

# LLFP 核変換率に対する補正因子の評価

(技術報告)

2005年3月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division ,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構  
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2005

## LLFP 核変換率に対する補正因子の評価

(技術報告)

神 智之<sup>※1</sup>、大木 繁夫<sup>※2</sup>

## 要 旨

FBR 実用化戦略調査研究における LLFP (Long-Lived Fission Product) 核変換炉心設計への適用を目的として、LLFP 核変換率に対する補正因子を設計計算と詳細モンテカルロ計算との比較により評価した。設計計算から詳細計算に至る段階的な分析により、(a) 群縮約効果、(b) 輸送効果、(c) 決定論計算とモンテカルロ計算の差、(d) 詳細エネルギー群効果 (熱エネルギー領域の効果を含む)、(e) 炉心体系 3 次元効果、(f) LLFP ターゲット集合体の非均質効果、への要因分析を行った。その結果、LLFP ターゲット集合体の非均質効果が設計計算と詳細計算の差の主要因であり、その非均質効果のメカニズムは、共鳴から熱エネルギー領域にかけての LLFP 核種の断面積エネルギー形状との関係で説明できることを明らかにした。

---

本報告書は FBR サイクル実用化戦略調査研究フェーズ II 計画 (WBS) 111110 「大型 Na 炉の炉心・燃料設計研究」に係る平成 16 年度の検討結果をまとめたものである。

※1 株式会社 NESI

※2 大洗工学センター システム技術開発部 中性子工学グループ

## Evaluation of Correction Factors for LLFP Transmutation Rate

JIN Tomoyuki\*<sup>1</sup> and OHKI Shigeo\*<sup>2</sup>

### Abstract

For the design study of LLFP (Long-Lived Fission Product) transmutation core concepts in Feasibility Study on commercialized fast reactor cycle systems, correction factors for LLFP transmutation rate were evaluated by comparing the design calculation with the detailed Monte-Carlo calculation. By a step-by-step approach from design to detailed calculation, the correction factors were decomposed into the following factorial effects: (a) group collapsing effect, (b) transport effect, (c) difference between the deterministic method and the Monte-Carlo calculation, (d) detailed energy group effect (including a treatment of the thermal energy region), (e) three-dimensional effect of the core geometry, and (f) heterogeneity effect of the LLFP target assembly. As a result, the heterogeneity effect of the LLFP target assembly was turned out to be the main cause of the difference between the design and the detailed calculations. It is possible to explain the mechanism of the heterogeneity effect in connection with the cross-section shape of LLFP from resonance to thermal energy region.

---

※1 NESI incorporation

※2 Reactor Physics Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC

## 目次

1. はじめに	1
2. 対象炉心と LLFP ターゲット集合体の仕様	2
3. 解析方法	19
4. 解析結果	21
5. おわりに	44
参考文献	45
付録 A	46
付録 B	47

## 表リスト

表 1.1	Na 冷却 MOX 燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	4
表 1.2	Na 冷却金属燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	4
表 1.3	Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	5
表 1.4	強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	5
表 1.5	自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	6
表 1.6	He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様	6
表 2	LLFP 核変換率補正因子の要因分析のための計算ケース	20
表 3	LLFP 核変換率補正因子	24
表 4.1	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却 MOX 燃料大型炉)	25
表 4.2	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却金属燃料大型炉)	27
表 4.3	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却 MOX 燃料中型炉)	29
表 4.4	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉)	31
表 4.5	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉)	33
表 4.6	LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心)	35
表 5	LLFP 捕獲反応断面積	37

## 図リスト

図 1.1	Na 冷却 MOX 燃料大型炉 (H14 年度標準炉心)	7
図 1.2	Na 冷却金属燃料大型炉 (H14 年度標準炉心)	8
図 1.3	Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉 (H14 年度平衡期向け炉心)	9
図 1.4	強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉 (H14 年度選定炉心)	10
図 1.5	自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉 (H14 年度選定炉心)	11
図 1.6	He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心 (H15 年度選定炉心)	12
図 2.1	Na 冷却 MOX 燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	13
図 2.2	Na 冷却金属燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	14
図 2.3	Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	15
図 2.4	強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	16
図 2.5	自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	17
図 2.6	He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図	18
図 3	LLFP 捕獲反応断面積	38
図 4	LLFP 捕獲反応率の比較 (Na 冷却 MOX 燃料大型炉)	39
図 5	LLFP 核変換率補正因子の対象炉心間の比較	41

## 1. はじめに

FBR 実用化戦略調査研究では、高速炉における長寿命核分裂生成物 (Long-Lived Fission Product, LLFP) の核変換が検討されている。LLFP 核変換率向上のため、LLFP ターゲット集合体には LLFP とともに中性子減速材が用いられる。この減速材付き LLFP ターゲット集合体においては、中性子束の空間分布及びエネルギー分布が大きく変化する。また、中性子の減速に伴う熱エネルギー領域の寄与を無視することができない。高速炉設計計算において、これらを常に詳細に取り扱うことは、作業効率を悪化させることになる。そこで、現状ではモンテカルロ計算コードによる詳細計算と設計計算の比較から補正因子を求め、設計計算値を補正することで対応している。

本報告書では、H15 年度に LLFP 核変換特性が検討された冷却材及び燃料形態等の異なる 6 つの炉心概念について、炉心設計計算とモンテカルロ計算との比較により算出した。各炉心の LLFP 核変換率に対する補正因子とその要因分析の結果についてまとめる。



## 2. 対象炉心と LLFP ターゲット集合体の仕様

対象炉心は、H15 年度の FBR 実用化戦略調査研究で LLFP の核変換特性が検討された Na 冷却炉 (MOX 燃料大型炉、金属燃料大型炉、MOX 燃料中型高内部転換型炉)、Pb-Bi 炉 (強制循環型、自然循環型)、He ガス冷却炉 (被覆粒子型燃料炉心) である<sup>[1]</sup>。LLFP ターゲット集合体には、LLFP ピンと減速材ピンが充填される。対象 LLFP は  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$  ( $^{127}\text{I}$  も合わせて評価した) であり、本解析では対象炉心に Tc 集合体と I 集合体のそれぞれを装荷した計算を行い、LLFP ターゲット集合体の非均質効果を分析した。以下に、各対象炉心の LLFP ターゲット集合体の仕様を示す。なお、対象炉心の炉心構成を図 1.1~図 1.6 に、LLFP ターゲット集合体の詳細仕様を表 1.1~1.6 に、LLFP ターゲット集合体内の LLFP ピンと減速材ピンの配置を図 2.1~2.6 に示す。

① Na 冷却 MOX 燃料大型炉・・・ 図 1.1、図 2.1、表 1.1 参照

Tc 集合体 : スミア密度 80%、減速材 (ZrH) ピン割合 48%

CuI 集合体 : スミア密度 70%、減速材 (ZrH) ピン割合 40%

径方向ブランケット領域 (2 層、198 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。

② Na 冷却金属燃料大型炉・・・ 図 1.2、図 2.2、表 1.2 参照

Tc 集合体 : スミア密度 80%、減速材 (ZrH) ピン割合 50%

CuI 集合体 : スミア密度 50%、減速材 (ZrH) ピン割合 60%

径方向ブランケット領域 (2 層、186 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。

③ Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉・・・ 図 1.3、図 2.3、表 1.3 参照

Tc 集合体 : スミア密度 80%、減速材 (ZrH) ピン割合 48%

CuI 集合体 : スミア密度 50%、減速材 (ZrH) ピン割合 60%

径方向反射体 (SUS) 領域 (2 層、186 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。LLFP ターゲット集合体の外周に 2 層分の径方向反射体を配置。

④ 強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉・・・ 図 1.4、図 2.4、表 1.4 参照

Tc 集合体 : スミア密度 80%、減速材 (ZrH) ピン割合 40%

CuI 集合体 : スミア密度 70%、減速材 (ZrH) ピン割合 40%

Pb-Bi 遮蔽体領域 (2 層、186 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。LLFP ターゲット集合体の外周に 2 層分の Pb-Bi 遮蔽体を配置。

⑤ 自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉・・・ 図 1.5、図 2.5、表 1.5 参照

Tc 集合体 : スミア密度 80%、減速材 (ZrH) ピン割合 48%

CuI 集合体： スミア密度 50%、減速材 (ZrH) ピン割合 60%

Pb-Bi 遮蔽体領域 (2 層、162 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。LLFP ターゲット集合体の外周に 2 層分の Pb-Bi 遮蔽体を配置。

⑥ He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心・・・ 図 1.6、図 2.6、表 1.6 参照

Tc 集合体： スミア密度 80%、減速材 (YH) ピン割合 70%

YI<sub>3</sub> 集合体： スミア密度 50%、減速材 (YH) ピン割合 40%

径方向ブランケット領域 (2 層、186 体) を LLFP ターゲット集合体に置換。

表 1.1 Na 冷却 MOX 燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

集合体		To集合体		CuI集合体	
充填材	材料	To	Zr-H	CuI	Zr-H
	形態	ペレット			
	内径 [mm]	0.0			
	外径 [mm]	6.98	7.36	4.52	4.6
	理論密度比 [-]	1.0		0.8	1.0
	充填材スミア密度 [%]	80	90	70	90
被覆管	材料	ODS鋼			
	外径 [mm]	8.42		5.5	
	内径 [mm]	7.76		4.84	
	肉厚 [mm]	0.33			
	全長 [mm]	2905			
要素	直径ギャップ [mm]	0.078	0.40	0.32	0.24
	ボンド材	He	Na	He	Na
	充填材スタック高さ [mm]	1500		1100	
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	1020 / 285		1420 / 285	
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
スペーサ	形式	ワイヤ型			
	材料	PNC-FMS			
	ワイヤ直径 [mm]	0.7		1.06	
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	179.2			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	169.2			
	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0			
集合体	バンドル規模 [本]	331		631	
	要素配列ピッチ [mm]	9.2		6.6	
	P/D	1.09		1.20	
	集合体配列ピッチ [mm]	183.2			

表 1.2 Na 冷却金属燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

集合体		To集合体		CuI集合体	
充填材	材料	To	Zr-H	CuI	Zr-H
	形態	ペレット			
	外径 [mm]	6.72	7.12	3.83	4.60
	充填材スミア密度 [%]	80	90	50	90
被覆管	材料	ODS鋼			
	外径 [mm]	8.50		5.50	
	内径 [mm]	7.5		4.84	
	肉厚 [mm]	0.05		0.33	
要素	全長 [mm]	3170			
	直径ギャップ [mm]	0.78	0.46	—	0.24
	ボンド材	He	Na	He	Na
	充填材スタック高さ [mm]	900			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	0/2150			
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
スペーサ	形式	ワイヤ型			
	材料	PNC-FMS			
	ワイヤ直径 [mm]	1.67		1.20	
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	171.2			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	181.2			
	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0			
集合体	バンドル規模 [本]	271		631	
	要素配列ピッチ [mm]	10.22		6.73	
	P/D	1.20		1.22	
	集合体配列ピッチ [mm]	187.2			

表 1.3 Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

集合体		To集合体		Cul集合体	
充填材	材料	To	Zr-H	Cul	Zr-H
	形態	ペレット		ペレット	
	外径 [mm]	8.08	8.52	3.86	4.6
	充填材スミア密度 [%]	80	90	50	90
被覆管	材料	ODS鋼			
	外径 [mm]	10.40		5.50	
	内径 [mm]	8.98		4.84	
	肉厚 [mm]	0.71		0.33	
要素	全長 [mm]	2710			
	直径ギャップ [mm]	0.90	0.46	—	0.24
	ボンド材	He	Na	He	Na
	充填材スタック高さ [mm]	1000			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	1220/400			
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
	スペーサ	形式	ワイヤ型		
材料		PNC-FMS			
ワイヤ直径 [mm]		1.05		1.20	
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	172.1			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	182.1			
	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0			
集合体	バンドル規模 [本]	217		631	
	要素配列ピッチ [mm]	11.5		6.76	
	P/D	1.11		1.23	
	集合体配列ピッチ [mm]	186.1			

