

島根原子力発電所 3号炉 審査資料	
資料番号	S3-EP-004(説1)
提出年月日	令和4年8月25日

島根原子力発電所 3号炉

LANCR/AETNA コードについて

令和4年8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
	コード適用範囲	.....	P.4
2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について			
	許認可解析への適用性確認の考え方	.....	P.5
	適用性確認手順	.....	P.6
	手順①重要な物理現象の特定	.....	P.7
	手順②モデル化の網羅性確認, 手順③検証及び妥当性確認の網羅性確認	.....	P.8
	検証及び妥当性確認の考え方	.....	P.9
	解析の各段階における手順①～③の実施方法	.....	P.10
	モデル化の網羅性確認結果	.....	P.11
	検証及び妥当性確認の網羅性確認結果	.....	P.18
4. 検証及び妥当性確認			
	LANCRの検証及び妥当性確認の概要	.....	P.22
	AETNAの検証及び妥当性確認の概要	.....	P.24
5. 許認可解析への適用			
	LANCRの適用範囲と検証及び妥当性確認の実施範囲	.....	P.26
	AETNAの適用範囲と検証及び妥当性確認の実施範囲	.....	P.27
	許認可解析へのLANCR/AETNAコード適用の妥当性	.....	P.28
別添資料	LANCR及びAETNAの解析モデル概要	.....	P.29

1. 目的と概要

目的

BWRでは、炉内での中性子挙動と沸騰現象とが密接に関係するため、核計算と熱水力計算を結合した炉心核熱水力特性解析システムを用いて炉心の特性評価や設計を行う。

本資料では、島根原子力発電所3号炉（以下、「島根3号炉」という。）のチャンネルボックス厚肉化に伴う許認可解析に用いた、

燃料集合体核特性計算コード LANCR Ver.1（以下、「LANCR」という。）

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。）

について以下を整理し、許認可解析への適用性を示す。

- ・LANCR及びAETNAの適用範囲
- ・炉心特性解析において重要となる物理現象の特定とモデル化
- ・LANCR及びAETNAの解析モデル（p.29以降に別添）
- ・検証及び妥当性確認
- ・許認可解析への適用性

本資料の各スライドの項目番号は「LANCR/AETNAコード説明書」の章番号と合わせている。

1. 目的と概要

概要

解析システムの目的

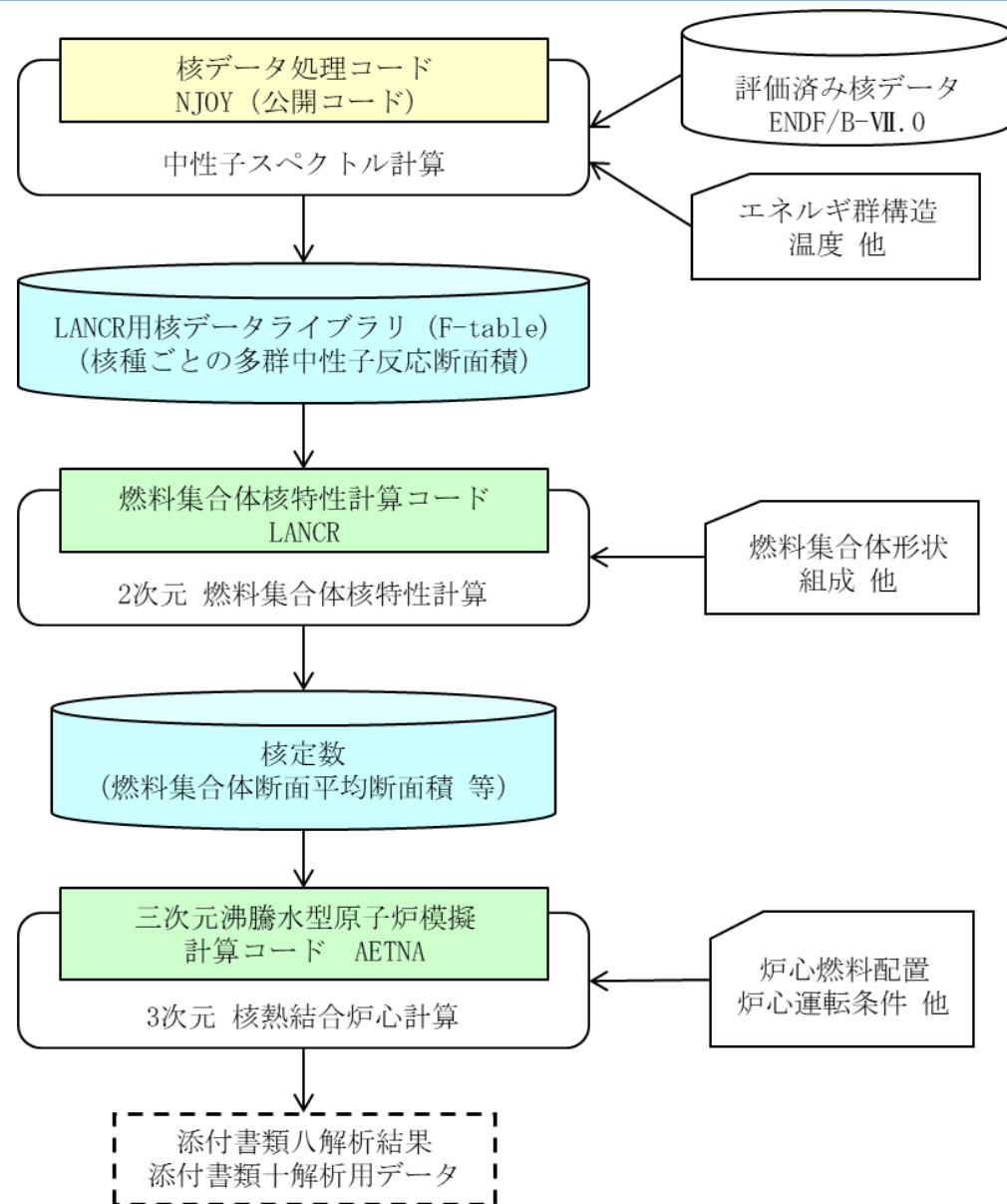
- ・原子炉設置変更許可申請書 添付書類八における炉心・燃料の核・熱水力特性評価
- ・添付書類十の解析等に必要となる反応度係数や反応度価値の算出

解析システムの構成

AETNA：炉心全体に対して、燃料集合体単位の特性を用いた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で処理し、F-tableと呼ばれる形式で作成する。



1. 目的と概要

コード適用範囲

LANCR/AETNAは以下を適用範囲とする。島根 3 号炉は，この範囲に含まれる 9×9 燃料で構成される ABWR であり，許認可解析における解析条件もこの範囲に含まれている。

LANCR適用範囲

項目	適用範囲
燃料棒配列	$1 \times 1 \sim 10 \times 10$
^{235}U 濃縮度	0.2～6.5wt%
Gd_2O_3 含有量	0～15wt%
プルトニウム富化度	0～17.2wt%
核分裂性プルトニウム富化度	0～11wt%
燃料棒の温度	10～2300℃
減速材ボイド率	0～100%
減速材温度	10～327℃
減速材中のほう素濃度	0～2230ppm
燃焼度（集合体平均）	0～80GWd/t
制御棒吸収材	B_4C ，ハフニウム

AETNA適用範囲

項目	適用範囲
燃料棒配列	$7 \times 7 \sim 10 \times 10$
炉型	BWR, ABWR
燃料	UO_2 , MOX
減速材温度	低温～出力運転時
炉圧	大気圧～8.6MPa
吸収材	B_4C ，ハフニウム（制御棒） ほう酸水（SLC）

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 許認可解析への適用性確認の考え方

“LANCR/AETNAコードを島根 3 号炉の許認可解析に適用することの妥当性”を示すため、本資料では以下を説明する。

コードが解析に必要なモデルを有すること

- ・ 炉心体系に関する全ての物理現象の中から重要なものが特定されていること
- ・ 特定した重要な物理現象に対して、対応するモデルが網羅的に実装されていること

試験等の妥当性確認によりコードの信頼性が確認されていること

- ・ 重要な物理現象について、妥当性確認が網羅的に実施されていること
- ・ 妥当性確認に用いた試験等の条件範囲がコードの適用範囲を包絡していること

島根 3 号炉 許認可解析に必要な信頼性を達成していること

- ・ 許認可解析で想定した不確かさの設定値に対し、コードの不確かさが下回っていること

これらを確認する手順を次スライドに示す。

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 適用性確認手順

島根 3 号炉の許認可解析に対するLANCR/AETNAの適用性について①～⑤の手順で確認する。

手順	目的	使用する帳票類
①	炉心解析における重要な現象を特定する。	重要度ランキングテーブル (PIRT) (スライド p.11～16)
②	①で抽出され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 (スライド p.11～16)
③	②で示された現象とモデル群に対し、もれなく検証及び妥当性確認が実施されていることを確認する。	モデル性能比較表および評価表 (スライド p.18～20)
④	LANCR/AETNAの適用範囲に対し、上記で示された検証及び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の適用範囲と検証及び妥当性確認の実施範囲の対応表 (スライド p.26～27)
⑤	検証及び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。	不確かさと設計における設定値の関係表 (スライド p.28)

手順①～③の具体的な方法をp.7～8に、手順③における検証及び妥当性確認の考え方をp.9に、解析システムの各段階に対する手順①～③の実施方法をp.10に示す。検討の結果をp.11以降に示す。

