

島根原子力発電所 3号炉 審査資料	
資料番号	S3-EP-002(説)
提出年月日	令和4年7月5日

# 島根原子力発電所 3号炉

## LANCRコード説明書

---

令和4年7月  
中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

**Energia**

1.	目的と概要	目的	.....	P.2
		概要	.....	P.3
		概要 計算フロー	.....	P.4
		解析モデルの概要	.....	P.5
		解析条件適用範囲	.....	P.7
2.	重要現象についてのモデル化と妥当性確認について	.....		P.8
		PIRT及びモデル性能比較表	.....	P.9
		モデルに対する検証・妥当性確認の網羅性確認	.....	P.13
3.	解析モデル	核データライブラリ	.....	P.14
		詳細エネルギー群断面積データ処理	.....	P.15
		詳細エネルギー群中性子スペクトル計算, 中間エネルギー群実効断面積計算...	.....	P.16
		燃料集合体中性子輸送計算	.....	P.17
		ガンマ線輸送計算及び出力分布計算	.....	P.18
		燃焼計算	.....	P.19
4.	検証及び妥当性確認	概要	.....	P.20
		試験による妥当性確認(例)	.....	P.22
		ベンチマーク問題による検証(例)	.....	P.24
		連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認(例)	.....	P.25
5.	許認可解析への適用	検証及び妥当性確認結果のまとめ 不確かさのまとめ	.....	P.27

# 1. 目的と概要

## 目的

燃料集合体核特性計算コードLANCR Ver.1（以下、「LANCR」という。）は、計算モデルを高度化することで、燃料集合体の核特性に対するシミュレーションの信頼性向上を目的として開発された、新しい知見に基づくコードである。

燃料集合体内の中性子の空間及びエネルギー分布計算にエネルギー多群の中性子輸送計算法を採用すると共に、核種の生成・崩壊計算において個別に取り扱う核種数を十分多くとった燃焼チェーンモデルを用いることにより計算モデルの信頼性を向上させている。

LANCRは、三次元沸騰水型原子炉模擬計算コードAETNA Ver.1（以下、「AETNA」という。）との組合せで使用する。

島根3号炉のチャンネルボックス厚肉化に伴う、炉心設計や安全解析等の評価においては、最新知見を反映する観点から9×9燃料（A型）に関してLANCRを使用することとしている。

# 1. 目的と概要

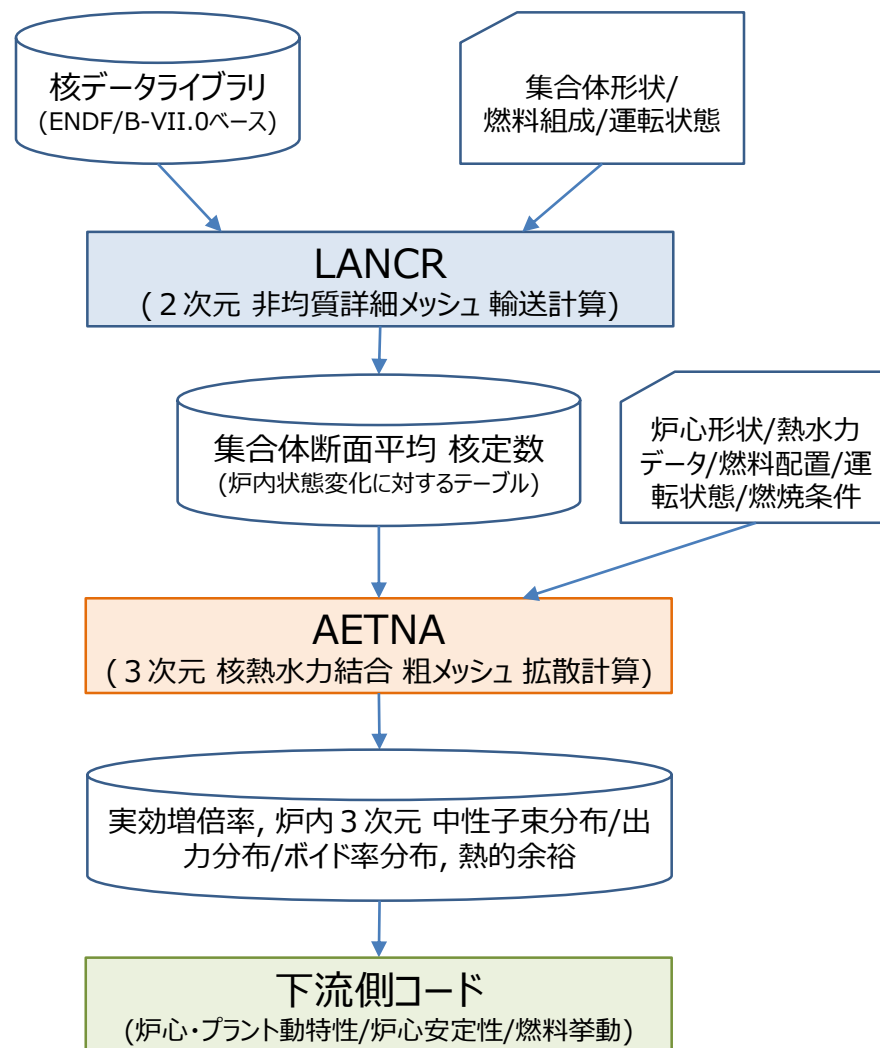
## 概要

### LANCR

集合体形状や燃料組成などの設計情報と核データライブラリを用いて、2次元無限格子体系での燃料集合体断面の核特性を非均質輸送計算により評価する。この計算は炉心内で集合体を経験する代表的な状態に対し網羅的に実行され、各状態における結果は、燃料集合体断面平均核定数テーブルを構成する。