表 1.4 強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

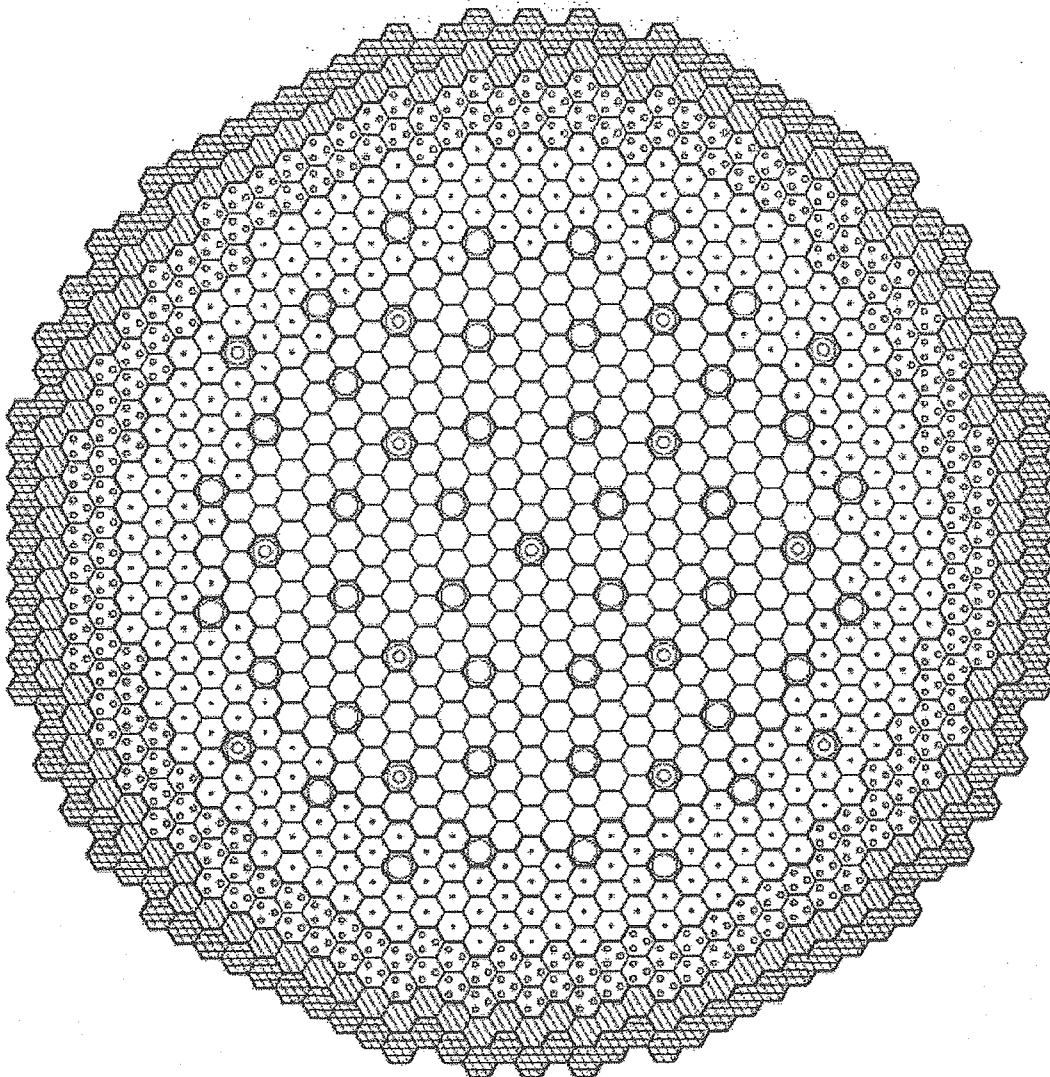
集合体		To集合体		Cul集合体	
充填材	材料	To	Zr-H	Cul	Zr-H
	形態	ペレット		ペレット	
	内径 [mm]	0.0			
	外径 [mm]	5.780	6.140	4.4	4.46
充填材スミア密度 [%]	80	90	70	90	
被覆管	材料	ODS鋼			
	外径 [mm]	7.30		5.30	
	内径 [mm]	6.46		4.70	
	肉厚 [mm]	0.42		0.30	
要素	全長 [mm]	2905			
	直径ギャップ [mm]	0.68	0.32	0.30	0.24
	ボンド材	He	Pb-Bi	He	Pb-Bi
	充填材スタック高さ [mm]	1050			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	730/410			
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
	スペーサ	形式	グリッド型		
材料		PNC-ODS鋼			
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	163.0			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	173.0			
	ラッパ管肉厚 [mm]	5.0			
集合体	バンドル規模 [本]	331		631	
	要素配列ピッチ [mm]	8.9		6.46	
	P/D	1.22		1.22	
	集合体配列ピッチ [mm]	177.5			

表 1.5 自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

集合体		Tc集合体		CuI集合体	
充填材	材料	Tc		CuI	
	形態	ペレット		ペレット	
	内径 [mm]	0.0			
	外径 [mm]	6.78	7.19	3.86	4.60
	充填材スミア密度 [%]	80	90	50	90
被覆管	材料	ODS鋼			
	外径 [mm]	8.50		5.50	
	内径 [mm]	7.58		4.84	
	肉厚 [mm]	0.46		0.33	
要素	全長 [mm]	2540			
	直径ギャップ [mm]	0.80	0.39	0.98	0.24
	ボンド材	He	Pb-Bi	He	Pb-Bi
	充填材スタック高さ [mm]	700			
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	1080/760			
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
スペーサ	形式	グリッド型			
	材料	PNC-ODS鋼			
ラッパ管	材料	PNC-FMS			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	211.3			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	205.3			
	ラッパ管肉厚 [mm]	3.0			
集合体	バンドル規模 [本]	271		631	
	要素配列ピッチ [mm]	12.5		8.1	
	P/D	1.47		1.47	
	集合体配列ピッチ [mm]	215.3			

表 1.6 He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心装荷用 LLFP ターゲット集合体仕様

集合体		Tc集合体		YI <sub>3</sub> 集合体	
充填材	材料	Tc		YI <sub>3</sub>	
	形態	ペレット		ペレット	
	外径 [mm]	8.77	9.30	5.30	6.36
	充填材スミア密度 [%]	80	90	50	90
被覆管	材料	SiC			
	外径 [mm]	11.8		8.7	
	内径 [mm]	9.8		6.7	
	肉厚 [mm]	1.0		1.0	
要素	全長 [mm]	2600			
	直径ギャップ [mm]	1.03	0.50	1.40	0.34
	ボンド材	He			
	充填材スタック高さ [mm]	1800		540	
	ガスプレナム長(下/上) [mm]	350/350		980/980	
	初期封入ガス	He			
	初期封入ガス圧 [MPa]	0.1			
スペーサ	形式	グリッド型			
	材料	SiC			
タイロッド	タイロッド直径 [mm]	11.8		8.7	
	タイロッド本数	3			
ラッパ管	材料	SiC			
	ラッパ管外対面間距離 [mm]	215.9			
	ラッパ管内対面間距離 [mm]	211.6			
	ラッパ管肉厚 [mm]	2.2			
集合体	バンドル規模 [本]	217		397	
	要素配列ピッチ [mm]	14.24		10.55	
	P/D	1.21		1.21	
	集合体配列ピッチ [mm]	222.3			










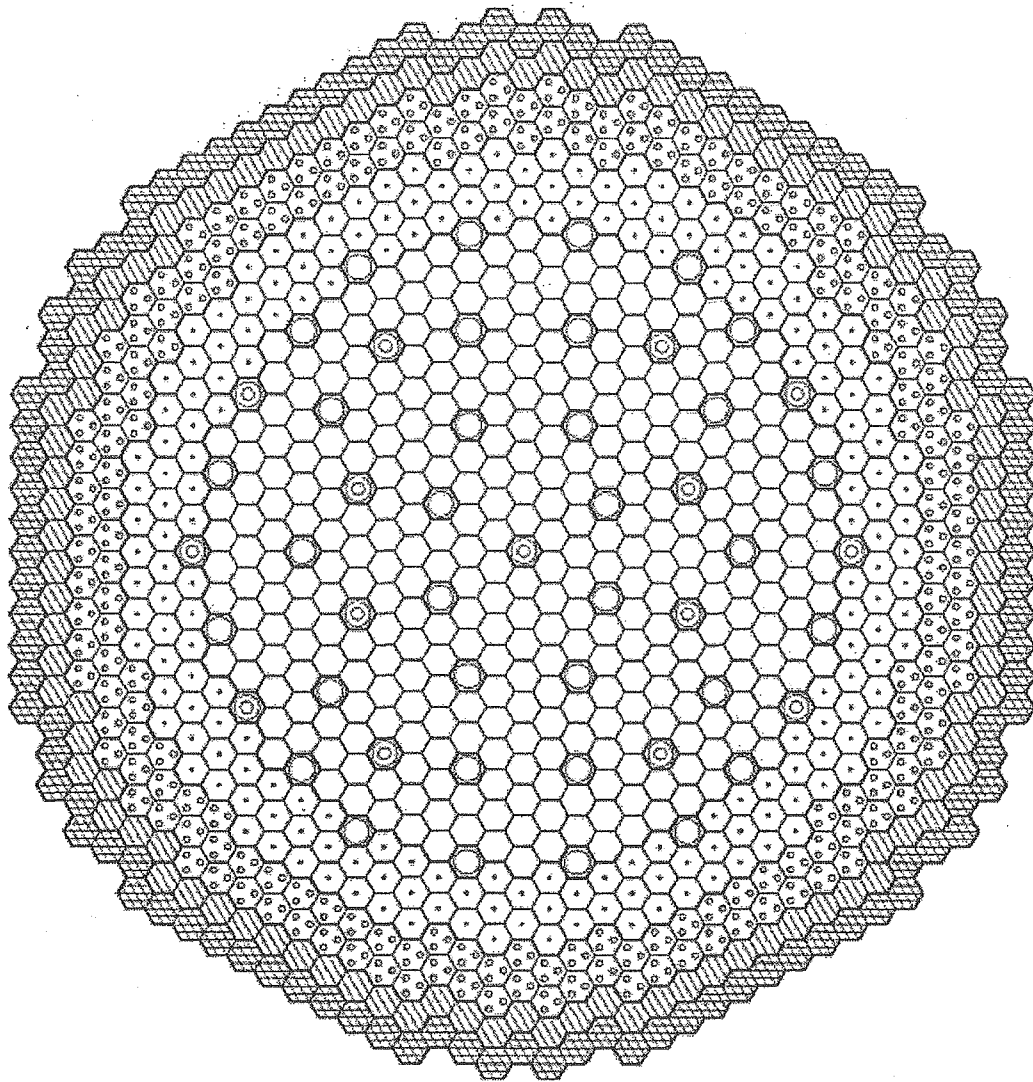
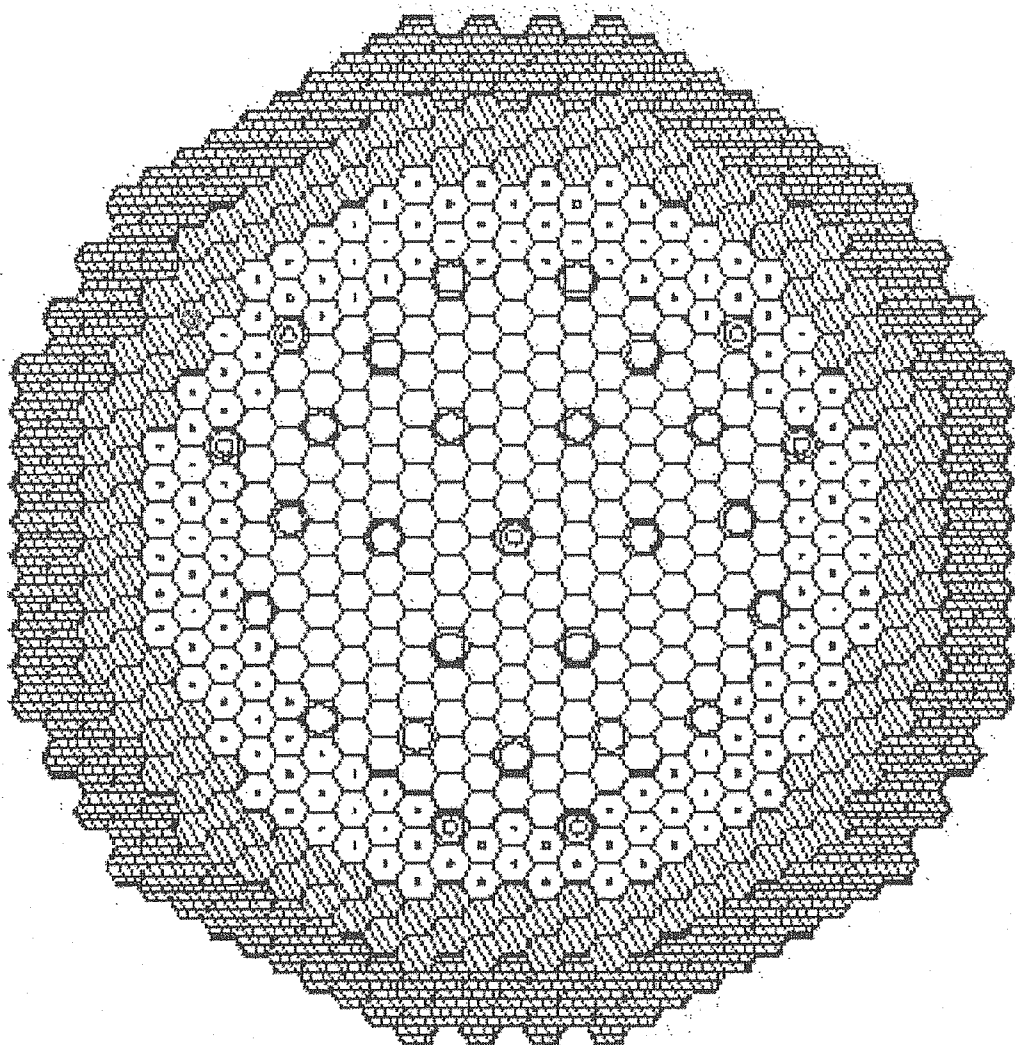
	内側炉心燃料集合体	316体
	外側炉心燃料集合体	278体
	径方向ブランケット集合体(2層)	198体
	径方向遮へい体(SUS 1層)	108体
	径方向遮へい体(ZrH 1層)	114体
	後備炉停止系制御棒	15体
	主炉停止系制御棒	40体

図 1.1 Na 冷却 MOX 燃料大型炉  
(H14 年度標準炉心)



	内側炉心燃料集合体	336体
	外側炉心燃料集合体	198体
	径方向ブランケット集合体	186体
	径方向遮へい体(SUS)	102体
	径方向遮へい体(ZrH)	108体
	後備炉停止系制御棒	15体
	主炉停止系制御棒	34体

図 1.2 Na 冷却金属燃料大型炉  
(H14 年度標準炉心)