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

手順①重要な物理現象の特定

手順① 重要度ランキングテーブル（PIRT*）を用いて、炉心解析において重要となる物理現象を特定する。

左側：炉心体系に関する全ての物理現象を列挙
 上側：評価指標（主要な評価対象項目）を列挙

両者の関係をI～Hでランク付けする。

→ランクM以上を含む物理現象を重要なものとし、
 手順②以降の確認の対象とする。

本資料ではランクM以上を含む物理現象のみを示す。

		重要度ランキングテーブル			
		1 評価指標	2 評価指標	3 評価指標	4 評価指標
物理現象	現象1	L	H	L	L
	現象2	H	H	L	H
	現象3	I	I	L	L
	現象4	L	L	M	M

重要度ランクの考え方

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	該当するモデルを実装する。実装されたモデルに対して、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・妥当性確認は必ずしも実施せず、出力分布・実効増倍率の妥当性確認により総合的に確認する。これらの現象は重要度が低いので、本資料の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、無視できる程度の現象	

*PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table) : 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」, AESJ-SC-A008:2015, 2016年7月

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

手順②モデル化の網羅性確認, 手順③検証及び妥当性確認の網羅性確認

手順② モデル性能比較表を用い、コードのモデルが、手順①でランクM以上とした物理現象を考慮していることを確認する。

左側：PIRTで特定された重要な物理現象

上側：コードで考慮されているすべてのモデルを列挙

物理現象に対応するモデルに○，モデルがない場合はN/Aを記載

→モデル化に抜けがないことを確認し、モデル化されていない物理現象がある場合は、その取り扱いを示す。

		モデル性能比較表			
		モデルA	モデルB	モデルC	モデルD
物理現象	現象1	○		○	
	現象2		○		
	現象4				○

物理現象と評価指標の関係（手順①）と物理現象とモデルの関係（手順②）のつながりを見やすくするため、本資料では、作成したPIRTとモデル性能比較表を結合してp.11～16に示す。

手順③ 手順②の結果とモデル性能評価表を用い、重要な物理現象を扱うモデルの検証及び妥当性確認の状態を把握する。

左側：PIRTで特定された重要な物理現象

上側：検証及び妥当性確認の項目を列挙

物理現象に対応する妥当性確認項目に○を記載

→重要な物理現象に対して検証・妥当性確認に抜けがないことを確認し、確認されていないものは取り扱いを示す。

		モデル性能評価表			
		確認項目Ⅰ	確認項目Ⅱ	確認項目Ⅲ	確認項目Ⅳ
物理現象	現象1	○			○
	現象2		○	○	
	現象4				○

本資料では、重要な物理現象、関連するモデル及び妥当性確認の関係を見やすくするため、モデル性能比較表とモデル性能評価表を結合し、物理現象の最高ランクを含めてp.18～20に示す。

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 検証及び妥当性確認の考え方

一般に試験や実機プラントにおける測定値等との比較が「妥当性確認」とされる。妥当性確認に利用できる測定データ類は限られているため、近年の連続エネルギーモンテカルロコード等の十分に詳細なモデルによる計算結果との比較は、コードの信頼性確認を補完できる「妥当性確認に準ずる確認」と位置付ける。ベンチマーク問題に対する他の解析結果との比較は「検証」とし、コードの信頼性確認の一部と位置付ける。

以上から、LANCR及びAETNAの検証及び妥当性確認は以下で構成される。

- 試験による妥当性確認
- 実機運転データによる妥当性確認（AETNAのみ）
- 連続エネルギーモンテカルロコード等による妥当性確認
- ベンチマーク問題による検証

LANCR及びAETNAの解析には上流過程の結果が反映されるので、それぞれの妥当性確認は上流過程に関する妥当性確認の一部を含むものと位置付ける。

特にAETNAの妥当性確認は、炉心解析システム全体に対する総合的な妥当性確認の意味を持つ。

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 解析の各段階における手順①～③の実施方法

解析全体を下表の5段階に分けて整理する。

重要現象の特定(手順①)とモデル化の網羅性確認(手順②)は(a)～(e)の全段階で実施する。

検証及び妥当性確認の網羅性確認(手順③)は (c)LANCRと(e)AETNAの結果により総合的に確認する。

段階	対象	PIRTと モデル性能 比較表	検証及び妥当性確認の方針	モデル性能 評価表
(a) NJOY	核データライブラ リ処理	有	世界的に実績のあるNJOYの処理モデルについては個別の検証・妥当性確認を実施しない。 LANCR及びAETNAの妥当性確認により総合的に確認する。	無
(b) F-table	核データライブラ リのテーブル化	有	LANCR及びAETNAの妥当性確認により総合的に確認する。	無
(c) LANCR	燃料集合体核 特性計算	有	ランクの高い現象に対して検証・妥当性確認を行う。 NJOY, F-tableの妥当性確認を含む。 一部の現象はAETNAにより総合的に確認する。	有
(d) 核定数	核定数のテーブ ル化	有	AETNAの妥当性確認により総合的に確認する。	無
(e) AETNA	核熱結合炉心 計算	有	ランクの高い現象に対して検証・妥当性確認を行う。すべての 上流コードとデータ処理に対する総合的な妥当性確認を含む。	有

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

モデル化の網羅性確認結果 (a)NJOY(ライブラリの処理方法)(手順①・②)

NJOYを用いたライブラリ処理において、重要な物理現象（ランクM以上）がモデル化されている。
N/A（モデル無し）の項目の取り扱いについてはp.17で説明する。

ライブラリ処理のPIRT及びモデル性能比較表

物理現象			重要度ランキング (PIRT)						モデル性能比較表 “-”：関連しない, “○”：関連する, “N/A”：モデル無し							
			中性子微視的断面積	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	詳細エネルギー群ビン生成	中性子反応 共鳴断面積構築	中性子反応 共鳴断面積温度幅	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
核的現象	中性子反応	核分裂反応	臨界性, 核分裂発熱													
		捕獲反応	臨界性													
		散乱反応	中性子減速													
		遅発中性子	遅発中性子割合													
	光子反応	ガンマ線吸収	ガンマ線発熱													
		ガンマ線散乱														
		ガンマ線スペクトル														
	温度	ドップラ効果	共鳴吸収													
		共鳴群の上方散乱効果	ドップラ係数													
		分子結合	熱中性子散乱則													
	組成	非共鳴核種	中性子の減速													
	空間分布	非均質性	自己遮蔽													

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について

モデル化の網羅性確認結果 (b)F-table(テーブル化処理)(手順①・②)

核データライブラリのテーブル化に関して重要な現象が考慮されている。
N/Aの項目の取り扱いについてはp.17で説明する。

F-tableデータ形式のPIRT及びモデル性能比較表

物理現象			重要度ランキング (PIRT)		モデル性能比較表 “-”：関連しない, “○”：関連する, “N/A”：モデル無				
			中性子反応 実効微視的断面積 (f因子)	最高ランク	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 群数
核的現象	中性子 反応	核分裂反応	臨界性, 核分裂発熱						
		捕獲反応	臨界性						
		散乱反応	中性子減速						
	温度	ドップラ効果	共鳴吸収						
		分子結合	熱中性子散乱則						
	組成	非共鳴核種	中性子の減速						
	空間 分布	非均質性	自己遮蔽						

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について モデル化の網羅性確認結果 (c)LANCR(手順①・②)

LANCRにおいて重要な物理現象がモデル化されている。
N/Aの項目の取り扱いについてはp.17で説明する。

LANCRのPIRT及びモデル性能比較表

物理現象			重要度ランキング (PIRT)										モデル性能比較表 “-”：関連しない，“○”：関連する， “N/A”：モデル無									
			無限増倍率	局所出力分布	ガドリニア価値	ポイド反応度	トップアラ反応度	ほう素価値	制御棒価値	減速材温度係数	遅発中性子割合	燃焼後核種組成	最高ランク	ライブラリモデル (中性子・ガンマ線)	エネルギー群構造	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/fiss.含む)	均質化定数計算 (βeff含む)	燃焼計算 (燃焼子エーン・領域分割)	燃焼スペクトル調整
核的現象	中性子反応	中性子反応断面積	核分裂, 吸収, 散乱																			
		非均質性	自己遮蔽																			
		中性子束分布																				
	光子反応	ガンマ線反応断面積																				
		ガンマ線束分布																				
構造物	冷却材 化学組成変化	SLC																				
その他	三次元効果	燃焼スペクトル																				
熱的・水力的現象	熱	核分裂発熱																				
		ガンマ線発熱																				
水力	冷却材密度分布	集合体内ポイド率分布 注1																				
材料	核反応	燃料組成	Gd燃料棒																			

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。

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

モデル化の網羅性確認結果 (d)核定数(テーブル化処理)(手順①・②)

