

# 軽水炉へのトリウム燃料適用の検討

福井大学  
附属国際原子力工学研究所  
島津洋一郎

## トリウム燃料との出会い

- **熔融塩増殖炉(MSBR)の燃料サイクルコスト検討**
  - 1970年－1971年：UCBにおける修士論文テーマ
  - 指導教官；Thomas H. Pigford
- **帰国後の単独研究（1976年－1978年）**
  - 熔融塩炉の燃料サイクルコスト評価
  - MSBRにおける過渡キセノン解析
  - 燃料システムによる反応度制御能力
  - MSBRの反応度事故解析
  - MSBRにおけるポンプ軸固着自己解析

## 熔融塩炉検討の続き（北海道大学期）

- 2次元R-Z体系の核熱動特性解析コードを用いた事故解析（減圧事故、反応度添加事故）
- 黒鉛減速材の寿命延長のための出力分布の平坦化
- 日本型再処理プルトニウムの有効利用
- 高速中性子スペクトル熔融塩炉の解析
- 2流体熔融塩炉の復活
- 熔融塩炉解析の核データライブラリーの比較
- 熔融塩炉の事故解析結果の安全性判定基準の検討

## 固体燃料・被覆粒子燃料への展開

### 研究経緯

- 札幌駅北側・北海道熱供給公社；駅南側のオフィス街に温水による熱供給（冷暖房可能）
- 燃料；石油、石炭、RDF（ゴミ）
- 札幌市の冬季除雪費予算額 約150億円



温暖化防止には原子力エネルギーが最適  
熱エネルギーを用いると効率100%

## 地域熱供給炉の条件－ 1

- NIMBYではなくCIMBY(Come Into My Backyard)
- このためには安心・安全設計が不可欠
- 放射性物質の放出確率を今以上に低下すること



被覆粒子燃料の健全性をさらに向上  
ガス炉用燃料を十分な実績のある軽水炉の被覆管内  
で保護

## 地域熱供給炉の条件－ 2

- 小型炉で対応可能
- 長期間の連続運転が好ましい
- 運転操作が単純



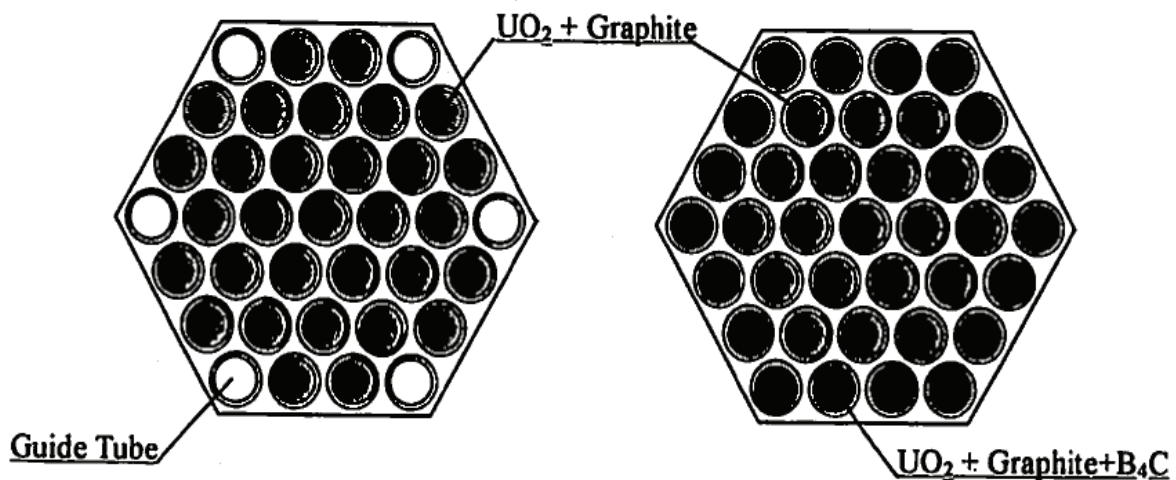
小型PWR（大型炉の十分な運転実績）  
可溶性ホウ素による反応度制御削除  
長期運転（燃料交換なしで5－10年）

