

島根原子力発電所 3号炉 審査資料	
資料番号	S3-EP-004改04(説1-1)
提出年月日	2023年 4月10日

# 島根原子力発電所 3号炉 炉心解析コード (LANCR/AETNA) (妥当性確認と許認可解析への適用性について)

2023年 4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**

# 目次

- はじめに ..... P.2
- 審査会合における指摘事項一覧 ..... P.3
- 1. 炉心解析コード（LANCR/AETNA）の概要 ..... P.6
- 2. 許認可解析への適用性確認手順 ..... P.7
- 3. 妥当性確認 ..... P.8
- 4. 妥当性確認結果 ..... P.20
- 5. 許認可解析への適用性確認 ..... P.26
- 6. まとめ ..... P.29
- 別紙 審査会合における指摘事項に対する回答 ..... P.30
- 参考① 妥当性確認において留意すべき事項とその対応 ..... P.48

※ 本資料内で“ [] ”内の章または番号は、「島根原子力発電所 3 号炉 LANCR/AETNAコード説明書（以降、「コード説明書」という。）」における該当箇所を示す。

# はじめに

- ▶ 島根 3 号炉チャンネルボックス厚変更に伴う許認可解析に対する炉心解析コード（LANCR/AETNA）の適用性に関して、以下の項目を説明する。

- 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について [ 2 章]

- ・モデル化と妥当性確認の網羅性について
- ・モデル化の網羅性確認
- ・妥当性確認の網羅性確認

- 解析モデル [ 3 章]

- ・LANCR 解析モデル
- ・AETNA 解析モデル

- 検証及び妥当性確認 [ 4 章]

- ・LANCR の検証及び妥当性確認
- ・AETNA の検証及び妥当性確認

- 許認可解析への適用 [ 5 章]

- ・許認可解析へのLANCR/AETNA コード適用

 : ご説明済の範囲

 : 本日まで説明範囲

# 審査会合における指摘事項一覧（1 / 3）

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
4	2022年9月29日	検証及び妥当性確認のプロセスが適切に実施されているかを確認するため、当該プロセスの内容を整理すること。なお、学協会基準等を参照した場合は、参照した基準等を示すこと。	本日回答 (別紙P.30, 31)
5	2022年9月29日	妥当性確認に採用している試験データ等について、解析結果と比較するにあたって、想定している炉心状態を網羅しているか、信頼性のある試験データかなどを含め、試験データ等の選定の考え方を整理すること。	本日回答 (P.9, 15, 17~19) (別紙P.32~36)
6	2022年9月29日	試験データ等と比較した結果により、妥当と判断した考え方（どういう観点から、何を満たしていればよいと考えるのか）を整理すること。	本日回答 (P.8, 10) (別紙P.37, 38)
7	2022年9月29日	安全解析コード等の入力となるLANCR/AETNAコードの出力を整理し、必要に応じて当該出力から安全解析コード等への入力のための処理プロセスも示すこと。	本日回答 (別紙P.39, 40)
8	2022年9月29日	妥当性確認プロセスから、どのように解析コードの不確かさの値を算出しているのか整理すること。	本日回答 (P.21, 24) (別紙P.41, 42)
9	2022年9月29日	解析コードの不確かさと設計における設定値との比較においては、解析コード以外の不確かさ（取替炉心段階に生じる不確かさ等）の値も示した上で、設計における設定値内であることを示すこと。	本日回答 (P.27) (別紙P.43)

# 審査会合における指摘事項一覧（2 / 3）

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
10	2022年12月13日	手順⑤のLANCR/AETNAの達成すべき予測性能について、指標となるパラメータの選定及び許容される不確かさ等の達成基準の考え方を説明すること。また、安全解析の対象となる平衡炉心の成立性に関しても、予測性能を設定する必要はないか説明すること。	本日回答 (P.26) (別紙P.44)
11	2022年12月13日	手順④の“モデル実装/コード検証/解検証はメーカーのQMSにより達成されることを前提としている”について、事業者におけるQMS上の調達管理としてどのように確認したのか具体例を示しつつ、説明すること。	後日回答
12	2022年12月13日	手順④の妥当性確認を通した総括不確かさの評価について、物理的モデルの不確かさの影響についても説明すること。	本日回答 (P.21, 24, 28) (別紙P.45~47)
13	2022年12月13日	階層構造分析による物理現象の整理について、システムを炉心（シュラウド内）に限定している理由を説明すること。外部ループ（再循環系、給復水系）、原子炉ドーム圧、システムの境界を構成する構造物等の炉心外の要素がどのように取り扱われているか説明すること。	後日回答
14	2022年12月13日	各PIRTでランクLとした項目のうち、参考文献以外を判断根拠としているものについて、感度解析等の結果を根拠としているものについては、そのデータを示して根拠を説明すること。	後日回答

# 審査会合における指摘事項一覧（3 / 3）

No.	審査会合日	指摘事項の内容	回答頁
15	2022年12月13日	モデル化されていない物理現象の扱いについて、モデル化しないことによる不確かさへの影響等をどのように考慮しているかを説明すること。	後日回答
16	2023年3月28日	LANCRにおける従来コードから変更された解析モデルについて、LANCR以外の「燃料集合体核特性計算コード」において使用実績があるか、また、AETNAにおける従来コードから変更された解析モデルについて、AETNA以外の「三次元沸騰水型原子炉模擬計算コード」において使用実績があるか、整理して説明すること。	後日回答

# 1. 炉心解析コード (LANCR/AETNA) の概要

## システム概要

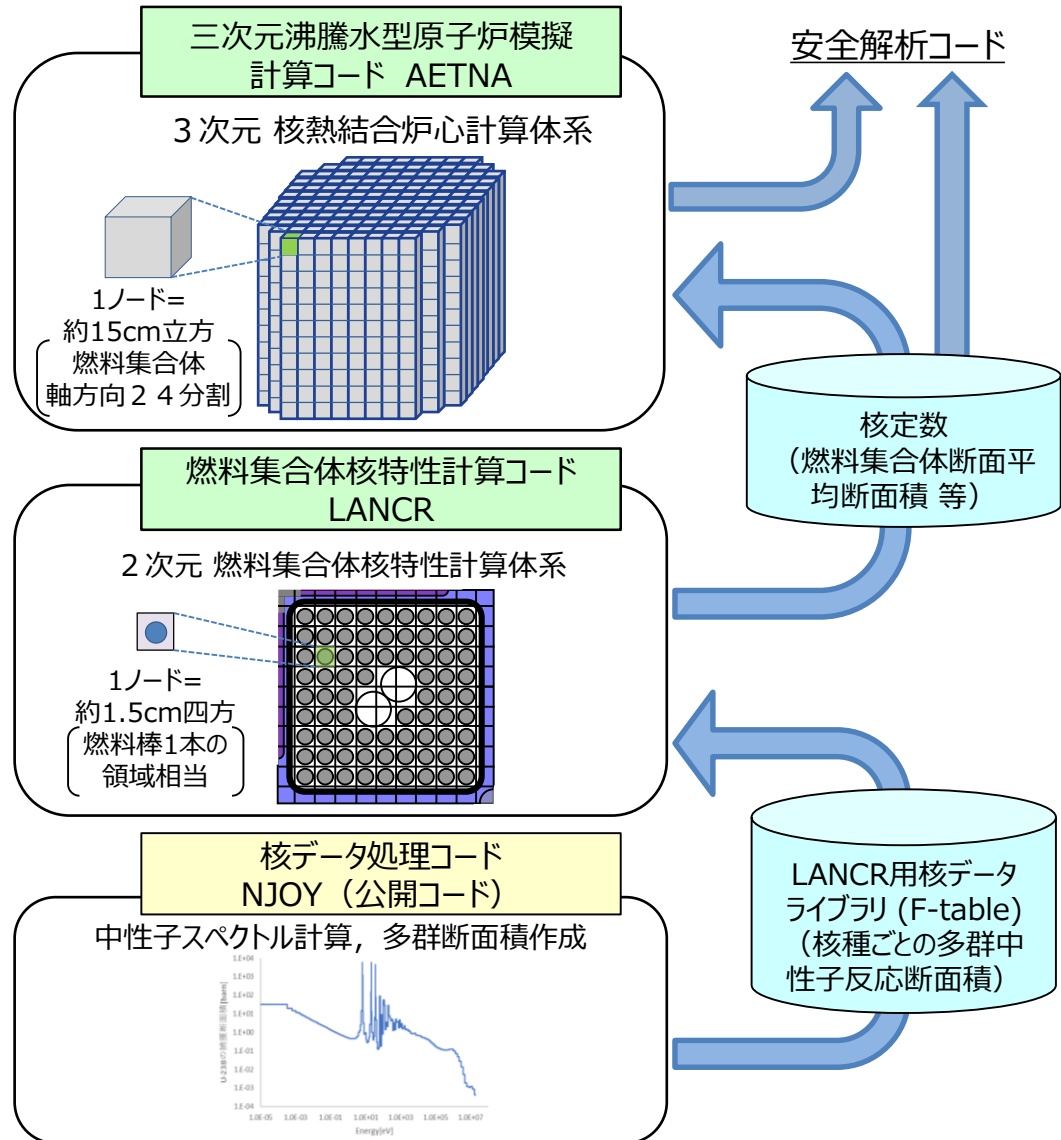
### 炉心解析コードの構成

AETNA：炉心全体に対して，燃料集合体単位の特性をを用いた3次元の核熱水力反復計算を行い，出力分布や炉停止余裕などの各種炉心特性を評価する。

LANCR：燃料集合体の断面に対して燃料棒単位の詳細な核計算を2次元体系で実施し，AETNAに必要な燃料集合体断面の平均的な核特性を計算する。

LANCRの計算に必要な核データライブラリは，評価済み核データを公開コードNJOY\*<sup>1</sup>で処理し，F-table形式で作成する。（炉心解析コードでは同様の手順が広く用いられる。）

\*1：NJOYはNJOY99を使用



## 2. 許認可解析への適用性確認手順 適用性確認手順

- LANCR/AETNAの島根3号炉許認可解析への適用性確認手順を以下に示す。以降では、手順③～⑤の実施内容を説明する。

LANCR/AETNAの島根3号炉許認可解析への適用性確認手順

手 順		使用するツール / 判断方法
①	炉心体系に関する物理現象を抽出し、その中から炉心解析において重要な現象を特定する。	重要度ランキングテーブル (PIRT) →重要な現象が特定されていること
②	①で特定した重要な現象のモデル化の有無を確認し、モデル化されていないものについて取り扱いを説明する。	モデル性能比較表 →各現象に対し“○”(該当モデル)が一つ以上あること
③	②で示された現象に対して、もれなく妥当性確認が実施されていることを確認する。	モデル性能評価表 →各現象に対し“○”(該当試験)が一つ以上あること
④	LANCR/AETNAの適用範囲に対し、上記で示された妥当性確認の試験条件が包絡していることを確認する。	LANCR/AETNAの適用範囲と妥当性確認範囲の対応表 →適用範囲が妥当性確認範囲に含まれること
⑤	妥当性確認を通して整理された不確かさ又はこれらの積算値が、設計における設定値を下回っていることを確認する。	注目すべき応答変量と要求すべき予測性能の比較表 →不確かさが要求性能を下回ること

手順および実施内容ともご説明済

手順はご説明済  
実施内容を本日もご説明



## 3. 妥当性確認

### 妥当性確認における実施項目

➤ 妥当性確認における実施項目を以下に示す。

#### 信頼性確認

- ✓ 解析コードが物理現象に対して模擬性を有することの確認を、重要な物理現象および解析条件に対して網羅するように実施する。
  - 模擬性を有することの確認は、解析コードによる評価対象が目安となる不確かさで予測できること、解析コードによる計算結果に特異な傾向が無く予測性を示すことを確認することにより行う。
  - この確認は、全ての重要な物理現象を網羅するとともに、以下の解析条件に対して網羅するように行う。