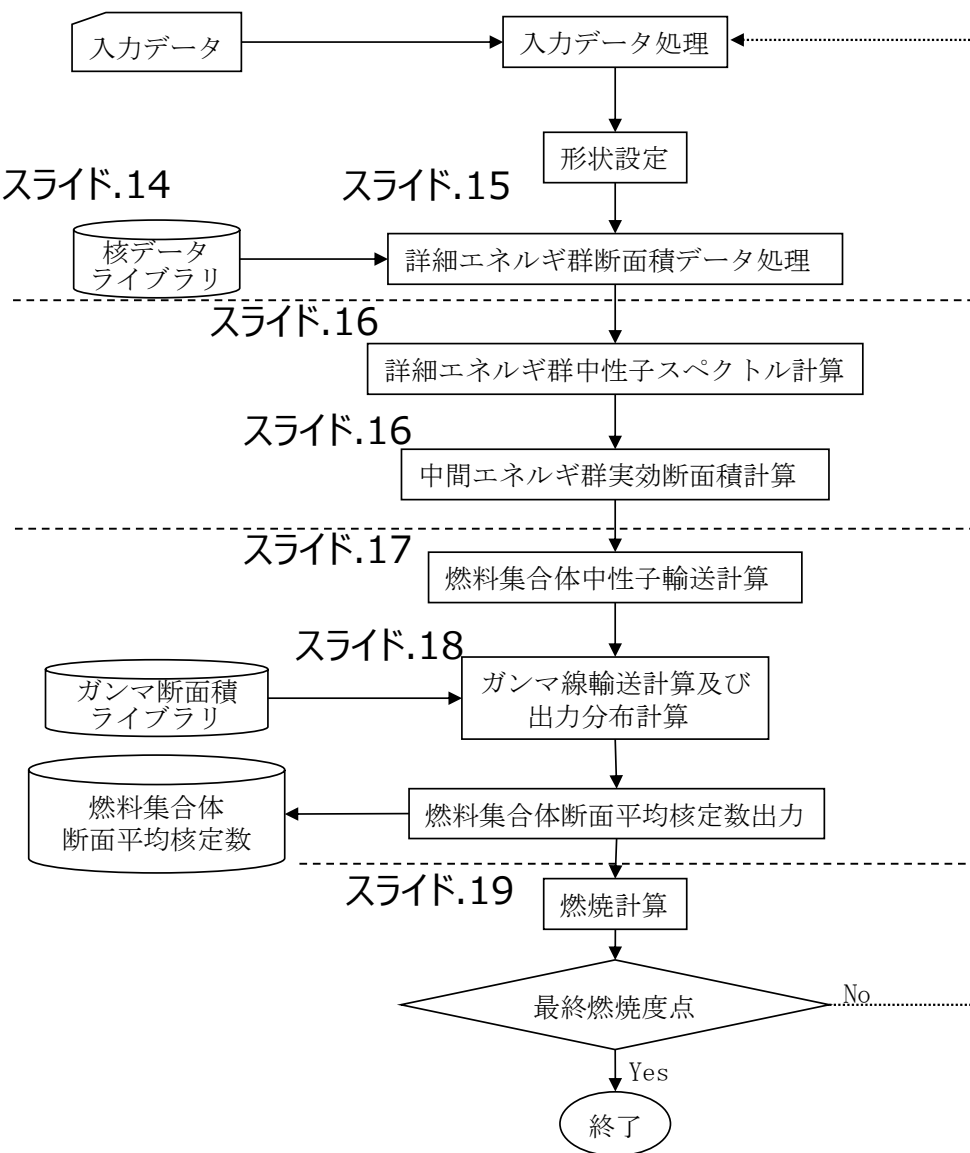
### AETNA

燃料集合体断面平均核定数や熱水力データを用いて、炉心の熱出力・流量・制御棒パターンなどの運転状態に対応した臨界性や熱的余裕を評価する。出力は下流コードであるプラント動特性計算コード及び炉心安定解析コードや燃料棒熱・機械設計コードに受け渡す。

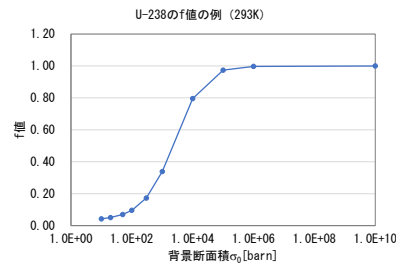


# 1. 目的と概要

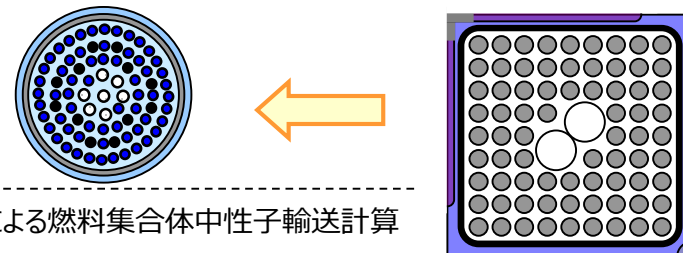
## 概要 計算フロー



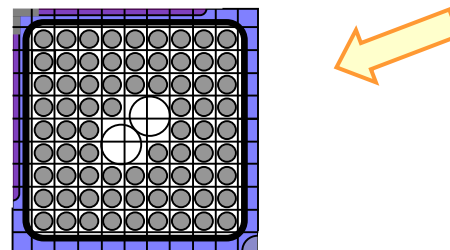
Bondarenko形式の核データライブラリを用いた実効断面積計算



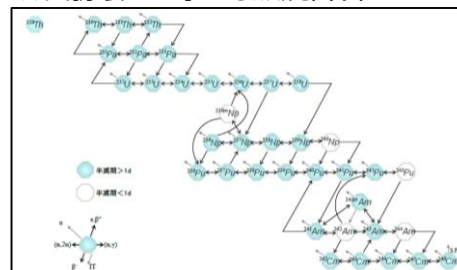
円筒クラスタ体系による高速な詳細群中性子スペクトル計算



改良CCCP法による燃料集合体中性子輸送計算



核種の生成・崩壊量を求める燃焼計算



# 1. 目的と概要

## 解析モデルの概要(1)

### 入力データ処理

燃料集合体の形状，燃料棒毎の核種組成とその配置，減速材や構造材の組成，これらの温度などの状態量や計算オプション等を読み込む。

### 形状設定

入力データ中の形状データから中性子輸送計算や燃焼計算等で必要となる燃料棒配列，チャンネルボックスや水ロッド形状を含む燃料集合体の断面幾何形状や，幾何形状と関連づけられた領域毎の物質組成データを設定する。

### 詳細エネルギー群断面積データ処理

核データライブラリファイルからBondarenko形式の詳細エネルギー群中性子反応断面積データを読み込み，詳細エネルギー群中性子スペクトル計算で必要となる実効断面積を求める。

### 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算

詳細エネルギー群の実効断面積を中性子輸送計算で必要となる中間エネルギー群断面積にエネルギー縮約するための中性子スペクトルを計算する処理である。

### 中間エネルギー群実効断面積計算

円筒クラスタ体系の詳細エネルギー群スペクトルを用いて詳細エネルギー群の実効断面積をエネルギー縮約し，実形状燃料集合体体系における物質組成領域毎の中間エネルギー群実効断面積を計算する。

# 1. 目的と概要

## 解析モデルの概要(2)

### 燃料集合体中性子輸送計算

2次元燃料集合体体系を対象に、改良Current Coupling Collision Probability（以下、「改良CCCP法」という。）法による中性子輸送計算を行い、燃料集合体内の中性子束分布を計算する。

### ガンマ線輸送計算及び出力分布計算

ガンマ線輸送計算は、中性子輸送計算の結果から得られる核分裂起源のガンマ線源を入力とし、燃料集合体体系内のガンマ線束分布を計算し、ガンマ線エネルギーの燃料棒への付与量とガンマ検出器の応答を評価する。出力分布計算は、燃料集合体内で発生する核分裂エネルギーの総量を、「燃料棒内の核分裂発生点で局所的に付与される成分」と「発生点から空間輸送により再配分される成分」に分離し、それぞれを燃料棒毎の出力として求め合算する機能である。

### 燃料集合体断面平均核定数出力

燃料集合体中性子輸送計算及びガンマ線輸送計算の結果から、AETNAが必要とする中性子反応断面積、遅発中性子割合、核分裂当りの放出エネルギー、核種の原子数密度・少数群ミクロ断面積、燃料棒毎の相対出力・燃焼度などを出力する処理である。

### 燃焼計算

燃焼方程式で表現される核分裂、中性子照射や放射性崩壊に伴う核種の生成・崩壊に伴う核種変換を数値計算で求める処理である。

# 1. 目的と概要

## 解析条件適用範囲

LANCRの適用範囲を以下に示す。BWR 燃料集合体の核設計及び許認可解析で実施される範囲，すなわち下流コードであるAETNA の適用範囲のうち，燃料集合体核特性計算に関わる解析条件が包含される。