核定数テーブルにおいて重要な物理現象がモデル化されている。
N/Aの項目の取り扱いについてはp.17で説明する。

核定数テーブルのPIRT及びモデル性能比較表

物理現象 (核定数テーブルは燃料設計タイプ毎に定義するため 燃料設計に依存した効果・現象は全て取り込まれる)	重要度ランキング (PIRT)				モデル性能比較表 “—”：関連しない, “○”：関連する, “N/A”：モデル無									
	マクロ/マイクロ断面積, 拡散係数, 不連続因子	局所出力分布, 核計装応答	実効遅発中性子割合, 中性子寿命	最高ランク	燃焼度依存性	履歴ボイド/スペクトル履歴ボイド率依存性	履歴ボイド変化依存性	制御棒履歴効果 - 燃焼度依存性	制御棒履歴時効果 - 吸収材組成(制御棒タイプ)依存性	燃料温度変化瞬時効果 - 燃焼度依存性	燃料温度変化瞬時効果 - 温度依存性	減速材温度瞬時効果 (冷温) - 減速材温度依存性	ほう素混入時瞬時効果 (冷温) - ほう素量依存性	過渡時効果 - 冷温時ボイド及び温度依存性*2
(1) 燃料減損	組成変化に伴う燃焼度依存性													
(2) スペクトル履歴	履歴ボイド効果													
(3) 核分裂生成物反応度	長期停止効果 (マイクロ燃焼モデル) 含む													
(4) ボイド反応度	ボイド率 (瞬時) 依存性													
(5) 制御棒価値	燃焼度/ボイド/運転条件 (高温/冷温) 依存性													
(6) 制御棒履歴	CBH効果の燃焼度依存性													
(7) 制御棒多種類効果	制御棒タイプ													
(8) 制御棒価値の減損	照射による吸収材の減損													
(9) ドップラ反応度	燃焼度/温度/ボイド依存性													
(11) 減速材温度	燃焼度/温度 依存性 (冷温)													
(12) ほう素価値	燃焼度/ほう素量 依存性													
(13) ほう素価値の減速材温度依存性	SLC作動時の減速材温度効果													
(14) 過渡時冷温ボイド/温度*1	冷温時ボイド及び温度依存性*2													

*1：プラント過渡解析コードで使用 *2：インチャンネルとアウトチャンネルの独立性を考慮

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について モデル化の網羅性確認結果 (e)AETNA(1/2)(手順①・②)

AETNAにおいて重要な物理現象がモデル化されている。
N/Aの項目の取り扱いについてはp.17で説明する。

AETNAのPIRT及びモデル性能比較表 (1/2, 核的現象)

BWRの炉内物理現象 (*はLANCRのPIRTにあるもの)		重要度ランキング (PIRT)										モデル性能比較表 (“-”: 関連しない, “○”: 関連する, “N/A”: モデル無し)																											
		通常運転時					過渡時					基礎 方程式	物理モデルまたは構成式																										
		核的制限値					熱的制限値						核計算							熱水力計算				その他															
		余剰反応度	炉停止余裕	最大制御棒価値	反応度係数	スクラム反応度	スクラム反応度	ほう酸注入系停止機能	熱機械 (LHGR)	設計出力履歴	焼損 (MCPR)		未臨界度	表面熱流束	焼損 (MCPR)	最高ランク	中性子拡散方程式 (定常)	中性子拡散方程式 (過渡)	蒸気物性値	中性子束計算 (定常)	中性子束計算 (過渡)	高次モード計算	燃料棒出力再構築	燃料棒燃焼度再構築	断面種モデル	燃焼履歴モデル	ミクロ燃焼モデル	燃料温度モデル	反射体モデル	エネルギー計算	サブクール沸騰モデル	ボイド相関式	壁面熱伝達	圧力損失	チャンネル流量配分	パイプモデル	熱的余裕計算	沸騰遷移相関式	核計装応答
		核的現象	空間分布	(1) 中性子増倍特性*	集合体核設計, 燃料配置																																		
(2) 遅発中性子割合*	スクラム反応度																																						
(3) 3次元 出力分布 (定常)																																							
(4) 3次元 高次モード分布 (定常)																																							
(5) 3次元 出力分布(過渡)	スクラム反応度																																						
(6) 局所出力分布 *	燃料棒出力再構築, R因子																																						
(7) 局所燃焼度分布	設計出力履歴																																						
フィードバック	(8) 制御棒価値 *																																						
	(9) ボイド反応度 *																																						
	(10) ドップラ反応度 *																																						
	(11) ほう酸価値 *																																						
	(12) 減速材温度 *																																						
	(13) 燃料減損 *																																						
	(15) 核分裂生成物反応度		毒物効果, 長期停止効果																																				
	(17) スクラム時 制御棒価値		スクラム反応度																																				
	(18) スクラム時 ボイド反応度		スクラム反応度, 断熱仮定 (補正)																																				
	構成体記号		(20) 制御棒履歴	CBH効果 (片燃え)																																			
			(21) 多種類制御棒																																				
(25) 水口形状			断面効果はLANCR, 隣接燃料効果はBDF因子																																				
計装			(26) 炉内計装管応答	TIP/LPRM学習 (プロセス計算機編)																																			

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について モデル化の網羅性確認結果（手順②）

全ての段階について重要な物理現象に対するモデル化の網羅性を確認した。
スライドp.11～16においてN/Aとなっている項目の取り扱いを以下に示す。

N/Aの項目		取り扱い
NJOY	共鳴吸収の上方散乱 (スライド p.11)	共鳴群における上方散乱はドップラ係数に影響する。LANCRのドップラ係数の不確かさを定量的に把握し、設計時に設定する裕度を下回ることを確認することで設計に悪影響が無いことを確認する。
NJOY/ F-table	非均質性 (スライド p.11,12)	この効果はLANCRの実効断面積モデルで考慮する。
LANCR/ AETNA	集合体内ボイド分布 (スライド p.13,16)	現行燃料においては集合体内のボイド率分布の影響が大きくないことがわかっており、島根3号炉の許認可解析では集合体内ボイド率は一定として扱う。
核定数	制御棒価値の減損効果 (スライド p.14)	プラント運転管理において、制御棒照射量に対して適切に管理を行うことにより、一定の制御棒価値が維持されている。このため、吸収材の減損をテーブルとして考慮する必要性は低い。
	ほう素価値の 減速材温度依存性 (スライド p.14)	SLC作動時の実効増倍率は、プラントごとに最も厳しい評価結果となる温度点1点で評価を行っている。当該温度のデータを用意すれば核定数において温度依存性をテーブル化する必要がない。
AETNA	スクラム時ボイド反応度 (スライド p.15)	島根3号炉チャンネルボックス厚肉化に伴う許認可解析では用いない。
	炉心熱出力 (スライド p.16)	入力値（解析条件としてユーザーから与えられるためモデル化は不要）

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 検証及び妥当性確認の網羅性確認結果(1) (手順③)

LANCRのモデルの検証及び妥当性確認の網羅性を確認した。

LANCRのモデル性能比較表及び評価表

物理現象			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														
			重要ランキン ライブラリモデル (中性子・ガンマ線) エネルギー群構造 実効断面積計算 詳細エネルギー スペクトル計算 中間燃料、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 (燃焼フェーン・領域分割) 燃焼スペクトル調整										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				
													Babcock & Wilcox臨界試験					Hellstrand実効共鳴積分の実験式					4x4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					フルトニウム富化度変化に対する妥当性確認
			NCA臨界試験					MISTRAL臨界試験					ウラン燃料棒セル問題					ガドリニア価値 減速材ポイド係数 ほろ素価値 制御棒価値 等温温度係数 トップラ係数 ガンマ発熱量 モンテカルロ燃焼計算									
核的現象	中性子 反応	中性子反応断面積	核分裂, 吸収, 散乱																								
		非均質性	自己遮蔽																								
中性子束分布																											
光子 反応	ガンマ線反応断面積																										
	ガンマ線束分布																										
構造物	冷却材 化学組成変化	SLC																									
その他	三次元効果	燃焼スペクトル																									
熱的・水力的現象	熱	核分裂発熱																									
		ガンマ線発熱																									
水力	冷却材密度分布	集合体内ポイド率分布 注																									
	燃料組成	Gd燃料棒																									

注：スライドp.17参照

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 検証及び妥当性確認の網羅性確認結果(2) (手順③)

AETNAのモデルの検証及び妥当性確認の網羅性を確認した。

AETNAのモデル性能比較表及び評価表 (1/2, 核的現象)

重要度ラウンギング	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			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等による妥当性確認																								
	中性子束計算 (定常)	中性子束計算 (過渡)	高次モード計算	燃料棒出力再構築	燃料棒燃焼度再構築	断面積モデル	燃焼履歴モデル	マイクロ燃焼モデル	燃料温度モデル	反射体モデル	エネルギー計算	サブクール沸騰モデル	ボイド相関式	壁面熱伝達	圧力損失	チャンネル流量配分	パイパスモデル	熱的余裕計算	沸騰遷移相関式	核計装応答	学習モデル (プロセス計算機編)	冷温時臨界固有値 (制御棒価値)	出力運転時臨界固有値	出力分布 (TIPとの比較)	出力分布 (Vスキヤン)	燃料棒出力分布 (Vスキヤン)	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)	チャンネル圧損試験	SPERT実験	安定性試験高次モード分布	IAEA PWRベンチマーク (定常)	LRA BWRベンチマーク (定常/過渡)	HAFAS BWRベンチマーク (定常)	LMW PWRベンチマーク (過渡)	均質円筒炉心高次モード問題	局所出力 (初装尚多濃縮度炉心)	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
	BWRの炉内物理現象 *はLANCR PIRTにあるもの																																												
核的現象	中性子増倍特性 (ノード) *																																												
	遅発中性子割合 (ノード) *																																												
	空間分布	3次元 出力分布 (定常)																																											
		3次元 高次モード分布 (定常)																																											
		3次元 出力分布(過渡)																																											
		局所出力分布 *																																											
		局所燃焼度分布																																											
	フィードバック	制御棒価値 *																																											
		ボイド反応度 *																																											
		ドップラ反応度 *																																											
		ほう酸価値 *																																											
		減速材温度 *																																											
		燃料減損 (ノード)																																											
		核分裂生成物反応度 (ノード)																																											
		スクラム時 制御棒価値 *																																											
		スクラム時 ボイド反応度 * 注																																											
		構成体起因	制御棒履歴																																										
	多種類制御棒効果																																												
	水ロッド形状																																												
	炉内計装管応答																																												