炉型・格子タイプ・燃料タイプ

運転状態

適用範囲

#### 不確かさの把握

- ✓ 許認可解析への適用性確認（手順⑤）に必要な不確かさを定量的に把握する。

### 3. 妥当性確認

#### 妥当性確認において参照する試験の構成

- ▶ 妥当性確認において参照する試験の構成の考え方を以下に示す。
- ✓ 従来の炉心解析コードで採用していた実績のある試験をベースに、炉型・格子タイプ・燃料タイプ、運転状態および適用範囲に対する網羅性を確認するとともに、新しい知見を踏まえて追加や差し替えの要否を考慮し、必要な試験を追加した。
  - ✓ 追加した試験を以下に示す。
    - ① モンテカルロ計算による妥当性確認（個・L）
    - ② モンテカルロ燃焼計算による妥当性確認（個・L）
    - ③ 全炉心モンテカルロ計算による妥当性確認（個・A）
    - ④ 燃料棒出力妥当性確認（ガンマスキャンとの比較）（総・A）
    - ⑤ 安定性試験高次モード分布との比較（総・A）

計算機やコード解析能力の進展を踏まえ追加

海外知見の適用

注1：試験を実施する際の制約などからデータ数が限られる試験による妥当性確認を補完することを目的に、連続エネルギーモンテカルロ計算による確認を妥当性確認に準ずるものと位置づける。

注2：“個”は個別効果試験，“総”は総合効果試験，“L”はLANCR，“A”はAETNAに該当する妥当性確認が存在することを示す。

### 3. 妥当性確認

## 妥当性確認において参照する試験の区分

➤ 妥当性確認において参照する試験の区分を以下に示す。

#### ✓ 総合効果試験

炉心解析時と同様に解析コードの全体的な解析モデルを使用することにより、多数の物理現象が作用した結果を確認できる妥当性確認

例：出力分布確認試験

直接的には核分裂反応やガンマ線反応を起因とする出力の相対分布を測定値との比較で確認するものであるが、計算の過程ではボイド分布や圧損分布など、一部を除いたAETNAの主要な解析モデルがそれぞれの感度に応じて結果に影響を及ぼしている。

→ 炉心解析時と同様に解析コードの全体的な機能を使用することから、実機運転データによる試験は重要性が高い。そのため、炉型・格子タイプ・燃料タイプについて十分な試験データ数で網羅するように実施する。

#### ✓ 個別効果試験

少数の解析モデルのみに機能を制限させることで、着目する物理現象が作用した結果を十分な感度で確認できる妥当性確認

例：ボイド率測定試験，チャンネル圧損試験，核定数に対するモンテカルロ計算による準妥当性確認，各種臨界試験

→ 総合効果試験では確認が困難な物理現象，あるいは測定頻度が少ない総合効果試験で確認している物理現象の作用した結果を確認する妥当性確認の補完として実施する。

### 3. 妥当性確認

## 物理現象に対する妥当性確認の網羅性確認方法

- 物理現象に対する妥当性確認の網羅性は、モデル性能評価表により確認する。確認方法を以下に示す。（参考に**重要度ランキングテーブル**の最高ランキングおよびモデル性能比較表と併せて示すことで、関連する物理現象とその重要度、対応する解析モデルが判別できる。）

手順②：モデル性能比較表

物理現象に対する解析モデルの網羅性

(2022年12月13日の審査会合にてご説明済)

手順③：モデル性能評価表

物理現象に対する妥当性確認の網羅性

		重要度ランキング	モデル性能比較表				モデル性能評価表			
			モデルA	モデルB	モデルC	モデルD	妥当性確認 I	妥当性確認 II	妥当性確認 III	妥当性確認 IV
物理現象	現象1	H	○		○		○			○
	現象2	M		○			○	○		
	現象4	M				○				○

コード説明書における  
妥当性確認の項目名

各物理現象に1つ以上“○”  
があることにより網羅性が確認  
できる。

手順①：重要度ランキングテーブル

重要な物理現象の特定

(2022年12月13日の審査会合にてご説明済)

### 3. 妥当性確認

## LANCR妥当性確認の物理現象に対する網羅性

- LANCRのモデル性能評価表による物理現象に対する妥当性確認の網羅性を以下に示す。
- 各物理現象に対して1つ以上"○"があることから、物理現象に対して妥当性確認が網羅されていることが確認できる。

(物理現象)			(補足説明)			モデル性能比較表		モデル性能評価表	
						" - " : 関連しない, "○" : 関連する, "N/A" : モデル無		試験による妥当性確認	連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認
								個別効果試験	
						重要度ランキング			
						ダイナミク(中性子・ガンマ) [3.1.1, 3.1.3.5.1]			
						エネルギー構造 [3.1.1, 3.1.3.5.1]			
						実効断面補計算 [3.1.2.2]			
						詳細エネルギーレベル計算 [3.1.2.3]			
						2次元 中性子輸送計算 [3.1.3]			
						2次元 ガンマ線輸送計算 [3.1.3.5.2]			
						出力分布計算 [3.1.3.7]			
						均質化定数計算 [3.1.3.8]			
						燃焼計算 (チーン・領域分割) [3.1.4]			
						燃焼スペクトル調整 [3.1.4.3]			
						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			
						福島第二号炉の照射後試験 (ウラン燃料)			
						Dodegaard炉の照射後試験 (MOX燃料)			
						未燃焼組成燃料集合体に対する妥当性確認			
						ウラン濃縮変化に対する妥当性確認			
						プルトニウム濃縮変化に対する妥当性確認			
						カドニウム値			
						減速材ボイド係数			
						ほう素値			
						制御棒値			
						等温度係数			
						トプナ係数			
						ガンマ発熱量			
						モンテカルロ燃焼計算			

 : 個別効果試験

各物理現象に対して1つ以上"○"がある。

注1

注1 集合体内ボイド率の均一分布の仮定の妥当性は、AETNAの妥当性確認(ガンマスキャン等)を通して実施される。

※ グレーハッチング箇所は島根3号炉許認可解析非適用

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。

### 3. 妥当性確認

## AETNA (核的現象) 妥当性確認の物理現象に対する網羅性

- AETNA (核的現象) のモデル性能評価表による物理現象に対する妥当性確認の網羅性を以下に示す。
- 各物理現象に対して1つ以上"○"があることから、物理現象に対して妥当性確認が網羅されていることが確認できる。

*はLANCER PIRTにあるもの (物理現象)		モデル性能比較表		モデル性能評価表							
		"-": 関連しない, "○": 関連する, "N/A": モデル無		核計算		熱水力計算		その他			
				プラント運転実績による妥当性確認		試験による妥当性確認		連続エネルギーモンテカルロ計算等による妥当性確認			
				総合効果試験		個別	総合	個別効果試験			
物理現象	重要度ランク										
	中性子集計算 (定常) [3.2.1]										
	中性子集計算 (過渡) [3.2.9]										
	高次モード計算 [3.2.10]										
	燃料棒出力再構築 [3.2.2]										
	燃料棒燃焼度再構築 [3.2.2.3]										
	断面棒モデル [3.2.3]										
	燃焼履歴モデル [3.2.4]										
	三口燃焼モデル [3.2.4.5~3.2.4.9]										
	燃料温度モデル [3.2.3.3.2]										
	反射体モデル [3.2.3.2]										
	エネルギー計算 [3.2.5.4]										
	サブクール沸騰モデル [3.2.5.8.2]										
	ボイド相関式 [3.2.5.8.1]										
	パイパス熱伝達 [3.2.5.5]										
	圧力損失 [3.2.5.3]										
	チャンネル流量配分 [3.2.5.6]										
	パイパスモデル [3.2.5.1]										
	熱的余裕計算 [3.2.6]										
	沸騰遷移相関式 [3.2.6.1]										
核計算応答 [3.2.7]											
学習モデル (ノセル計算機編)											
冷温時境界固有値 (制御棒固有値)											
出力運転時間境界固有値											
出力分布 (TRPとの比較)											
出力分布 (Vスキャン)											
出力分布 (Vスキャン)											
燃料棒出力分布 (Vスキャン)											
照射後試験											
MOX装荷炉心											
長期停止運転											
部分出力運転											
ボイド率測定 (ボイド率を比較)											
チャンネル圧抑試験											
SPERT実験											
安定性試験高次モード分布											
均質炉高次モード問題											
局所出力 (初装荷多燃焼炉心)											
局所出力 (MOX燃料部分炉心)											
局所出力 (10X10燃料平衡炉心)											
燃焼履歴問題											
全炉心体系モンテカルロ											
チャンネル流量配分											
核的現象	中性子増倍特性 (ノード) *	H									
	遅発中性子割合 (ノード) *	H									
	空間分布	3次元出力分布 (定常)	H								
		3次元高次モード分布 (定常)	H								
		3次元出力分布(過渡)	H								
		局所出力分布 *	H								
	局所燃焼度分布	H									
	フィードバック	制御棒価値 *	H								
		ボイド反応度 *	H								
		トップラ反応度 *	H								
		ほう談価値 *	H								
		減速材温度 *	M								
		燃料減損 (ノード)	H								
		核分裂生成物反応度 (ノード)	M								
		スクラム時 制御棒価値 *	H								
スクラム時 ボイド反応度 *	M										
棒束体起因	制御棒履歴	M									
	多種類制御棒効果	M									
	制御棒減損	M									
	水ロッド形状	M									
炉内計装管応答	H										

  : 総合効果試験  
  : 個別効果試験

各物理現象に対して1つ以上"○"がある。

① (SPERT実験) では、炉心出力の時間依存応答のみ確認している。  
 ② (SPERT実験) では、時間依存の投入反応度について実験値と比較している。

※ グレーハッチング箇所は島根3号炉許認可解析非適用

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。

# 3. 妥当性確認

## AETNA(熱的・水力的, 材料現象)妥当性確認の物理現象に対する網羅性

- AETNA (熱的・水力的, 材料現象) のモデル性能評価表による物理現象に対する妥当性確認の網羅性を以下に示す。
- 各物理現象に対して1つ以上"○"があることから, 物理現象に対して妥当性確認が網羅されていることが確認できる。

(物理現象) *はLANCR PIRTにあるもの	モデル性能比較表 "-":関連しない, "○":関連する, "N/A":モデル無										モデル性能評価表																														
	核計算					熱水力計算					その他	プラント運転実績による妥当性確認			試験による妥当性確認			連続エネルギーモンテカルロ計算等による妥当性確認																							
												総合効果試験			個別			総合			個別効果試験																				
												総合効果試験			個別			総合			個別効果試験																				
重要度ランゲ	中性子束計算 (定常) [3.2.1]	中性子束計算 (過渡) [3.2.9]	高次モード計算 [3.2.10]	燃料棒出力再構築 [3.2.2]	燃料棒燃焼度再構築 [3.2.2.3]	断面積モデル [3.2.3]	燃料燃焼モデル [3.2.4]	ミクロ燃焼モデル [3.2.4.5~3.2.4.9]	燃料温度モデル [3.2.3.3.2]	放射体モデル [3.2.3.2]	エネルギー計算 [3.2.5.4]	サブクール沸騰モデル [3.2.5.8.2]	ボイド相関式 [3.2.5.8.1]	バイパス熱伝達 [3.2.5.5]	圧力損失 [3.2.5.3]	チャンネル流量配分 [3.2.5.6]	バイパスモデル [3.2.5.1]	熱的余裕計算 [3.2.6]	沸騰遷移相関式 [3.2.6.1]	核計装芯管 [3.2.7]	学習モデル (プロセス計算機編)	冷却時間境界有無 (節節時間節)	出力運転時間境界有無	出力分布 (TIPとの比較)	出力分布 (γスキャン)	燃料棒出力分布 (γスキャン)	照射後試験	MOX装荷炉心	長期停止運転	部分出力運転	ボイド率測定 (ボイド率比較)	チャンネル圧損試験	SPEC下試験	安定性試験高次モード分布	均質円筒炉心・高次モード問題	局所出力 (初装荷多濃縮炉心)	局所出力 (MOX燃料部分炉心)	局所出力 (10X10燃料平衡炉心)	燃料燃焼問題	全炉心体系モンテカルロ	チャンネル流量配分
熱的・水力的現象	空間分布	3次元ポイド分布	H																																						
		集合体内ポイド分布 *	M																																						
		バイパスポイド分布	M																																						
		サブクールポイド	M																																						
	構成体起因	チャンネル圧損	M																																						
		クラッド付着	M																																						
		チャンネル流量	M																																						
		バイパス流量 (入力値)	M																																						
		水ロッド流量 (入力値)	M																																						
		水ロッド形状	M																																						
	発熱	スベアサ効果	M																																						
		減速材直接発熱 (入力値)	M																																						
		構造材直接発熱 (入力値)	M																																						
		炉心熱出力 (入力値)	H																																						
炉心流量 (入力値)		H																																							
材料・燃焼域	材料	燃料平均温度 (入力値)	M																																						
		チャンネル曲り・バブル	M																																						

