

# 京都大学原子炉実験所における 加速器駆動システムの基礎研究の現状

卞 哲浩

京都大学原子炉実験所

[pyeon@rri.kyoto-u.ac.jp](mailto:pyeon@rri.kyoto-u.ac.jp)

## 発表内容

- 背景と目的
- 京大炉における加速器駆動システム(ADS; 実験設備)の構成
  - Kyouto University Critical Assembly (KUCA)
  - Fixed-Field Alternating Gradient (FFAG)加速器
- $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験(14 MeV DT中性子)  
(IAEA ADS CRP in 2007 to 2011)
- $^{235}\text{U}$ 装荷および $^{232}\text{Th}$ 装荷ADS実験 (IAEA ADS CW in 2013 to 2014)
  - 静特性解析: 反応率(中性子増倍など)
  - 動特性解析: 未臨界度測定(高精度・オンライン測定)
- 次期ADS実験ベンチマーク(100 MeV陽子)  
(IAEA ADS CW from 2015)
- まとめ



## 背景と目的

---

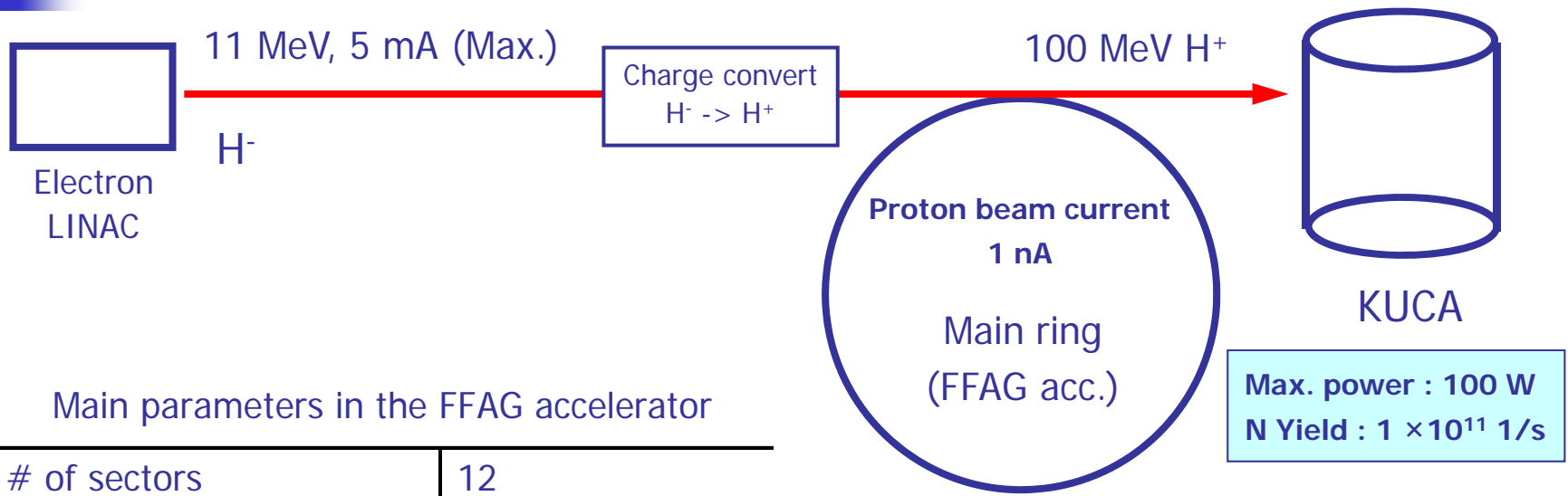
### 背景

- エネルギー増幅装置および核変換技術への応用(MAおよびLLFP)
- $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験研究(14 MeV DT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実験を断続的に行ってきた。(以下に着目)
  - 炉心スペクトル: 燃料 -> 高濃縮ウラン、トリウム、天然ウラン  
減速材・反射材 -> ポリエチレン、C、Be、Al、F、Pb等
  - 外部中性子源; 14 MeV DT中性子  
核破砕中性子(100 MeV陽子 + 重金属)