LANCRの適用条件範囲

項目	適用範囲
格子サイズ	1 × 1 ~ 10 × 10
水ロッド	7 × 7, 8 × 8, 9 × 9 及び 10 × 10 燃料集合体の核特性解析に必要な形状及び配置
制御棒	B <sub>4</sub> C棒型制御棒, Hf棒型, Hf板型, Hf楕円型の制御棒ブレード
計装管	同心円形状で表される中性子及びガンマ線計装管
温度	水素, 軽水 : 293.6K ~ 800K, その他同位体 : 293K ~ 2573K
燃焼度	~100GWd/t



物理現象の重要度ランキング(PIRT\*<sup>1</sup>)の考え方をを用いて、核データライブラリ (NJOY\*<sup>2</sup>の処理, 自己遮蔽因子のテーブル (以下, 「F-table」という。)) の各種依存性) 及びLANCR本体の数学モデルについてのモデル化の網羅性をPIRT及びモデル性能比較表を用いて確認する。PIRTにおけるランキングの考え方を以下に示す。

本書におけるPIRTランキングの考え方

ランク	PIRT 重要度ランクの定義	包絡性確認の考え方
H	評価指標に対する影響が大きいと考えられる現象	該当する数学モデルを実装する。実装された数学モデルに対して、試験・実機もしくは連続エネルギーモンテカルロコード等の信頼性の高いモデルによる妥当性確認を実施する。妥当性確認が実施できない場合、それらの取り扱いについて説明する。
M	評価指標に対する影響が中程度と考えられる現象	
L	評価指標に対する影響が小さいと考えられる現象	物理現象に対するモデルの実装・検証・妥当性確認は実施せず、出力分布・実効増倍率の妥当性確認でもって総合的に確認する。 これらの現象は重要度が低いことから、本書のPIRT等では記載を省略している。
I	評価指標に対して影響を与えないか、または無視できる程度の現象	

\*1 PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) : 日本原子力学会、「シミュレーションの信頼性確保に関する ガイドライン : 2015」、AESJ-SC-A008:2015、2016年7月

\*2 NJOY : 評価済み核データ処理コード

# 2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

## PIRT及びモデル性能比較表(1)

以下に示すPIRT及びモデル性能比較表により、NJOYを用いて断面積やF-tableを作成するためのライブラリ処理において結果に与える影響が大きいと考えられる主要な現象(ランクM以上)が概ね数学モデルを有していることを確認した。(モデルを有さない項目についてはp.12で説明する)

ライブラリ処理に関するPIRT及びモデル性能比較表

評価事象			重要度ランキング 均質媒質内の中性子・光子反応 実効断面積 (連続エネルギー分解能・着目温度条件)					モデル性能比較表 "ー": 関連しない, "O": 関連する, "N/A": モデル無										
			中性子反応微視的断面積	光子生成微視的断面積	中性子エネルギースペクトル	光子反応微視的断面積	光子エネルギースペクトル	最高ランク	詳細エネルギー群ヒストグラム生成	中性子反応 共鳴断面積(273K)構築	中性子反応 共鳴断面積温度拡張	中性子反応 熱領域断面積構築	中性子エネルギースペクトル生成	中性子反応断面積エネルギー多群化	光子原子反応断面積構築	光子エネルギースペクトル生成	光子反応断面積エネルギー多群化	
均質系単一重核物質(含む軽核減速物質)内の核的物理現象			ライブラリ 処理コード(NJOY) 評価指標															
			核的現象	均質空間内エネルギー分布(空間0次元)	核反応	核分裂反応	核分裂中性子源強度											
						中性子吸収	共鳴吸収											
						中性子散乱	中性子減速(含む上方散乱) 注1											
			核的現象	均質空間内エネルギー分布(空間0次元)	光子反応	光子吸収	原子との相互作用											
						光子散乱												
						中性子	中性子源強度及びエネルギースペクトル(即発)											
			核的現象	均質空間内エネルギー分布(空間0次元)	光子エネルギー	遅発中性子	中性子割合及びエネルギースペクトル(遅発)											
						ガンマ線	ガンマ線源強度及びエネルギースペクトル											
						原子レベル	熱振動	熱中性子散乱則、原子及び分子運動 共鳴吸収に対する上方散乱効果 注2										
核的現象	均質空間内エネルギー分布(空間0次元)	原子レベル	分子結合	熱中性子散乱則、原子間結合エネルギー														
			組成/温度依存性	減速材密度/原子核熱運動														

注1: 背景となる核種は軽核減速材で仮定される1種類のみである。  
 注2: 共鳴吸収に対する上方散乱効果は、重要度ランクがM以上であるがモデル性能比較表で「N/A」のため、検証及び妥当性確認の中で不確かさを考慮する必要がある。

## 2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について PIRT及びモデル性能比較表 (2)

自己遮蔽因子は、着目核種毎に温度・背景断面積に基づきテーブル化されたF-tableを読み込むことで、着目する体系に対応する温度と背景断面積から内挿計算により推定する。  
以下のPIRT及びモデル性能比較表により、LANCRが読み込むF-tableはデータ点などに不足がなくf値を推定するためのテーブルモデルの性能に問題がないことを確認した。

F-tableのデータ形式に関するPIRT及びモデル性能比較表

評価事象			重要度ランキング 均質媒質内の中性子・光子反応 実効断面積 (着目温度・背景断面積条件下)			モデル(データベース)性能比較表 “-”: 関連しない, "O": 関連する, "N/A": モデル無				
			実効中性子反応 微視的断面積	光子原子反応 微視的断面積	最高ランク	対象とする核種・反応	エネルギー縮約スペクトルモデル	背景断面積テーブルデータ点数	温度点テーブルデータ点数	多群エネルギービンジ
燃料集合体 核特性計算コード用 定数テーブル(F-table) 評価指標  均質系単一重核物質(含む軽核減速物質)内の 核的物理現象										
核的現象	均質空間内エネルギー分布(空間0次元)	核反応	核分裂反応	核分裂中性子源強度						
			中性子吸収	共鳴吸収						
			中性子散乱	中性子減速(含む上方散乱) 注1						
	光子反応	光子吸収	原子との相互作用							
		光子散乱								
		中性子	中性子源強度及びエネルギースペクトル(即発)							
	粒子数・エネルギー	遅発中性子	中性子割合及びエネルギースペクトル(遅発)							
		ガンマ線	ガンマ線源強度及びエネルギースペクトル							
		熱振動	熱中性子散乱則、原子及び分子運動							
	原子レベル	分子結合	熱中性子散乱則、原子間結合エネルギー							
組成/温度依存性		減速材密度/原子核熱運動								

注1: 背景となる核種は軽核減速材で仮定される1種類のみ

## 2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について PIRT及びモデル性能比較表 (3)

以下のPIRT及びモデル性能評価表より、NJOYによるライブラリ処理とF-table化以外のLANCRの数学モデルは、重要な物理現象が概ねモデル化されていることを確認した。(モデルを有さない項目についてはp.12で説明する)