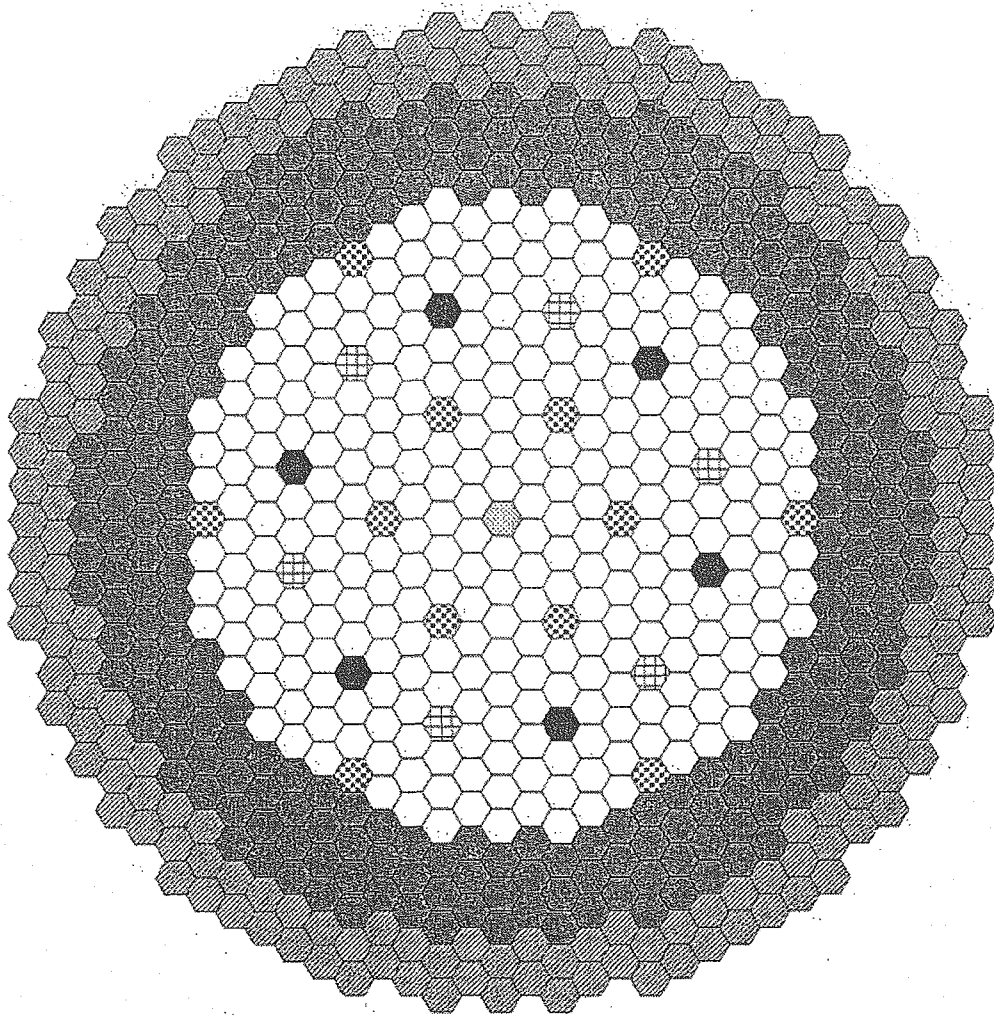
	内側炉心燃料集合体	183体
	外側炉心燃料集合体	150体
	径方向遮へい体(SUS2層)	150体
	径方向遮へい体(B <sub>4</sub> C2層)	174体
	後備炉停止系制御棒	7体
	主炉停止系制御棒	21体

図 1.3 Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉  
(H14 年度平衡期向け炉心)












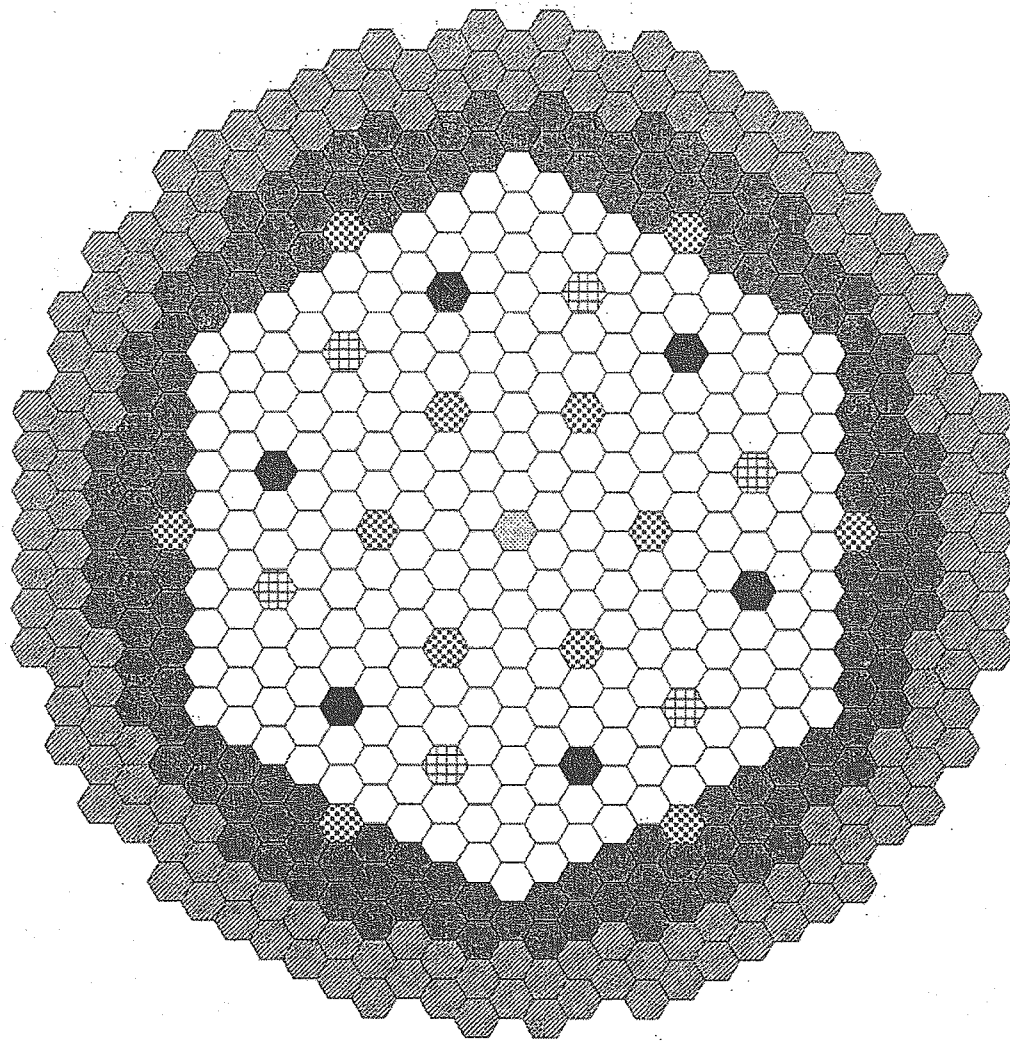
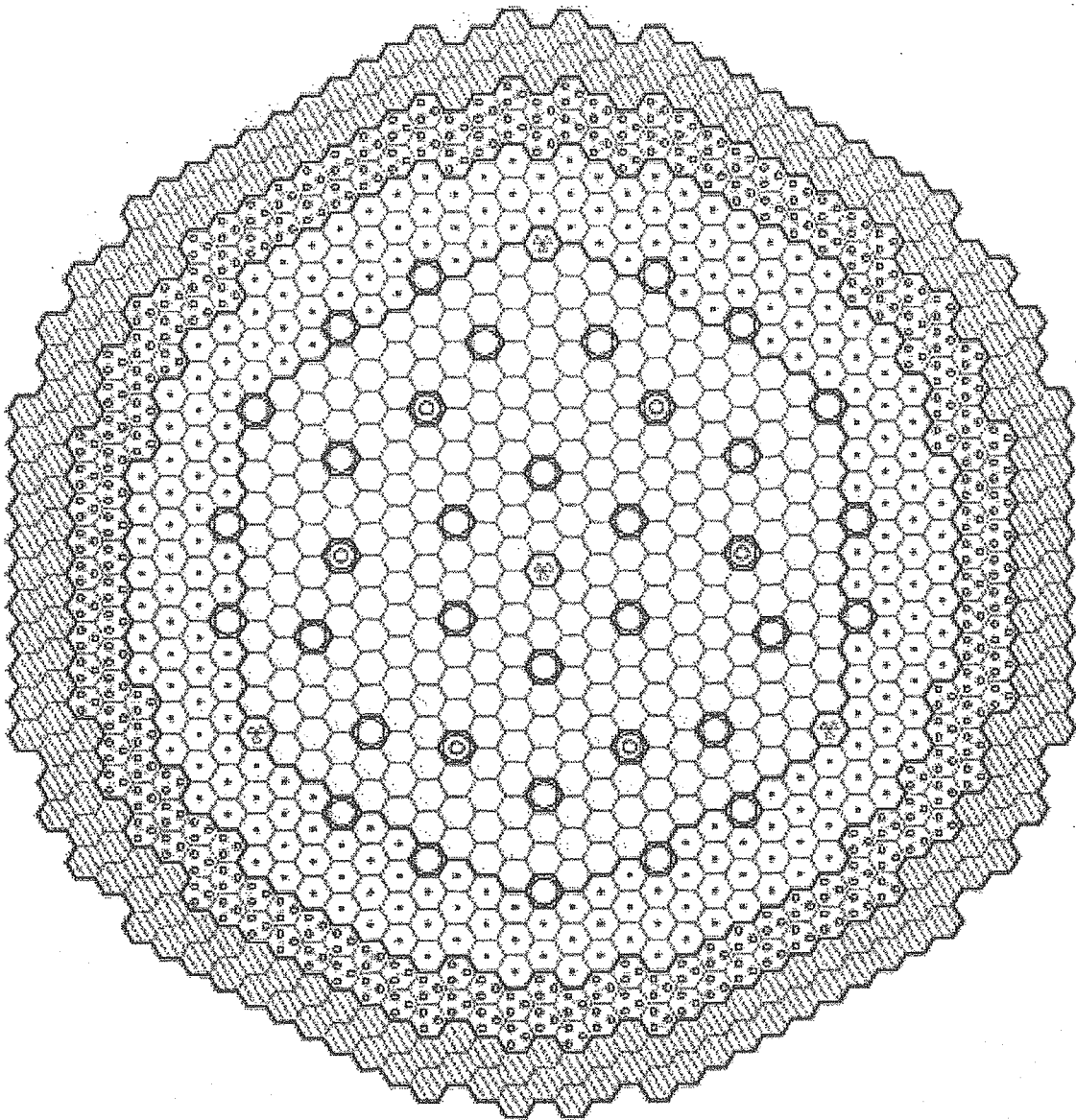
	内側炉心燃料	: 288体
	外側炉心燃料	: 246体
	炉中心ステール集合体	: 1体
	制御棒 (粗調整棒)	: 12体
	制御棒 (微調整棒)	: 6体
	制御棒 (後備炉停止棒)	: 6体
	Pb-Bi 遮へい体	: 186体

図 1.4 強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉  
(H14 年度選定炉心)



- |   |              |        |
|---|--------------|--------|
|  | 内側炉心燃料       | : 252体 |
|  | 外側炉心燃料       | : 144体 |
|  | 炉中心スチール集合体   | : 1体   |
|  | 制御棒 (粗調整棒)   | : 12体  |
|  | 制御棒 (微調整棒)   | : 6体   |
|  | 制御棒 (後備炉停止棒) | : 6体   |
|  | Pb-Bi 遮へい体   | : 162体 |

図 1.5 自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉  
(H14 年度選定炉心)










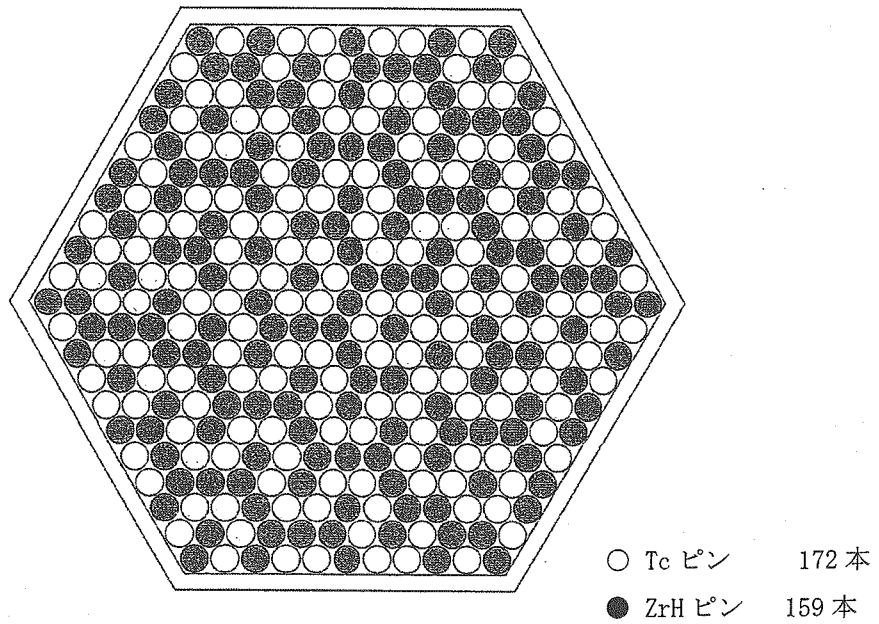
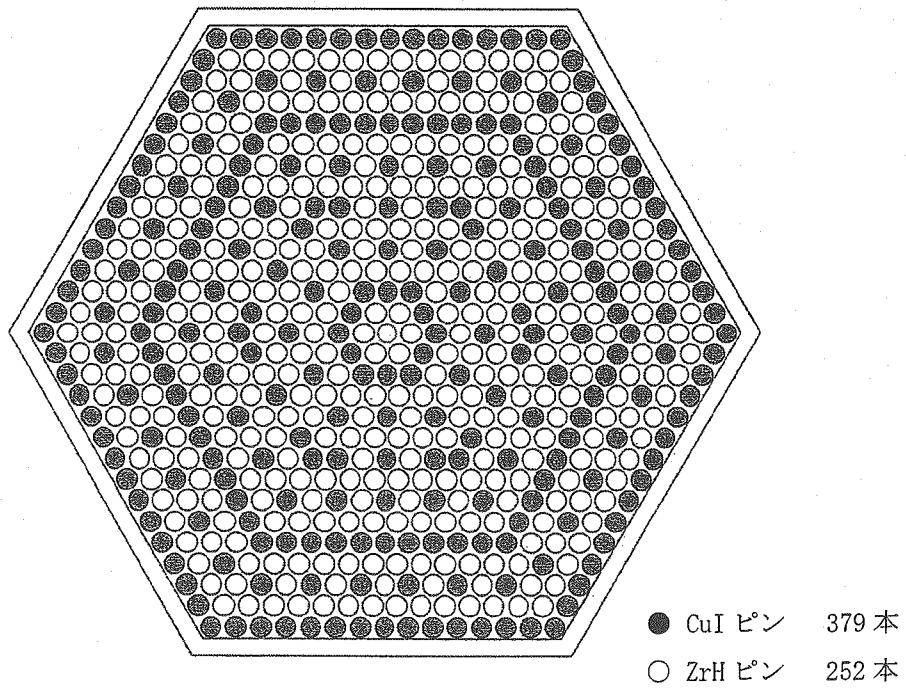
	内側炉心燃料	: 303体		外側炉心燃料	: 240体
	径方向ブランケット	: 186体		可動反射体 (SiC)	: 212体
	制御棒 (主炉停止系)	: 30体		制御棒 (後備炉停止系)	: 6体
	制御棒 (受動的炉停止系)	: 4体			