注：スライドp.17参照, ① (SPERT実験), ② (LRA BWRベンチマーク(過渡)), ③ (LMW PWRベンチマーク(過渡)) では、炉心出力の時間依存応答のみ確認している。

2. 重要現象についてのモデル化と妥当性確認について 検証及び妥当性確認の網羅性確認結果(3) (手順③)

AETNAのモデルの検証及び妥当性確認の網羅性を確認した。

AETNAのモデル性能比較表及び評価表 (2/2, 熱・水力・材料現象)

重要度ランク		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			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等による妥当性確認																			
		中性子束計算 (定常)	中性子束計算 (過渡)	高次モード計算	燃料棒出力再構築	燃料棒燃焼度再構築	断面積モデル	燃焼履歴モデル	マイクロ燃焼モデル	燃料温度モデル	反射体モデル	エネルギー計算	サブクール沸騰モデル	ボイド相関式	壁面熱伝達	圧力損失	チャンネル流量配分	バイパスモデル	熱的余裕計算	沸騰遷移相関式	核計表応答	学習モデル (プロセス計算機編)	冷温時臨界固有値 (制御棒価値)	出力運転時臨界固有値	出力分布 (TIPとの比較)	出力分布 (V/Sキャン)	燃料棒出力分布 (V/Sキャン)	照射後試験	MOX裝荷炉心	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)	チャンネル圧損試験	SPERT実験	安定性試験高次モード分布	IAEA PWRベンチマーク (定常)	LRA BWRベンチマーク (定常/過渡)	HAFAS BWRベンチマーク (定常)	LMW PWRベンチマーク (過渡)	均質円筒炉心高次モード問題	局所出力 (初裝荷多濃縮度炉心)	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
BWRの炉内物理現象 *はLANCR PIRTにあるもの	空間分布	3次元ボイド分布	集合体内ボイド分布 *	バイパスボイド分布	サブクールボイド																																							
		構成体起因	チャンネル圧損	チャンネル流量	バイパス流量 (入力値)	水ロッド流量 (入力値)	水ロッド形状	スパーサ効果																																				
			発熱	減速材直接発熱 (入力値)	構造材直接発熱 (入力値)	炉心熱出力 (入力値)	沸騰遷移																																					
	熱			燃料平均温度 (入力値)																																								
	材料			チャンネル曲り・バルジ																																								

注: スライドp.21参照 ① 集合体内の均一ボイド分布の仮定は, “燃料棒出力(V/S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。

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 検証及び妥当性確認の網羅性確認結果(4) (手順③)

重要現象ごとに対応するモデルの検証及び妥当性確認が網羅的に実施されていることを確認した。

下記3項目に対する直接的な妥当性確認は示していないが、以下で確認される。

チャンネル流量 (熱的・水力的現象)

チャンネル流量は圧力損失が等しくなるように配分される。したがって圧力損失評価の妥当性確認により配分される流量の妥当性を間接的に確認できる。圧力損失モデルについて試験による妥当性確認を実施している。代表チャンネルによる流量配分モデルについては全集合体を独立チャンネルとして取り扱う詳細コードとの比較による検証を実施している。

以上より本現象に対しては直接および間接的な検証および妥当性確認により信頼性は確認されている。

スパーサ効果及び沸騰遷移 (熱的・水力的現象)

沸騰遷移モデルとしてGEXL相関式に基づくモデルを有しており、スパーサ効果も含まれる。GEXL相関式の妥当性は公開参考文献により示されている。

バイパス流量・水ロッド流量, 減速材及び構造材直接発熱, 炉心熱出力, 燃料平均温度, チャンネル曲がり・バルジ

これらの現象を考慮した事前評価により、解析対象とする炉心状態に適合した設定値 (係数やテーブル形式) がAETNAへの入力値として与えられるため、これらに対する直接の妥当性確認は示していない。これらはAETNAの高温運転状態を対象とした妥当性確認により総合的に確認される。

4. 検証及び妥当性確認

LANCRの検証及び妥当性確認の概要 (手順③)

LANCRの検証及び妥当性確認の実施項目を以下に示す。
(モデル性能評価表 (スライドp.18) の右上に相当)

検証及び妥当性確認 実施項目		
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
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		
福島第二2号炉の照射後試験 (ウラン燃料)		
Dodewaard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		
ウラン濃縮度変化に対する妥当性確認		
プルトニウム富化変化に対する妥当性確認		
ガドリニア価値		
減速材ボイド係数		
ほう素価値		
制御棒価値		
等温温度係数		
ドップラ係数		
ガンマ発熱量		
モンテカルロ燃焼計算		

4. 検証及び妥当性確認

LANCRの妥当性確認 (例) (手順③)

試験による妥当性確認の例としてBASALA臨界試験による妥当性確認結果を以下に示す。

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 % Δk , 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, %であった。

ウォータロッド反応度, 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

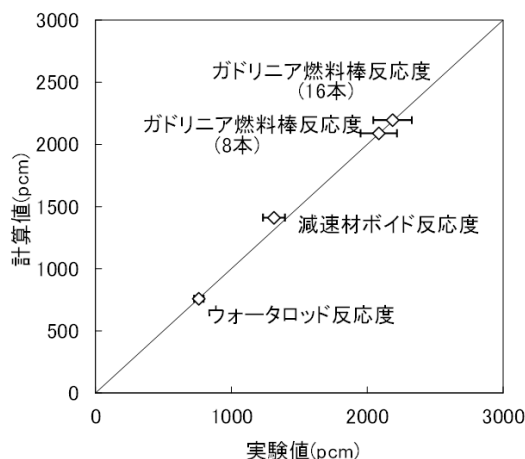
減速材ボイド反応度を除き, 実験値からの不確かさは測定誤差 (約 %) の範囲内であった。減速材ボイド反応度の不確かさは %であった。

等温温度係数

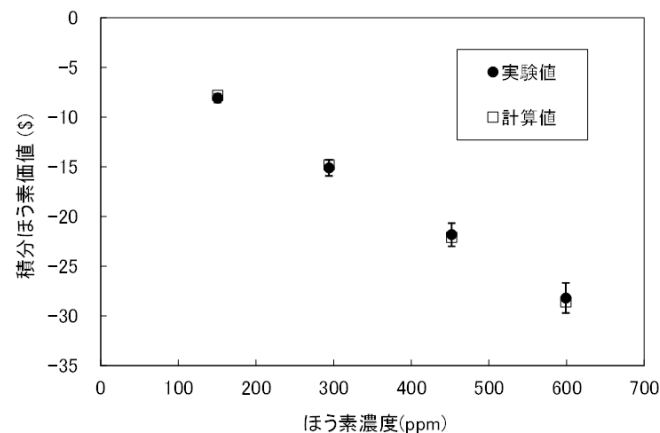
20℃～60℃での計算値は実験誤差の範囲内であり, 60℃～80℃の2ケースについては実験誤差の2 σ 以内で一致した。

積分ほう素価値

計算値は実験誤差の範囲内で実験値と一致した。



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

AETNAの検証及び妥当性確認の概要 (手順③)

AETNAの検証及び妥当性確認の項目を下記に示す。
(モデル性能評価表 (スライドp.19-20) の右上に相当)

検証及び妥当性確認 実施項目																							
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			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 計算等による妥当性確認												
冷温時臨界固有値 (制御棒価値)	出力運転時臨界固有値	出力分布 (TIPとの比較)	出力分布 (Yスキャン)	燃料棒出力分布 (Y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)	チャンネル圧損試験	SPERT実験	安定性試験高次モード分布	IAEA PWRベンチマーク (定常)	LRA BWRベンチマーク (定常/過渡)	HAFAS BWRベンチマーク (定常)	LMW PWRベンチマーク (過渡)	均質円筒炉心高次モード問題	局所出力 (初装荷多濃縮度炉心)	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

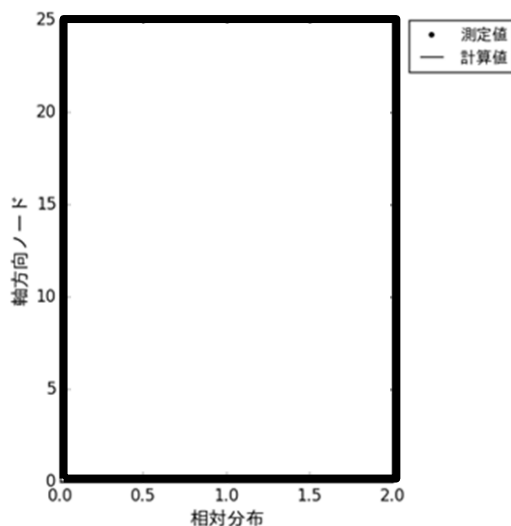
4. 検証及び妥当性確認

AETNAの妥当性確認（例）（手順③）

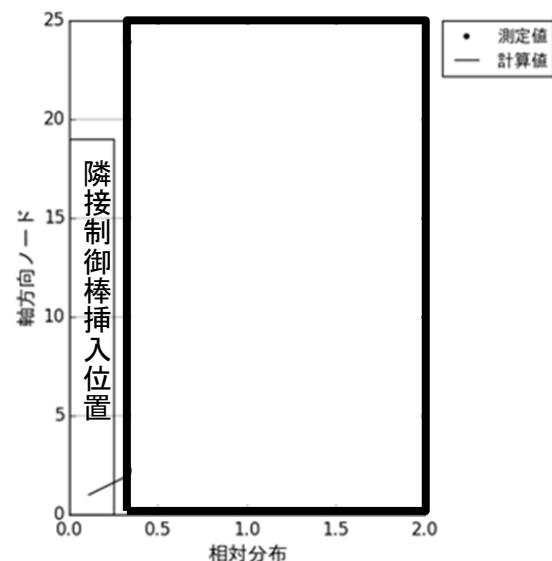
プラント運転実績による妥当性確認の例として，出力分布（ガンマスキャンとの比較）による妥当性確認の結果を以下に示す。