: 総合効果試験

: 個別効果試験

各物理現象  
に対して1つ  
以上"○"  
がある

① 集合体内の均一ポイド分布の仮定は, "出力分布 (TIPとの比較/γスキャン)" "および燃料棒出力(γスキャン)" で間接的に確認される。  
 ② チャンネル流量は, "チャンネル圧損試験"及び"チャンネル流量配分の妥当性確認"で間接的に確認される。  
 ※ グレーハッチング箇所は島根3号炉許認可解析非適用





### 3. 妥当性確認

## 総合効果試験では確認が困難な物理現象に対する充足性の考察

- 前頁の3つの総合効果試験では確認が困難な物理現象に対する妥当性確認の充足性に関する考察を以下に示す。

3つの総合効果試験では確認が困難な物理現象	確認が困難な理由	格子タイプ				燃料タイプ		妥当性確認の充足性に関する考察
		D	C	S	N	8×8	9×9	
3次元高次モード分布	高次モードが励起される頻度が低い ため	-	-	○	-	○	-	均質ノード体系に対する高次モード計算モデルの有効性は個別の燃料設計への依存性は低く、また、以下に示す2つの妥当性確認を実施していることから、本物理現象に対する妥当性確認としては十分であると判断できる。 - “均質円筒炉心高次モード問題”において、基本モード～9次モードまでの固有値および周方向1次モードの出力分布について解析解との比較により確認 - “安定性高次モード分布との比較”（実機試験）におけるLPRM信号との比較により確認
局所出力分布	測定できないため	○	○	○	○	○	○	以下に示す3つの妥当性確認により網羅性を達成しており、本物理現象に対する妥当性確認は充足性を有すると判断できる。 - 核定数に対するモンテカルロ計算（個別効果試験）で格子タイプ・燃料対応に対し網羅的に確認 - “燃料棒出力分布（ガンマスキャン）”で2体の燃料集合体（10×10）に対して多数断面で確認 - 代表的なボイド率条件での複数の燃料集合体タイプに対して“局所出力ベンチマーク問題”で確認
局所燃焼度分布	測定できないため	局所出力分布で確認される						局所燃焼度は局所出力分布の積算値であり、局所出力分布は上記のとおり充足性を有すると判断できることから、局所燃焼度分布についても充足性を有すると判断できる。 なお、“照射後試験”で7つの使用済み燃料ペレットにおける測定値と計算値の比較による妥当性確認を追加で実施している。
ほう酸価値	通常運転時はSLCは作動しないため	-	○	○	○	○	○	個別の燃料設計に対する数学的モデルの依存性は低く、また、様々な格子条件・燃料設計に対して連続エネルギーモンテカルロを参照解とする準妥当性確認を網羅的に実施 [添付資料6] していることから、本物理現象に対する妥当性確認としては十分であると判断できる。
バイパスボイド分布	バイパス領域にボイドができる頻度が低い ため	○	○	○	○	○	○	支配現象はインチャンネルの3次元ボイド分布（ノード平均）と等しく、3次元ボイド分布の確認を通して本物理現象に対する妥当性確認も充足性を有すると判断できる。
チャンネル圧損	TIP測定値への感度が低い ため	-	-	○	-	○	○	等価直径や流路面積、燃料タイプごとに実験で定める局所圧損係数などを有する半経験的な数学的モデルを使用しており、圧損評価結果の不確かさは個別の燃料設計への依存性は少ない。また、8×8燃料及び9×9燃料（A型）に対する“チャンネル圧損試験”（個別効果試験）で幅広い圧力・流量条件に対して確認していることから、本物理現象に対する妥当性確認としては十分であると判断できる。
チャンネル流量		チャンネル圧損で確認される						チャンネル流量は上記のチャンネル圧損に支配されるため、チャンネル圧損の妥当性確認を通して本物理現象に対する妥当性確認が可能である。

### 3. 妥当性確認

#### 運転状態に対する網羅性

- LANCRA/AETNAの妥当性確認による確認項目が運転状態に対し網羅されていること（各運転状態において確認すべき項目が含まれていること）を以下に示す。

LANCRAについての運転状態に対する妥当性確認項目

	運転状態		
	通常運転	冷温停止	SLC
確認項目	無限増倍率・実効増倍率 局所出力分布 ガドリニア価値 ボイド反応度 ドップラ反応度 制御棒価値 減速材温度係数 同位体重量	無限増倍率・実効増倍率 局所出力分布 ガドリニア価値 ドップラ反応度 制御棒価値 減速材温度係数 遅発中性子割合	無限増倍率・実効増倍率 ほう素価値

AETNAについての運転状態に対する妥当性確認項目

	運転状態		
	通常運転	冷温停止	SLC
確認項目	余剰反応度 反応度係数 MLHGR/MCPR 設計出力履歴 高次モード未臨界度*	停止余裕 最大制御棒価値	ほう酸注入系停止機能

\* 原子炉設置変更許可申請書添付資料八において示す安定性の評価において入力となる未臨界度は、領域安定性が保守的な評価となるよう浅い未臨界度を設定しており、設計炉心が前述の設定値より深い未臨界度となっていることをAETNAによる高次モード解析で確認している。

### 3. 妥当性確認

## LANCRの適用範囲に対する網羅性

➤ LANCERの適用範囲と妥当性確認範囲との対応の確認結果を以下に示す。

LANCRの適用範囲と妥当性確認範囲

	適用範囲	妥当性確認範囲と内訳		
		右記の合計確認範囲	試験データによる妥当性確認	連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認
燃料棒配列	1×1～10×10	1×1～10×10	1×1, 8×8, 9×9	8×8～10×10
<sup>235</sup> U濃縮度	0.2～6 wt%	0.2～6 wt%	0.2～4.9 wt%	0.2～6 wt%
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含有量	0～15 wt%	0～15 wt%	0～5 wt%	0～15 wt%
プルトニウム含有率	0～15.5 wt%	0～15.5 wt%	0～8.7 wt%	0～15.5 wt%
核分裂性 プルトニウム富化度	0～10.4 wt%	0～10.4 wt%	0～□wt%	0～10.4 wt%
燃料棒の温度	10～2300 °C	10～2300 °C	10～80 °C	20～2300 °C
減速材ボイド率	0～100 %	0～100 %	0% (40%模擬あり)	0～100 %
減速材温度※1	10～286 °C	10～286 °C	10～80 °C	20～286 °C
減速材中のほう素濃度	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0～1700 ppm
燃焼度 (燃料集合体平均)	0～80 GWd/t	0～80 GWd/t	0 GWd/t※2	0～80 GWd/t
制御棒吸収材	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム

※1 温度はLANCR計算時の定格圧力における飽和温度としている。

※2 ここでは燃料集合体平均燃焼度を示しているため、臨界試験では全て0GWd/tであるが、照射後試験では、約17～59GWd/tのペレット燃焼度を測定している。

### 3. 妥当性確認

#### AETNAの適用範囲に対する網羅性

➤ AETNAの適用範囲と妥当性確認範囲との対応の確認結果を以下に示す。

AETNAの適用範囲と妥当性確認範囲

	適用範囲	妥当性確認範囲と内訳			
		右記の合計確認範囲	プラント運転実績による妥当性確認	試験データによる妥当性確認	連続エネルギーモンテカルロ計算等による妥当性確認
燃料棒配列	7×7 ~ 10×10	4×4 ~ 10×10	8×8, 9×9, 10×10	8×8, 9×9, 4×4, 5×5	8×8, 9×9, 10×10
炉型	BWR, ABWR	BWR3/4/5/6, ABWR	BWR3/4/5, ABWR	BWR5/6, SPERT III炉心	BWR, ABWR
燃料	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> , MOX
減速材温度	低温 ~ 出力運転時	低温 ~ 出力運転時	低温 ~ 出力運転時	出力運転時	出力運転時
炉圧	大気圧~8.6 MPa	大気圧~8.6 MPa	大気圧~7.3 MPa	0.2~8.6※ MPa	-
吸収材	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム)	制御棒(B <sub>4</sub> C)	制御棒(B <sub>4</sub> C), ほう酸水(SLC)

※ 8.6 MPaは熱水力試験における高圧時の条件。なお、LANCRで計算した核定数をAETNAにて参照する際は、相対水密度を用いて内外挿するため、定格圧力よりも高圧の状態であってもAETNAは適用可能である。

## 4. 妥当性確認結果

### LANCRの妥当性確認結果 ①信頼性確認結果

➤ 信頼性確認として実施したLANCRの妥当性確認の結果を以下に示す。

	試験（ [ ] 内は詳細記載箇所）	確認結果
試験による妥当性確認	Babcock & Wilcox臨界試験 [添付資料8 2.1.3.1]	U炉心, MOX炉心に対して実効増倍率は判断の目安を達成した。
	NCA臨界試験 [添付資料8 2.1.3.2]	BWR燃料を模擬した臨界試験に対し, 実効増倍率・局所出力分布は判断の目安を達成した。
	BASALA臨界試験 [4.2.3.1]	BWR燃料を模擬した臨界試験に対し, 実効増倍率・局所出力分布・各種反応度は判断の目安を達成した。
	Hellstrandらの実効共鳴積分の実験式 [4.2.3.1]	実効共鳴積分の計算値は判断の目安以内で実験式を模擬していた。
	MISTRAL臨界試験 [4.2.3.3]	U炉心, MOX炉心の実効遅発中性子割合は判断の目安を達成した。
	福島第二原子力発電所2号炉及びDodewaard炉の照射後試験 [添付資料8 2.1.3.6]	U燃料, MOX燃料について, 核種ごと重量割合は測定結果の重量割合に対する模擬性を有することを確認した。
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（ベース） [添付資料8 2.1.4.1]	実効増倍率について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	ウラン濃縮度の変化 [添付資料8 2.1.4.2.1]	ウラン濃縮度依存性について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	プルトニウム含有率の変化 [添付資料8 2.1.4.2.2]	プルトニウム含有率依存性について, 条件に依存する特異な傾向は認められなかった。
	ガドリニア価値 [添付資料8 2.1.4.3.1]	ガドリニア価値について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	減速材ポイド係数 [添付資料8 2.1.4.3.2]	減速材ポイド係数について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	ほう素価値 [添付資料8 2.1.4.3.3]	ほう素価値について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	制御棒価値 [添付資料8 2.1.4.3.4]	制御棒価値について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	等温温度係数 [添付資料8 2.1.4.3.5]	等温温度係数について, 条件などに依存する特異な傾向は認められなかった。
	ドップラ係数 [添付資料8 2.1.4.3.6]	ドップラ係数について, 条件に依存する特異な傾向は認められなかった。
	モンテカルロ燃焼計算 [添付資料8 2.1.4.4]	燃焼時の無限増倍率について, 特異な傾向は認められなかった。
ガンマ発熱量 [添付資料8 2.1.4.5]	複数の燃焼条件におけるガンマ発熱分について, 参照解に対し特異な傾向無く模擬できている。	

\*1 “目安”はベンチマークにおけるコード間ばらつきや測定の不確かさの2σなど。詳細は, コード説明書4.2.2の表4.2-1に示す。  
上記の他に検証のための試験を行っており, コード説明書には信頼性確認の参考として一部の結果を記載している。

\*2 BASALA, MISTRAL臨界試験以外に, フランス原子力庁の臨界試験装置EOLE炉におけるFUBILA試験やベルギーの臨界試験装置VENUSにおけるREBUS計画でのBWR-MOX臨界試験も実施されているが, いずれもフルMOX BWR炉心の炉心特性を取得する目的で実施された臨界試験である。現状のAETNAの妥当性確認は部分装荷MOXまでを見据えたものとなっており, 島根3号炉の許認可解析への適用性を確認する目的の今回の妥当性確認としては現状で十分と判断できる。