図 1.6 He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心  
(H15 年度選定炉心)

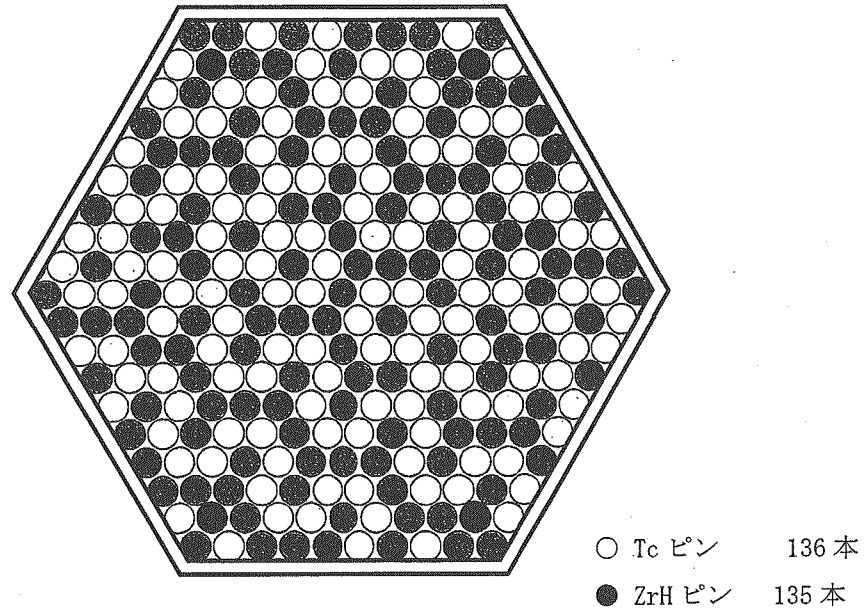


(a) Tc 集合体

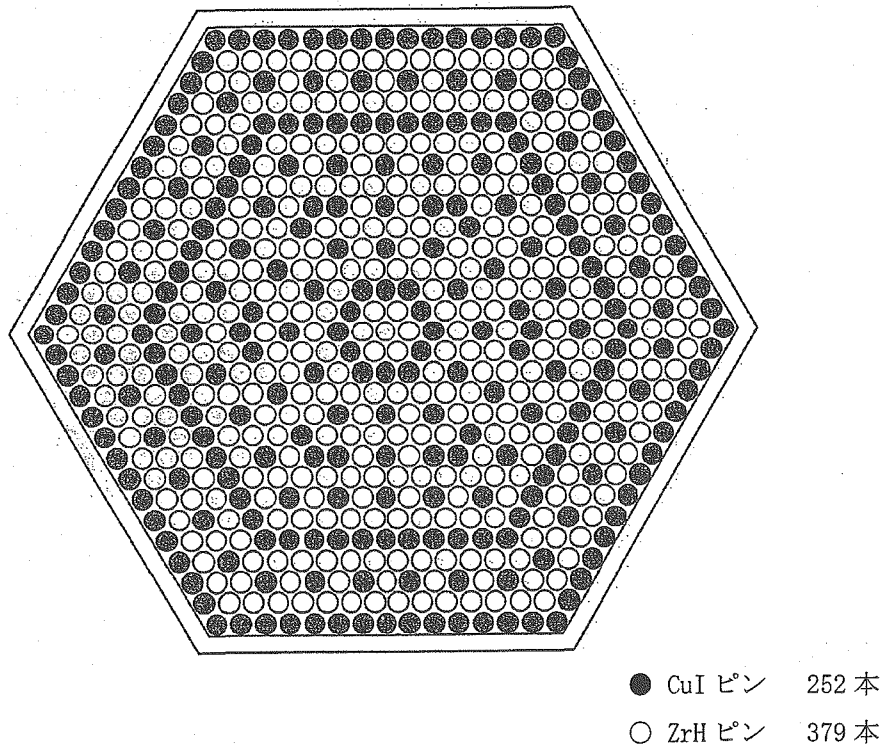


(b) CuI 集合体

図 2.1 Na 冷却 MOX 燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図

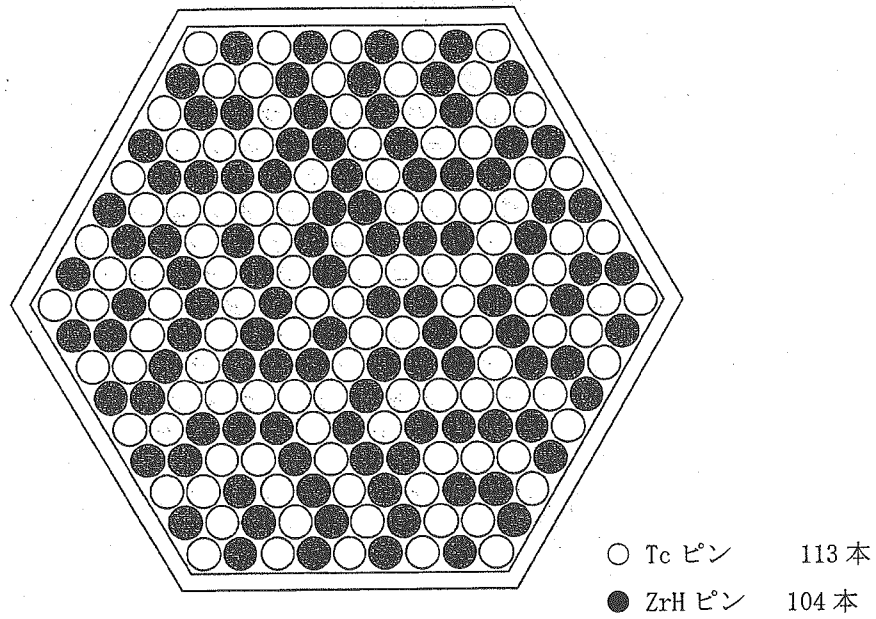


(a) Tc 集合体

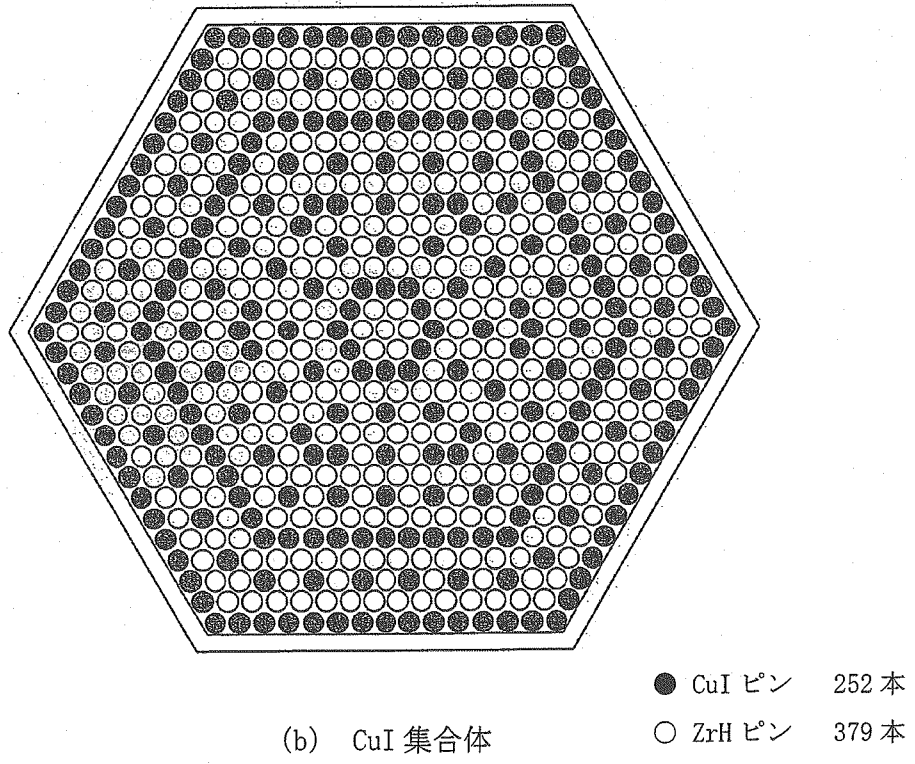


(b) CuI 集合体

図 2.2 Na 冷却金属燃料大型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図

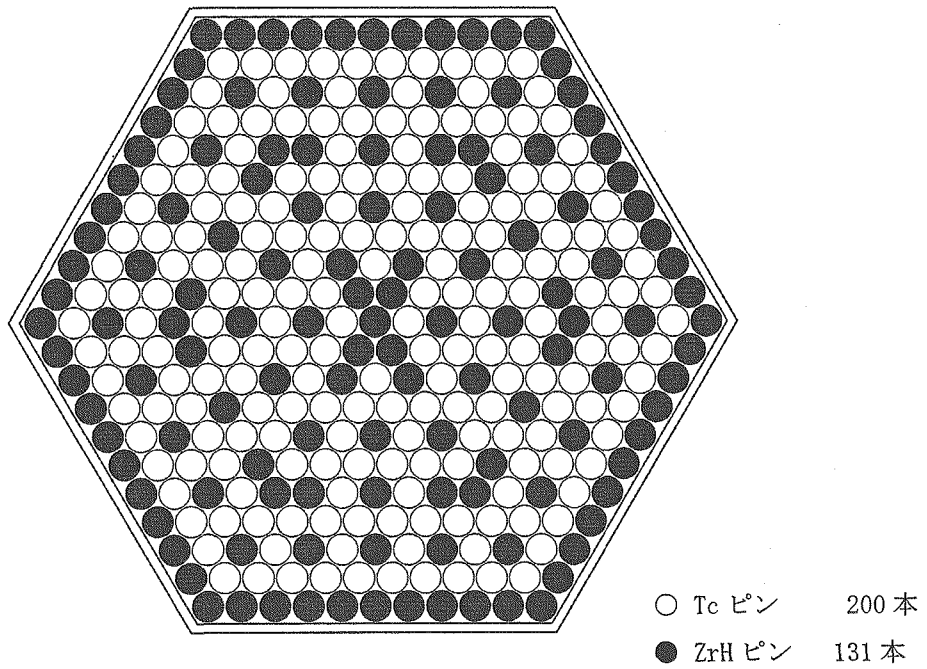


(a) Tc 集合体

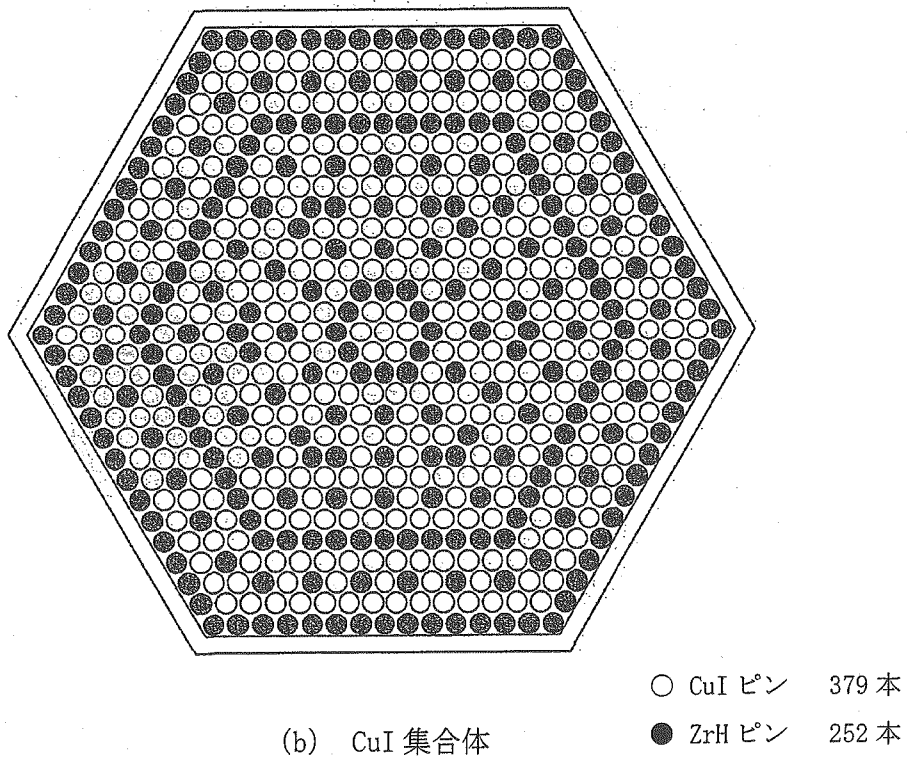


(b) CuI 集合体

図 2.3 Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図

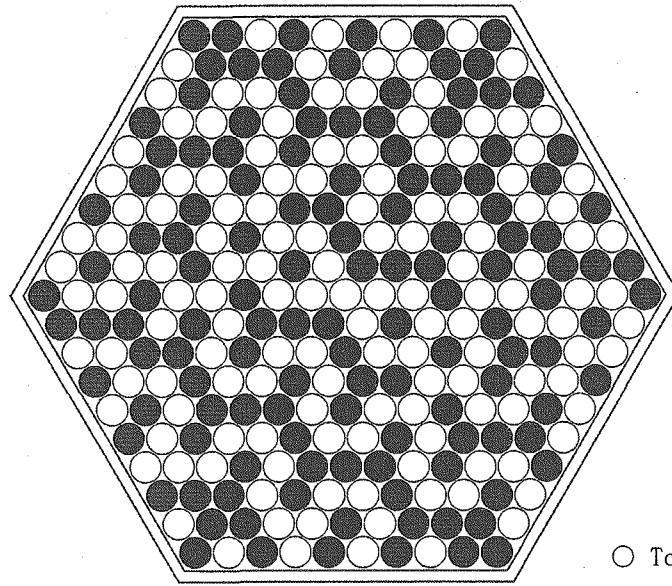


(a) Tc 集合体



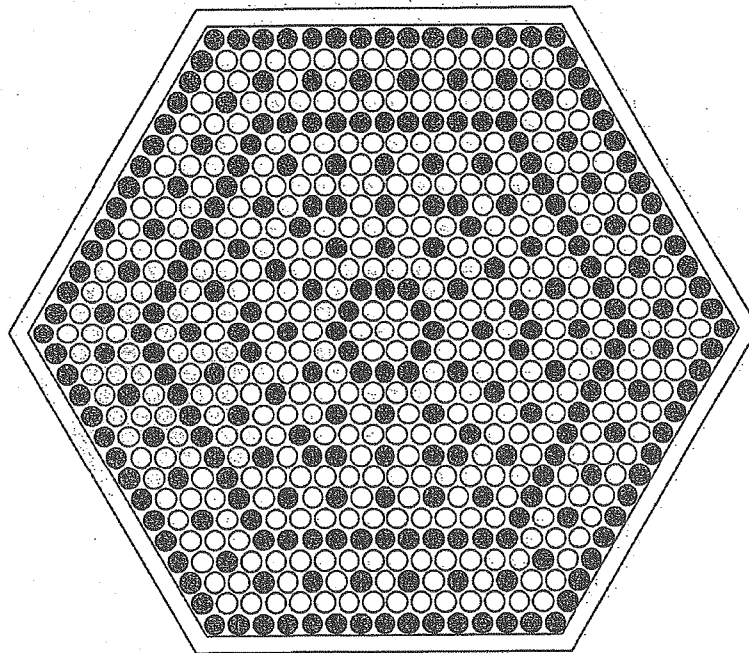
(b) CuI 集合体

図 2.4 強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図



○ Tc ピン 141 本  
● ZrH ピン 130 本

(a) Tc 集合体

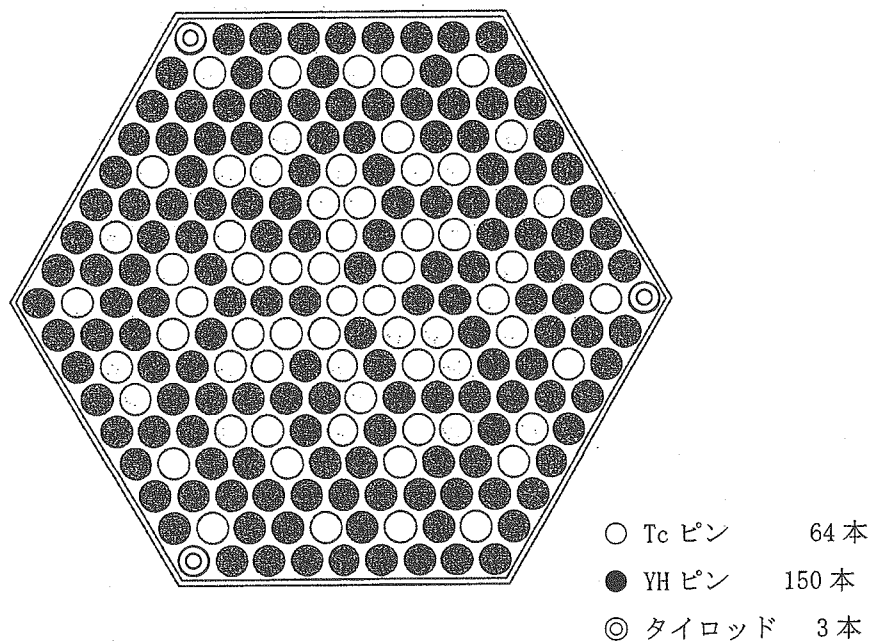


● CuI ピン 252 本  
○ ZrH ピン 379 本

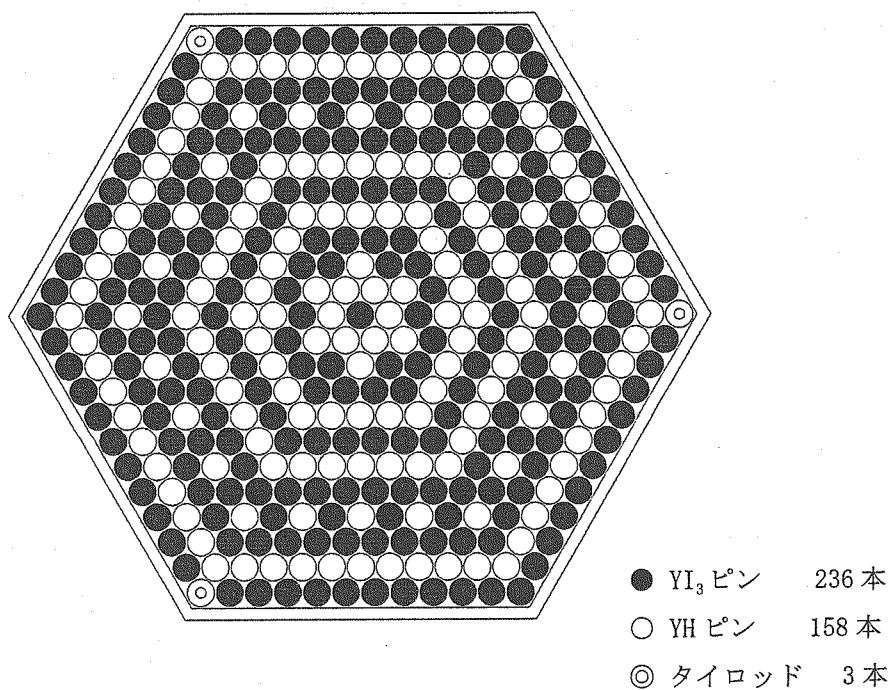
(b) CuI 集合体

図 2.5 自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図





(a) Tc 集合体



(b) YI<sub>3</sub> 集合体

図 2.6 He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心装荷用 LLFP ターゲット集合体の概念図

### 3. 解析方法

LLFP 核変換率に対する補正因子を、基準となる決定論計算による設計計算とモンテカルロ計算による詳細計算の比較より評価した。以下に、計算条件を示す。

#### ① 計算コード

- i) 設計計算・・・(CITATION-FBR コード) 拡散近似、7 群、R-Z 体系 (70 群実効断面積作成には SLAROM コード、7 群への縮約には JOINT コードを使用。ゾーン及びメッシュの分割は設計計算方法<sup>[1]</sup>に従った。)
- ii) 詳細計算・・・(MVP コード<sup>[2]</sup>) 輸送理論、連続エネルギー、Hex-Z 体系 (LLFP ターゲット集合体のみ非均質にモデル化、その他は均質)、ヒストリー数 約 6000 万

#### ② 核データライブラリ・・・(CITATION-FBR コード) JFS-3-J3.2R<sup>[3]</sup> (MVP コード) JENDL-3.2<sup>[4]</sup>

#### ③ 中性子束規格化方法・・・炉心全体の核分裂数で規格化

さらに要因分析のため、表 2 に示す設計計算から詳細計算に至る段階的な計算ケースを設定した。各計算ケースの段階的な比較により、次の効果を分析する。

- ・ Case-0 → Case-1 群縮約効果
- ・ Case-1 → Case-2 輸送効果
- ・ Case-2 → Case-3 決定論計算とモンテカルロ計算の比較
- ・ Case-3 → Case-4 詳細エネルギー群効果 (熱エネルギー領域の効果等を含む)
- ・ Case-4 → Case-5 炉心体系 3 次元効果
- ・ Case-5 → Case-6 LLFP ターゲット集合体非均質効果

また、本解析を行った際に明らかとなった大型炉でモンテカルロ計算を行う際の初期中性子源の設定方法についての注意点を付録 A に示す。

表 2 LLFP 核変換率補正因子の要因分析のための計算ケース

Case	計算コード	理論	LLFP 集合体 モデル	炉心 体系	エネルギー 群数
Case-0 (設計計算)	CITATION	拡散	均質	RZ	7
Case-1	CITATION	拡散	均質	RZ	70
Case-2	TWOTRAN2	輸送	均質	RZ	70
Case-3	GMVP	輸送	均質	RZ	70
Case-4	MVP	輸送	均質	RZ	連続
Case-5	MVP	輸送	均質	Hex-Z	連続