燃焼の進んだ高燃焼度 8×8 燃料と新燃料の 9×9 燃料を装荷したBWR 大型炉取替炉心（炉心平均燃焼度28GWd/t）および高燃焼度 8×8 燃料の濃縮度多種類燃料を装荷したABWR初装荷炉心における運転後の燃料集合体ガンマスキャン測定値（La-140 測定値）とAETNA による計算値（La-140 計算値）を比較した。

BWR 大型炉取替炉心及びABWR 初装荷炉心において，ノードルRMS誤差は %，径方向 %，軸方向 %である。測定データとの比較例は以下のとおりである。



La-140燃料集合体軸方向分布の比較(1)
(BWR大型炉取替炉心の例)



La-140燃料集合体軸方向分布の比較(2)
(BWR大型炉取替炉心の例)

5. 許認可解析への適用

LANCRの適用範囲と検証及び妥当性確認の実施範囲（手順④）

LANCRの適用範囲（スライドp.4の再掲）と、検証及び妥当性確認の実施範囲の内訳と合計範囲を以下にまとめる。検証及び妥当性確認の合計範囲は適用範囲を包絡している。

	適用範囲	検証及び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	公開ベンチマーク問題 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
燃料棒配列	1×1～10×10	1×1～10×10	1×1, 8×8, 9×9	1×1, 4×4, 9×9, 10×10	8×8～10×10
²³⁵ U濃縮度	0.2～6.5 wt%	0.2～6.5 wt%	0.2～4.9 wt%	0.2～6.5 wt%	0.2～6 wt%
Gd ₂ O ₃ 含有量	0～15 wt%	0～15 wt%	0～5 wt%	0～6 wt%	0～15 wt%
プルトニウム富化度	0～17.2 wt%	0～17.2 wt%	0～8.7 wt%	0～17.2 wt%	0～15.5 wt%
核分裂性 プルトニウム富化度	0～11 wt%	0～11 wt%	0～□ wt%	0～11 wt%	0～10.4 wt%
燃料棒の温度	10～2300℃	10～2300℃	10～80℃	627～1527℃	20～2300℃
減速材ポイド率	0～100%	0～100%	0% (40%模擬あり)	0～70%	0～100%
減速材温度	10～327℃	10～327℃	10～80℃	327～327℃	20～286℃
減速材中のほう素濃度	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0～2230 ppm	0 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	0～70 GWd/t	0～80 GWd/t
制御棒吸収材	B ₄ C, ハフニウム	B ₄ C, ハフニウム	B ₄ C, ハフニウム	—	B ₄ C, ハフニウム

5. 許認可解析への適用

AETNAの適用範囲と検証及び妥当性確認の実施範囲（手順④）

AETNAの適用範囲（スライドp.4の再掲）と、検証及び妥当性確認の実施範囲の内訳と合計範囲を以下にまとめる。検証及び妥当性確認の合計範囲は適用範囲を包絡している。

	適用範囲	検証及び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	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	BWR6, SPERT ⅢE炉心	BWR, PWR	BWR, ABWR
燃料	UO ₂ , MOX	UO ₂ , MOX	UO ₂ , MOX	UO ₂	-	UO ₂ , 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	低温 ~ 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 ~ 8.6MPa	-	-
吸収材	制御棒 (B ₄ C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B ₄ C, ハフニウム), ほう酸水(SLC)	制御棒 (B ₄ C, ハフニウム)	制御棒(B ₄ C)	制御棒	制御棒(B ₄ C), ほう酸水(SLC)

5. 許認可解析への適用

許認可解析へのLANCR/AETNAコード適用の妥当性（手順⑤）

島根3号炉チャンネルボックス厚肉化の許認可解析時には、炉心関連のパラメータについてコードに起因する不確かさを想定し、必要と考えられる設計裕度を設定している。そのうち安全上重要と考えられる代表項目として以下の4項目を選定し、LANCR/AETNAの不確かさ又は不確かさを積み上げた保守因子が、設計における設定値を下回っていることを確認した。

これにより、LANCR/AETNAを島根3号炉チャンネルボックス厚肉化の許認可解析へ適用することは妥当と判断できる。

項目		LANCR/ AETNA	設計における 設定値	備考（設定値の考え方）
反応度係数の 保守因子	減速材ボイド係数, β_{eff} , ノード出力, ノード燃焼度 の不確かさを積算	<input type="text"/> %	25 %	計算コードの不確かさと取替炉心段階に 生じる不確かさも考慮
制御棒価値の 保守因子	ドップラ係数, β_{eff} , 制御 棒価値の不確かさを積算	<input type="text"/> % Δk	0.3 % Δk	計算コードの不確かさと取替炉心段階に 生じる不確かさも考慮
SLMCPR	ノード出力 (AETNA)	<input type="text"/> %	5.2 %	SLMCPR評価で設定する核計算の不確 かさ
	局所出力 (AETNA)	<input type="text"/> %	3.0 %	SLMCPR評価で設定するR因子不確かさ 1.5%の2倍
SLC	ほう素価値, 冷温臨界固 有値の不確かさを積算	<input type="text"/> % Δk	1.5 % Δk	SLC停止余裕評価において設定した基準 値

別添資料

LANCR及びAETNAの 解析モデル概要

3. 解析モデル

LANCR/AETNAの解析モデル

別添資料として以下の概要を示す。

<LANCR解析モデル>

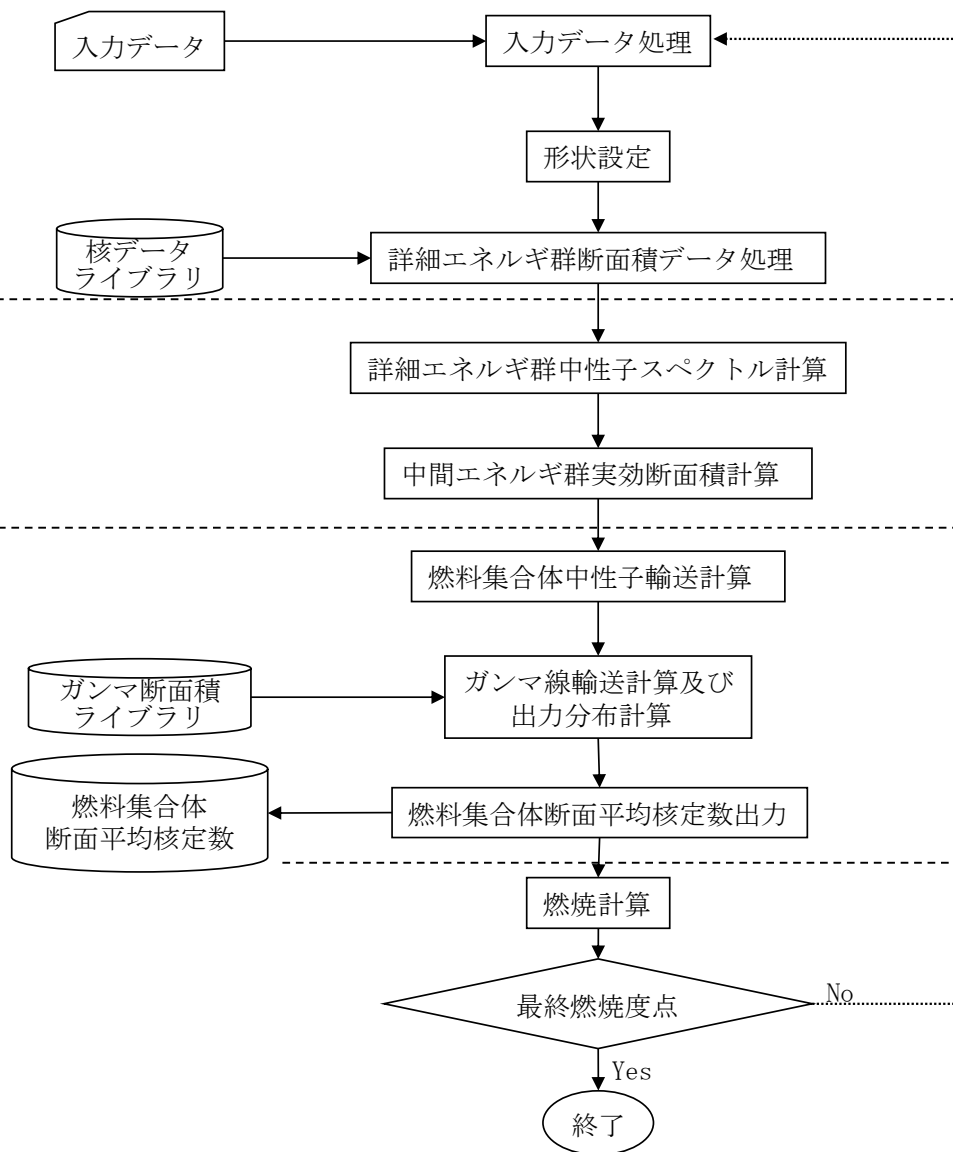
- (1) LANCRの概要 計算フロー (スライド p.31)
- (2) 核データライブラリ (スライド p.32)
- (3) 詳細エネルギー群断面積データ処理 (スライド p.33)
- (4) 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算, 中間エネルギー群実効断面積計算 (スライドp. 34)
- (5) 燃料集合体中性子輸送計算 (スライド p.35)
- (6) ガンマ線輸送計算及び出力分布計算 (スライド p.36)
- (7) 燃焼計算 (スライド p.37)