# 5%濃縮度UO<sub>2</sub>被覆粒子燃料

**Table 1. Major specification of the preliminary design**

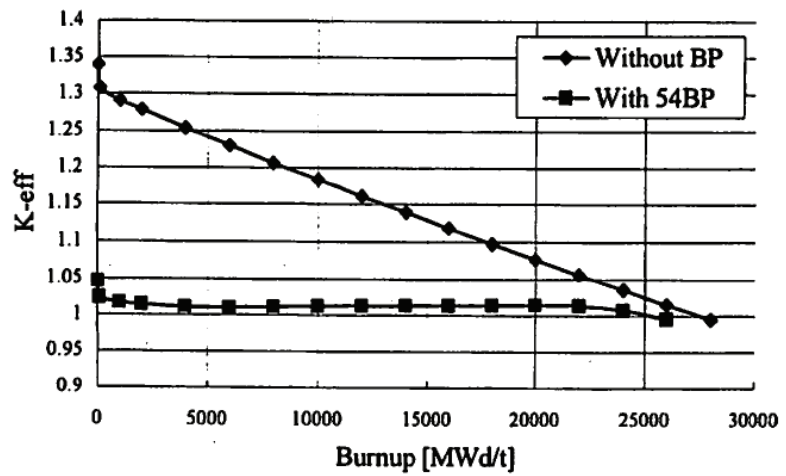
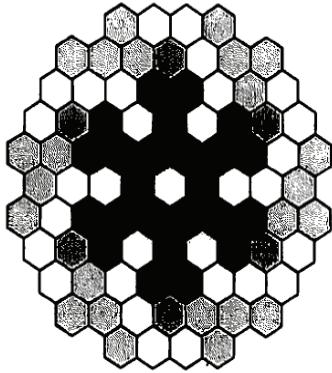
Thermal output	50 MW
Fuel type	TRISO (UO <sub>2</sub> kernel)
Enrichment	5 wt%
Coolant and moderator	Light water
Average primary coolant temperature	250°C
Primary coolant pressure	8.6 MPa
Type of circulation	Forced flow
Linear power density	87.2 W/cm
Heavy metal	5.2 ton
Fuel rod pitch	~ 34 mm
Fuel rod diameter	~ 29 mm
Cladding materials	Zircaloy-4
Guide tube material	SUS316
Lattice type	Hexagonal
Num. of fuel rod / an assembly	37 / 31 (GT)
Num. of assemblies	85
Cladding materials	Zircaloy-4
Num. of GT assemblies	31
Equivalent core diameter	~ 2.0 m
Effective core height	~ 1.8 m

## 燃料集合体



**Fig. 1. Cross section view of GT (left) and BP assemblies (right)**

## 炉心装荷パターンと燃焼特性



運転サイクル 7.3EFPY

## 被覆粒子燃料PWRの成立性

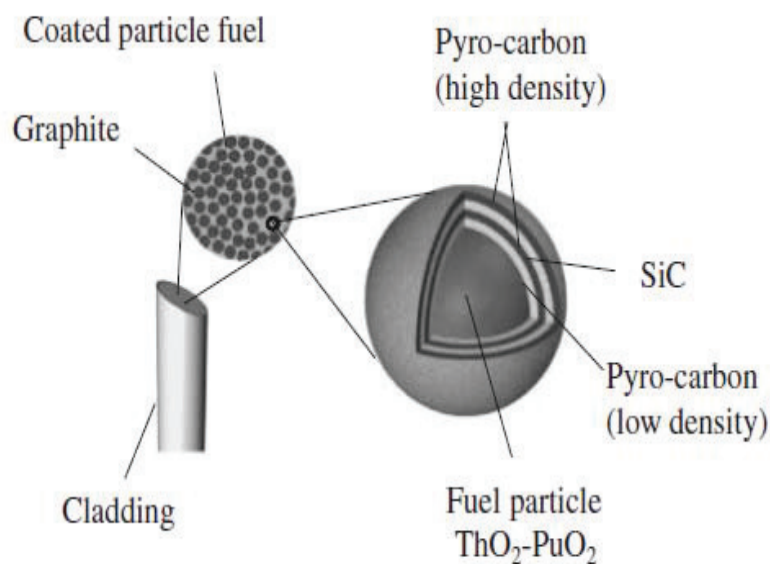
- 反応度係数
- 停止余裕（制御棒1本固着状態、キセノンなしで、全出力状態から低温停止可能）



炉心設計の成立性確認

Small PWR using Coated Particle Fuel of Thorium and Plutonium, J. Nucl. Sci. Technol., Vol.44, No.8, pp. 1045-1051(2007)