### 目的

- KUCAでの実験を通じたADSの成立性の検討
- ADS実験を通して、実験(測定)手法の確立と数値計算精度(MCNP)の確認

# FFAG加速器 (100 MeV陽子)

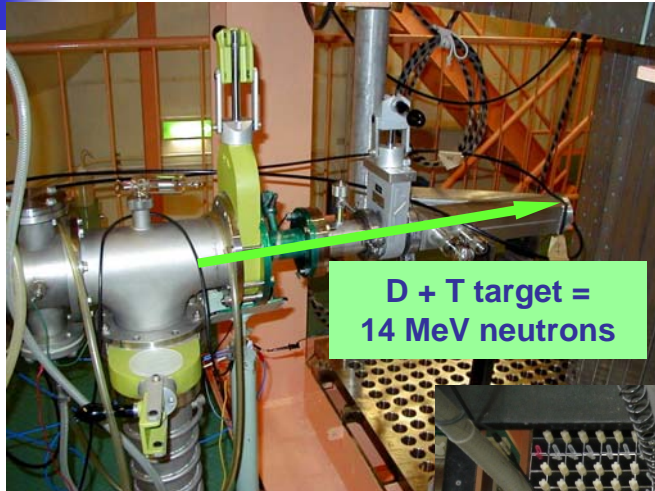


Main parameters in the FFAG accelerator

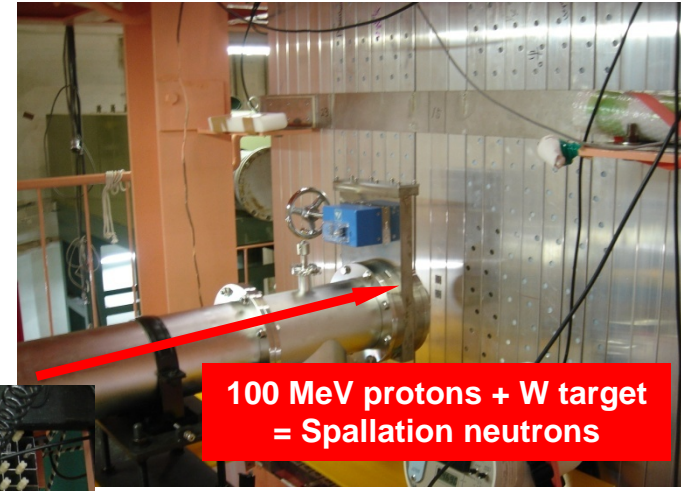
# of sectors	12
Energy	2.5 – 150 MeV
Repetition rate	120 Hz
Average beam current	1 nA
Rf frequency	1.5 - 4.6 MHz
Field index	7.5
Closed orbit radius	4.4 - 5.3 m