<AETNA解析モデル>

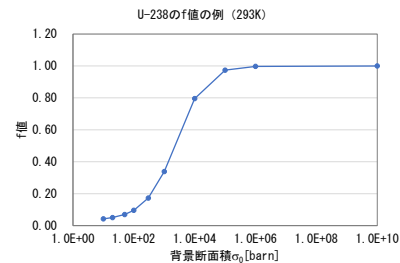
- (1) AETNAの概要 計算フロー (スライド p.38)
- (2) 核計算 (スライド p.39~40)
- (3) 燃料棒出力計算 (スライド p.41~42)
- (4) 断面積計算 (スライド p.43~45)
- (5) 燃焼履歴計算 (スライド p.46)
- (6) 熱水力計算 (スライド p.47)
- (7) 熱的余裕計算 (スライド p.48)

3.1 LANCRの解析モデル

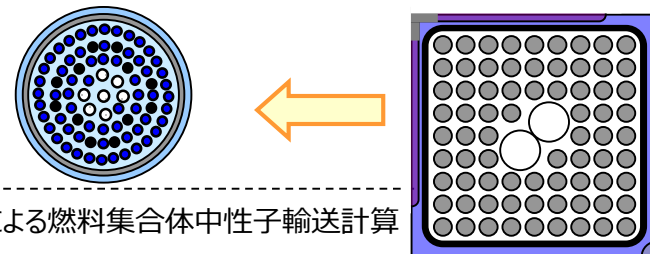
LANCRの概要 計算フロー



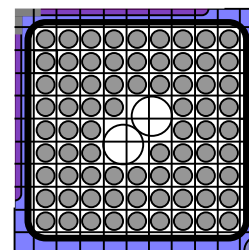
Bondarenko形式の核データライブラリを用いた実効断面積計算



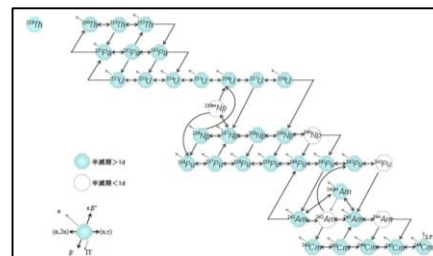
円筒クラスタ体系による高速な詳細群中性子スペクトル計算



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



3.1 LANCRの解析モデル

(1) 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 σ_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

3.1 LANCRの解析モデル

(2) 詳細エネルギー群断面積データ処理

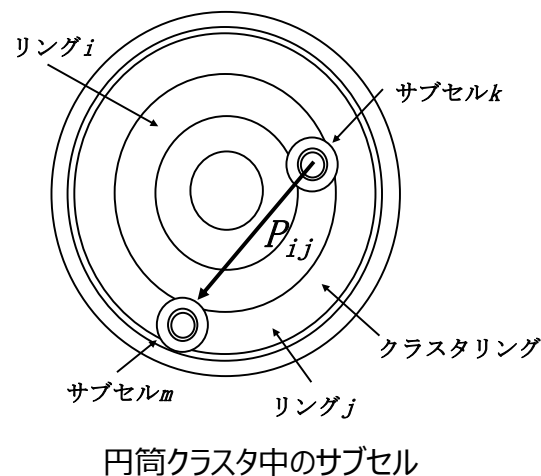
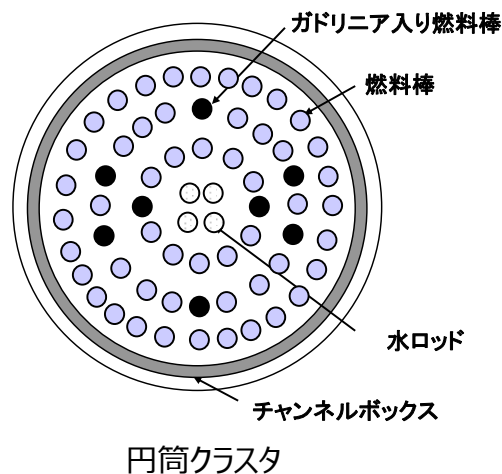
詳細エネルギー群中性子スペクトル計算で使用する実効断面積を円筒クラスタ体系で計算する。

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。



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。

3.1 LANCRの解析モデル

(3) 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， χ_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。

3.1 LANCRの解析モデル

(4) 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。

$$\underbrace{\Sigma_i^g \phi_i^g V_i}_{\text{領域 } i \text{ での衝突数}} = \underbrace{\sum_{n,m,l} \Gamma_{nml \rightarrow i}^- J_{nml}^-}_{\text{入射カレントの寄与}} A_{nm} + \sum_j P_{j \rightarrow i}^g \underbrace{\sum_{g'} \left(\Sigma_j^{g' \rightarrow g} + \frac{\chi_j^g}{\lambda} \nu \Sigma_{f,j}^{g'} \right) \phi_j^{g'} V_j}_{\text{ノード内部ソースの寄与}}$$

$$J_{nml}^+ A_{nm} = \underbrace{\sum_j P_{j \rightarrow nml}^g \sum_{g'} \left(\Sigma_j^{g' \rightarrow g} + \frac{\chi_j^g}{\lambda} \nu \Sigma_{f,j}^{g'} \right) \phi_j^{g'} V_j}_{\text{ノード内部ソースの寄与}} + \underbrace{\sum_{n',m',l'} \Gamma_{n'm'l' \rightarrow nml}^- J_{n'm'l'}^-}_{\text{入射カレントの寄与}} A_{n'm'}$$

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

隣接ノードとの境界条件

- $J_{nml}^{\pm,g}$: 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)
- ϕ_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
- χ_j^g : 領域 j の核分裂スペクトル
- λ : 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。

3.1 LANCRの解析モデル

(5) 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。

3.1 LANCRの解析モデル (6) 燃焼計算

燃焼チェーン

重核38核種，核分裂生成核136核種及び本チェーン上では明示的に取り扱わない残りの核分裂生成核種を一括した擬似FP核種より構成される。

数値積分法

予測計算部

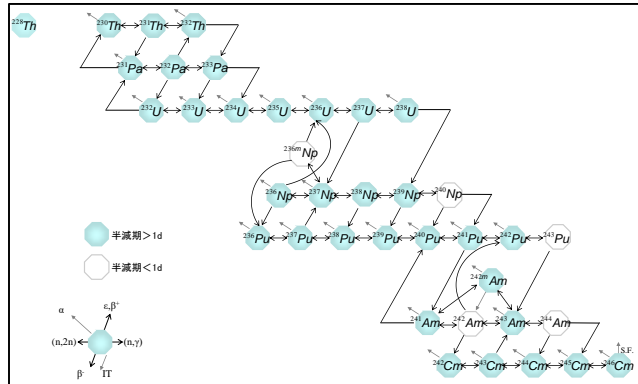
予測計算部では4次のRunge-Kutta-Gill法により燃焼方程式を解く。その際、生成項 Q_i は微小時間ステップ Δt の間は一定と仮定する。

修正計算部

修正部での燃焼方程式では、実効的な崩壊定数を時間に対し一次の関数として取り扱う。また生成項 Q は時間ステップ Δt 間の平均値 $Q_{av,i}$ で代表させる。

中性子束及び燃焼スペクトル計算モデル

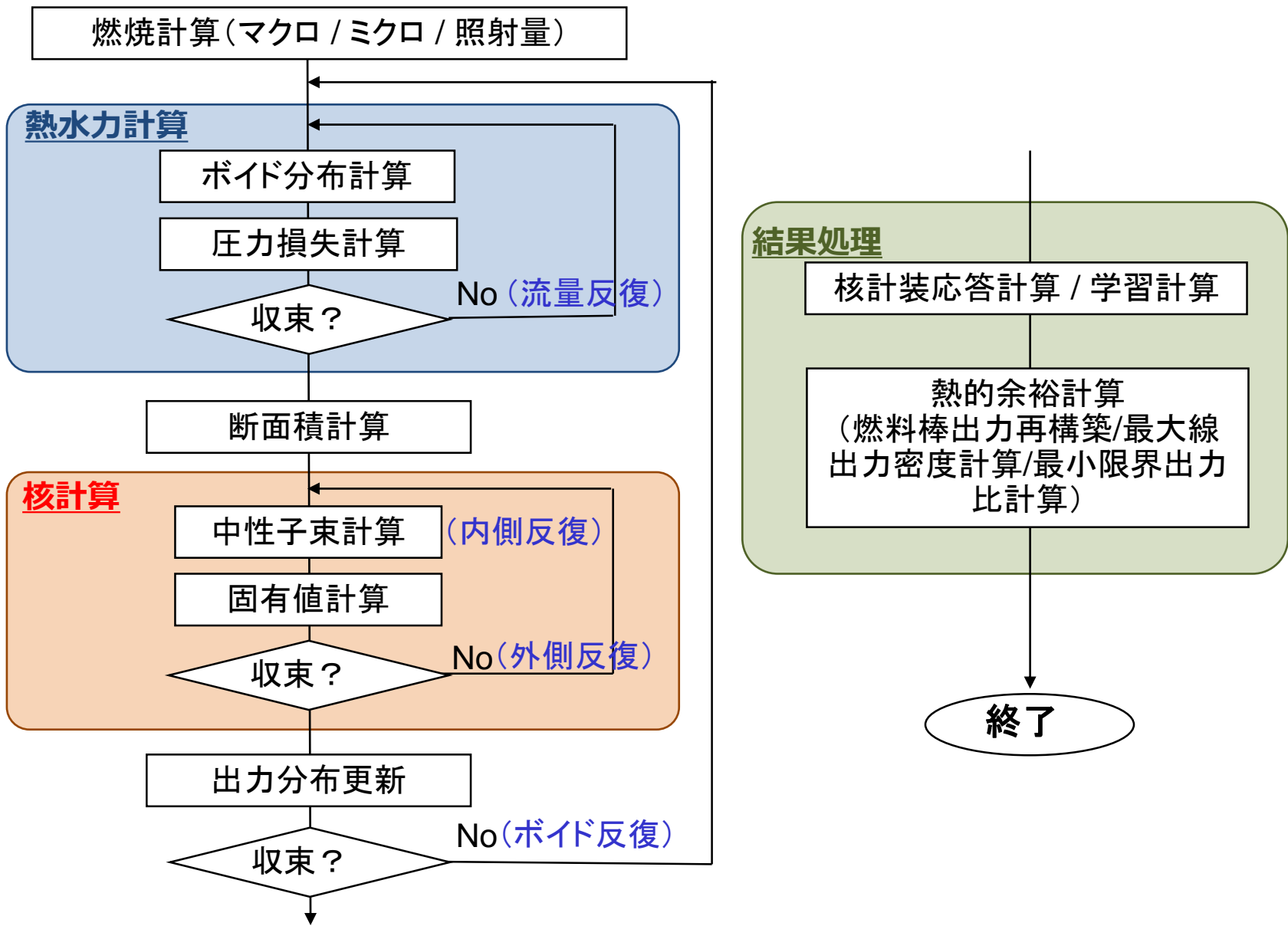
燃焼計算に用いる中性子束レベルは、与えられた出力密度と核分裂密度の関係から求まる。燃料集合体計算で得られる中性子スペクトルは、無限格子のものであり、炉内の状況とは異なっている。燃焼計算では、この点を考慮するために臨界状態にある炉内を模擬した少数群拡散方程式で、もれを表すバックリングを固有値とした基本モードの中性子スペクトルを用いる。