## 4. 妥当性確認結果

### LANCRの妥当性確認結果 ②不確かさ把握結果

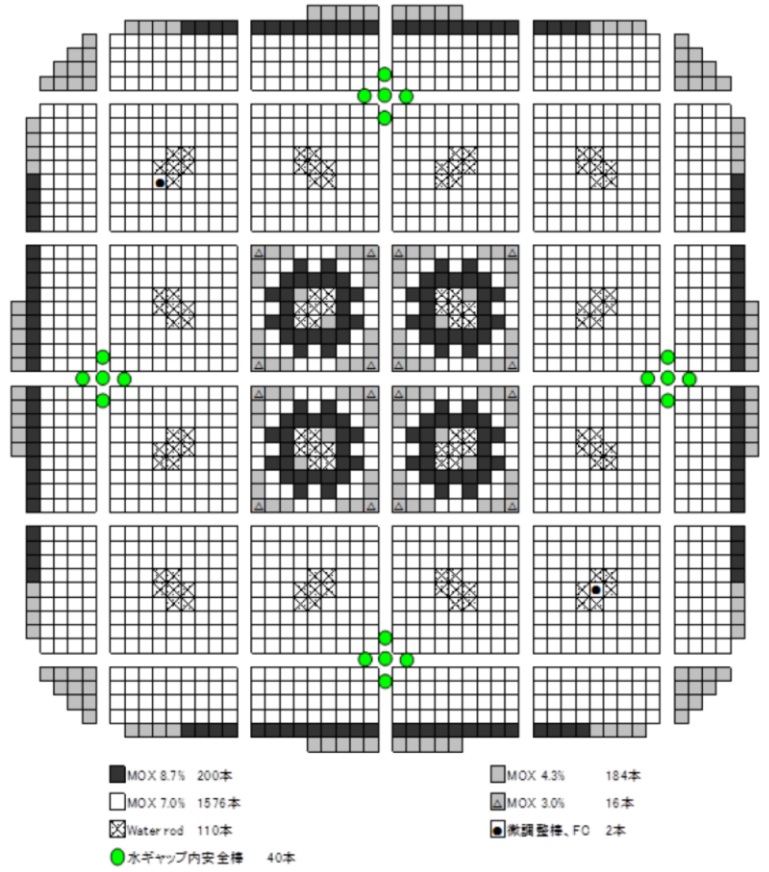
➤ 不確かさの把握として実施したLANCRの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果 ( [ ] 内は詳細記載箇所)	不確かさ評価方法および 物理的モデルの不確かさの扱い
ボイド反応度	BASALA試験とは測定の不確かさの範囲とほぼ等しい [ ] %の不確かさ [4.2.3.1.2] で一致した。	測定値との相対差で評価。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこれに含まれる。
ドップラ反応度	[ ] %の不確かさを持つHellstrandらの実験式の結果に対し、実験式の持つ不確かさの範囲内でほぼ一致 [4.2.3.2] した。	実験式と計算値の差に対し、実験式の不確かさが大きいため、実験式の不確かさをドップラ反応度の不確かさとした。 物理的モデルの不確かさとして実験式の不確かさを考慮している。
ほう素価値	試験データとは測定の不確かさの範囲内で一致し [4.2.3.1.3] , 燃焼度依存の95%信頼度-95%確率値の最大値は [ ] % $\Delta$ k [添付資料6] であることを確認した。	参照コード (MCNP5_DBRC) とLANCRにおけるほう素価値評価結果の相対差の95%信頼度-95%確率値で算出。 参照コードの不確かさ評価分も考慮しており、その中で測定の不確かさ等も含まれる。
遅発中性子割合	試験データとの比較を実施し、測定の不確かさの [ ] 以内、従来コードと同等の [ ] %未満の相対差で実験値を再現すること [4.2.3.3] を確認した。	測定値と計算値の不確かさの相対差の平均値が、左記の従来許認可コードの不確かさを下回ることを確認し、従来コードの不確かさを踏襲。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこれに含まれる。

# 4. 妥当性確認結果

## LANCRの妥当性確認の実施例 BASALA臨界試験（ボイド反応度）

➤ LANCRの妥当性確認の実施例として、BASALA臨界試験（試験体系と試験条件）におけるボイド反応度の測定値と計算値の比較による妥当性確認結果を以下に示す。



BASALA 臨界試験体系（炉心1）

BASALA 臨界試験条件と島根3号炉の比較

試験 パラメータ	BASALA (フランス)	島根3号炉 (参考)
燃料	MOX燃料集合体	ウラン燃料集合体
試験領域U-235濃縮度又はプルトニウム含有率(wt%)	3.0~8.7 (Puf: <input type="text"/> )	初装荷 1.5~4.1 取替 3.8
減速材温度 (°C)	約20 炉心1 : 40%ボイド 模擬 炉心2 : 冷温模擬	停止余裕評価 20 高温運転時 平均約40%ボイド
H/HM (原子数密度)	炉心1 : 約5 炉心2 : 約9	40%ボイド : 約5 冷温 : 約9
燃料棒又は燃料集合体ピッチ (cm)	燃料棒 炉心1 : 1.13 炉心2 : 1.35 燃料集合体 炉心1 : 約11.4 炉心2 : 約13.6	燃料棒 約1.4 燃料集合体 約15

ボイド反応度の実験値と測定値の比較による不確かさ（**相対差の平均値**）は  % であった。（測定の不確かさは約  %）

## 4. 妥当性確認結果

### AETNAの妥当性確認結果 ①信頼性確認結果

➤ 信頼性確認として実施したAETNAの妥当性確認の結果を以下に示す。

試験（ [ ] 内は詳細記載箇所）		確認結果	
連続エネルギーモンテカルロ計算による 妥当性確認	均質円筒炉心高次モード問題 [添付資料 8]	モード間固有値間隔のモード依存性と、周方向一次モードの径方向分布について、解析解に対する模擬性を確認した。	
	局所出力	初装荷多種類燃料炉心問題 [添付資料 8]	初装荷多濃縮度燃料隣接配置, U/MOX燃料隣接配置, 10X10燃料平衡炉心模擬配置の各種条件下で、参照解の燃料棒出力分布の傾向を模擬できることを確認した。
		MOX燃料部分装荷炉心問題 [添付資料 8]	
		10×10燃料装荷炉心問題 [添付資料 8]	
	燃焼履歴	制御棒履歴問題 [添付資料 8]	制御棒履歴効果の影響下において、実効増倍率および最大局所出力について、参照解の燃焼推移傾向を模擬できることを確認した。
	全炉心体系 [添付資料 8]	初装荷多濃縮炉心における制御棒価値, ボイド反応度, SLC作動模擬時の反応度価値について、ウラン・MOXの装荷割合に対し特異な傾向が無く参照解を模擬できることを確認した。	
チャンネル流量配分 [添付資料 8]	定格出力時・部分出力時においてチャンネルの流量配分が参照解を模擬できることを確認した。		
プラント運転実績による妥当性確認	冷温時臨界固有値（制御棒価値含む） [4.3.4.1]	冷温実効増倍率および制御棒価値について、炉型・格子タイプに対し特異な傾向を示すことなく実機傾向を模擬できることを確認した。	
	出力運転時臨界固有値 [添付資料 8]	実機追跡計算結果の出力運転時実効増倍率について、炉型・格子タイプに対し特異な傾向が無いことを確認した。	
	出力分布（TIPとの比較） [4.3.4.2]	炉型・格子タイプに対し特異な傾向を示すことなく実機の3次元出力分布の傾向を模擬できることを確認した。	
	出力分布（ガンマスキャンとの比較） [4.3.4.3]	炉型・格子タイプに対し特異な傾向を示すことなく実機の3次元出力分布の傾向を模擬できることを確認した。	
	燃料棒出力分布（ガンマスキャンとの比較） [4.3.4.4]	集合体内のボイド率などに依存することなく実機の3次元燃料棒出力分布を模擬できることを確認した。	
	照射後試験の測定燃焼度と計算燃焼度との比較 [4.3.4.5]	集合体内の測定位置やペレット種類に対して特異な傾向無く測定燃焼度を模擬できることを確認した。	
	MOX燃料装荷炉心 [添付資料 8]	ウラン炉心と同程度の予測性能を有することを確認した。	
部分出力運転 [添付資料 8]	定格出力時と同程度の予測性能を有することを確認した。		
試験による 妥当性確認	ボイド率測定 [添付資料 8]	出口平均ボイド率の圧力・流量依存性について測定結果の傾向を模擬できることを確認した。	
	チャンネル圧損試験 [添付資料 8]	集合体圧力損失の圧力・流量依存性について測定結果の傾向を模擬できることを確認した。	
	安定性試験高次モード分布との比較 [添付資料 8]	周方向一次モードの径方向分布について、測定結果を模擬できることを確認した。	

“目安”についての詳細は、コード説明書4.3.3の表4.3-11に示す。

上記の他に検証のための試験を行っており、コード説明書には信頼性確認の参考として一部の結果を記載している。



## 4. 妥当性確認結果

### AETNAの妥当性確認結果 ②不確かさ把握結果

➤ 不確かさの把握として実施したAETNAの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果（ [ ] 内は詳細記載箇所）	不確かさ評価方法および物理的モデルの不確かさの扱い
炉停止余裕	炉停止余裕の妥当性確認のため、冷温時臨界固有値を確認した。ウラン燃料装荷炉心における実績臨界固有値の95%信頼度-95%確率値で [ ] % $\Delta k$ [添付資料6] であり、MOX装荷炉心に対しても不確かさの拡大は認められない。[添付資料8]	冷温臨界固有値評価値のプラントごとの全データ平均値からの個々のデータのばらつきについて95%信頼度-95%確率値を評価。測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
最大制御棒価値	MOX燃料装荷炉心を含む110万kW級BWR及び80万kW級BWRの2プラント8ケースの冷温時制御棒価値測定結果に対し、計算値と測定値の差は平均 [ ] $\Delta k/k'$ 、標準偏差は [ ] $\Delta k/k'$ 、相対差の平均は [ ] %、標準偏差は [ ] %である。[4.3.4.1]	制御棒価値の計算値と測定値の相対差の標準偏差。適用性判断の不確かさの積算において保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこれに含まれる。
熱機械 (MLHGR) 焼損 (MCPR)	ノード出力・局所出力には、核・熱流動の主要な数学的モデルがすべて影響したうえで得られる結果である。 ガンマスキャンと比較した局所出力分布RMS差は約 [ ] % [4.3.4.4] であり、連続エネルギーモンテカルロ計算との比較による燃料集合体内局所出力分布のRMS差 [添付資料8] と、燃料の製造公差による不確かさと合成された局所出力分布の不確かさと同程度であった。ウラン燃料装荷炉心(BWR大型取替及びABWR初装荷)におけるガンマスキャン測定値との比較よりノード出力のRMS差は [ ] %以下であり [4.3.4.3]、MOX装荷炉心に対して不確かさの拡大は認められない。[添付資料8] ガンマスキャンより測定の不確かさが大きいものと同じく3次元分布を多数条件で測定しているTIPとの比較 [4.3.4.2] で得られる不確かさと整合している。	局所出力： 集合体内における局所出力分布の燃料棒ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 ノード出力： 炉内3次元ノード相対出力分布の集合体ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 測定の不確かさ（局所出力およびノード出力）： 測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
設計出力履歴 (燃焼度)	照射後試験による測定ペレット燃焼度と計算値のRMS差は [ ] %であった。[4.3.4.5]	試料ごと（照射後燃料）のペレット燃焼度の測定値と計算値のRMSを評価。測定の不確かさ等は減速材ポイド係数の保守因子への影響は十分に小さい。（参照P.28）