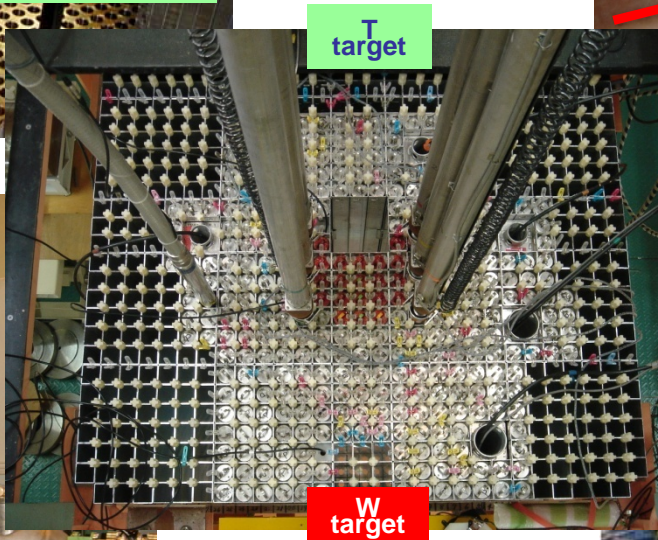
# KUCAでのADS実験設備の構成



Beam line of D



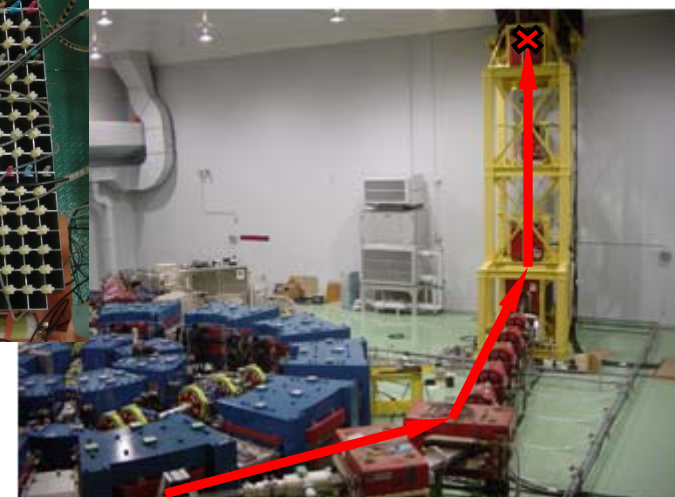
Beam line of protons



KUCA core



Pulsed neutron generator



C. H. Pyeon, Kyoto Univ. 5

# KUCAの固体減速架台(炉心)

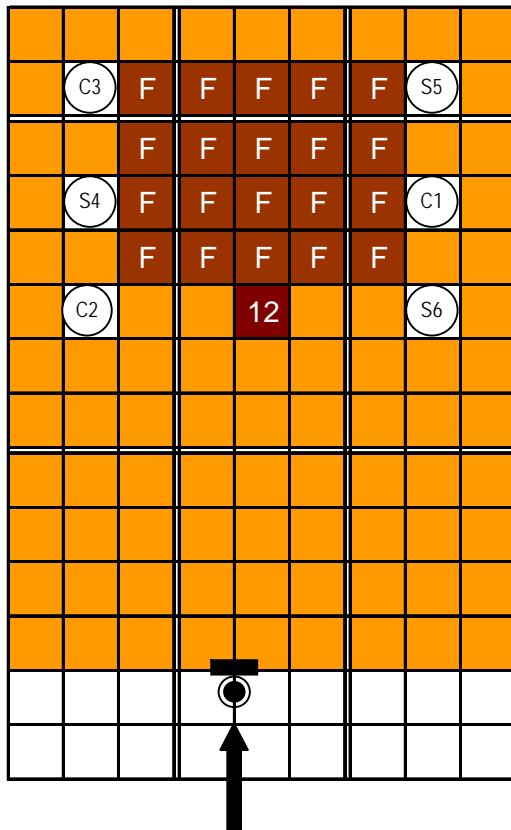


Fig. KUCA core

- KUCA core -  
A solid-moderated and -reflected core

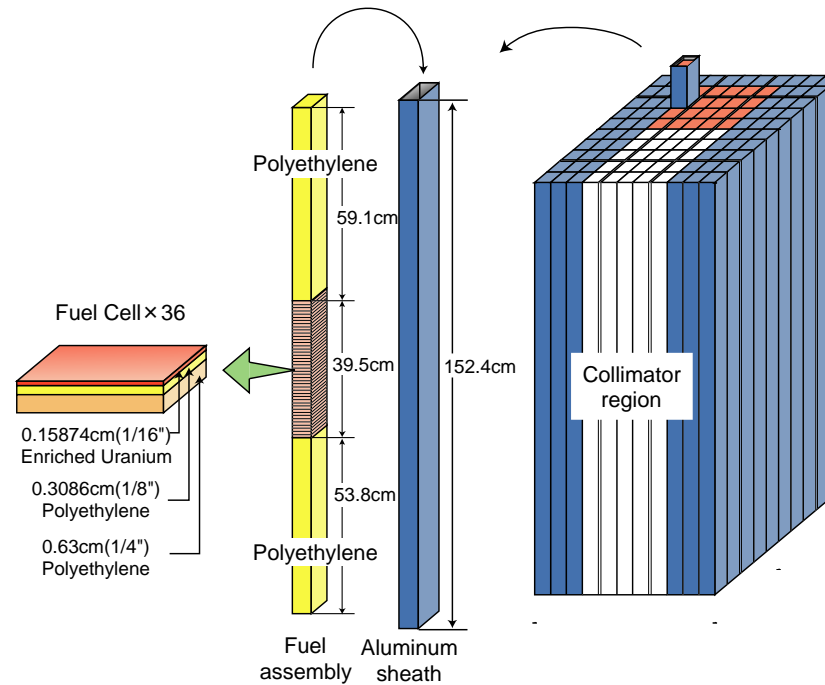


Fig. Image of KUCA core and fuel assembly loaded



# 14 MeV中性子を用いたADS実験

## <sup>235</sup>U装荷ADS実験ベンチマーク (IAEA ADS CRP in 2007 to 2011)

- 未臨界度測定
- 中性子スペクトル
- 反応率(中性子増倍など)

C. H. Pyeon, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **44**, 1368 (2007).  
C. H. Pyeon, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **45**, 1171 (2008).  