Case-6 (詳細計算)	MVP	輸送	非均質	Hex-Z	連続

## 4. 解析結果

各対象炉心・対象核種の LLFP 核変換率の補正因子を表 3 に示す。ここで、LLFP 核変換率補正因子を MVP/CITATION のように定義した。また、第 3 節で示した要因分析を含めた計算結果を表 4.1～表 4.6 及び図 5 に示す。LLFP 核変換率の補正因子には、次のような傾向が見られる。

- ・  $^{99}\text{Tc}$  の補正因子は、0.92～0.97 の範囲にある。
- ・  $^{127}\text{I}$  の補正因子は、0.83～0.89 と対象核種の中で最も小さくなっている。
- ・  $^{129}\text{I}$  の補正因子は、Na 冷却金属燃料炉心が 1.09 と他の炉心に比べ大きくなっている。一方、He ガス冷却炉心では傾向が異なり 0.95 と小さい。その他の炉心は 0.98～1.01 の範囲にある。

このように、対象炉心・対象核種によって傾向が異なっている。

### (1) 対象核種間の比較

LLFP 核変換率補正因子の変化のメカニズムを理解するために、まず対象核種間の比較を行った（具体的な数値は例として Na 冷却 MOX 燃料大型炉をとりあげる）。

Na 冷却 MOX 燃料大型炉の補正因子は、 $^{99}\text{Tc}$  が  $0.93 \pm 1.0\%$ 、 $^{127}\text{I}$  が  $0.86 \pm 1.0\%$ 、 $^{129}\text{I}$  が  $1.00 \pm 0.9\%$  である。表 4.1 の要因分析の結果からわかるように、全ての対象核種について LLFP ターゲット集合体の非均質効果 (Case-5 → Case-6) が主たる変化成分となっている。

### LLFP ターゲット集合体の非均質効果

LLFP ターゲット集合体の非均質効果は  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{127}\text{I}$ 、 $^{129}\text{I}$  についてそれぞれ、 $-5\%$ 、 $-13\%$ 、 $+5\%$  であり、中でも  $^{127}\text{I}$  に対して大きい。この非均質効果の生じるメカニズムは、対象核種それぞれの捕獲反応断面積のエネルギー分布 (図 3 及び表 5 参照) より理解することができる。共鳴反応に対しては、非均質効果はエネルギー自己遮蔽効果の増加として現れ、共鳴反応を減少させる。非均質効果について共鳴反応の減少分は、 $^{99}\text{Tc}$  が  $-16\%$ 、 $^{127}\text{I}$  が  $-14\%$  であるのに対し、 $^{99}\text{Tc}$  及び  $^{127}\text{I}$  のように顕著な共鳴ピークを持たない  $^{129}\text{I}$  では、減少量が小さく  $-5\%$  となっている。共鳴反応の減少は、共鳴を逃れる中性子の割合を増やすことになり、熱中性子エネルギー領域の反応を増加させる。これによる非均質効果の増加量は、 $^{99}\text{Tc}$  では  $+10\%$ 、 $^{127}\text{I}$  は  $+1\%$ 、 $^{129}\text{I}$  は  $+10\%$  である。 $^{99}\text{Tc}$  と  $^{129}\text{I}$  では共鳴反応の減少と熱中性子エネルギー領域の反応の増加が相殺する傾向にあることがわかる。しかし、 $^{127}\text{I}$  では熱中性子エネルギー領域の捕獲反応断面積が小さいためこの相殺が起らない。こうして、 $^{99}\text{Tc}$  及び  $^{129}\text{I}$  では正味の非均質効果が小さくなり、 $^{127}\text{I}$  では共鳴反応の減少のみが目立って現れたのである。なお、ヨウ素核変換ターゲットでは、 $^{127}\text{I}$  の共鳴吸収 (ムダ吸収) を逃れた中性子が比較的大きな熱中性子捕獲反応断面積を持つ  $^{129}\text{I}$  に吸収されるという具合に、非均質効果が核変換にとって有利に働いている点にも注目できる。

### 非均質効果以外の効果

非均質効果以外のその他の効果は、概して小さいものであるが、いくつか統計誤差に比べ無視できない寄与を与えるものがある。 $^{99}\text{Tc}$  に対する決定論計算とモンテカルロ計算の違い (Case-2 → Case-3) と詳細エネルギー群効果 (Case-3 → Case-4)、 $^{129}\text{I}$  に対する詳細エネルギー群効果 (Case-3 → Case-4) と炉心体系 3 次元効果 (Case-4 → Case-5) である。

決定論とモンテカルロの違いでは、計算に用いる実効断面積を同一にした条件で、輸送計算コードと多群モンテカルロコードを比較している。モンテカルロ計算コードの統計誤差を超える有意な相違が出るとは予想外であり、この相違についてはさらなる検討を要する。