## 4. 妥当性確認結果

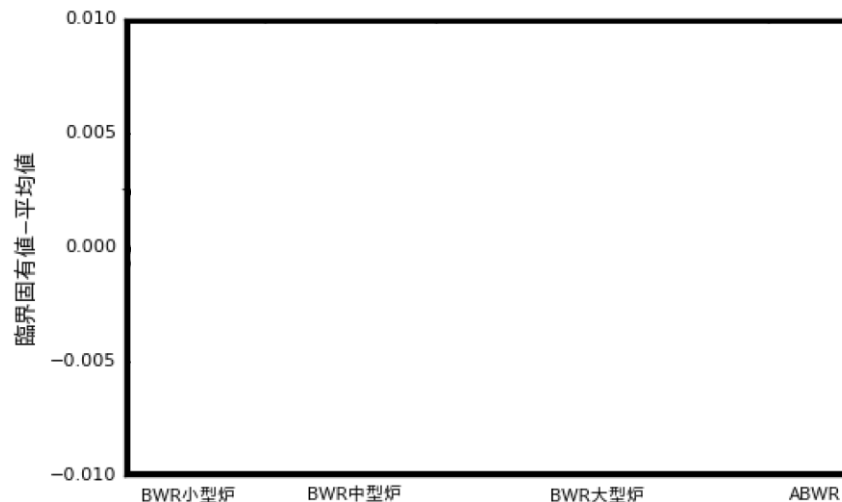
### AETNAの妥当性確認の実施例 冷温臨界固有値

- AETNAの妥当性確認の実施例として、冷温臨界固有値の妥当性確認結果を以下に示す。  
冷温臨界固有値 評価実施炉心

右表に示すBWR各炉型・格子・8X8および9X9燃料装荷炉心について、各サイクルの実機冷温臨界試験の追跡計算を行い、左下図のように臨界固有値のばらつきに炉型や格子に対し特異な傾向が無いことを確認した。

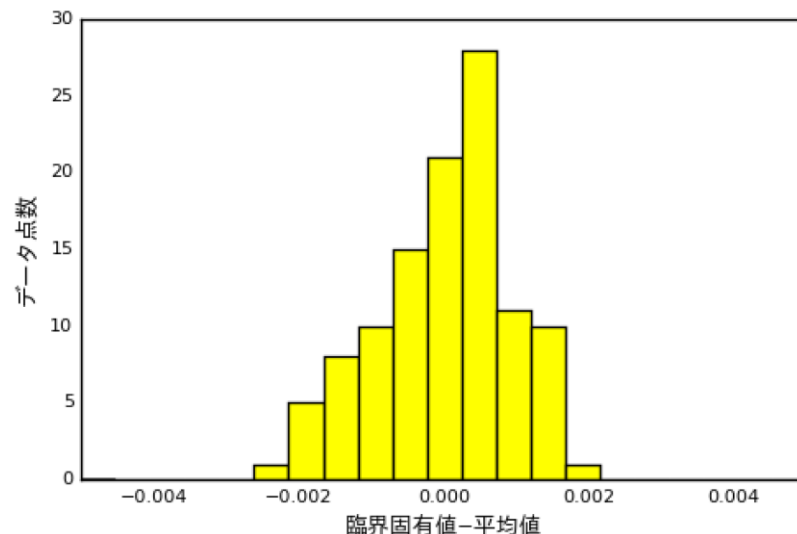
全プラント、全サイクルに対する臨界固有値の変動成分のヒストグラムを右下図に示す。各試験における臨界固有値と平均値との標準偏差は

$\Delta k$ 、これは95%信頼度 - 95%確率値では  $\%$   $\Delta k$  である。



冷温臨界固有値の変動 (プラントごと)

炉型	サイズ (万kW級)	格子	プラント	評価サイクル数
BWR小型炉	50	D	A (BWR3)	4
		S	B (BWR5)	4
BWR中型炉	80	D	C (BWR4)	4
		S	D (BWR5)	5
BWR大型炉	110	C	E (BWR5)	4
			F (BWR5)	5
		S	G (BWR5)	4
			H (BWR5)	4
ABWR	135	N	I (ABWR)	4



冷温臨界固有値の変動ヒストグラム (全プラント)

## 5. 許認可解析への適用性確認

### 注目すべき応答変量と要求すべき予測性能の指定

- 安全解析で重要な裕度設定と関連するもの（反応度係数の保守因子，制御棒落下解析での保守因子），許認可静特性解析において重要で明示的な裕度設定を行っているもの（SLMCPR，SLC）について注目すべき応答変量と要求すべき予測性能を以下に示す。

注目すべき応答変量と要求すべき予測性能

項目	不確かさの考慮方法	設計裕度で考慮する不確かさと要求すべき予測性能			備考
		注目すべき応答変量 ((L)はLANCRを, (A)はAETNAを表す。)	LANCR/AETNA以外の 不確かさ	左記積算に対する 要求すべき予測性能	
反応度係数の保守因子	不確かさ成分の積算値	減速材ポイド係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , ノード出力(A), ノード燃焼度(A)	・炉心一点近似モデル由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	25 %	許認可解析における包括解析で考慮
制御棒価値の保守因子	不確かさ成分の積算値	ドブプラ係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , 制御棒価値(A)	・空間縮約由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	0.3 % $\Delta k$	許認可解析における包括解析で考慮
SLMCPR	統計解析 (各不確かさ成分を 独立に扱う)	ノード出力(A)	—	5.2 %	許認可解析における包括解析で考慮
		局所出力(A)	—	3.0 %	許認可解析における包括解析で考慮
SLC	不確かさ成分の積算値	ほう素価値(L), 冷温臨界固有値(A)	参照コードの不確かさ	1.5 % $\Delta k$	取替炉心段階で個別炉心に対して考慮

なお，原子炉設置変更許可申請書 添付書類八において解析例として示す平衡炉心の成立性を考慮すると MLHGR，MCPR，炉停止余裕の3つが注目すべき応答変量の候補として挙げられる。

MLHGR 及び MCPR はノード出力及び局所出力が関係するが，これらは SLMCPR の観点で確認している。

停止余裕については，原子炉設置変更許可申請書で設定している裕度に対し，LANCR/AETNA の冷温時実効増倍率の不確かさが十分に小さく，許認可適用性判断への影響は少ない。

## 5. 許認可解析への適用性確認

### 適用性確認結果（要求すべき予測性能に対する達成状況）

- 妥当性確認の結果得られた注目すべき応答変量の不確かさの積算結果と、要求すべき予測性能の比較結果を以下に示す。
- LANCR/AETNAはすべての要求すべき予測性能を満足しており、島根3号炉許認可静特性解析に適用性があると判断できる。

注目すべき応答変量やその他の不確かさと要求すべき予測性能の比較結果

項目	LANCR/AETNA使用時の不確かさ			要求すべき 予測性能	備考
	注目すべき応答変量 ((L)はLANCRを, (A)はAETNAを表す。)	LANCR/AETNA以外の 不確かさ	左記合計値		
反応度係数の 保守因子	減速材ボイド係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , ノード出力(A), ノード燃焼度(A)	・炉心一点近似モデル由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	<input type="checkbox"/> %	25 %	[添付資料 4]
制御棒価値の 保守因子	ドップラ係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , 制御棒価値(A)	・空間縮約由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	<input type="checkbox"/> % $\Delta k$	0.3 % $\Delta k$	[添付資料 5]
SLMCPR	ノード出力(A)	—	<input type="checkbox"/> %	5.2 %	—
	局所出力(A)	—	<input type="checkbox"/> %	3.0 %	—
SLC	ほう素価値(L), 冷温臨界固有値(A)	参照コードの不確かさ	<input type="checkbox"/> % $\Delta k$	1.5 % $\Delta k$	[添付資料 6]

## 5. 許認可解析への適用性確認

### 適用性確認時の不確かさ積算実施例（反応度係数の保守因子）

- 許認可解析への適用性確認のための不確かさの積算の実施例として、反応度係数（減速材ボイド係数）の保守因子についての実施結果を以下に示す。
- 応答変量を積み上げた結果は  % であり、要求すべき予測性能（25%）の範囲内である。

解析コード	応答変量もしくはコード以外の不確かさ	不確かさ
LANCR	減速材ボイド係数, 実効遅発中性子割合	<input type="text"/> %
AETNA	3次元出力分布, 3次元ノード燃焼度	<input type="text"/> % <sup>注1</sup>
-	炉心一点近似モデルの不確かさ	<input type="text"/> %
-	取替炉心の詳細設計段階の不確かさ	<input type="text"/> %
	不確かさの合計（二乗和平方根） <sup>注2</sup>	<input type="text"/> %

注1：3次元出力分布と3次元ノード燃焼度の不確かさに起因する減速材ボイド係数の不確かさ。

仮に3次元ノード燃焼度の測定の不確かさを考慮した場合でも、「3次元出力分布, 3次元ノード燃焼度」の不確かさは  % 程度となるが、この値とした場合でも不確かさの合計値（上記表に示す二乗和平方根の小数点以下切り上げ値）は変わらない。

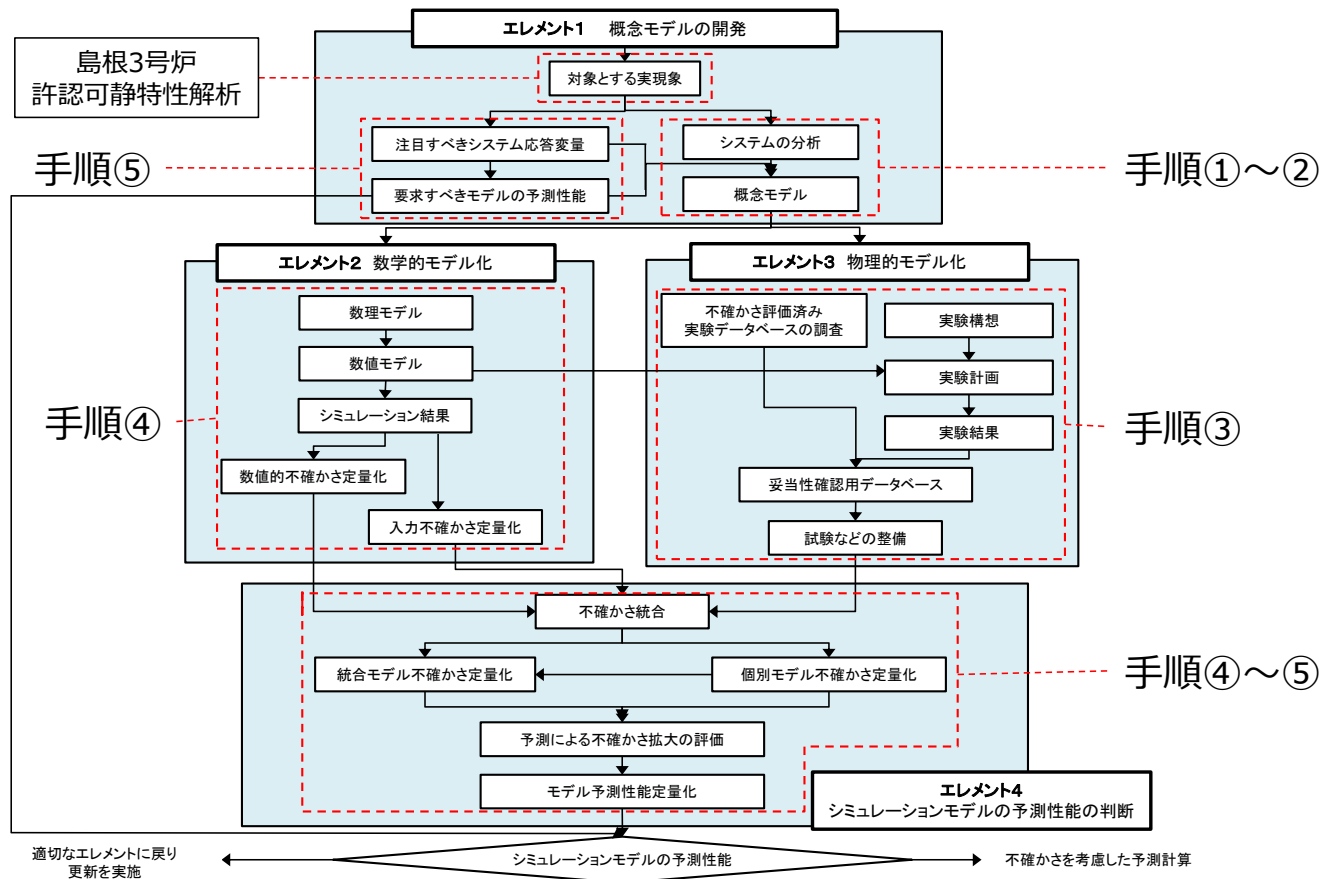
注2：上記の各不確かさ成分は独立な偶然誤差であり、不確かさの合計は二乗和平方根で求めている。