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. 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).



# $^{232}\text{Th}$ 装荷ADS実験

## $^{232}\text{Th}$ 装荷ADS実験ベンチマーク (IAEA ADS CW in 2013 and 2014)

### ADSにおける各種パラメータ依存性の研究

- 未臨界度
- 炉心スペクトル
- 外部中性子源

(14 MeV中性子 vs. 核破碎中性子)

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.*, *PHYSOR 2014*, (2014).



# 232Th装荷ADS実験：反応率分布測定

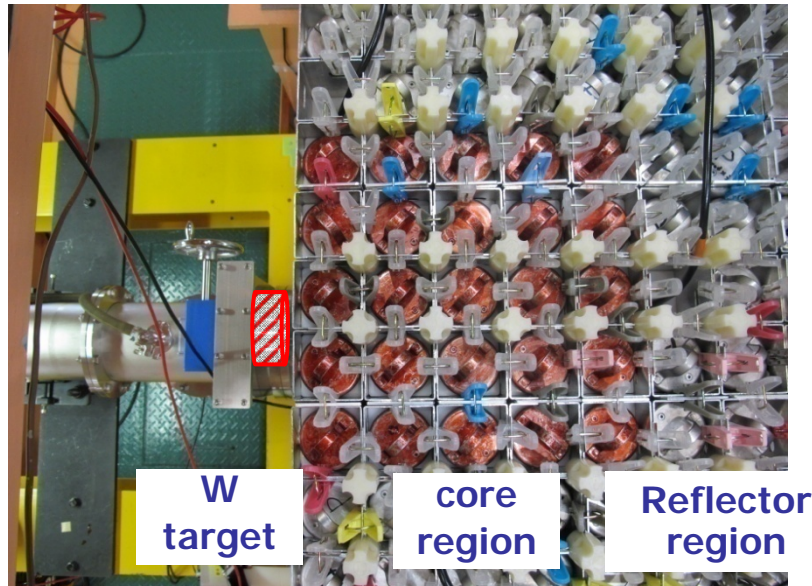


Fig. Core configuration of <sup>232</sup>Th-loaded core

## 実験によって期待される知見

- 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. 100 MeV陽子+W)

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

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

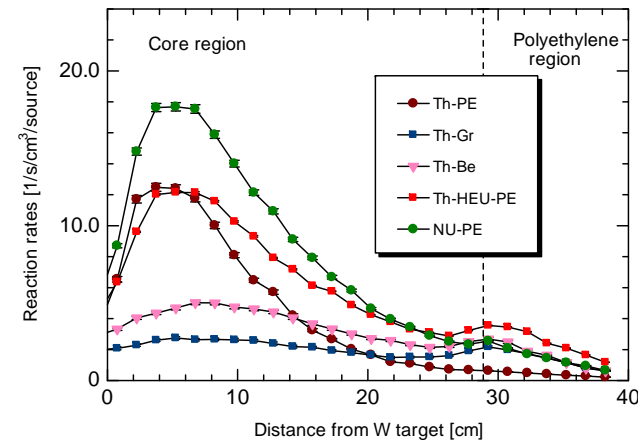


Fig. Measured <sup>115</sup>In (n,  $\gamma$ )<sup>116m</sup>In reaction rates (**100 MeV protons**)