LANCRの燃焼チェーン(アクチノイド)

3.2 AETNAの解析モデル

AETNAの概要 計算フロー



3.2 AETNAの解析モデル

(1) 核計算 (1/2) 基礎方程式

ノードにおける炉内中性子束分布に対するエネルギー 3 群拡散方程式を基礎式とする。

$$\nabla \cdot J_g^i(x, y, z) + \Sigma_{rg}^i \phi_g^i(x, y, z) = Q_g^i(x, y, z)$$

$\Sigma_{rg}^i(x, y, z)$: 第g群除去断面積 $\phi_g^i(x, y, z)$: 第g群中性子束 (g=1, 2, 3がそれぞれ高速, 共鳴, 熱群)

中性子流および中性子源はそれぞれ

$$J_g^i(x, y, z) = -D_g^i \nabla \phi_g^i(x, y, z),$$

$$Q_g^i(x, y, z) = \sum_{g' \neq g} \Sigma_{g' \rightarrow g}^i \phi_{g'}^i(x, y, z) + \frac{\chi_g}{\lambda} \sum_{g'} \nu \Sigma_{fg'}^i \phi_{g'}^i(x, y, z),$$

$D_g^i(x, y, z)$: 第g群拡散係数 $\nu \Sigma_{fg}^i(x, y, z)$: 第g群核分裂生成断面積 (ν は核分裂当たり発生中性子数)

$\Sigma_{g' \rightarrow g}^i(x, y, z)$: 第g' → g群散乱断面積 χ_g : 核分裂スペクトル

上記に対し, 解析的多項式ノード法を適用してノード内中性子束分布を考慮する。ノード内分布の計算においては, 着目方向以外の横方向について積分した 1 次元方程式において以下に示す式に展開する。(次スライド参照)

$$\phi_{gx}^i(x) = A_{gx}^i \cosh \kappa_g^i x + B_{gx}^i \sinh \kappa_g^i x + \sum_{n=0}^2 a_{gxn}^i w_n(x/h_x^i),$$

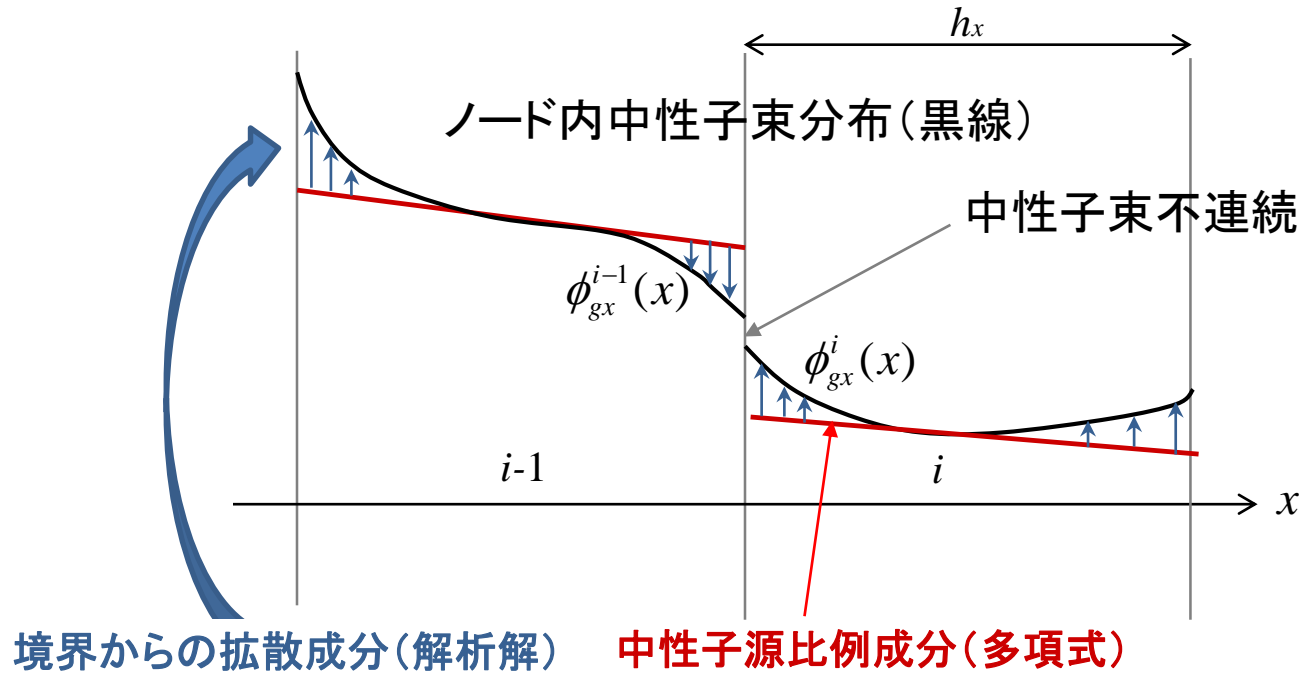
AETNAは上記ノード法を非線形反復法で解く。

離散化されたノード内分布を上式で展開する意味, 不連続因子について後述。

3.2 AETNAの解析モデル

(1) 核計算 (2/2) 解析的多項式ノード法について

AETNAでは離散化されたノード内分布について、不連続因子も用いて以下のように展開する。



$$\phi_{gx}^i(x) = A_{gx}^i \cosh \kappa_g^i x + B_{gx}^i \sinh \kappa_g^i x + \sum_{n=0}^2 a_{gxn}^i w_n(x/h_x), \quad (w_n: 2 \text{ 次ルジャンドル多項式})$$

-展開係数 (A, B, a_n) は中性子源分布式とノード境界条件から決定

-中性子束不連続条件：不連続因子 f を掛けた中性子束が連続

$$f_{gx}^{i-1}(h_x^{i-1})\phi_{gx}^{i-1}(h_x^{i-1}) = f_{gx}^i(0)\phi_{gx}^i(0) \quad f_{gx}: x \text{ 方向の中性子束不連続因子}$$

3.2 AETNAの解析モデル

(2) 燃料棒出力計算 (1/2)

ノード法燃料棒出力再構築

ノード内中性子束及び断面積分布を考慮した再構築された燃料棒出力 $p(x, y)$ は無限体系の出力分布と展開されたノード内中性子束分布および断面積分布より評価する。

$$p(x, y) = p^\infty(x, y) \left\{ \sum_{g=1}^G \Sigma_{fg}^{hom}(x, y) \phi_g^{hom}(x, y) \right\},$$

$\Sigma_{fg}^{hom}(x, y)$: ノード内核分裂断面積
(下記では *hom* を省略)

$p^\infty(x, y)$: LANCRのLPF

$\phi_g^{hom}(x, y)$: ノード内中性子束分布

ノード内断面積分布と燃焼度分布および燃料棒燃焼度

スペクトルミスマッチの履歴効果や片燃え効果を考慮したノード内断面積分布は、横方向に分離展開した1次元多項式分布を合成することで計算する。1次元分布はノード平均/表面燃焼度から計算する。

$$\Sigma_{fgy}(x, y) \cong \Sigma_{fgx}(x) + \Sigma_{fgy}(y) - \bar{\Sigma}_{fgy},$$