その他のLANCRに関するPIRT及びモデル性能比較表

評価事象			重要度ランキング											モデル性能比較表						
			中性子増倍特性	遅発中性子割合	局所出力分布	ガドリニア値	制御棒面値	ボイド反応度	ドップラ反応度	ほう素面値	減速材温度係数	燃焼後核種組成	最高ランキング	ライブラリモデル (中性子・ガンマ線)	エネルギー詳細構造	実効断面積計算	詳細エネルギースペクトル計算	中間エネルギー 2次元中性子輸送計算	2次元ガンマ線輸送計算	出力分布計算 (MeV/fss含む)
燃料集合体 核特性計算コード 評価指標  格子系核燃料内の 核的・熱的・水力的・熱機械および 材料に関する物理現象														“-”: 関連無, “O”: 関連有, “N/A”: モデル無						
核的現象	空間分布(2次元)	核反応	核分裂反応	核設計																
			中性子吸収	核分裂分布、検出器応答																
		粒子数・エネルギー	中性子	制御棒(フォロー、ハンドル含む)																
			ガンマ線	実効遅発中性子割合																
	原子レベル	熱振動	直接発熱																	
		分子結合	ドップラ効果、熱中性子散乱則																	
各種依存性	組成/形状/温度依存性	熱中性子散乱則																		
	中性子増倍特性(ノド)依存性	自己遮蔽(燃料温度依存性)																		
構成起因	冷却材 化学組成変化	燃焼スペクトル																		
熱的・水力的現象	空間分布	核分裂(即発)	ほう酸(一様分布)																	
		核分裂(遅発)	核分裂による発熱																	
	熱(出力)	冷却材 密度分布	集合体内ボイド率分布(入力値) 注1																	
材料	空間分布	燃料棒 組成分布	燃料減損、核分裂生成物、制御棒履歴、Gd燃料(燃料棒内組成分布)																	

注1: 集合体内ボイド率分布の仮定の妥当性は、AETNAの妥当性確認(ガンマスキャン)を通して実施される。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

### PIRT及びモデル性能比較表(4)

LANCRにおいて、ランクM以上の現象で数学モデルを有していないものは以下であるが、下記に記載のとおり、検証及び妥当性確認を通して解析結果に悪影響がないことを確認している。

#### 共鳴吸収に対する上方散乱効果

重核種(U-238など)の熱振動に伴う中性子の上方散乱が共鳴吸収に及ぼす効果が、特に燃料温度の高い領域で大きく、ドップラ係数に対し無視し得ない影響をもたらすことが指摘されている。NJOYは、この効果を考慮できないため、LANCRでこの効果を取り入れることはできない。したがって、LANCRでは、検証及び妥当性確認によりこの効果を不確かさとして考慮する。

#### 冷却材密度分布(集合体内ボイド率分布) (水力的現象)

LANCRにおける2次元無限体系の集合体核特性計算では、集合体内の冷却材密度分布(ボイド率分布)を通常は均一分布との仮定で計算している。これは2次元集合体コードに共通する手法上の制約による。集合体内ボイド率の均一分布仮定は、LANCRが作成した定数を使用するAENTAの燃料棒出力分布のガンマスキャンとの比較で間接的に妥当性は確認される。また、別途実施した3次元の詳細解析によれば、現行燃料の平衡炉心においてはボイド率分布の影響が大きいこと、これまでの実炉の運転実績においても本影響を起因とした燃料破損が発生していないと考えられることなどから、集合体内ボイド率分布を均一と仮定する影響は直ちに安全上問題にはならないと考えられる。

## 2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について モデルに対する検証・妥当性確認の網羅性の確認

LANCRの重要な現象に対応する数学モデルと、それらの検証・妥当性確認の網羅性は、以下の表に示すとおりであり、重要な現象とそれに対する数学モデルは、網羅的に検証・妥当性確認が実施されている（抜けがない）ことが分かる。

LANCRに関するモデル性能比較表及び評価表

評価事象	モデル性能比較表 “-”: 関連しない、“O”: 関連する、 “N/A”: モデル無	モデル性能評価		
		試験による妥当性確認	ベンチマーク問題 による検証	連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認
燃料集合体 核特性計算コード モデルと性能評価	ライブラリモデル(中性子・ガンマ線) エネルギー群構造 葉節断面積計算 詳細エネルギー スベクトル計算 中間エネルギー 2次元中性子輸送計算 2次元ガンマ線輸送計算 出力分布計算 (MeV/fiss.含む) 均質化定数計算 (βeff含む) 燃焼計算 (燃焼チエーン・領域分割) 燃焼スベクトル調整 Babcock & Wilcox臨界試験 NCA 臨界試験 BASALA臨界試験 Helstrand実効共鳴積分の実験式 MISTRAL 臨界試験 福島第二号炉の照射後試験(ウラン燃料) Dodevaard炉の照射後試験(MOX燃料) ウラン燃料棒セル問題 MOX燃料棒セル問題 BWR-ウラン燃料集合体 BWR-MOX燃料集合体 4×4体系、ガドリニア添加ウラン燃料棒2本 未燃焼組成燃料集合体に対する妥当性確認 ウラン濃縮率変化に対する妥当性確認 フルトニウム富化度変化に対する妥当性確認 ガドリニア価値 減速材ポイド係数 ほう素価値 制御棒価値 等温度係数 ドップラ係数 ガンマ線熱量 モンテカルロ燃焼計算			
格子系核燃料内の 核的・熱的・水力的・熱機械的 および材料に関する物理現象	中性子増倍特性 (燃料棒)			
	核反応	核分裂反応 中性子吸収		
	中性子数・エネルギー	中性子 ガンマ線		
	原子レベル	熱振動 分子結合		
	各種依存性	組成/形状/温度依存性 中性子増倍特性(ノード)依存性		
	構成体起因	冷却材 化学組成変化		
熱	発熱(出力)	核分裂 (即発) 核分裂 (遅発)		
	水力	冷却材 密度分布 (入力値)注1		
材料	核反応起源	燃料棒 組成分布		

注1: 集合体内ポイド率分布の仮定の妥当性は、AETNAの妥当性確認(ガンマスキャン)を通して実施される。

### 3. 解析モデル 核データライブラリ

LANCRの核データライブラリは、中性子反応断面積、崩壊定数とその分岐比、核分裂収率、原子質量、遅発中性子関連データ、及び、ガンマ断面積から構成される。ガンマ断面積データを除き、全て評価済核データファイルENDF/B-VII.0である。

#### ENDF/B-VII.0

2006年12月15日に米国の国立核データセンター（National Nuclear Data Center）から公開された評価済み核データファイル

#### 中性子反応断面積

- 背景断面積 $\sigma_b$ と温度 $T$ でテーブル化したBondarenko形式
- エネルギー群数は190群
- 評価済み核データ処理コードNJOYを用いて処理
- エネルギーレンジ  $10^{-5}$  eV ~ 20MeV
- 平均レサジ幅 約0.15
- U-238, Pu-240, Pu-242の主要共鳴吸収エネルギー領域
- 熱群カットオフエネルギー 4 eV