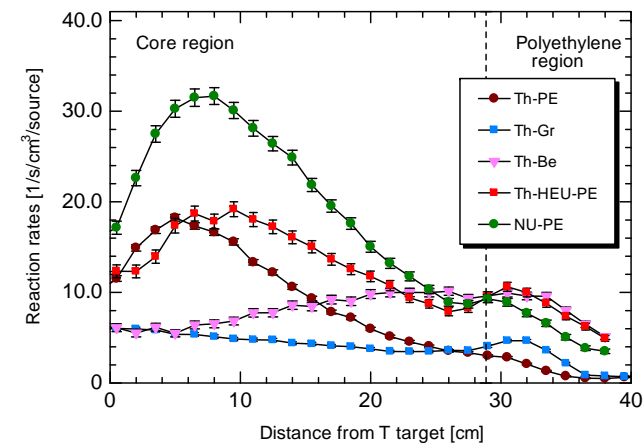


Fig. Measured <sup>115</sup>In (n,  $\gamma$ )<sup>116m</sup>In reaction rates (**14 MeV neutrons**)

# 232Th装荷ADS実験: 未臨界度測定

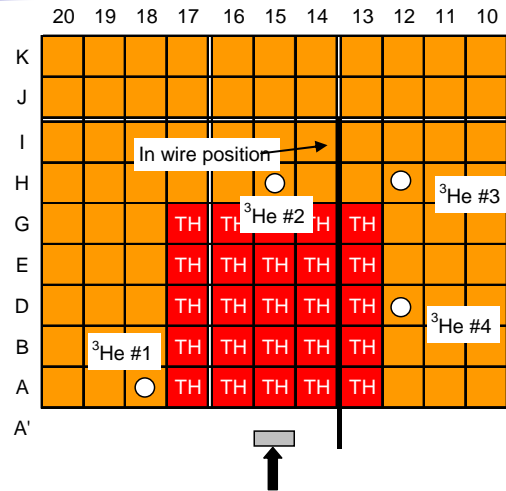


Fig. Core configuration of  $^{232}\text{Th}$ -PE core (100 MeV protons)

Table Results in  $k_{\text{eff}}$  ( $^3\text{He}$  #3; Area ratio method)

	Cal.	Exp.	
Core	MCNPX	100 MeV Protons	14 MeV Neutrons
<b>Th-HEU-PE</b>	<b>0.5876</b>	<b>0.7346</b>	<b>0.6577</b>

$\beta_{\text{eff}} = 8.491\text{E-}03$ ; SRAC-CITATION 107-G, 3-D

$\alpha = 5065 \pm 28$  (100 MeV Protons)

$5288 \pm 13$  (14 MeV Neutrons)