## 6. まとめ

- LANCR/AETNAが、島根3号炉（ABWR/9x9燃料炉心）許認可静特性解析へ適用できることを以下のとおり確認した。
  - ✓ 妥当性確認が以下に対して網羅していることを確認
    - 全ての重要な物理現象
    - 炉型・格子タイプ・燃料タイプ
    - 運転条件
    - 適用範囲
  - ✓ 妥当性確認（信頼性確認）によりLANCR/AETNAの物理現象に対する模擬性を確認
    - 解析コードによる評価対象が目安となる不確かさで予測できること、解析コードによる計算結果に特異な傾向が無く予測性を示すことを確認した。
  - ✓ 妥当性確認（不確かさの把握）によりLANCR/AETNAの不確かさを把握
    - 許認可解析への適用性確認に必要な不確かさを定量的に把握した。
  - ✓ LANCR/AETNAの許認可解析への適用性を確認
    - 許認可解析への適用性を判断するために、注目すべき応答変量と要求すべき予測性能を指定した。
    - 妥当性確認（不確かさの把握）で把握した不確かさの積算結果と、要求すべき予測性能を比較し、LANCR/AETNAが要求すべき予測性能を満足することを確認した。

# 別紙 審査会合における指摘事項 (No.4) に対する回答 (1/2)

- 指摘事項 (第1076回審査会合 2022年9月29日)
- 検証及び妥当性確認のプロセスが適切に実施されているかを確認するため、当該プロセスの内容を整理すること。なお、学協会基準等を参照した場合は、参照した基準等を示すこと。
- 回答
- 適用性確認の手順①～⑤と、日本原子力学会標準「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」(以下、「M&S標準」という。)の各エレメント対応を以下に示す。エレメントの概要と適用性確認手順の詳細は次ページに示す。



M&S標準における実施フローと適用性確認手順の対応

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.4）に対する回答（2/2）

### ■ 回答（つづき）

➤ M&S標準における各エレメントの概要と適用性確認の手順との対応を下表に示す。

M&S標準の各エレメントと適用性確認手順の対応

エレメント	M&S標準の内容	手順	適用性確認における対応
エレメント1	対象とする実現現象を指定する。		島根3号炉許認可静特性解析を対象とする。
	数学モデルや物理モデル（実験）を構築するため、シミュレーションを行う対象システムについて分析し、それらを支配する重要な物理プロセスで理想化することで、概念モデルを構築する。	手順① 手順②	手順①において重要度ランキングテーブル（PIRT）を作成し、手順②におけるモデル性能比較表によって重要現象のモデル化の網羅性を示している。
	対象システムの性能を評価する指標を特定し要求すべき予測性能を指定する。	手順⑤	LANCR/AETNAについて達成すべき予測性能の指標と性能を定めている。要求性能の指標と数値は手順⑤における判断時に示す。
エレメント2	概念モデルを数学的表現に変換し、数値モデルとして計算機に実装しコード検証/解検証によってこれらを検証するとともに、数値的不確かさを定量化する。	手順④	数値モデルの適用範囲に渡る確認状況を手順④で示す。 数理・数値モデルの一部は3章に、検証及び妥当性確認の詳細は4章で示している。手順④では、数学的モデルの不確かさ（数理モデル段階での近似、数値モデルの打ち切り誤差や離散化誤差など）を示す代わりに物理モデルの不確かさと併せた総括不確かさを妥当性確認を通して評価している。なお、モデル実装/コード検証/解検証はメーカのQMSにより達成されることを前提としている。
エレメント3	概念モデルに対する不確かさ評価済みの実験データをそろえる。不足する実験について計画を立て実施する。	手順③	手順③におけるモデル性能比較表によって、重要な現象ごとに必要な妥当性確認が網羅されていることを確認する。個々の実験（実機、試験、モンテカルロ計算）の詳細は4章の妥当性確認で示す。
エレメント4	数学モデルに由来する数値的不確かさや入力不確かさと、実験に由来する物理モデルの不確かさを統合する。 実験データの存在しない領域に対する予測の拡大を定量化する。 利用目的に対する合否を判断する。	手順④ 手順⑤	妥当性確認結果から総括不確かさを把握するとともに、手順④における適用範囲に対する妥当性確認範囲の包絡性により、予測による不確かさの拡大がないことを確認する。 手順⑤においてLANCR/AETNAコードが島根3号炉許認可解析を行う上で要求される予測性能を満たすことを確認することにより、その適用性を示す。



## 別紙 審査会合における指摘事項（No.5）に対する回答（1/5）

### ■ 指摘事項（第1076回審査会合 2022年9月29日）

- 妥当性確認に採用している試験データ等について、解析結果と比較するにあたって、想定している炉心状態を網羅しているか、信頼性のある試験データかなどを含め、試験データ等の選定の考え方を整理すること。

### ■ 回答（P.9再掲）

- 妥当性確認において参照する試験の構成の考え方を以下に示す。

- ✓ 従来の炉心解析コードで採用していた実績のある試験をベースに、炉型・格子タイプ・燃料タイプ、運転状態および適用範囲に対する網羅性を確認するとともに、新しい知見を踏まえて追加や差し替えの要否を考慮し、必要な試験を追加した。
- ✓ 追加した試験を以下に示す。

- |                                |   |                          |
|--------------------------------|---|--------------------------|
| ① モンテカルロ計算による妥当性確認（個・L）        | } | 計算機やコード解析能力<br>の進展を踏まえ追加 |
| ② モンテカルロ燃焼計算による妥当性確認（個・L）      |   |                          |
| ③ 全炉心モンテカルロ計算による妥当性確認（個・A）     |   |                          |
| ④ 燃料棒出力妥当性確認（ガンマスキャンとの比較）（総・A） | } | 海外知見の適用                  |
| ⑤ 安定性試験高次モード分布との比較（総・A）        |   |                          |

注1：試験を実施する際の制約などからデータ数が限られる試験による妥当性確認を補完することを目的に、連続エネルギーモンテカルロ計算による確認を妥当性確認に準ずるものと位置づける。

注2：“個”は個別効果試験，“総”は総合効果試験，“L”はLANCR，“A”はAETNAに該当する妥当性確認が存在することを示す。

上記データを追加した妥当性確認に関して、以下の解析条件に対する網羅性を次ページ以降で詳細を示す。

炉型・格子タイプ・燃料タイプ

運転状態

適用範囲



## 別紙 審査会合における指摘事項（No.5）に対する回答（3/5）

### ■ 回答（つづき）（P.17再掲）

- LANCR/AETNAの妥当性確認による確認項目が運転状態に対し網羅されていること（各運転状態において確認すべき項目が含まれていること）を以下に示す。

LANCRについての運転状態に対する妥当性確認項目

	運転状態		
	通常運転	冷温停止	SLC
確認項目	無限増倍率・実効増倍率 局所出力分布 ガドリニア価値 ボイド反応度 ドップラ反応度 制御棒価値 減速材温度係数 同位体重量	無限増倍率・実効増倍率 局所出力分布 ガドリニア価値 ドップラ反応度 制御棒価値 減速材温度係数 遅発中性子割合	無限増倍率・実効増倍率 ほう素価値

AETNAについての運転状態に対する妥当性確認項目

	運転状態		
	通常運転	冷温停止	SLC
確認項目	余剰反応度 反応度係数 MLHGR/MCPR 設計出力履歴 高次モード未臨界度*	停止余裕 最大制御棒価値	ほう酸注入系停止機能

\* 原子炉設置変更許可申請書添付資料八において示す安定性の評価において入力となる未臨界度は、領域安定性が保守的な評価となるよう浅い未臨界度を設定しており、設計炉心が前述の設定値より深い未臨界度となっていることをAETNAによる高次モード解析で確認している。

# 別紙 審査会合における指摘事項（No.5）に対する回答（4/5）

## ■ 回答（つづき）（P.18再掲）

➤ LANCRの適用範囲と妥当性確認範囲との対応の確認結果を以下に示す。

LANCRの適用範囲と妥当性確認範囲

	適用範囲	妥当性確認範囲と内訳		
		右記の合計確認範囲	試験データによる妥当性確認	連続エネルギーモンテカルロ計算による妥当性確認
燃料棒配列	1×1～10×10	1×1～10×10	1×1, 8×8, 9×9	8×8～10×10
<sup>235</sup> U濃縮度	0.2～6 wt%	0.2～6 wt%	0.2～4.9 wt%	0.2～6 wt%
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含有量	0～15 wt%	0～15 wt%	0～5 wt%	0～15 wt%
プルトニウム含有率	0～15.5 wt%	0～15.5 wt%	0～8.7 wt%	0～15.5 wt%
核分裂性 プルトニウム富化度	0～10.4 wt%	0～10.4 wt%	0～ <input type="text"/> wt%	0～10.4 wt%
燃料棒の温度	10～2300 °C	10～2300 °C	10～80 °C	20～2300 °C
減速材ボイド率	0～100 %	0～100 %	0% (40%模擬あり)	0～100 %
減速材温度※1	10～286 °C	10～286 °C	10～80 °C	20～286 °C
減速材中のほう素濃度	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0～1700 ppm
燃焼度 (燃料集合体平均)	0～80 GWd/t	0～80 GWd/t	0 GWd/t※2	0～80 GWd/t
制御棒吸収材	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム	B <sub>4</sub> C, ハフニウム

※1 温度はLANCR計算時の定格圧力における飽和温度としている。

※2 ここでは燃料集合体平均燃焼度を示しているため、臨界試験では全て0GWd/tであるが照射後試験では約17～59GWd/tのペレット燃焼度を測定している。

# 別紙 審査会合における指摘事項 (No.5) に対する回答 (5/5)

## ■ 回答 (つづき) (P.19再掲)

➤ AETNAの適用範囲と妥当性確認範囲との対応の確認結果を以下に示す。

### AETNAの適用範囲と妥当性確認範囲

	適用範囲	妥当性確認範囲と内訳			
		右記の合計確認範囲	プラント運転実績による妥当性確認	試験データによる妥当性確認	連続エネルギーモンテカルロ計算等による妥当性確認
燃料棒配列	7×7 ~ 10×10	4×4 ~ 10×10	8×8, 9×9, 10×10	8×8, 9×9, 4×4, 5×5	8×8, 9×9, 10×10
炉型	BWR, ABWR	BWR3/4/5/6, ABWR	BWR3/4/5, ABWR	BWR5/6, SPERT III炉心	BWR, ABWR
燃料	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub> , MOX	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> , MOX
減速材温度	低温 ~ 出力運転時	低温 ~ 出力運転時	低温 ~ 出力運転時	出力運転時	出力運転時
炉圧	大気圧 ~ 8.6 MPa	大気圧 ~ 8.6 MPa	大気圧 ~ 7.3 MPa	0.2 ~ 8.6※ MPa	-
吸収材	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B <sub>4</sub> C, ハフニウム)	制御棒(B <sub>4</sub> C)	制御棒(B <sub>4</sub> C), ほう酸水(SLC)

※ 8.6 MPaは熱水力試験における高圧時の条件。なお、LANCRで計算した核定数をAETNAにて参照する際は、相対水密度を用いて内外挿するため、定格圧力よりも高圧の状態であってもAETNAは適用可能である。

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.6）に対する回答（1/2）

- 指摘事項（第1076回審査会合 2022年9月29日）
- 試験データ等と比較した結果により，妥当と判断した考え方（どういう観点から，何を満たしていればよいと考えるのか）を整理すること。

### ■ 回答（P.8再掲）

- 妥当性確認における実施項目を以下に示す。

#### 信頼性確認

- ✓ 解析コードが物理現象に対して模擬性を有することの確認を，重要な物理現象および解析条件に対して網羅するように実施する。
  - 模擬性を有することの確認は，解析コードによる評価対象が目安となる不確かさで予測できること，解析コードによる計算結果に特異な傾向が無く予測性を示すことを確認することにより行う。
  - この確認は，全ての重要な物理現象を網羅するとともに，以下の解析条件に対して網羅するように行う。