### 3. 解析モデル 詳細エネルギー群断面積データ処理

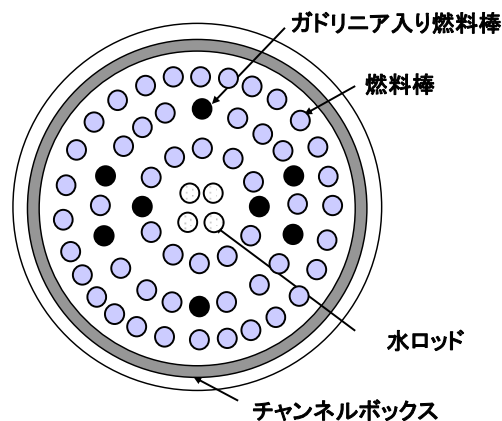
詳細エネルギー群中性子スペクトル計算で使用する実効断面積を円筒クラスタ体系で計算する。

円筒クラスタ体系における衝突確率の計算モデル

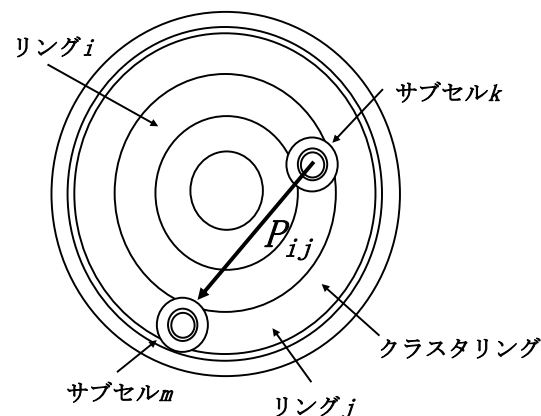
円筒クラスタ体系は、燃料棒が集合体中心から一層ずつ円筒クラスタのリング領域に配置される。

実形状における燃料棒セルは、リング内に配置されるサブセルにてモデル化する。

円筒クラスタ体系における衝突確率は、山本の方法によって計算する。



円筒クラスタ



円筒クラスタ中のサブセル

詳細エネルギー群実効断面積計算モデル

詳細エネルギー群中性子スペクトル計算に必要な実効断面積を計算する。

実効断面積は、温度と背景断面積のテーブルから求める $f$ 値と無限希釈断面積から計算する。

背景断面積に非均質の影響を取り込む脱出断面積 $\Sigma_{e,i}$ を東稔の方法で求めるダンコフ係数から計算する。



### 3. 解析モデル

## 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算，中間エネルギー群実効断面積計算

### 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算

円筒クラスタ体系における詳細エネルギー群中性子スペクトル計算は，そこでの衝突確率と実効断面積から次の減速方程式を解くことで計算される。

$$\Sigma_i^g \phi_i^g V_i = \sum_j \sum_{g'} (\Sigma_j^{g' \rightarrow g} \phi_j^{g'} + \chi_j^g Q_j) P_{j \rightarrow i}^g V_j$$

ここで  $g, g'$  は詳細エネルギー群， $\chi_j^g$  は領域  $j$ ，エネルギー群  $g$  の核分裂スペクトル， $Q_j$  は領域  $j$  の核分裂ソースであり燃料領域では 1.0，それ以外では 0 と仮定する。

### 制御棒ブレード領域の詳細エネルギー群中性子スペクトル計算

詳細エネルギー群実効断面積は，制御棒ブレードの中性子吸収材以外の領域では無限希釈条件にて，中性子吸収材中では，ダンコフ係数を求め，これを用いて実効断面積を計算する。詳細エネルギー群中性子スペクトル計算では，各領域の体積が保存するように制御棒ブレードの形状を 1 次元平板形状モデルに焼きなおす。この体系に対し，減速方程式を解くことで制御棒ブレード領域の詳細エネルギー群中性子スペクトルが計算される。

### 中間エネルギー群実効断面積

円筒クラスタ体系計算で得られた中性子スペクトルを用い詳細エネルギー群実効断面積を縮約し，各リング及び燃料棒種類毎の中間エネルギー群実効断面積を作成する。

### 燃料集合体実形状におけるダンコフ係数計算モデル

燃料集合体実形状におけるダンコフ係数を計算する。

### 3. 解析モデル 燃料集合体中性子輸送計算

LANCRでは、燃料集合体内の中性子束を改良CCCP法で求める。

$$\Sigma_i^g \phi_i^g V_i = \sum_{n,m,l} \Gamma_{nml \rightarrow i}^- J_{nml}^- A_{nm} + \sum_j P_{j \rightarrow i}^g \sum_{g'} \left( \Sigma_j^{g' \rightarrow g} + \frac{\chi_j^g}{\lambda} \nu \Sigma_{f,j}^{g'} \right) \phi_j^{g'} V_j$$

領域*i*での衝突数      入射カレントの寄与      ノード内部ソースの寄与

$$J_{nml}^{+,g} A_{nm} = \sum_j P_{j \rightarrow nml}^g \sum_{g'} \left( \Sigma_j^{g' \rightarrow g} + \frac{\chi_j^g}{\lambda} \nu \Sigma_{f,j}^{g'} \right) \phi_j^{g'} V_j + \sum_{n',m',l'} \Gamma_{n'm'l' \rightarrow nml}^g J_{n'm'l'}^- A_{n'm'}$$

外向きカレント      ノード内部ソースの寄与      入射カレントの寄与

$$J_{nml}^- = J_{n'm'l'}^{+,g} (\text{adjacent node})$$

隣接ノードとの境界条件

- $\Gamma_{nml}^{+,g}$  : ノード表面*n*のセグメント*m*・セクタ*l*へ流入、流出するエネルギー群*g*の中性子流(+、-はそれぞれ流出、流入を表す)
- $\phi_i^g$  : 領域*i*におけるエネルギー群*g*の中性子束
- $P_{j \rightarrow i}^g$  : 領域*j*で生まれたエネルギー群*g*の中性子が領域*i*ではじめて衝突する確率
- $P_{j \rightarrow nml}^g$  : 領域*j*で生まれたエネルギー群*g*の中性子が衝突せずノード表面*n*のセグメント*m*・セクタ*l*の範囲で出ていく確率
- $\Gamma_{n'm'l' \rightarrow i}^g$  : ノード表面*n'*のセグメント*m'*・セクタ*l'*の範囲で入射したエネルギー群*g*の中性子が領域*i*ではじめて衝突する確率
- $\Gamma_{n'm'l' \rightarrow nml}^g$  : ノード表面*n'*のセグメント*m'*・セクタ*l'*の範囲で入射したエネルギー群*g*の中性子が衝突せずにノード表面*n*のセグメント*m*・セクタ*l*の範囲で出ていく確率
- $A_{nm}$  : ノード表面*n*のセグメント*m*の面積
- $V_i$  : 領域*i*の体積
- $\Sigma_i^g, \nu \Sigma_{f,i}^g, \Sigma_i^{g' \rightarrow g}$  : 領域*i*におけるエネルギー群*g*の中性子の巨視的断面積
- $\chi_j^g$  : 領域*j*の核分裂スペクトル
- $\lambda$  : 無限増倍率

計算対象とする体系を燃料棒セル（以下、「ノード」という。）に分割し、ノード内バランス計算と体系バランス計算を繰り返す。

ノード内バランス計算では、各ノードに対して入射中性子流を与えてノード内部中性子束とノード外面からの出射中性子流を解く。

体系バランス計算では、ノード内バランス計算で得た中性子スペクトルにより各ノードに対し均質化された少数エネルギーの核定数を求め、燃料集合体体系全体を対象として各ノードの平均中性子束とノード境界面での出入中性子流を解く。