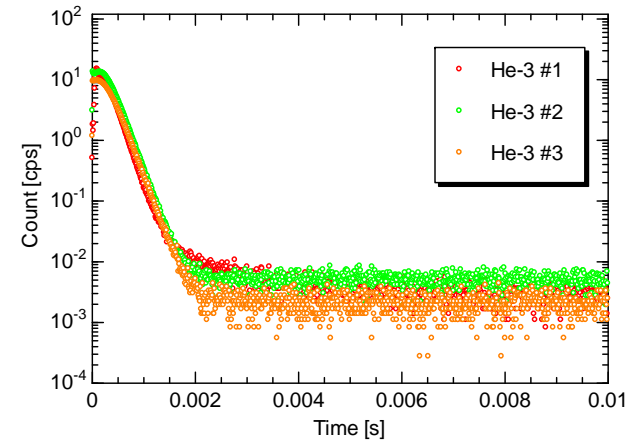


Fig. Results in Th-HEU-PE with 100 MeV protons

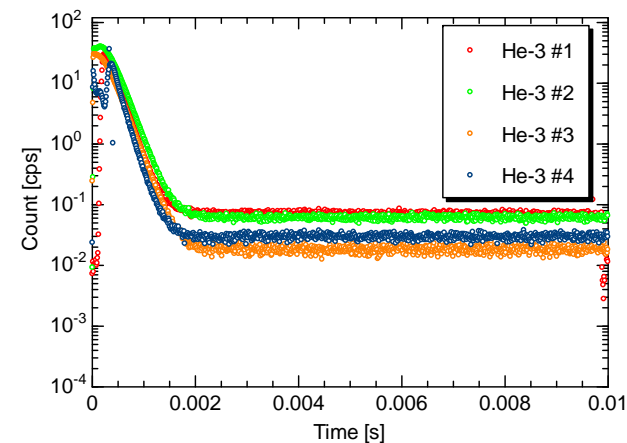


Fig. Results in Th-HEU-PE with 14 MeV neutrons



## $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験(核破砕中性子)

### $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験ベンチマーク(核破砕中性子) (IAEA ADS CW from 2015)

- ターゲット研究(W, W-Be, Pb-Bi)
- 未臨界度測定の高度化・オンライン化
- 中性子スペクトル研究
- 反応率(中性子増倍等)

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).

A. Sakon, *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 116 (2014).

C. H. Pyeon, *et al.*, *PHYSOR 2014*, (2014).

C. H. Pyeon, *et al.*, *Prog. Nucl. Energy*, (2014). [in print]

# ターゲット研究(静特性解析)

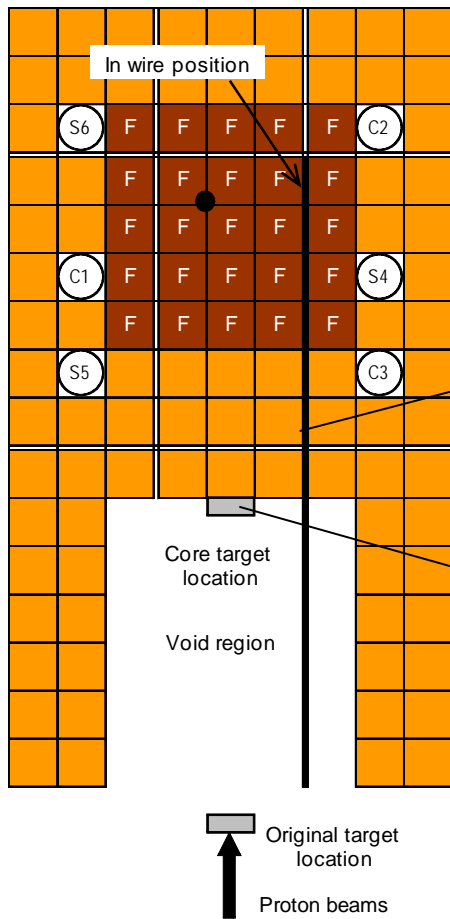


Fig. Core configuration of  $^{235}\text{U}$ -PE core (100 MeV protons)

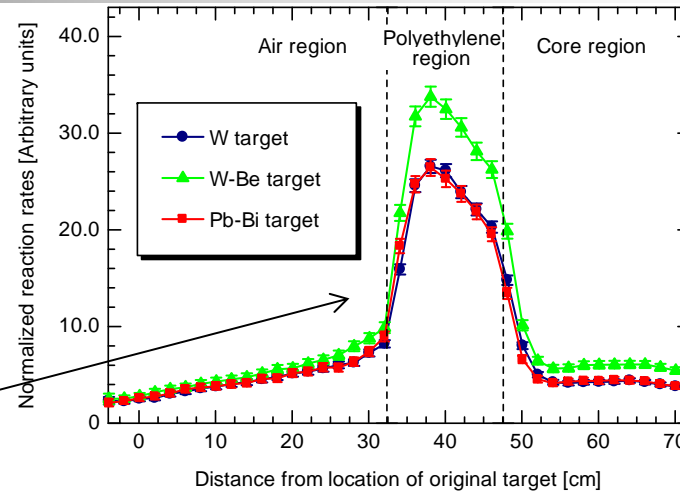


Fig. Measured reaction rate distribution (M and k-source study)

