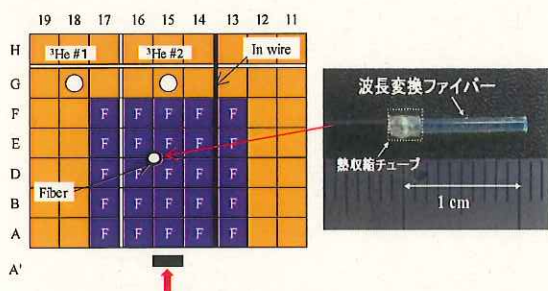


図 232Th装荷ADS炉心の上面図 (核破砕中性子)

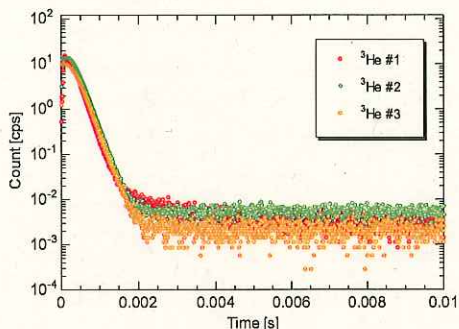


図 PNS法による測定結果の一例 (核破砕中性子)

表 keffの実験値と計算値の比較 (PNS法: Fiber検出器)

	計算値	実験値	
		核破砕中性子	14 MeV 中性子
炉心	MCNPX		
Th-HEU-5PE	0.86416	0.89707	0.84775

表 即発中性子減衰定数の実験値の比較 (PNS法: Fiber検出器)

	実験値	
	核破砕中性子	14 MeV 中性子
炉心		
Th-HEU-5PE	808	798

### 実験によって得られる知見

動特性パラメータの外部中性子源による影響  
(例えば、14 MeV中性子 vs. 核破砕中性子)

1) 未臨界面度

2) 即発中性子減衰定数

=> **未臨界面度の測定結果に影響**

(実効遅発中性子割合という換算係数が変化する?)

M. Yamanaka, et al., *Ann. Nucl. Energy*, (2015). [to be submitted]

### ➤ 実効遅発中性子割合とは?

- 遅発中性子発生数の全中性子発生数に対する実効的な割合
- $^{235}\text{U}$  (>0.7%; 軽水炉)、MA(0.03 - 0.1%)...
- 原子炉出力の時間変化に敏感 → 運転制御に大きく影響する。

### ➤ KUCA ADS実験から得られた重要な知見

- $\beta_{eff}$ が外部中性子源および未臨界面度によって変化する。
- 実機ADSでは、 $\beta_{eff}$ が非常に小さいMAが大量に含まれるため、臨界面状態での運転は困難 → 未臨界面状態での運転が前提
- 未臨界面度のモニタリング → 炉心の安全性を常に確認するためには、高精度およびオンラインが不可欠

### ➤ $\beta_{eff}$ の正確な評価が必須(運転条件に左右されてはならない!)

- 数値計算手法は臨界面炉心が前提 → 未臨界面および外部中性子源を考慮した計算手法の開発
- $\beta_{eff}$ の実験による推定は未解決の研究課題

### □ 取り組むべき課題

- ADSで要求される $\beta_{eff}$ の新たな評価(計算)手法の開発
- 未臨界面度測定の高精度化およびオンライン化



## まとめ



### ➤ KUCA IAEA ADS実験ベンチマーク

- 固体減速架台および外部中性子源を用いたADS実験研究
- ADSに関する基礎研究の世界の最先端

### ➤ KUCA ADS実験から得られた重要な知見

- 未臨界度および外部中性子源の変化に伴って $\beta_{\text{eff}}$ が変化(物理的考察が必要)

### ➤ 実効遅発中性子割合( $\beta_{\text{eff}}$ )に関する検討

- 確率論的手法によるユニークな評価手法の開発
- 決定論的手法を用いた計算コードシステムの導入の検討
- MA核データ整備
- 未臨界度測定の高度化・オンライン化の研究

### □ 今後の課題

- 未臨界度測定技術を活用した実効遅発中性子割合の測定を実現する。
- ADSの核変換技術応用に向けたMA( $^{237}\text{Np}$ および $^{241}\text{Am}$ )の照射実験を行い、MA核データの不確かさ評価を行う。