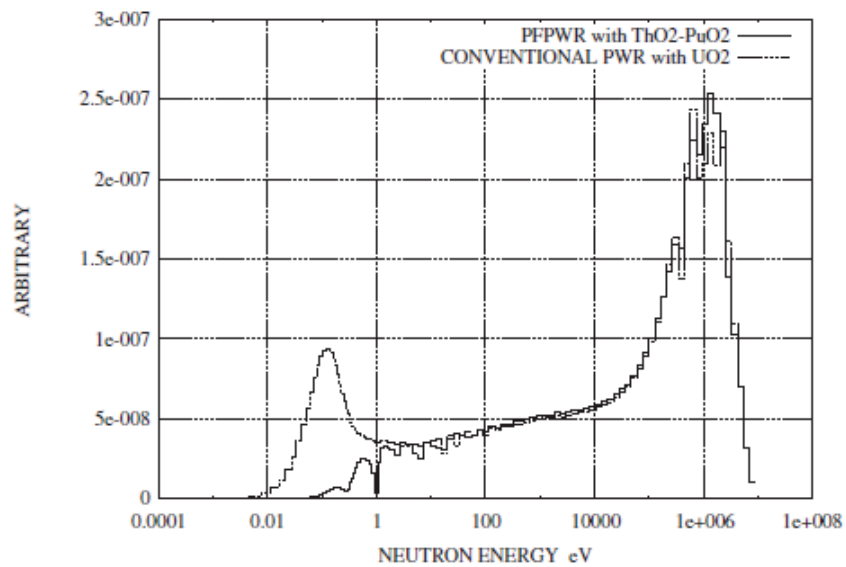
● 炉心寿命の長期化の検討



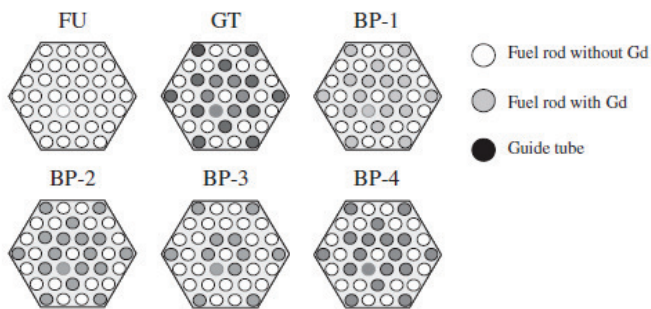
## 原子炉仕様

Reactor parameter	Value
Thermal output	50 MW
Core equivalent diameter	2.4 m
Core height	1.8 m
Average coolant temperature	250°C
Coolant pressure	8.6 MPa
Number of fuel assembly	85
Loading of heavy metal	4.6 t
Core average discharge burnup	35,000 MWD/t
Core life	8.9 EFPY
Average linear heat rate	9.1 kW/m
Fuel	TRISO
Plutonium enrichment	10 wt%
Fissile plutonium enrichment	7.5 wt%
Cladding material	Zircaloy
Lattice type	Hexagonal
Number of rods/Assembly	37
Assembly pitch	21 cm
Fuel rod pitch	34 mm
Fuel rod diameter	29 mm
Cladding thickness	1.5 mm

# 中性子スペクトル



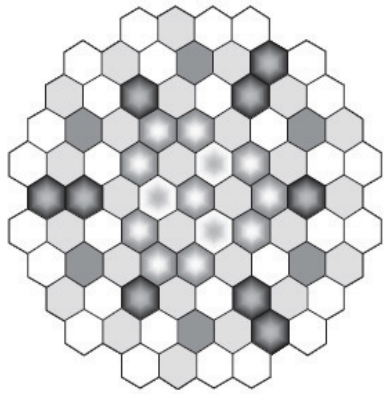
# 燃料集合体設計



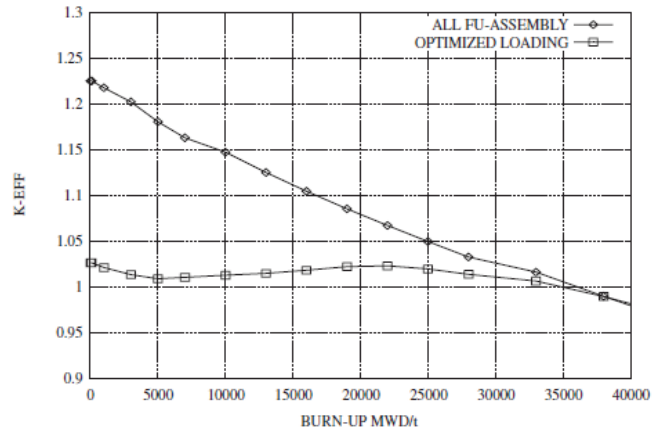
Note: See Table 2 for Types of Fuel assemblies