詳細エネルギー群効果について、対象核種それぞれのエネルギー分布を図 4 に示す。Case-4 ではより正確に中性子スペクトルが評価されるようになり、熱エネルギー領域では結果として反応率の増加に結びついている。図 4 を一見すると、0.3 eV 以下で反応率が減少しているようにみえるが、0.3 eV~1 eV の領域で反応率が増加しており、これら正味の結果として熱エネルギー領域の反応率が増加している。この効果が重要となるのは熱エネルギー領域で主に反応の起こる  $^{129}\text{I}$  である。一方、共鳴領域の詳細エネルギー群効果に目を向けると、特に変化の著しいのは、 $^{99}\text{Tc}$  の 5 eV における巨大共鳴であり、その反応率は約半分に減少している。他の共鳴ではこれほどの変化は生じていない。Case-0 から Case-3 までの計算で用いた実効群定数は高速炉体系の重み関数で作成されている点や、このような大きな共鳴には NR 近似が適当でない可能性がある。このため、 $^{99}\text{Tc}$  の巨大共鳴周辺のエネルギー群の分割をより細かく扱った格子計算による群定数作成が必要であると考えられる。

炉心体系 3 次元効果は熱中性子エネルギー領域で生じており、熱中性子が炉心体系のモデル化に敏感なことを示唆している。有意な影響の出るのは  $^{129}\text{I}$  のみである。

### (2) 対象炉心間の比較

上では、Na 冷却 MOX 燃料大型炉に着目してきたが、他の対象炉心ではどうなっているか見ることにしよう。図 5 に LLFP 核変換補正因子に対する要因を各対象炉心間で比較したものを示す。これより、He ガス冷却炉を除き、各対象炉心の LLFP 核変換補正因子は Na 冷却 MOX 燃料大型炉と類似していることがわかる。すなわち、それら炉心では LLFP ターゲット集合体の非均質効果が LLFP 核変換補正因子の主たる要因となっている。

He ガス冷却炉が他と異なる点として、 $^{99}\text{Tc}$  に対して各効果の大きさが大きいこと、一方、 $^{129}\text{I}$  に対しては、非均質効果に伴う熱エネルギー領域の反応の増加が小さいことが挙げられる。He ガス冷却炉の LLFP ターゲット集合体の中性子スペクトルは、Tc、I 双方ともに他の炉心に比べ熱化が進んでおり、Tc ターゲットについては巨大共鳴に対する感度の高まりが補正因子の各効果の大きさを増加させ、I ターゲットについては共鳴領域の反応が初めから少なく、非均質効果がかかっても熱エネルギー領域の反応増加に結びつかなかったようで

ある（表 4.6 参照）。

Na 冷却金属燃料炉心の  $^{129}\text{I}$  補正因子は 1.09 と他の炉心に比べ大きい。熱エネルギー領域に対する詳細エネルギー群効果や LLFP ターゲット集合体の非均質効果が大きいことが要因となっている。なぜ金属燃料炉心でこれらが顕著となるのか定性的な理由は不明である。

以上、LLFP 核変換率の補正因子を評価し、その変化のメカニズムを考察した。LLFP ターゲット集合体の非均質効果については、対象核種の捕獲反応の熱中性子エネルギー領域から共鳴領域にかけた断面積の形状によって、非均質効果が物理的に説明できることを示した。また、決定論計算とモンテカルロ計算の違いや詳細エネルギー群効果など、さらに検討を必要とする部分も明らかとなった。

なお、LLFP 核変換率補正因子計算の品質保証のための方策として、Na 冷却 MOX 燃料大型炉を用いて、全ての減速材ピンを LLFP ピンで置き換え、中性子スペクトルを硬化させ、通常の高速炉ブランケット位置程度とした場合の計算を行った。計算結果を付録 B に示す。

表3 LLFP 核変換率補正因子

炉心	Tc 集合体	CuI 集合体 ( $YI_3$ 集合体*)	
	$^{99}Tc$	$^{127}I$	$^{129}I$
Na 冷却 MOX 燃料大型炉	0.93±1.0%	0.86±1.0%	1.00±0.9%
Na 冷却金属燃料大型炉	0.97±0.5%	0.85±0.9%	1.09±0.8%
Na 冷却 MOX 燃料中型高内部転換型炉	0.92±0.7%	0.86±0.7%	1.01±0.6%
強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉	0.93±0.6%	0.87±0.8%	0.98±0.8%
自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉	0.94±0.8%	0.83±0.6%	0.99±0.6%
He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心	0.94±0.4%	0.89±0.6%	0.95±0.5%

\* He ガス冷却炉心の場合

表 4.1 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却 MOX 燃料大型炉)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.002	0.140	0.861
Case-2	0.986	0.133	0.853
Case-3	1.03±3% (1σ相当)**	0.13	0.91
Case-4	1.00±3% (1σ相当)**	0.13	0.87
Case-5	0.98±3% (1σ相当)**	0.13	0.86
Case-6 (詳細計算)	0.93±1.0% (1σ)***	0.23	0.70

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 300 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 3000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.999	0.065	0.934
Case-2	0.995	0.063	0.932
Case-3	1.01±3% (1σ相当)**	0.06	0.95
Case-4	1.03±3% (1σ相当)**	0.06	0.96
Case-5	0.99±3% (1σ相当)**	0.06	0.93
Case-6 (詳細計算)	0.86±1.0% (1σ)***	0.07	0.79

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 300 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 3000 万。



(表 4.1 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.000	0.490	0.510
Case-2	0.979	0.469	0.510
Case-3	$1.00 \pm 3\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.48	0.52
Case-4	$1.00 \pm 3\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.49	0.51
Case-5	$0.95 \pm 3\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.45	0.50
Case-6 (詳細計算)	$1.00 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ )***	0.55	0.45

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 300 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 3000 万。

表 4.2 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却金属燃料大型炉)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.998	0.132	0.866
Case-2	0.994	0.125	0.869
Case-3	$1.05 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.93
Case-4	$1.03 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.13	0.90
Case-5	$1.01 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.89
Case-6 (詳細計算)	$0.97 \pm 0.5\%$ ( $1\sigma$ )***	0.21	0.76

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.988	0.105	0.883
Case-2	1.032	0.101	0.930
Case-3	$1.03 \pm 1\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.93
Case-4	$1.07 \pm 1\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.11	0.96
Case-5	$1.06 \pm 1\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.96
Case-6 (詳細計算)	$0.85 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ )***	0.13	0.72

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(表 4.2 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.988	0.649	0.339
Case-2	0.985	0.626	0.359
Case-3	0.98±1% (1 $\sigma$ 相当)**	0.62	0.36
Case-4	1.03±1% (1 $\sigma$ 相当)**	0.67	0.36
Case-5	0.99±1% (1 $\sigma$ 相当)**	0.63	0.36
Case-6 (詳細計算)	1.09±0.8% (1 $\sigma$ )***	0.78	0.31

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

表 4.3 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果 (Na 冷却 MOX 燃料中型炉)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.999	0.133	0.866
Case-2	0.983	0.121	0.862
Case-3	$1.02 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.90
Case-4	$1.00 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.88
Case-5	$0.96 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.11	0.85
Case-6 (詳細計算)	$0.92 \pm 0.7\%$ ( $1\sigma$ )***	0.19	0.73

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.998	0.103	0.895
Case-2	1.028	0.093	0.935
Case-3	$1.00 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.09	0.91
Case-4	$1.05 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.95
Case-5	$1.02 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.09	0.93
Case-6 (詳細計算)	$0.86 \pm 0.7\%$ ( $1\sigma$ )***	0.11	0.75

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(表 4.3 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.000	0.662	0.338
Case-2	0.948	0.592	0.356
Case-3	0.93±0.7% (1σ相当)**	0.58	0.35
Case-4	0.96±0.7% (1σ相当)**	0.62	0.34
Case-5	0.91±0.7% (1σ相当)**	0.57	0.34
Case-6 (詳細計算)	1.01±0.6% (1σ)***	0.71	0.30

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

表 4.4 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果(強制循環 Pb-Bi 冷却中型炉)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.001	0.089	0.912
Case-2	0.986	0.084	0.902
Case-3	$1.01 \pm 0.8\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.08	0.93
Case-4	$1.01 \pm 0.8\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.09	0.92
Case-5	$0.98 \pm 0.7\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.08	0.90
Case-6 (詳細計算)	$0.93 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ )***	0.13	0.80

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.997	0.062	0.935
Case-2	0.999	0.058	0.941
Case-3	$1.00 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.06	0.94
Case-4	$1.01 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.06	0.95
Case-5	$0.99 \pm 1.0\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.06	0.93
Case-6 (詳細計算)	$0.87 \pm 0.8\%$ ( $1\sigma$ )***	0.07	0.80

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(表 4.4 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.996	0.476	0.520
Case-2	0.975	0.449	0.526
Case-3	0.97±0.7% (1σ相当)**	0.45	0.52
Case-4	0.99±0.7% (1σ相当)**	0.47	0.52
Case-5	0.95±0.8% (1σ相当)**	0.44	0.51
Case-6 (詳細計算)	0.98±0.8% (1σ)***	0.51	0.47

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

表 4.5 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果(自然循環 Pb-Bi 冷却中型炉)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.998	0.126	0.872
Case-2	0.991	0.120	0.871
Case-3	$1.03 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.91
Case-4	$1.01 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.89
Case-5	$0.99 \pm 0.7\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.12	0.87
Case-6 (詳細計算)	$0.94 \pm 0.8\%$ ( $1\sigma$ )***	0.19	0.75

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.985	0.104	0.881
Case-2	1.014	0.101	0.913
Case-3	$1.01 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.91
Case-4	$1.02 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.92
Case-5	$1.01 \pm 1.0\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.10	0.91
Case-6 (詳細計算)	$0.83 \pm 0.6\%$ ( $1\sigma$ )***	0.11	0.72

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。



(表 4.5 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  (CuI 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.984	0.656	0.328
Case-2	0.977	0.636	0.341
Case-3	0.97±0.8% (1 $\sigma$ 相当)**	0.63	0.34
Case-4	1.00±0.8% (1 $\sigma$ 相当)**	0.67	0.33
Case-5	0.96±0.8% (1 $\sigma$ 相当)**	0.63	0.33
Case-6 (詳細計算)	0.99±0.6% (1 $\sigma$ )***	0.70	0.29

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

表 4.6 LLFP 核変換率補正因子とその分析結果(He ガス冷却被覆粒子型燃料炉心)

(a)  $^{99}\text{Tc}$  (Tc 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	0.999	0.307	0.692
Case-2	0.990	0.292	0.698
Case-3	1.06±0.8% (1σ相当)**	0.25	0.81
Case-4	1.00±0.8% (1σ相当)**	0.29	0.71
Case-5	0.99±0.7% (1σ相当)**	0.28	0.71
Case-6 (詳細計算)	0.94±0.4% (1σ)***	0.41	0.53

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(b)  $^{127}\text{I}$  (YI<sub>3</sub> 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal (<1eV)	Resonance (>1eV)
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.008	0.161	0.847
Case-2	1.023	0.152	0.871
Case-3	1.02±1.1% (1σ相当)**	0.15	0.87
Case-4	1.03±1.1% (1σ相当)**	0.16	0.87
Case-5	1.02±1.1% (1σ相当)**	0.15	0.87
Case-6 (詳細計算)	0.89±0.6% (1σ)***	0.15	0.74

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

(表 4.6 続き)

(c)  $^{129}\text{I}$  ( $\text{YI}_3$ 集合体)

計算ケース	捕獲反応率*		
	Total	Thermal ( $<1\text{eV}$ )	Resonance ( $>1\text{eV}$ )
Case-0 (設計計算)	1.000	—	—
Case-1	1.013	0.754	0.259
Case-2	0.978	0.712	0.266
Case-3	$0.96 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.70	0.26
Case-4	$0.99 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.73	0.26
Case-5	$0.95 \pm 0.9\%$ ( $1\sigma$ 相当)**	0.69	0.26
Case-6 (詳細計算)	$0.95 \pm 0.5\%$ ( $1\sigma$ )***	0.71	0.24

\* Case-0 の捕獲反応率 (Total) に規格化

\*\* 1回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 600 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

\*\*\* 初期乱数を変えた 10 回の計算より統計誤差を評価。総ヒストリー数 6000 万。

表 5 LLFP 捕獲反応断面積

核種	捕獲反応断面積 (JENDL-3.2) [barn]	
	Maxwell 分布平均 (温度 : 0.0253eV)	共鳴積分 (1/E 重み、積分範囲 : 0.5eV~100keV)
<sup>99</sup> Tc	17	311
<sup>127</sup> I	5.5	148
<sup>129</sup> I	24	29