炉型・格子タイプ・燃料タイプ

運転状態

適用範囲

#### 不確かさの把握

- ✓ 許認可解析への適用性確認（手順⑤）に必要な不確かさを定量的に把握する。

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.6）に対する回答（2/2）

### ■ 回答（つづき）（P.10再掲）

➤ 妥当性確認において参照する試験の区分を以下に示す。

#### ✓ 総合効果試験

炉心解析時と同様に解析コードの全体的な解析モデルを使用することにより、多数の物理現象が作用した結果を確認できる妥当性確認

例：出力分布確認試験

直接的には核分裂反応やガンマ線反応を起因とする出力の相対分布を測定値との比較で確認するものであるが、計算の過程ではボイド分布や圧損分布など、一部を除いたAETNAの主要な解析モデルがそれぞれの感度に応じて結果に影響を及ぼしている。

→ 炉心解析時と同様に解析コードの全体的な機能を使用することから、実機運転データによる試験は重要性が高い。そのため、炉型・格子タイプ・燃料タイプについて十分な試験データ数で網羅するように実施する。

#### ✓ 個別効果試験

少数の解析モデルのみに機能を制限させることで、着目する物理現象が作用した結果を十分な感度で確認できる妥当性確認

例：ボイド率測定試験，チャンネル圧損試験，核定数に対するモンテカルロ計算による準妥当性確認，各種臨界試験

→ 総合効果試験では確認が困難な物理現象，あるいは測定頻度が少ない総合効果試験で確認している物理現象の作用した結果を確認する妥当性確認の補完として実施する。

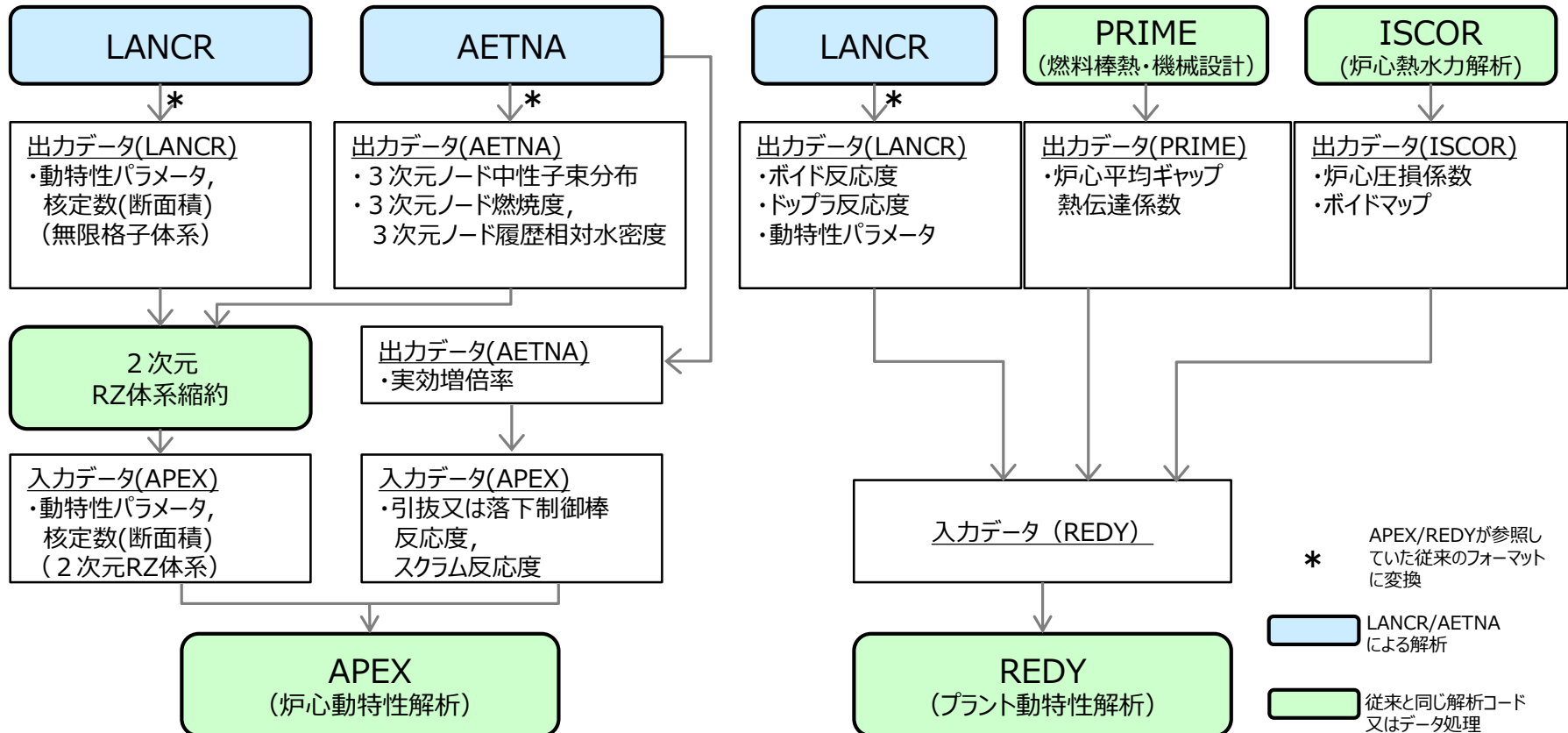
# 別紙 審査会合における指摘事項（No.7）に対する回答（1/2）

## ■ 指摘事項（第1076回審査会合 2022年9月29日）

- 安全解析コード等の入力となるLANCR/AETNAコードの出力を整理し、必要に応じて当該出力から安全解析コード等への入力のための処理プロセスも示すこと。

## ■ 回答

- 安全解析コードに引き渡すデータの処理プロセスの主要な例として、APEX/REDYに引き渡すデータの処理プロセスを以下に示す。





# 別紙 審査会合における指摘事項（No.7）に対する回答（2/2）

## ■ 回答（つづき）

- 原子炉設置変更許可申請書の添付書類十に示す安全解析を実施する際に各種安全解析コードに引き渡すLANCR/AETNAの出力データを以下に示す。

### 安全解析コードに引き渡すデータ

解析	安全解析コード	安全解析コードで使用されるLANCR/AETNAの出力データ	
		LANCR	AETNA
運転時の異常な過渡変化の解析	原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き	APEX/SCAT	核定数（拡散定数，核分裂断面積，生成断面積，吸収断面積，減速断面積，中性子速度），ドップラ係数，局所出力ピーキング係数，R因子，動特性パラメータ（遅発中性子割合，遅発中性子先行核崩壊定数） 引抜制御棒反応度，スクラム反応度 （入力作成過程で使用されるデータ） 実効増倍率，3次元ノード中性子束分布，3次元ノード燃焼度，3次元ノード履歴相対水密度
	出力運転中の制御棒の異常な引き抜き	AETNA	
	給水加熱喪失	REDY/ISCOR	ボイド反応度，ドップラ反応度，R因子，動特性パラメータ（遅発中性子割合，中性子平均寿命，遅発中性子先行核崩壊定数） （入力作成過程で使用されるデータ） 3次元出力分布，3次元ノード燃焼度
	上記以外の運転時の異常な過渡変化の解析	REDY/SCAT	ボイド反応度，ドップラ反応度，R因子，動特性パラメータ（遅発中性子割合，中性子平均寿命，遅発中性子先行核崩壊定数） （入力作成過程で使用されるデータ） 3次元出力分布，3次元ノード燃焼度
設計基準事故解析	原子炉冷却材喪失	LAMB/SCAT/SAFER	
	原子炉冷却材流量の喪失	REDY/SCAT/SAFER	ボイド反応度，ドップラ反応度，動特性パラメータ（遅発中性子割合，中性子平均寿命，遅発中性子先行核崩壊定数） （入力作成過程で使用されるデータ） 3次元出力分布，3次元ノード燃焼度
	制御棒落下	APEX/SCAT	使用するデータの項目は“原子炉起動時における制御棒の異常な引き抜き”と同じ
	主蒸気管破断	LAMB/SCAT/SAFER	

## 別紙 審査会合における指摘事項 (No.8) に対する回答 (1/2)

- 指摘事項 (第1076回審査会合 2022年9月29日)
  - 妥当性確認プロセスから、どのように解析コードの不確かさの値を算出しているのか整理すること。
- 回答 (P.21再掲)
  - 不確かさの把握として実施したLANCRの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果 ( [ ] 内は詳細記載箇所)	不確かさ評価方法および 物理的モデルの不確かさの扱い
ボイド反応度	BASALA試験とは測定の不確かさの範囲とほぼ等しい [ ] %の不確かさ [4.2.3.1.2] で一致した。	測定値との相対差で評価。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこちらに含まれる。
ドブプラ反応度	[ ] %の不確かさを持つHellstrandらの実験式の結果に対し、実験式の持つ不確かさの範囲内でほぼ一致 [4.2.3.2] した。	実験式と計算値の差に対し、実験式の不確かさが大きい ため、実験式の不確かさをドブプラ反応度の不確かさとした。 物理的モデルの不確かさとして実験式の不確かさを考慮している。
ほう素価値	試験データとは測定の不確かさの範囲内で一致し [4.2.3.1.3] , 燃焼度依存の95%信頼度-95%確率値の最大値は [ ] % $\Delta$ k [添付資料6] であることを確認した。	参照コード (MCNP5_DBRC) とLANCRにおけるほう素価値評価結果の相対差の95%信頼度-95%確率値で算出。 参照コードの不確かさ評価分も考慮しており、その中で測定の不確かさ等も含まれる。
遅発中性子割合	試験データとの比較を実施し、測定の不確かさの [ ] 以内、従来コードと同等の [ ] %未満の相対差で実験値を再現すること [4.2.3.3] を確認した。	測定値と計算値の不確かさの相対差の平均値が、左記の従来許認可コードの不確かさを下回ることを確認し、従来コードの不確かさを踏襲。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこちらに含まれる。

# 別紙 審査会合における指摘事項（No.8）に対する回答（2/2）

## ■ 回答（つづき）（P.24再掲）

➤ 不確かさの把握として実施したAETNAの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果（ [ ] 内は詳細記載箇所）	不確かさ評価方法および物理的モデルの不確かさの扱い
炉停止余裕	炉停止余裕の妥当性確認のため、冷温時臨界固有値を確認した。ウラン燃料装荷炉心における実績臨界固有値の95%信頼度-95%確率値で [ ] % $\Delta k$ [添付資料6] であり、MOX装荷炉心に対しても不確かさの拡大は認められない。[添付資料8]	冷温臨界固有値評価値のプラントごとの全データ平均値からの個々のデータのばらつきについて95%信頼度-95%確率値を評価。測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
最大制御棒価値	MOX燃料装荷炉心を含む110万kW級BWR及び80万kW級BWRの2プラント8ケースの冷温時制御棒価値測定結果に対し、計算値と測定値の差は平均 [ ] $\Delta k/k'$ 、標準偏差は [ ] $\Delta k/k'$ 、相対差の平均は [ ] %、標準偏差は [ ] %である。[4.3.4.1]	制御棒価値の計算値と測定値の相対差の標準偏差。適用性判断の不確かさの積算において保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこれに含まれる。
熱機械 (MLHGR) 焼損 (MCPR)	ノード出力・局所出力には、核・熱流動の主要な数学的モデルがすべて影響したうえで得られる結果である。 ガンマスキャンと比較した局所出力分布RMS差は約 [ ] % [4.3.4.4] であり、連続エネルギーモンテカルロ計算との比較による燃料集合体内局所出力分布のRMS差 [添付資料8] と、燃料の製造公差による不確かさと合成された局所出力分布の不確かさと同程度であった。ウラン燃料装荷炉心(BWR大型取替及びABWR初装荷)におけるガンマスキャン測定値との比較よりノード出力のRMS差は [ ] %以下であり [4.3.4.3]、MOX装荷炉心に対して不確かさの拡大は認められない。[添付資料8] ガンマスキャンより測定の不確かさが大きいものと同じく3次元分布を多数条件で測定しているTIPとの比較 [4.3.4.2] で得られる不確かさと整合している。	局所出力： 集合体内における局所出力分布の燃料棒ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 ノード出力： 炉内3次元ノード相対出力分布の集合体ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 測定の不確かさ（局所出力およびノード出力）： 測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
設計出力履歴 (燃焼度)	照射後試験による測定ペレット燃焼度と計算値のRMS差は [ ] %であった。[4.3.4.5]	試料ごと（照射後燃料）のペレット燃焼度の測定値と計算値のRMSを評価。測定の不確かさ等は減速材ポイド係数の保守因子への影響は十分に小さい。（参照P.28）