Assembly type	Gadolinia concentration (wt%)	Gadolinia rods number in an assembly	Assembly number in the core (total 85)
FU	0	0	6
GT	5	6	27
BP-1	1	18	30
BP-2	3	18	3
BP-3	3	12	9
BP-4	5	18	10

# 燃焼特性



- FU-assembly
- GT-assembly with 6 gadolinia-rods (5wt%)
- BP-assembly with 18 gadolinia-rods (1wt%)
- BP-assembly with 18 gadolinia-rods (3wt%)
- BP-assembly with 12 gadolinia-rods (3wt%)
- BP-assembly with 18 gadolinia-rods (5wt%)



運転期間の長期化を確認

## 問題点：

- 軽水炉条件の様な低温照射では炭素のウィグナーエネルギー問題が顕著化

(A new innovative spherical cermet nuclear fuel element to achieve ultra-long core life for use in grid-appropriate LWRs)

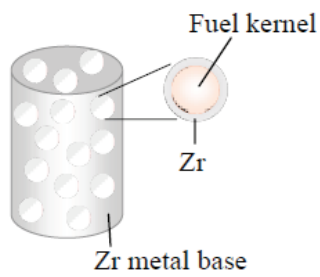
- 炭素使用に疑問



マトリクス材料をジルコニウム酸化物等に変更



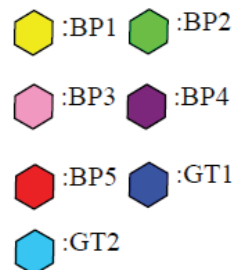
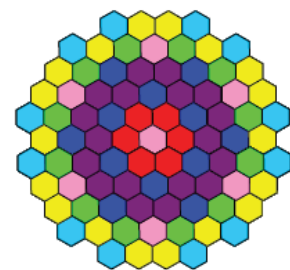
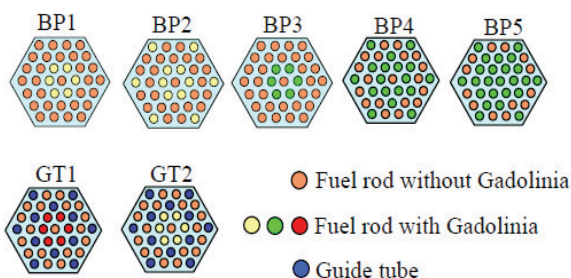
# Small PWR “PFPWR50” using Cermet Fuel of Th-Pu Particles, ICAPP09, Paper ID-9363



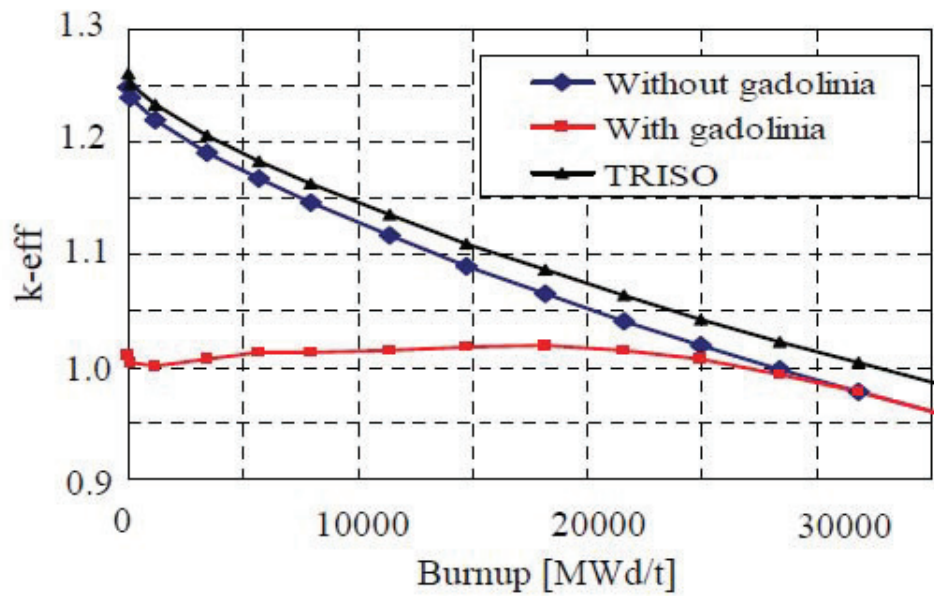
Fuel composition :  $\text{ThO}_2:\text{PuO}_2=9:1$   
 Pu 組成はLWRの取り出し燃料  
 (50000MWD/t)