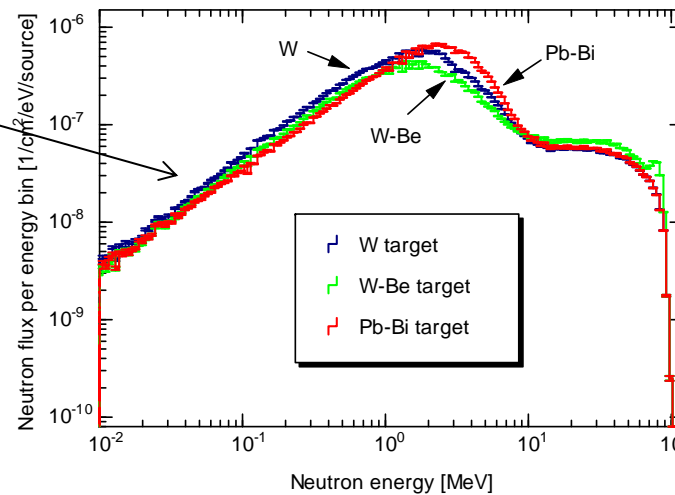
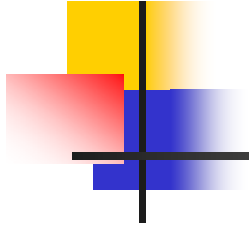


Fig. Neutron spectrum with the variation of target (MCNPX)



# 核変換技術への応用を目指した Pb-Bi研究 (共同研究: JAEAと京大炉)

# Pb-Bi断面積の不確かさ研究

## ➤ 動機

- Pb-Bi断面積のJENDL-3.3およびJENDL-4.0間の相違  
(Pb-Bi: 実機ADS施設のターゲットおよび冷却材)

## ➤ KUCAでの臨界実験

- Pb-Biプレートによるサンプル反応度測定による不確かさ評価

## 今後予定されている実験

- Biプレートのサンプル反応度測定 (PbおよびPb-Biプレートの実験は既に終了)

Table C/E values of sample reactivity by Pb plates

Reactivity (pcm)	JENDL-3.3	JENDL-4.0	ENDF/B-VII.0
89	1.62±0.14	1.17±0.11	1.05±0.11
105	1.57±0.11	1.09±0.09	0.97±0.09
140	1.52±0.08	1.04±0.07	1.02±0.06
151	1.66±0.08	1.17±0.07	1.13±0.07