出典 : JEF Report 14

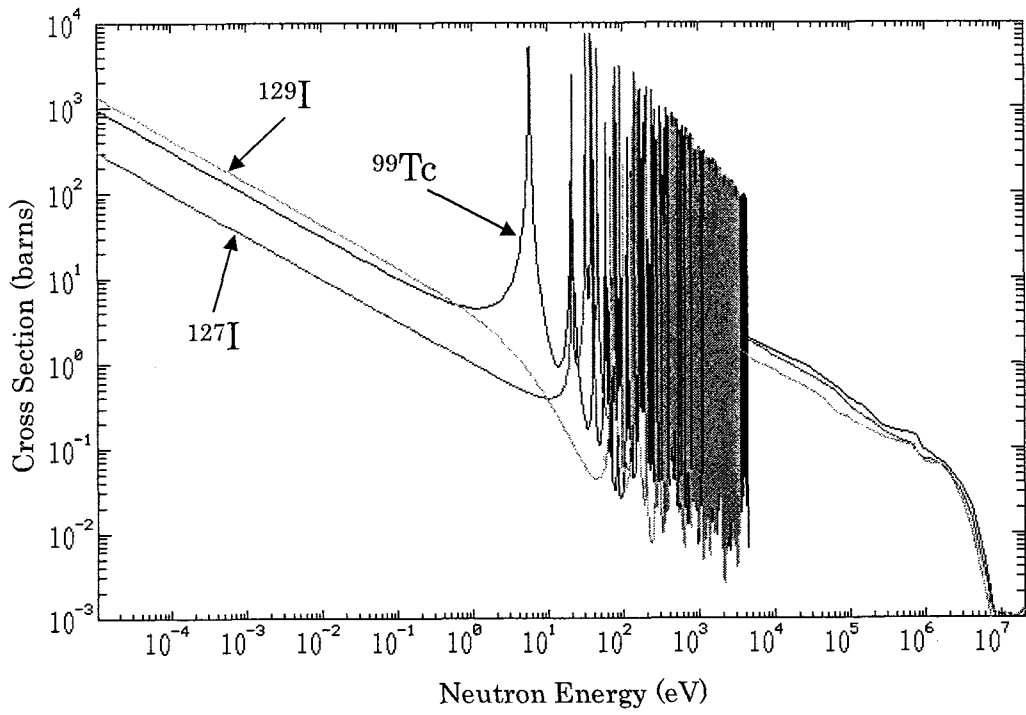
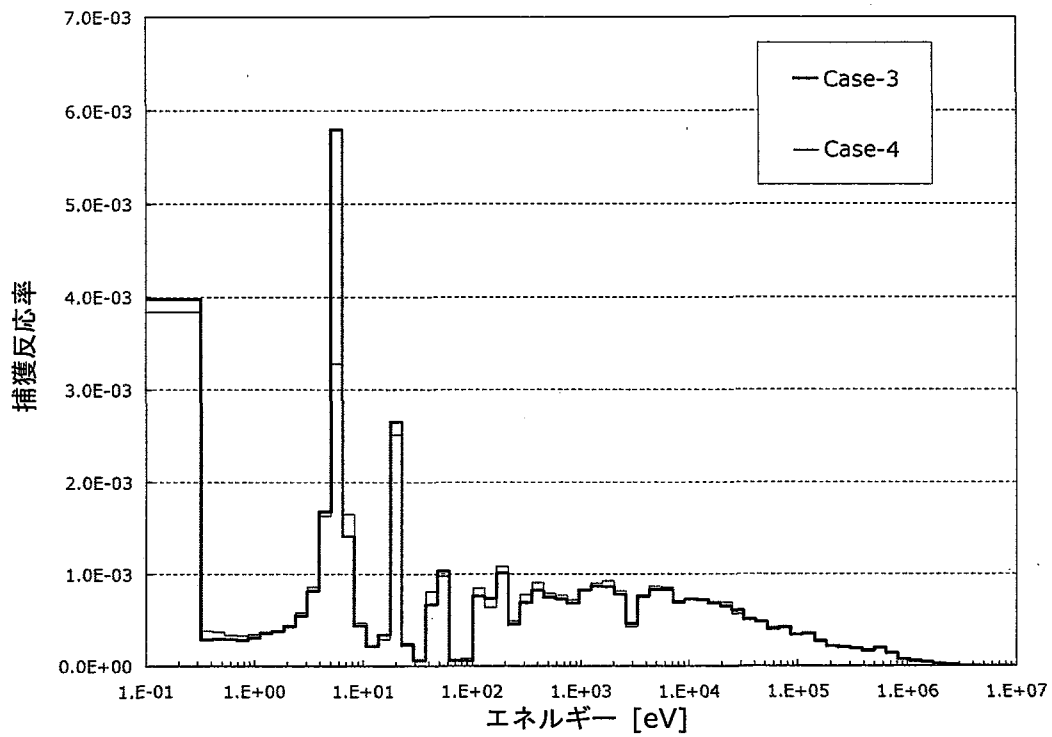
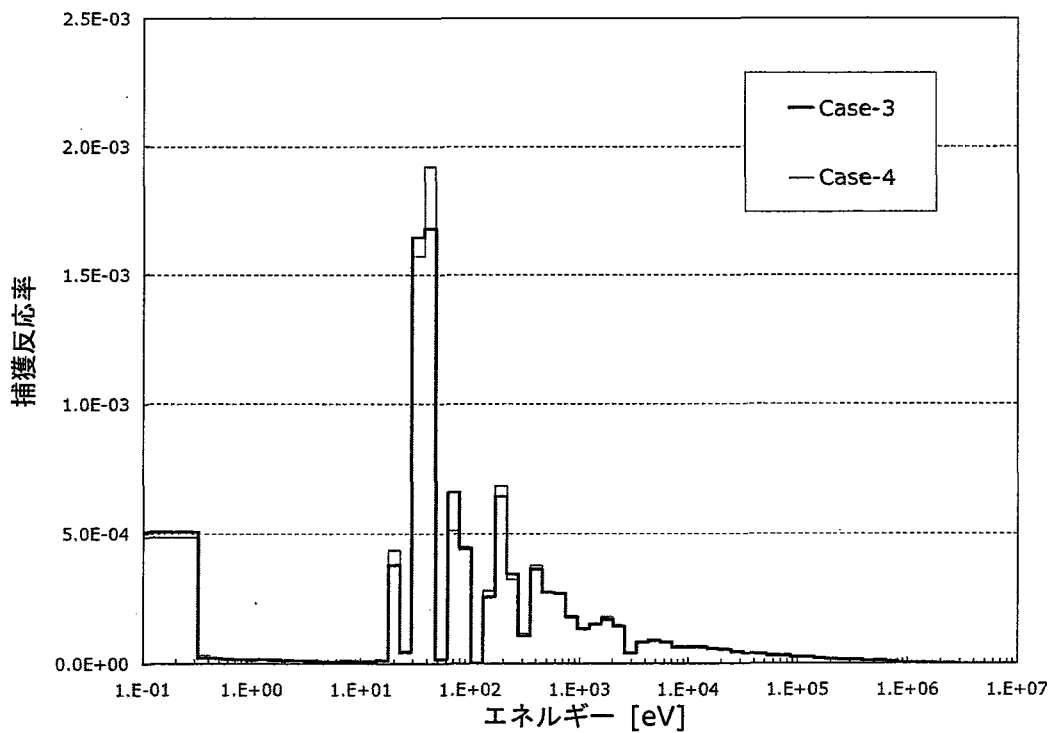


图 3 LLFP 捕獲反応断面積

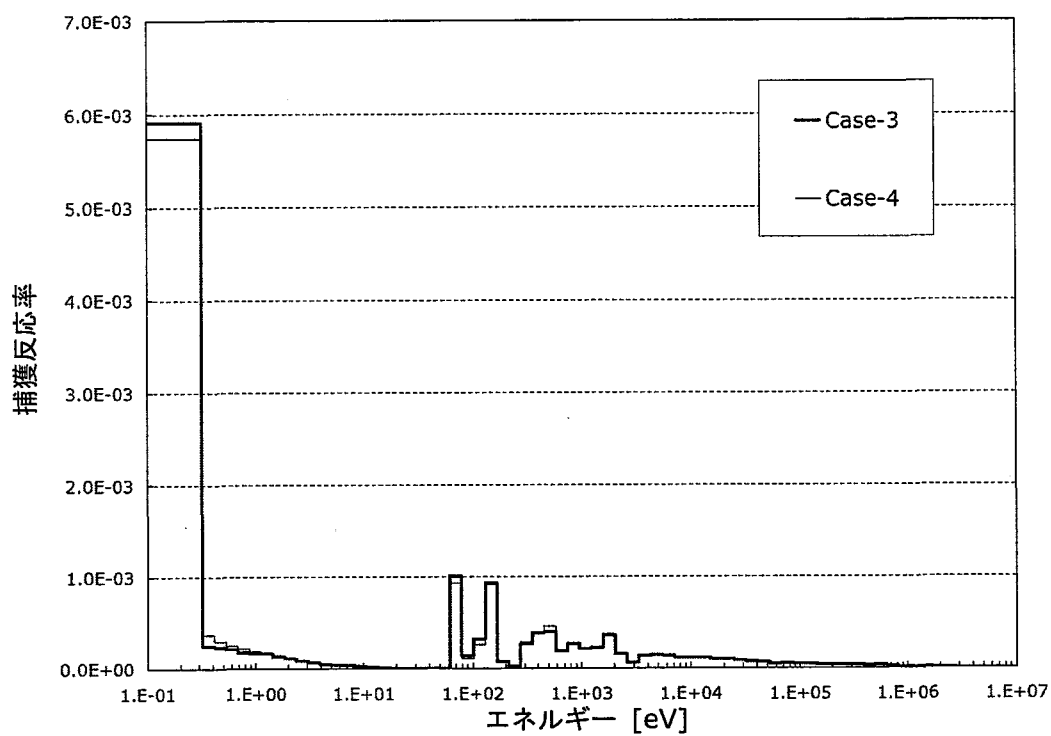


(a)  $^{99}\text{Tc}$



(b)  $^{127}\text{I}$

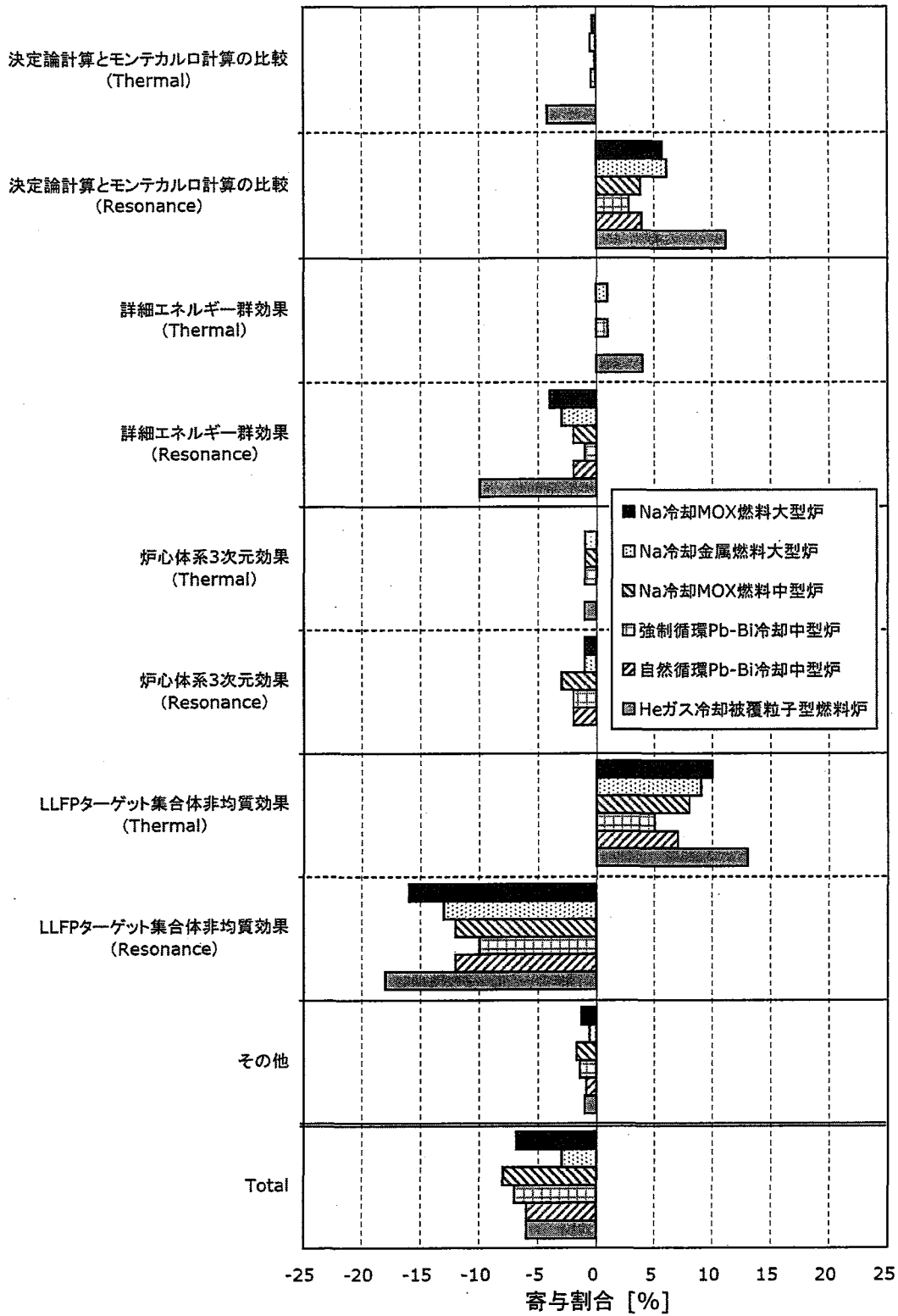
図4 LLFP 捕獲反応率の比較 (Na 冷却 MOX 燃料大型炉)



(c)  $^{129}\text{I}$

(図 4 続き)