## 燃料集合体と炉心装荷パターン

Assembly name	Gadolinia concentration			Guide tube	Assembly number in the core (total:85)
	1wt%	3wt%	7wt%		
BP1	6				18
BP2	12				12
BP3		6			7
BP4		18			18
BP5		25			6
GT1			6	12	12
GT2	6			12	12



# 燃燒特性



# 炉心特性

Reactivity coefficient of several burnup points

Burnup [MWd/t]	Doppler coefficient [pcm/K]	MTC [pcm/K]
0	-2.8	-28.4
3,500	-3.0	-35.7
18,000	-3.3	-34.4
25,000	-3.6	-36.2

Table 5 Shutdown margins for stuck rods

Burnup[MWd/t]	Control rod worth [%Δk/k]		
	a	b	c
0	4.64	2.70	2.89
3,500	4.70	3.27	2.18
18,000	2.34	1.32	2.30
25,000	2.65	2.48	3.27

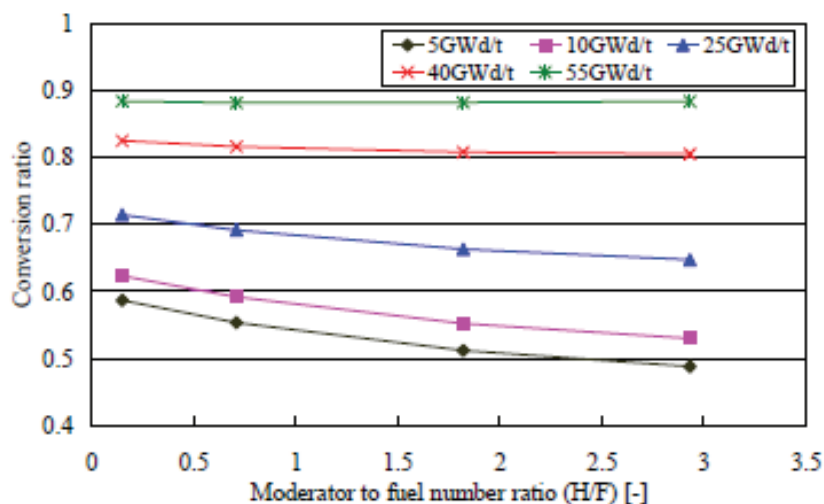
## 結論

- 炉心の成立性は確認
- 燃焼度は27,000MWD/t, 6.7EFPY

Investigation on the feasibility of thorium breeder reactor in a BWR

ICAPP2010, Paper ID-10086

- 高木先生のPWRでの検討に続きBWRで検討開始
- 北海道大学にて検討中
- 結果の例（8 x 8 BWR集合体、U濃縮度3.5%）



## 今後の検討

- 9 x 9、並びに10 x 10燃料集合体での検討
- 炉心全体での転換率の向上
- 炉心設計の成立性の検討

## TMSR臨界解析の核データ依存

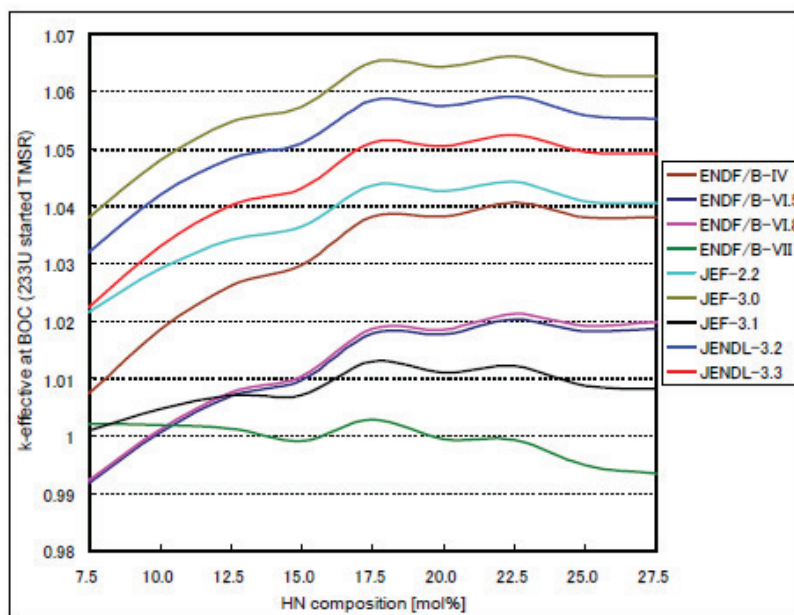


Fig. 5. Effective multiplication factors changing nuclear data libraries ( $^{233}\text{U}$  started TMSR)