$\Sigma_{fgx}(x), \Sigma_{fgy}(y)$: 1次元断面積分布 (x/y方向)

$$\Sigma_{fgx}(x) = \sum_{n=0}^2 \Sigma_{fgxn} w_n(x/h_x).$$

$\bar{\Sigma}_{fgy}$: ノード平均断面積
 Σ_{fgxn} : 2次多項式の各次数に対する係数

ノード平均及び表面燃焼度を用いて同様に展開した1次元燃焼度分布 (添え字は上記と等しい) と無限格子体系による2次元燃料棒燃焼度を用いて、燃料棒燃焼度 $E^{het}(x, y)$ を再構築する。

$$E(x, y) \cong E_x(x) + E_y(y) - \bar{E},$$

$E^{het, \infty}(x, y)$: LANCRの非均質無限体系計算による
燃料棒燃焼度 (平均燃焼度に対し規格化)

$$E_x(x) = \sum_{n=0}^2 E_{xn} w_n(x/h_x)$$

$$E^{het}(x, y) = E^{het, \infty}(x, y) \cdot E(x, y)$$

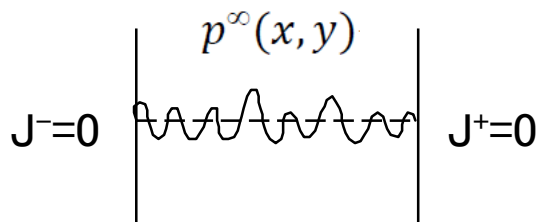
$E(x, y)$: AETNAで合成された2次元ノード内燃焼度分布

3.2 AETNAの解析モデル

(2) 燃料棒出力計算 (2/2) 燃料棒出力再構築法について

LANCRにおける無限格子計算で非均質燃料棒の出力分布を計算（核定数）し、AETNAにおいては、燃焼にともなうノード内片燃え効果を考慮した燃焼度分布からノード内断面積分布を計算し、これとノード内中性子束分布から均質な出力分布を計算。これらを合成することで、燃料棒出力を再構築する。CBH効果などを取り込むことも可能。

LANCR（詳細メッシュ）による無限格子体系
（反射境界条件）での非均質燃料棒出力分布

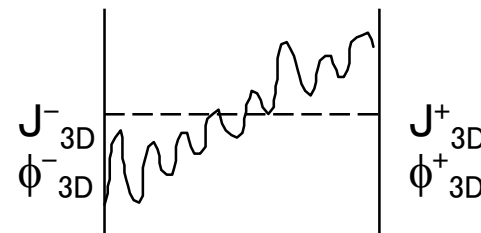
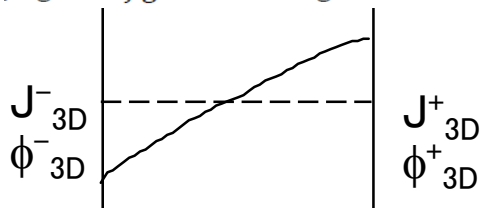


再構築された燃料棒出力分布

$$p(x, y) = p^{\infty}(x, y) \left\{ \sum_{g=1}^G \Sigma_{fg}^{hom}(x, y) \phi_g^{hom}(x, y) \right\}$$

AETNA（粗メッシュ）による
漏れを考慮した均質出力分布
（=断面積×中性子束の群積算値の分布）

$$\sum_{g=1}^G \Sigma_{fg}^{hom}(x, y) \phi_g^{hom}(x, y)$$



3.2 AETNAの解析モデル

(3) 断面積計算 (1/3)

ノードの断面積は燃焼区間毎の多項式を用いて表す。
集合体計算コード(LANCR)の結果から作成される断面積 (核定数) テーブルの各燃焼区間において、断面積データは燃焼度 E 、瞬時相対水密度 U 、実効履歴相対水密度 UH 、減速材温度(冷温時)の関数として次の多項式で与える。

高温時



冷温時



炉心領域を囲む反射体は、与えられた炉心外条件に対応する1つの水及び構造材を均質化したノードとして表す。定数としては群毎の拡散係数/減速断面積/吸収断面積を与える。

3.2 AETNAの解析モデル

(3) 断面積計算 (2/3)

キセノン毒作用モデル (およびその他の各種のマイクロ燃焼モデルに基づく断面積補正)

マクロ熱群除去断面積は、Xe無しのマクロ断面積とマイクロ燃焼モデルで把握したXe数密度および熱群のXeマイクロ吸収断面積（核定数）から計算し、均質化断面積の吸収断面積を補正する。

$$\Sigma_{r3} = \Sigma_{r3}^{noXe} + N_{Xe} \sigma_a^{Xe}$$

上記の他、出力密度の履歴に依存するプロメシウム、サマリウム、ロジウム、ガドリニウム、及びプルトニウム241、アメリシウム241についてマイクロ燃焼モデルを用いて核種数密度を追跡し、均質化断面積（吸収断面積/核分裂断面積）を補正する。

ドップラモデル

ドップラ反応度は燃料温度に依存する以下の式で評価する。 C_T はベース温度と高温の集合体計算結果から決定。燃料温度はノード出力・燃焼度に依存した多項式で決定する。これに基づき均質化断面積の共鳴群吸収断面積を補正する。

$$\rho^{Dop} = C_T (\sqrt{T_{fuel}} - \sqrt{T_{base}})$$

3.2 AETNAの解析モデル

(3) 断面積計算 (3/3)

制御棒履歴 (CBH) 反応度モデル

制御棒挿入状態で燃焼すると偏ったノード内出力分布で燃焼されるため、制御棒引き抜き時の反応度などが影響を受ける。(CBH効果)

これに対し、制御棒挿入状態での燃焼期間に依存した荷重因子 w を用いて以下によりCBH効果による反応度を決定する。全ての断面積に対し同様に補正する。

$$\text{制御棒が挿入されないノード} \quad \rho^U = w(k^{\infty CBU} - k^{\infty UBU})/k^{\infty UBU}$$

$$\text{制御棒が挿入されたノード} \quad \rho^C = w(k^{\infty CBC} - k^{\infty UBC})/k^{\infty UBC}$$

$$\text{部分的に制御棒が挿入されたノード} \quad \rho^{CBH} = CFK \cdot \rho^C + (1 - CFK)\rho^U$$

(制御割合:CFK)

$k^{\infty CBU}$: 制御棒挿入状態 (以下, 制御されたという) での燃焼から, 瞬時に制御棒を引き抜いた無限増倍率

$k^{\infty UBU}$: 常に制御棒引き抜き状態(以下, 非制御という)で燃焼した無限増倍率

$k^{\infty UBC}$: 常に非制御で燃焼し, 瞬時に制御棒を挿入した無限増倍率

$k^{\infty CBC}$: 常に制御されて燃焼した無限増倍率

例えば, 非制御ノードでは, 荷重因子 w は引き抜き後の燃焼度伸長と共に値が小さくなる (CBH反応度効果が小さくなる) 関数で評価される。

3.2 AETNAの解析モデル

(4) 燃焼履歴計算

燃焼度積算(マクロ燃焼)(E)

燃焼終了時のノード燃焼度は、前期間燃焼度に対し出力の時間積分値を加える。

スペクトル履歴相対水密度(UHSPH)

核定数を参照する指標として従来用いられてきた水密度から計算される履歴水密度(UH)の代わりに、集合体計算におけるノード平均中性子エネルギースペクトルの指標（高速群と熱群の比）と関連付けされたスペクトル履歴水密度(UHSPH)で核定数を参照する。

本手法により、AETNA計算時に隣接ノードの影響（スペクトルミスマッチ）により、当該ノードの水密度に相当するスペクトルからずれた場合でも、実際のスペクトル履歴に適合した断面積を核定数テーブルから再現することが可能となる。（テーブル参照時の指標のみ修正）

3.2 AETNAの解析モデル

(5) 熱水力計算

混合流体保存式

熱水力モデルは垂直方向の強制流を仮定する。バイパス領域（アウトチャンネルと水ロッド）は、独立のチャンネルとして扱う。本手法では、燃料集合体内の二相流に対し、定常状態の混合流に対する3保存式（圧損計算）とドリフトフラックスモデル（ボイド率計算）を適用する。

ドリフトフラックスモデルに基づくボイド率計算

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0 j + \bar{V}_{gj}} = \frac{x}{C_0 \left\{ x + (1-x) \frac{\rho_g}{\rho_f} \right\} + \frac{\rho_g \bar{V}_{gj}}{G}}$$

$$C_0 = \frac{\langle ja \rangle}{\langle j \rangle \langle \alpha \rangle}$$

$$\bar{V}_{gj} = \frac{\langle (v_g - j) \alpha \rangle}{\langle \alpha \rangle}$$

C_0	: 分布パラメータ
\bar{V}_{gj}	: ドリフト速度
j	: 混合流体の体積流束
j_g	: 蒸気の体積流束

圧力損失計算

1次元均質流に対する運動量保存式を積分した結果得られる以下の式で評価する。

$$P_k - P_{k+1} = \Delta P_{friction} + \Delta P_{local} + \Delta P_{acceleration} + \Delta P_{elevation}$$

右辺の各項は摩擦圧損、局所圧損、加速圧損、位置圧損成分を表す。

局所圧損は、オリフィス、下部及び上部タイプレート、燃料集合体のスペーサなどによる流路内の面積変化により起こる圧力損失であり、局所圧損係数とそれに対する参照流路面積で与える。

加速圧損成分では、流路面積及び密度の変化の両方を考慮する。

3.2 AETNAの解析モデル

(6) 熱的余裕計算

燃料棒線出力密度

燃料棒の線出力密度は、燃料棒再構築モデルで評価された局所出力ピーキング、炉心出力、炉内全ノード数、当該ノード燃料棒数から決定する。AETNAはノード内全燃料棒について評価する。

限界出力比と限界出力制限値比

沸騰遷移相関式により評価された限界出力に対する余裕（限界出力比）を評価するとともに、燃料集合体タイプ毎の限界出力比制限値に対する余裕（限界出力制限値比）を評価する。