この計算手順は、固有値及びノード境界中性子流が収束するまで繰り返される。体系バランス計算を粗メッシュ少数エネルギー群にて実施することで、収束計算の高速化が達せられる。

少ないセグメント分割数、セクタ数でできる限り高い精度を出すために中性子流を4つの直交成分に分け、必要な成分だけを保持し、残りの成分を修正して使用している。

### 3. 解析モデル

## ガンマ線輸送計算及び出力分布計算

#### ガンマ線輸送計算モデル

LANCRには、燃料棒のガンマ線による加熱やガンマセンサの応答を計算するためのガンマ線輸送計算機能が組み込まれている。

ガンマ断面積ライブラリは、原子番号 1 ~ 100 の全原子の全断面積、吸収（= 光電効果 + 電子対生成）、散乱断面積（コンプトン散乱によるエネルギー遷移）及びエネルギー付与断面積が収納されている。

中性子輸送計算と同様に燃料棒セルを単位とするCCCP法により、中性子輸送計算の結果求められるガンマ線源を入力として、ガンマ線輸送計算を実行する。

#### ガンマ発熱量

ガンマ発熱量は、ガンマ線束に発熱断面積を積算して求められる。

#### 出力分布計算

出力分布は、核分裂エネルギーとガンマ線エネルギーの分布を足し合わせて計算する。



## 4. 検証及び妥当性確認 概要(1)

ベンチマーク問題に対する他コード等との比較を「検証」、実機プラントや試験による測定値等との比較を「妥当性確認」と位置付け、検証及び妥当性確認においては後者の確認行為を優先している。ただし、妥当性確認に供せる試験データ数に制限がある事を考慮し、連続エネルギーモンテカルロコードのような十分に高度なモデルに基づく信頼性の高い手法との比較については、コードの信頼性確認行為を補完しうる「妥当性確認に準ずる確認」と位置付ける。

LANCRの検証及び妥当性確認は以下の3通りの観点で実施した。

- ・試験による妥当性確認

種々の臨界試験や照射後試験結果との比較により、LANCRの核特性の妥当性を確認する。

- ・ベンチマーク問題による検証

独立に開発された各参加機関コードの結果との相互比較によって、相対的にLANCRの健全性を、換言すれば、LANCRの計算結果に特異な傾向がないことを確認する。

- ・連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認

試験による妥当性確認は、試験数に制約があり十分な数を実施することができない。試験による妥当性確認を補完するため、連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認を実施する。連続エネルギーモンテカルロ輸送計算コードであるMCNP5 または連続エネルギーモンテカルロ輸送燃焼計算コードであるMonteburns2 の解析結果とLANCRコードの解析結果との比較を行う。核データライブラリはENDF/B-VII.0で統一し、核データ起因の誤差は排除する。また、十分な中性子ヒストリを設定し、モンテカルロ計算の統計誤差を低減する。

## 4. 検証及び妥当性確認 概要(2)

LANCRの検証及び妥当性確認の実施項目を以下に示す。

分類	検証及び妥当性確認 実施項目
試験による妥当性 確認	Babcock & Wilcox臨界試験
	NCA臨界試験
	BASALA臨界試験
	Hellstrand実効共鳴積分の実験式
	MISTRAL臨界試験
	福島第二原子力発電所 2号炉及びDodewaard炉の照射後試験
ベンチマーク問題に よる検証	軽水炉次世代燃料ベンチマーク問題による検証
	NEACRP-L-271ベンチマーク問題による検証
連続エネルギーモンテ カルロ計算による妥 当性確認	未燃焼組成燃料集合体に対する妥当性確認
	ウラン濃縮度の変化及びプルトニウム富化度の変化に対する妥当性確認
	反応度価値及び反応度係数に対する妥当性確認
	モンテカルロ燃焼計算による妥当性確認
	ガンマ発熱量に対する妥当性確認

## 4. 検証及び妥当性確認 試験による妥当性確認(例)(1)

### BASALA臨界試験による妥当性確認

#### 実効増倍率及び相対出力分布

実効増倍率の誤差の平均は  $\square$  % $\Delta k$ , 全試験を対象としたテストバンドル内の相対出力分布の実験値からのRMS誤差は,  $\square$  %であった。

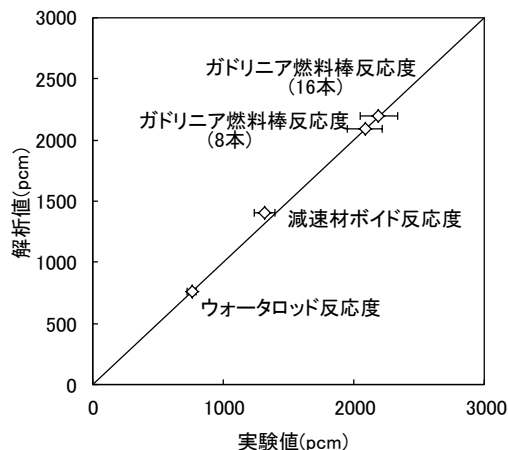
ウォーターロッド反応度, 減速材ボイド反応度, ガドリニア燃料棒反応度及び制御棒反応度  
減速材ボイド反応度を除き, 実験値からの不確かさは測定誤差 (約  $\square$  %) の範囲内であった。減速材ボイド反応度の不確かさは  $\square$  %であった。

#### 等温温度係数

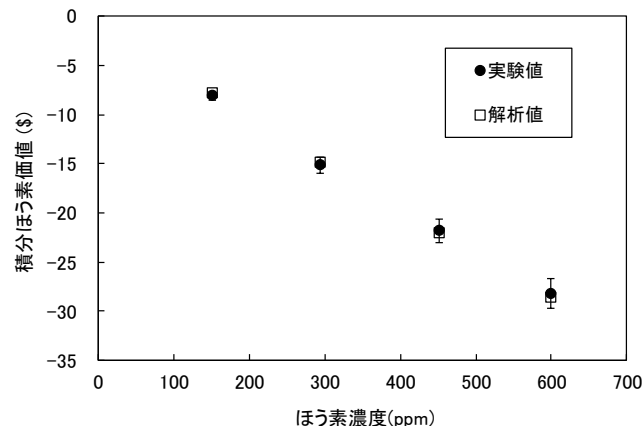
20℃～60℃での解析値は実験誤差の範囲内であり, 60℃～80℃の2ケースについては実験誤差の2 $\sigma$ 以内で一致した。

#### 積分ほう素価値

解析値は, 実験誤差の範囲内で実験値とよく一致した。



BASALA試験における反応度の比較 (炉心 1)