# 核データライブラリー依存性

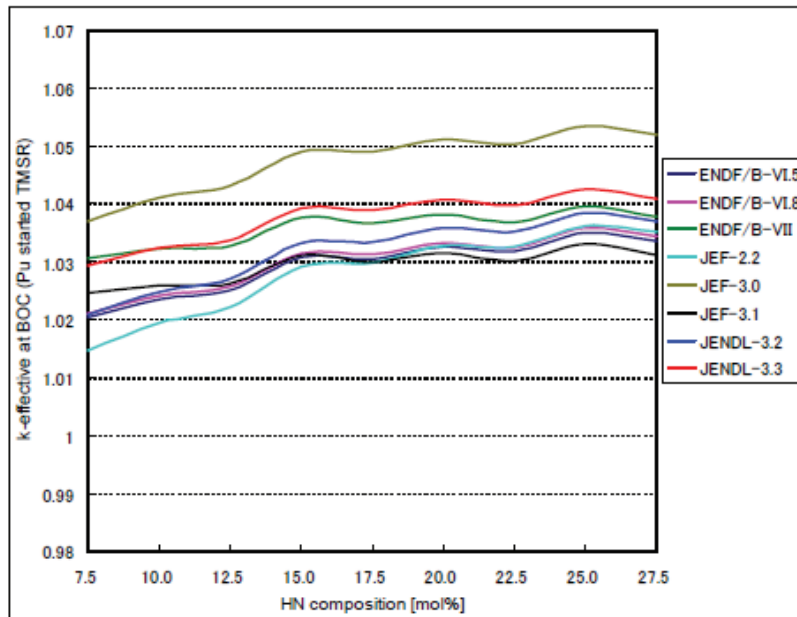
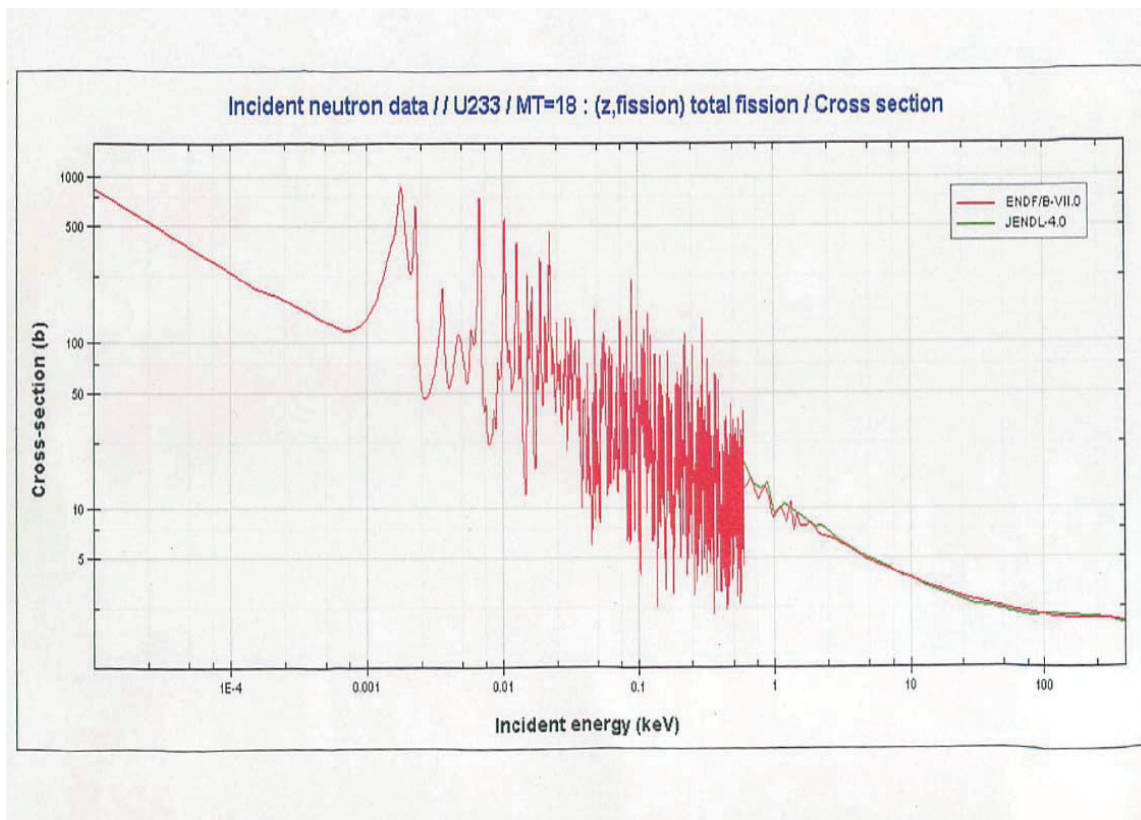
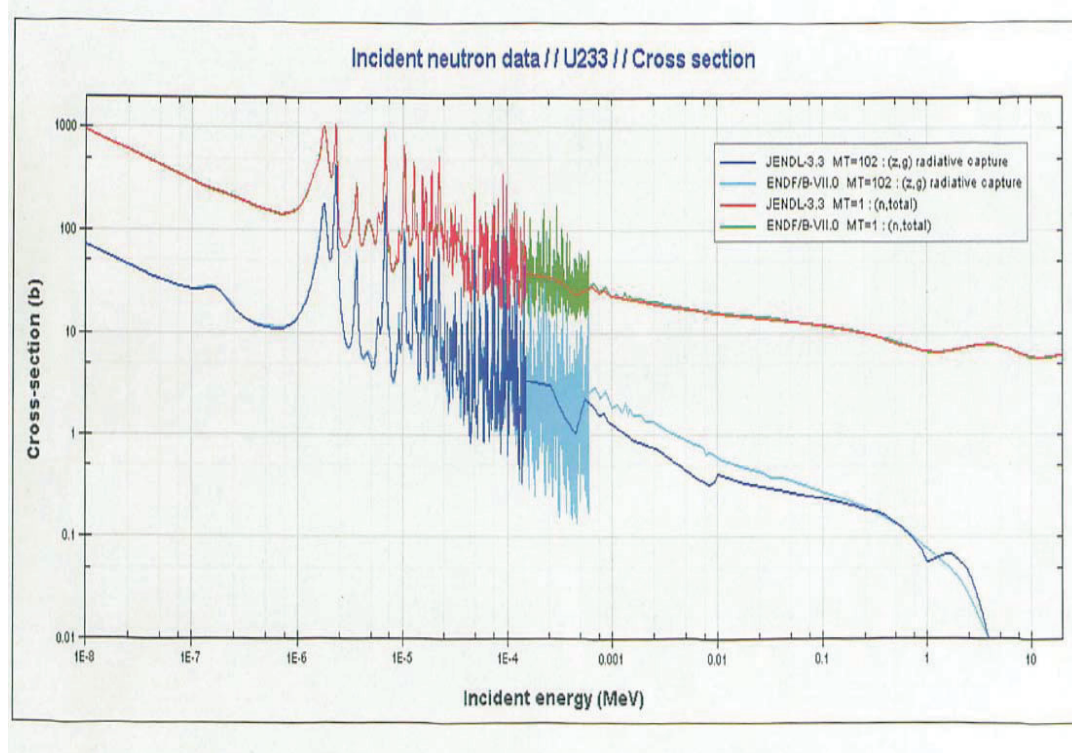


Fig. 6. Effective multiplication factors changing nuclear data libraries (Pu started TMSR)

# ライブラリーデータの比較（核分裂断面積）



## ライブラリーデータの比較（吸収断面積）



## Th0-U233サイクルの核データ制度

- 現状の核データ精度には不十分なところの存在が示唆される
- 今後更なる測定、評価に基づく見直しが期待される

ご清聴有難うございました