# 235U装荷Pb-Bi領域炉心の特性

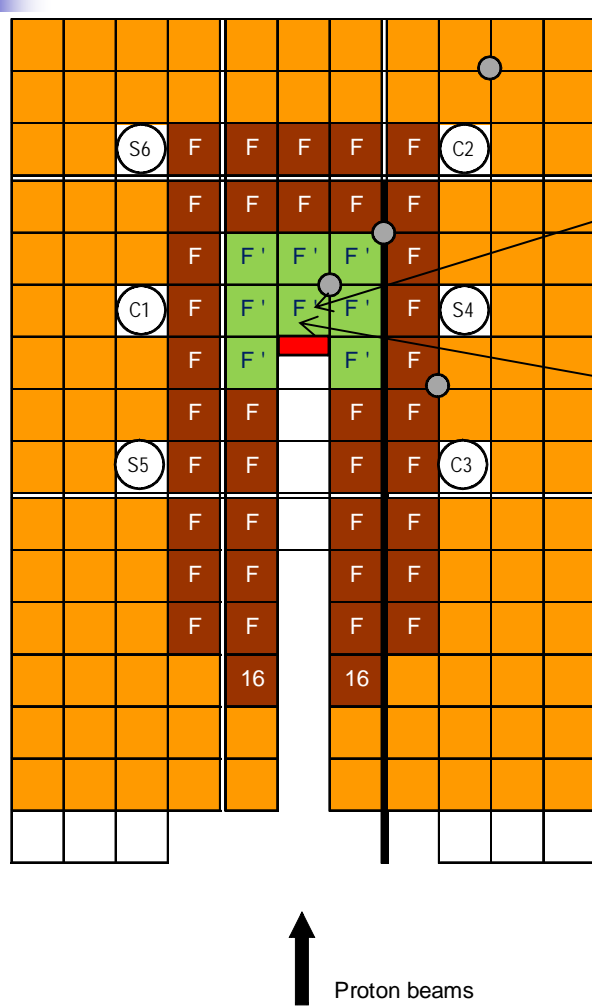


Fig. Core configuration of <sup>235</sup>U and Pb-Bi zoned core

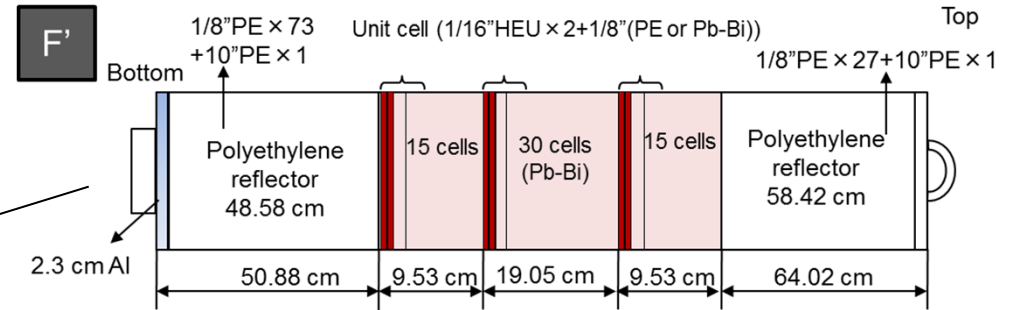


Fig. Fuel assembly of <sup>235</sup>U-PE and Pb-Bi

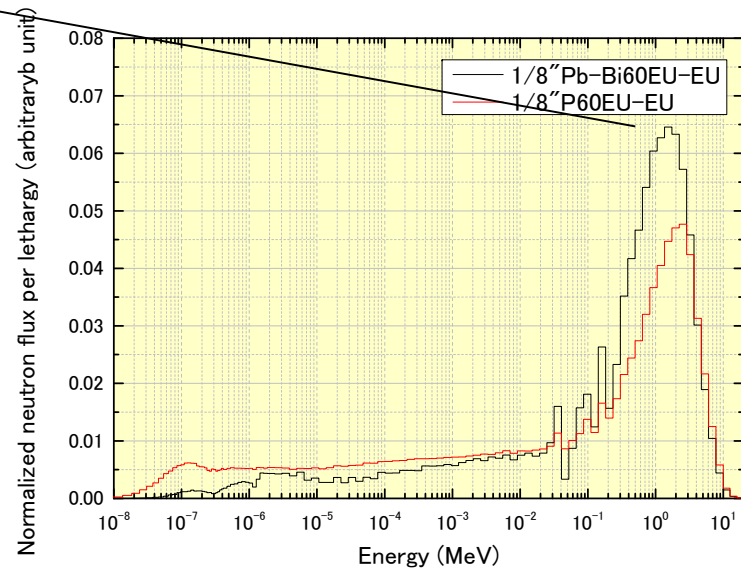


Fig. Neutron spectrum of core center in F' at 100 MeV proton injection onto Pb-Bi target



## まとめ

---

- 京大炉における一連の $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験についての紹介
  - KUCA固体減速架台および外部中性子源  
(14 MeV中性子および核破碎中性子)
  
- $^{232}\text{Th}$ 装荷ADS実験
  - 未臨界度、炉心スペクトルおよび外部中性子源に関する検討
  - 静特性および動特性パラメータの解析
  
- 核破碎中性子源を用いた $^{235}\text{U}$ 装荷ADS実験
  - Pb-Bi断面積の不確かさ評価
  - Pb-Bi核破碎ターゲットの研究
  - 核変換技術の応用に向けた $^{235}\text{U}$ 装荷Pb-Bi領域炉心の特性評価
  - 未臨界度測定の高度化・オンライン化の研究 sections
  
- 今後の課題
  - Pb-Bi断面積の評価の詳細な解析
  - ADSの核変換技術応用に向けた $^{237}\text{Np}$ および $^{241}\text{Am}$ の照射実験