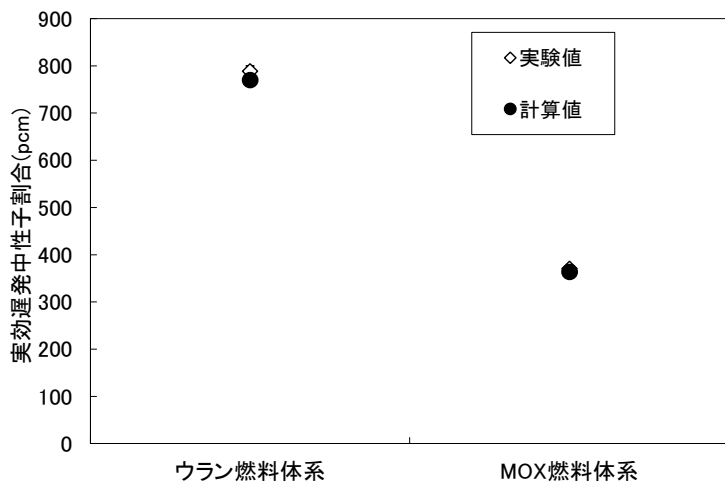


BASALA試験における積分ほう素価値の比較

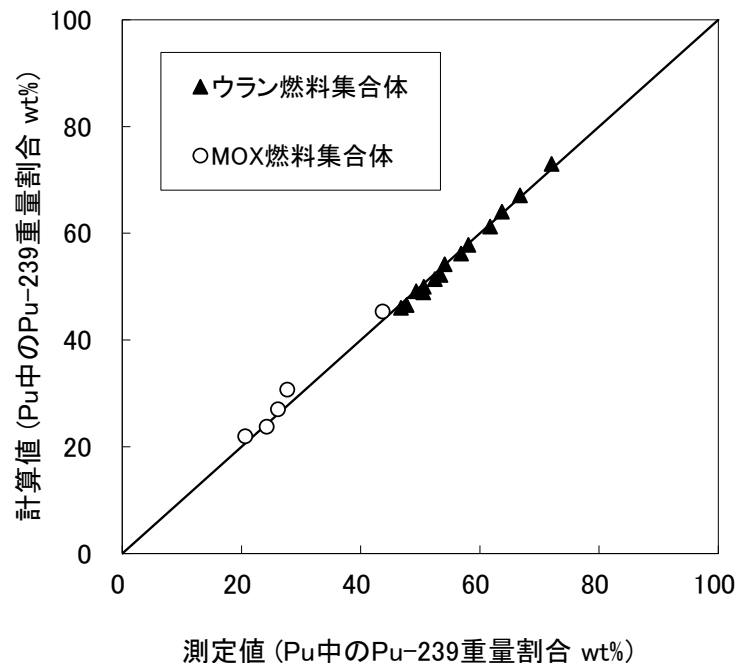
## 4. 検証及び妥当性確認 試験による妥当性確認(例)(2)

MISTRAL 臨界試験による実効遅発中性子割合 ( $\beta_{eff}$ ) の妥当性確認  
ウラン炉心, MOX炉心とも, 解析値は測定誤差の2 $\sigma$ 以内で実験値を再現した。

福島第二原子力発電所2号炉及びDodewaard炉の照射後試験  
ウラン燃料及びMOX燃料のいずれにおいても同程度の精度で同位体組成の燃焼に伴う変化が再現された。



MISTRAL試験における実効遅発中性子割合



福島第二原子力発電所2号炉及びDodewaard炉の  
燃焼後組成の測定値と解析値の比較 (Pu-239)



## 4. 検証及び妥当性確認 ベンチマーク問題による検証(例)

### 軽水炉次世代燃料ベンチマーク問題による検証

LANCRを除く全ベンチマーク参加コードの平均値からの無限増倍率の差異は、参加コード間のばらつきの2 $\sigma$ 以内であった。

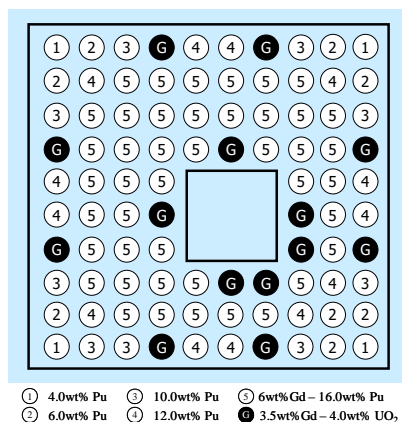
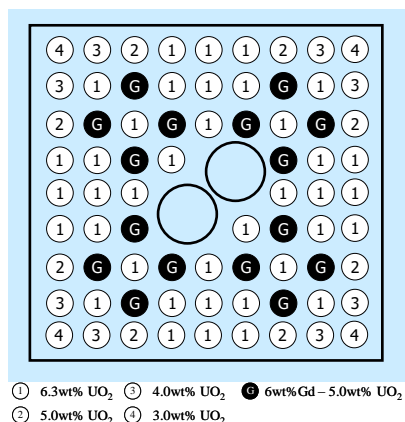
LANCRを除く全ベンチマーク参加コードの平均値からの各反応度の差異は、概ね参加コード間のばらつきの2 $\sigma$ 以内であった。

燃料集合体体系での局所出力分布の全コード平均値からの差異についても、ベンチマーク参加コード間のばらつきの2 $\sigma$ 以内であった。

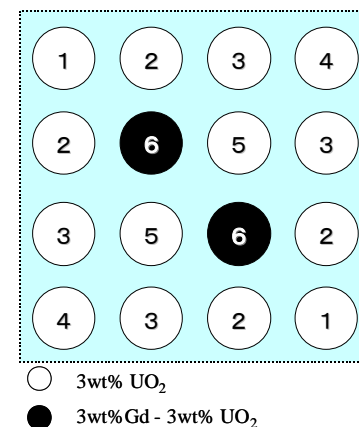
### NEACRP-L-271ベンチマーク問題による検証

LANCRを除く全ベンチマーク参加コードの平均値からの無限増倍率の差異は、参加コード間のばらつきの2 $\sigma$ 以内であった。

ガドリニアが添加されていないウラン燃料棒及びガドリニアが添加されているウラン燃料棒の相対出力について、LANCRを除く全ベンチマーク参加コードの平均値からの燃料棒相対出力の差異は、参加コード間のばらつきの1 $\sigma$ 以内であった。