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.9）に対する回答

- 指摘事項（第1076回審査会合 2022年9月29日）
  - 解析コードの不確かさと設計における設定値との比較においては、解析コード以外の不確かさ（取替炉心段階に生じる不確かさ等）の値も示した上で、設計における設定値内であることを示すこと。
- 回答（つづき）（P.27再掲）
  - 妥当性確認の結果得られた注目すべき応答変量の不確かさの積算結果と、要求すべき予測性能の比較結果を以下に示す。
  - LANCR/AETNAはすべての要求すべき予測性能を満足しており、島根3号炉許認可静特性解析に適用性があると判断できる。

注目すべき応答変量やその他の不確かさと要求すべき予測性能の比較結果

項目	LANCR/AETNA使用時の不確かさ			要求すべき 予測性能	備考
	注目すべき応答変量 ((L)はLANCRを, (A)はAETNAを表す。)	LANCR/AETNA以外の 不確かさ	左記合計値		
反応度係数の 保守因子	減速材ポイド係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , ノード出力(A), ノード燃焼度(A)	・炉心一点近似モデル由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	<input type="checkbox"/> %	25 %	[添付資料4]
制御棒価値の 保守因子	ドップラ係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , 制御棒価値(A)	・空間縮約由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	<input type="checkbox"/> % $\Delta k$	0.3 % $\Delta k$	[添付資料5]
SLMCPR	ノード出力(A)	—	<input type="checkbox"/> %	5.2 %	—
	局所出力(A)	—	<input type="checkbox"/> %	3.0 %	—
SLC	ほう素価値(L), 冷温臨界固有値(A)	参照コードの不確かさ	<input type="checkbox"/> % $\Delta k$	1.5 % $\Delta k$	[添付資料6]

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.10）に対する回答

- 指摘事項（第1100回審査会合 2022年12月13日）
  - 手順⑤のLANCR/AETNAの達成すべき予測性能について、指標となるパラメータの選定及び許容される不確かさ等の達成基準の考え方を説明すること。また、安全解析の対象となる平衡炉心の成立性に関しても、予測性能を設定する必要はないか説明すること。
- 回答（P.26再掲）
  - 安全解析で重要な裕度設定と関連するもの（反応度係数の保守因子、制御棒落下解析での保守因子）、許認可静特性解析において重要で明示的な裕度設定を行っているもの（SLMCPR, SLC）について注目すべき応答変量と要求すべき予測性能を以下に示す。

注目すべき応答変量と 要求すべき予測性能

項目	不確かさの考慮方法	設計裕度で考慮する不確かさと要求すべき予測性能			備考
		注目すべき応答変量 ((L)はLANCRを, (A)はAETNAを表す。)	LANCR/AETNA以外の 不確かさ	左記積算に対する 要求すべき予測性能	
反応度係数の保守因子	不確かさ成分の積算値	減速材ポイド係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , ノード出力(A), ノード燃焼度(A)	・炉心一点近似モデル由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	25 %	許認可解析における包括解析で考慮
制御棒価値の保守因子	不確かさ成分の積算値	ドブラ係数(L), $\beta_{eff}(L)$ , 制御棒価値(A)	・空間縮約由来の不確かさ ・取替炉心段階に生じる不確かさ	0.3 % $\Delta k$	許認可解析における包括解析で考慮
SLMCPR	統計解析 (各不確かさ成分を独立に扱う)	ノード出力(A)	—	5.2 %	許認可解析における包括解析で考慮
		局所出力(A)	—	3.0 %	許認可解析における包括解析で考慮
SLC	不確かさ成分の積算値	ほう素価値(L), 冷温臨界固有値(A)	参照コードの不確かさ	1.5 % $\Delta k$	取替炉心段階で個別炉心に対して考慮

なお、原子炉設置変更許可申請書 添付書類八において解析例として示す平衡炉心の成立性を考慮すると MLHGR, MCPR, 炉停止余裕の3つが注目すべき応答変量の候補として挙げられる。

MLHGR 及び MCPR はノード出力及び局所出力が関係するが、これらは SLMCPR の観点で確認している。

停止余裕については、原子炉設置変更許可申請書で設定している裕度に対し、LANCR/AETNA の冷温時実効増倍率の不確かさが十分に小さく、許認可適用性判断への影響は少ない。

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.12）に対する回答（1/3）

- 指摘事項（第1100回審査会合 2022年12月13日）
  - 手順④の妥当性確認を通した総括不確かさの評価について、物理的モデルの不確かさの影響についても説明すること。
- 回答（P.21再掲）
  - 不確かさの把握として実施したLANCRの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果 ( [ ] 内は詳細記載箇所)	不確かさ評価方法および 物理的モデルの不確かさの扱い
ボイド反応度	BASALA試験とは測定の不確かさの範囲とほぼ等しい <input type="checkbox"/> %の不確かさ [4.2.3.1.2] で一致した。	測定値との相対差で評価。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこちらに含まれる。
ドブプラ反応度	<input type="checkbox"/> %の不確かさを持つHellstrandらの実験式の結果に対し、実験式の持つ不確かさの範囲内でほぼ一致 [4.2.3.2] した。	実験式と計算値の差に対し、実験式の不確かさが大きい ため、実験式の不確かさをドブプラ反応度の不確かさとした。 物理的モデルの不確かさとして実験式の不確かさを考慮している。
ほう素価値	試験データとは測定の不確かさの範囲内で一致し [4.2.3.1.3]、燃焼度依存の95%信頼度-95%確率値の最大値は <input type="checkbox"/> % $\Delta$ k [添付資料6] であることを確認した。	参照コード (MCNP5_DBRC) とLANCRにおけるほう素価値評価結果の相対差の95%信頼度-95%確率値で算出。 参照コードの不確かさ評価分も考慮しており、その中で測定の不確かさ等も含まれる。
遅発中性子割合	試験データとの比較を実施し、測定の不確かさの <input type="checkbox"/> 以内、従来コードと同等の <input type="checkbox"/> %未満の相対差で実験値を再現すること [4.2.3.3] を確認した。	測定値と計算値の不確かさの相対差の平均値が、左記の従来許認可コードの不確かさを下回ることを確認し、従来コードの不確かさを踏襲。 適用性判断では反応度係数の不確かさは積算に対して保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこちらに含まれる。

# 別紙 審査会合における指摘事項 (No.12) に対する回答 (2/3)

## ■ 回答 (つづき) (P.24再掲)

➤ 不確かさの把握として実施したAETNAの妥当性確認の結果を以下に示す。

評価指標	妥当性確認結果 ( [ ] 内は詳細記載箇所)	不確かさ評価方法および物理的モデルの不確かさの扱い
炉停止余裕	炉停止余裕の妥当性確認のため、冷温時臨界固有値を確認した。ウラン燃料装荷炉心における実績臨界固有値の95%信頼度-95%確率値で [ ] % $\Delta k$ [添付資料6] であり、MOX装荷炉心に対しても不確かさの拡大は認められない。[添付資料8]	冷温臨界固有値評価値のプラントごとの全データ平均値からの個々のデータのばらつきについて95%信頼度-95%確率値を評価。測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
最大制御棒価値	MOX燃料装荷炉心を含む110万kW級BWR及び80万kW級BWRの2プラント8ケースの冷温時制御棒価値測定結果に対し、計算値と測定値の差は平均 [ ] $\Delta k/k'$ 、標準偏差は [ ] $\Delta k/k'$ 、相対差の平均は [ ] %、標準偏差は [ ] %である。[4.3.4.1]	制御棒価値の計算値と測定値の相対差の標準偏差。適用性判断の不確かさの積算において保守的に設定しており、測定の不確かさ等はこれに含まれる。
熱機械 (MLHGR) 焼損 (MCPR)	ノード出力・局所出力には、核・熱流動の主要な数学的モデルがすべて影響したうえで得られる結果である。 ガンマスキャンと比較した局所出力分布RMS差は約 [ ] % [4.3.4.4] であり、連続エネルギーモンテカルロ計算との比較による燃料集合体内局所出力分布のRMS差 [添付資料8] と、燃料の製造公差による不確かさと合成された局所出力分布の不確かさと同程度であった。ウラン燃料装荷炉心(BWR大型取替及びABWR初装荷)におけるガンマスキャン測定値との比較よりノード出力のRMS差は [ ] %以下であり [4.3.4.3]、MOX装荷炉心に対して不確かさの拡大は認められない。[添付資料8] ガンマスキャンより測定の不確かさが大きいものと同じく3次元分布を多数条件で測定しているTIPとの比較 [4.3.4.2] で得られる不確かさと整合している。	局所出力： 集合体内における局所出力分布の燃料棒ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 ノード出力： 炉内3次元ノード相対出力分布の集合体ガンマスキャン結果として得られた測定値と計算値についてRMSを評価。 測定の不確かさ(局所出力およびノード出力)： 測定点数が十分に大きく、かつ測定系は十分に校正されたのちのランダムな誤差と考えられることから、測定の不確かさ等は測定値と解析値の比較結果に含まれる。
設計出力履歴 (燃焼度)	照射後試験による測定ペレット燃焼度と計算値のRMS差は [ ] %であった。[4.3.4.5]	試料ごと(照射後燃料)のペレット燃焼度の測定値と計算値のRMSを評価。測定の不確かさ等は減速材ポイド係数の保守因子への影響は十分に小さい。(参照P.28)

## 別紙 審査会合における指摘事項（No.12）に対する回答（3/3）

### ■ 回答（つづき）（P.28再掲）

- 許認可解析への適用性確認のための不確かさの積算の実施例として、反応度係数（減速材ボイド係数）の保守因子についての実施結果を以下に示す。
- 応答変量を積み上げた結果は  % であり、要求すべき予測性能（25%）の範囲内である。

解析コード	応答変量もしくはコード以外の不確かさ	不確かさ
LANCR	減速材ボイド係数, 実効遅発中性子割合	<input type="text"/> %
AETNA	3次元出力分布, 3次元ノード燃焼度	<input type="text"/> % <sup>注1</sup>
-	炉心一点近似モデルの不確かさ	<input type="text"/> %
-	取替炉心の詳細設計段階の不確かさ	<input type="text"/> %
	不確かさの合計（二乗和平方根） <sup>注2</sup>	<input type="text"/> %

注1：3次元出力分布と3次元ノード燃焼度の不確かさに起因する減速材ボイド係数の不確かさ。

仮に3次元ノード燃焼度の測定の不確かさを考慮した場合でも、「3次元出力分布, 3次元ノード燃焼度」の不確かさは  % 程度となるが、この値とした場合でも不確かさの合計値（上記表に示す二乗和平方根の小数点以下切り上げ値）は変わらない。

注2：上記の各不確かさ成分は独立な偶然誤差であり、不確かさの合計は二乗和平方根で求めている。



## 参考① 妥当性確認において留意すべき事項とその対応

➤ 妥当性確認実施時の留意事項としてノード分割、スケール効果及びユーザ効果がある。これらへの対応を以下に示す。

### ✓ ノード分割

影響：ノード（数値計算時に空間を離散化する際のメッシュ幅）の大きさが妥当性確認時と炉心解析時で異なることにより、両者の間で不確かさなどに差異が発生する影響。

対応：ノード分割は、従来コードと同様な設定としている。これらはBWR体系の静特性炉心解析に一般的に用いられてきた信頼がおける設定値であり、PWR体系ベンチマークやSPERTⅢ過渡試験などの非BWR体系の妥当性確認を除いて、検証及び妥当性確認を通して炉心解析時と等しい分割条件としている。

### ✓ スケール効果

影響：妥当性確認時と炉心解析時の取り扱う空間サイズの違いにより支配現象の影響具合が変わることで両者の間で不確かさなどに差異が発生する影響。

対応：影響が懸念される熱水力試験（ボイド率測定・チャンネル圧損試験）では、実機と同サイズの模擬燃料を使用している。核計算においては、解析体系の違いに対して線形性が維持されることからスケール効果の懸念はない。

### ✓ ユーザ効果

影響：ユーザの知識レベルなどに起因してノード分割などの解析条件設定に問題があることで、妥当性確認においてコード本来の性能が発揮できない影響。

対応：QMSにおける力量管理のもと、一定の技能を有する者が妥当性確認の実施や審査に携わることで結果に有意な影響が出ないよう配慮している。