核変換率補正因子を決定する要因

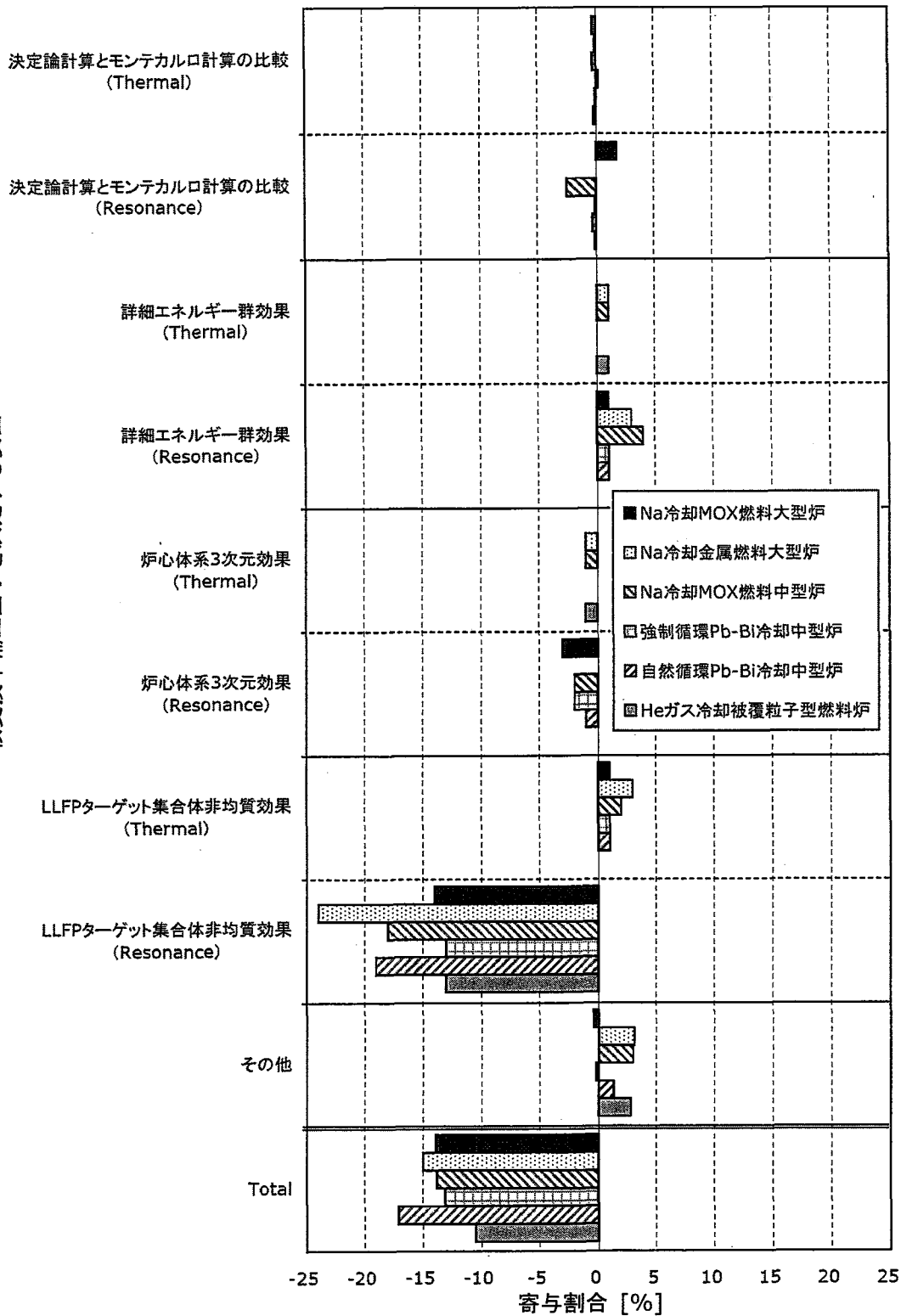


(a) <sup>99</sup>Tc

図5 LLFP核変換率補正因子の対象炉心間の比較



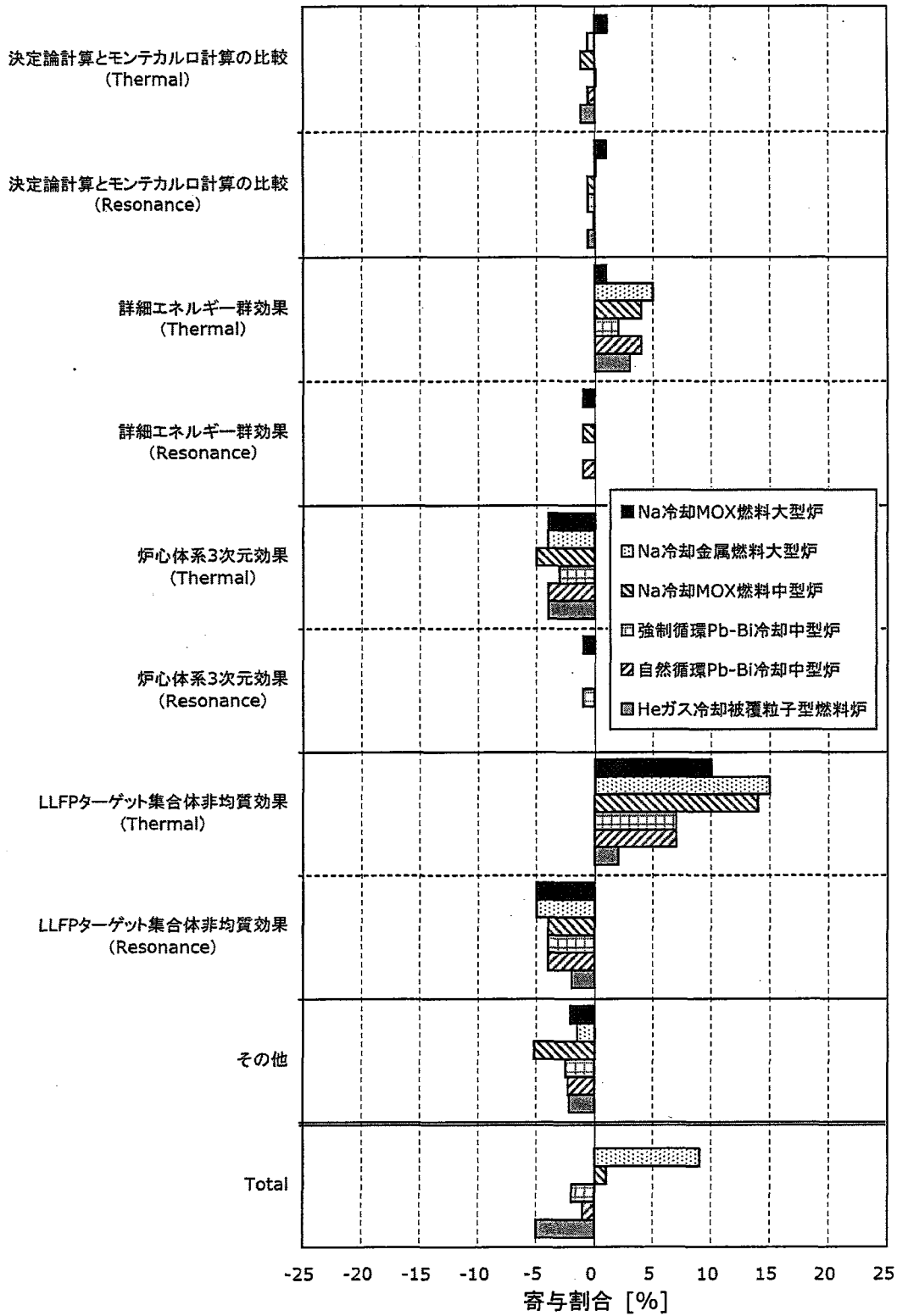
核変換率補正因子を決定する要因



(b) <sup>127</sup>I

(図 5 続き)

核変換率補正因子を決定する要因



(c) <sup>129</sup>I

(図 5 続き)

## 5. おわりに

LLFP 核変換率に対する補正因子を、決定論計算による設計計算とモンテカルロ計算による詳細計算の比較より評価した。対象炉心は、H15 年度の実用化戦略調査研究で LLFP の核変換特性が検討された Na 冷却炉 (MOX 燃料大型炉、金属燃料大型炉、MOX 燃料中型高内部転換型炉)、Pb-Bi 炉 (強制循環型、自然循環型)、He ガス冷却炉 (被覆粒子型燃料炉心) である。LLFP ターゲット集合体には、LLFP ピンと減速材ピンが充填され、対象 LLFP は  $^{99}\text{Tc}$ 、 $^{129}\text{I}$  ( $^{127}\text{I}$  も合わせて評価した) である。

解析では、設計計算から詳細計算に至る段階的な計算ケースを設定し、①群縮約効果、②輸送効果、③決定論計算とモンテカルロ計算の比較、④詳細エネルギー群効果 (熱エネルギー領域の効果等を含む)、⑤炉心体系 3 次元効果、⑥LLFP ターゲット集合体非均質効果の 6 段階の要因分析、さらに、これらの効果を熱エネルギー領域と共鳴領域の寄与に分けて分析を行った。その結果、対象炉心・対象核種によって変化傾向は若干異なるものの、LLFP ターゲット集合体の非均質効果が主要因であることがわかった。また、非均質効果のメカニズムについても対象核種の捕獲反応断面積のエネルギー分布と整合がとれていることを確認した。

## 参考文献

- [1] 高木 直行, 他: “Na 炉、Pb-Bi 炉、ガス炉における元素分離 LLFP の核変換特性 (その 2)” , JNC TN9400 2004-028 (2004) .
- [2] 森 貴正, 中川 正幸: “MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード” , JAERI-Data/Code 94-007 (1994) .
- [3] 千葉 豪, 沼田 一幸: “JENDL-3.2 に基づく高速炉用炉定数 JFS-3-J3.2R の作成” , JNC TN9400 2001-124 (2002) .
- [4] T.Nakagawa, *et al.* : “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2 : JENDL-3.2” , *J. Nucl. Sci. Technol.*, 32, 1259 (1995).

## 付録 A モンテカルロ計算時の注意点

今回の LLFP ターゲット集合体の非均質性評価を行った際、LLFP ターゲット領域(径方向ブランケット領域、径方向反射体領域、径方向遮蔽体領域などの炉心外周部) の中性子束レベルについて、決定論計算とモンテカルロ計算との間に約 10%の相違が見られる問題が起こった。この相違について調査した結果、モンテカルロ計算における初期中性子源の設定方法に原因があることがわかった。ここでは、この問題解決のための調査過程と解決方法について示す。

本文中の Na 冷却 MOX 燃料大型炉の解析でこの問題が発生したときのモンテカルロ計算は、初期中性子源を炉心中央部に配置し、最初の 20 バッチ (約 40 万ヒストリー) を捨てバッチとしていた。ZPPR-9 炉心 (等価炉心直径: 約 240cm) では、この方法でも中性子束が収束していない初期バッチの計算値を除去するのに十分であった。しかし、炉心サイズの大きな炉心 (Na 冷却 MOX 燃料大型炉、等価炉心直径: 約 490cm) では初期中性子源に起因する中性子束分布の偏りが残り、捨てバッチ数 20 では不十分であった (下図参照)。そこで、捨てバッチ数を増やす (ここでは 50) とともに、初期中性子源を炉心燃料領域全体に広げることで、中性子束レベルについて見られた決定論計算とモンテカルロ計算との間の約 10%の相違が解消した。

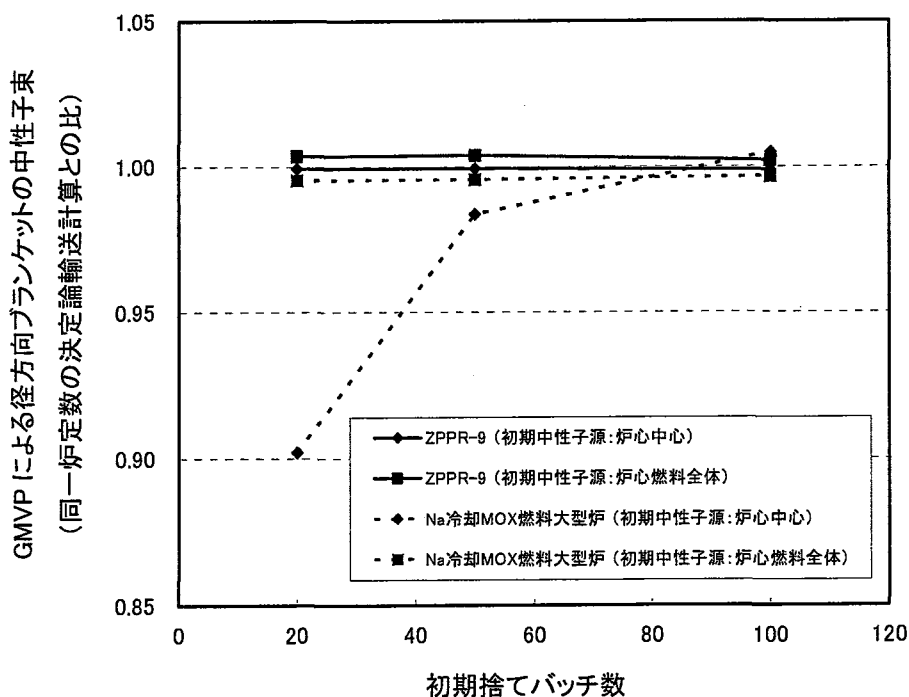


図 径方向ブランケット中性子束の初期捨てバッチ数依存性

## 付録 B 減速材を無くした場合の LLFP 核変換率補正因子

LLFP 核変換率補正因子計算の品質保証のための一方策として、全ての減速材ピンを LLFP ピンで置き換え、中性子スペクトルの軟化度合いを通常の高速度炉程度とした場合の計算を行った。これにより、熱エネルギー領域の寄与は無くなるため、反応率の変化要因が熱エネルギーの取り扱いに起因するものは現れなくなる。本文中の Na 冷却 MOX 燃料大型炉についての計算結果を下表に示す。

表 LLFP 核変換率補正因子\*の分析 (減速材なしの場合)

Case	Tc 集合体	CuI 集合体	
	<sup>99</sup> Tc	<sup>127</sup> I	<sup>129</sup> I
Case-0 (設計計算)	1.000	1.000	1.000
Case-1	1.005	1.007	1.006
Case-2	0.990	0.988	0.987
Case-3**	0.98±3%	0.99±3%	0.99±3%
Case-4**	0.99±3%	0.98±3%	0.99±3%
Case-5**	0.98±3%	0.94±3%	0.94±3%
Case-6 (詳細計算) **	0.97±3%	0.95±3%	0.94±3%

\* Case-0 に規格化

\*\* 1 回のモンテカルロ計算による値 (ヒストリー数 300 万)。統計誤差に初期乱数依存性を考慮。

減速材を無くした場合の核変換率補正因子は、<sup>99</sup>Tc、<sup>127</sup>I、<sup>129</sup>I について、それぞれ 0.97、0.95、0.94 となった (統計誤差が大きいので参考値とする)。LLFP ターゲット集合体の非均質効果や、<sup>99</sup>Tc の共鳴反応についての Case-2 から Case-4 にかけての変化 (本文中の表 4.1 参照) は現れなくなった。しかし、<sup>127</sup>I 及び <sup>129</sup>I では Case-4 から Case-5 にかけての約 5% の減少 (炉心体系 3 次元効果) が生じる結果となった。この炉心体系 3 次元効果は <sup>99</sup>Tc には生じておらず、両者で一貫性を欠いている。この原因は不明であり、今後の調査が必要である。