軽水炉次世代燃料ベンチマーク問題のBWR燃料集合体（左：ウラン燃料，右：MOX燃料）



NEACRP-L-271ベンチマーク問題体系

## 4. 検証及び妥当性確認

### 連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認(例)(1)

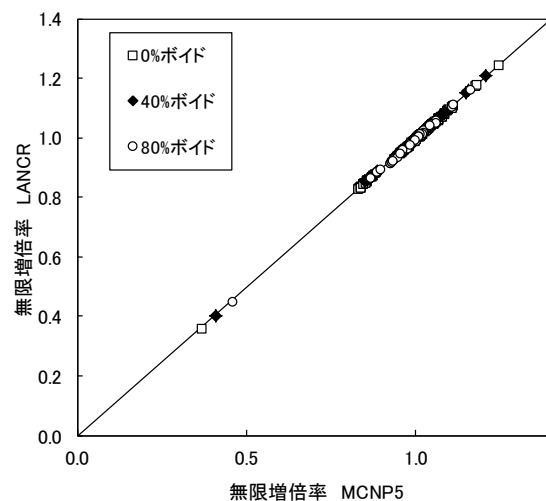
未燃焼組成燃料集合体に対する妥当性確認

全てのケースにおけるモンテカルロ計算からの無限増倍率の差異の平均は

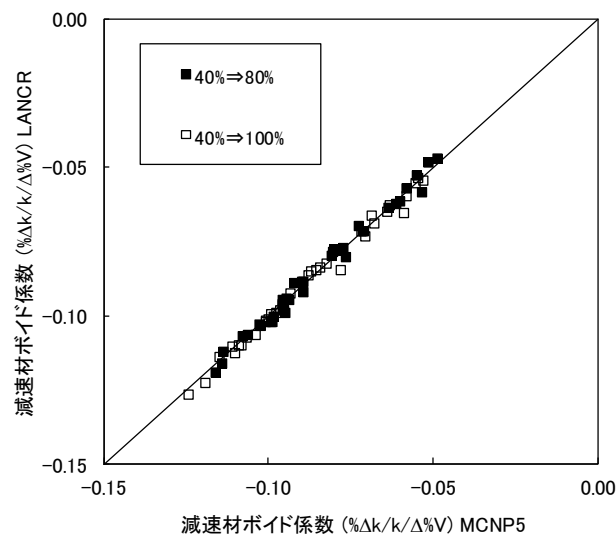
% $\Delta k$ であった。

反応度価値及び反応度係数に対する妥当性確認

減速材ポイド係数のモンテカルロ計算からの誤差の平均は %であった。



未燃焼組成での無限増倍率のモンテカルロ計算との比較  
(高温, 制御棒引抜状態)



減速材ポイド係数のモンテカルロ計算との比較

## 4. 検証及び妥当性確認

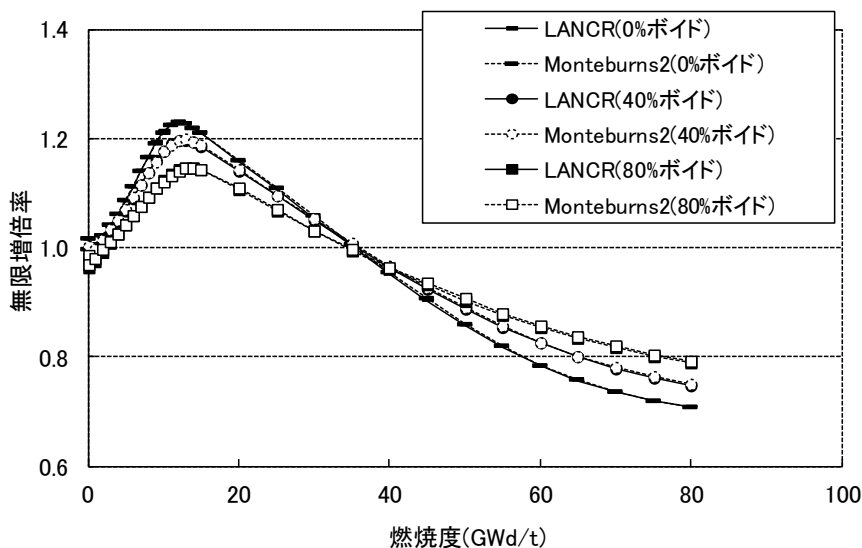
### 連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認(例)(2)

#### モンテカルロ燃焼計算による妥当性確認

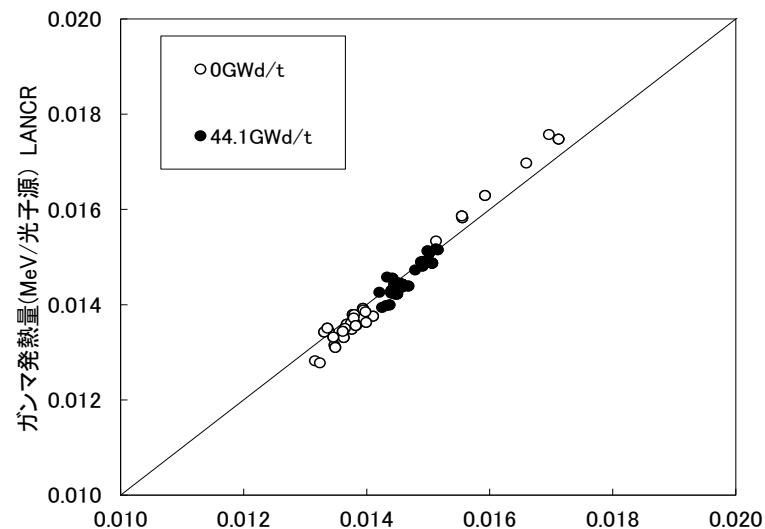
8×8, 9×9及び10×10ウラン燃料集合体及び8×8 MOX燃料集合体を対象に, 燃焼特性をMonteburns2の結果と比較し, モンテカルロ計算との誤差は, 全燃焼度点を通して % $\Delta k$ ~% $\Delta k$ の範囲内であり, よく一致している。

#### ガンマ発熱量に対する妥当性確認

8×8ウラン燃料集合体を対象とし, 燃焼度0 GWd/t及び44.1GWd/tにおいて, 減速材ボイド率を40%としたときのガンマ発熱量を比較し, モンテカルロ計算に対し %以内で一致した。また, モンテカルロ計算に対するガンマ発熱量の相対分布のRMS誤差は, いずれも %以内であった。



燃焼特性のモンテカルロ計算との比較 (9×9ウラン燃料集合体)



ガンマ発熱量(MeV/光子源) MCNP5  
ガンマ発熱量のモンテカルロ計算との比較

## 5. 許認可解析への適用 検証及び妥当性確認結果のまとめ 不確かさのまとめ

LANCRの不確かさを以下にまとめる。

パラメータ	検証および妥当性確認結果
実効増倍率または無限増倍率	試験データ、ベンチマーク問題及びモンテカルロ計算との比較を実施し、MOX体系もウラン体系も同等かつ良好な評価性能を有することを確認した。
出力分布のRMS(二乗平均平方根) 誤差	試験データ及びモンテカルロ計算との比較を実施し、RMS誤差は概ね <input type="text"/> %以下であり、良好な評価性能を有することを確認した。
ガドリニア価値	試験データとは測定誤差の範囲内で一致し、モンテカルロ計算との誤差は <input type="text"/> %であり、良好な評価性能を有することを確認した。
減速材ポイド係数	試験データとは測定誤差の範囲内でほぼ一致し、モンテカルロ計算との誤差は <input type="text"/> %であり、良好な評価性能を有することを確認した。
ドップラ係数	Hellstrandらの実験式とはばらつきの範囲内でほぼ一致し、モンテカルロ計算との誤差は <input type="text"/> %であり、良好な評価性能を有することを確認した。
ほう素価値	試験データとは測定誤差の範囲内で一致し、モンテカルロ計算との誤差は <input type="text"/> %であり、良好な評価性能を有することを確認した。
制御棒価値	試験データとは測定誤差の範囲内で一致し、モンテカルロ計算との誤差は <input type="text"/> %であり、良好な評価性能を有することを確認した。
等温温度係数	試験データとは概ね測定誤差の範囲内で一致し、モンテカルロ計算との差は <input type="text"/> (% $\Delta k/k/\Delta^\circ\text{C}$ ) であり、良好な評価性能を有することを確認した。
実効遅発中性子割合 ( $\beta_{\text{eff}}$ )	試験データとの比較を実施し、良好な評価性能を有することを確認した。
燃焼後の核種組成	試験データとの比較を実施し、ウラン燃料もMOX燃料も同等かつ良好な評価性能を有することを確認した。