

島根原子力発電所 3 号炉 炉心解析コード (LANCR/AETNA) (解析モデルについて)

2023年 3 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。

はじめに	P.2
1. 炉心解析コード (LANCR/AETNA) の概要	P.3
2. LANCR解析モデル	P.4
3. AETNA解析モデル	P.13
参考① モデル性能比較表の各モデルとの関係	P.21
参考② 衝突確率法	P.24
参考③ 円筒クラスタモデルでの衝突確率法	P.25
参考④ エネルギー縮約, 空間縮約	P.26
参考⑤ マクロ燃焼モデルとマイクロ燃焼モデル	P.27

※ 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

1. 炉心解析コード (LANCR/AETNA) の概要

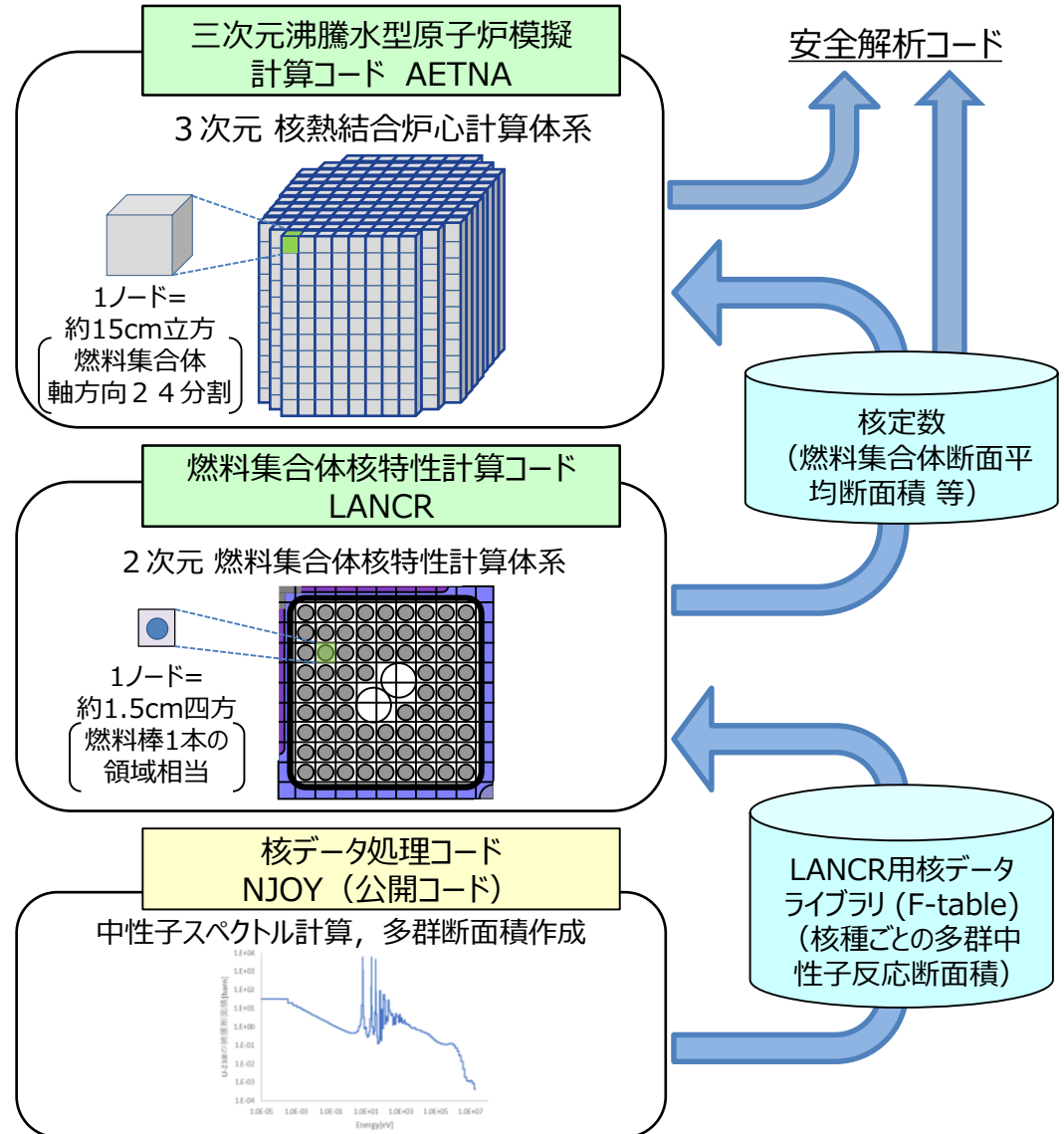
炉心解析コードの構成

AETNA：炉心全体に対して，燃料集合体単位の特徴を用いた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*¹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

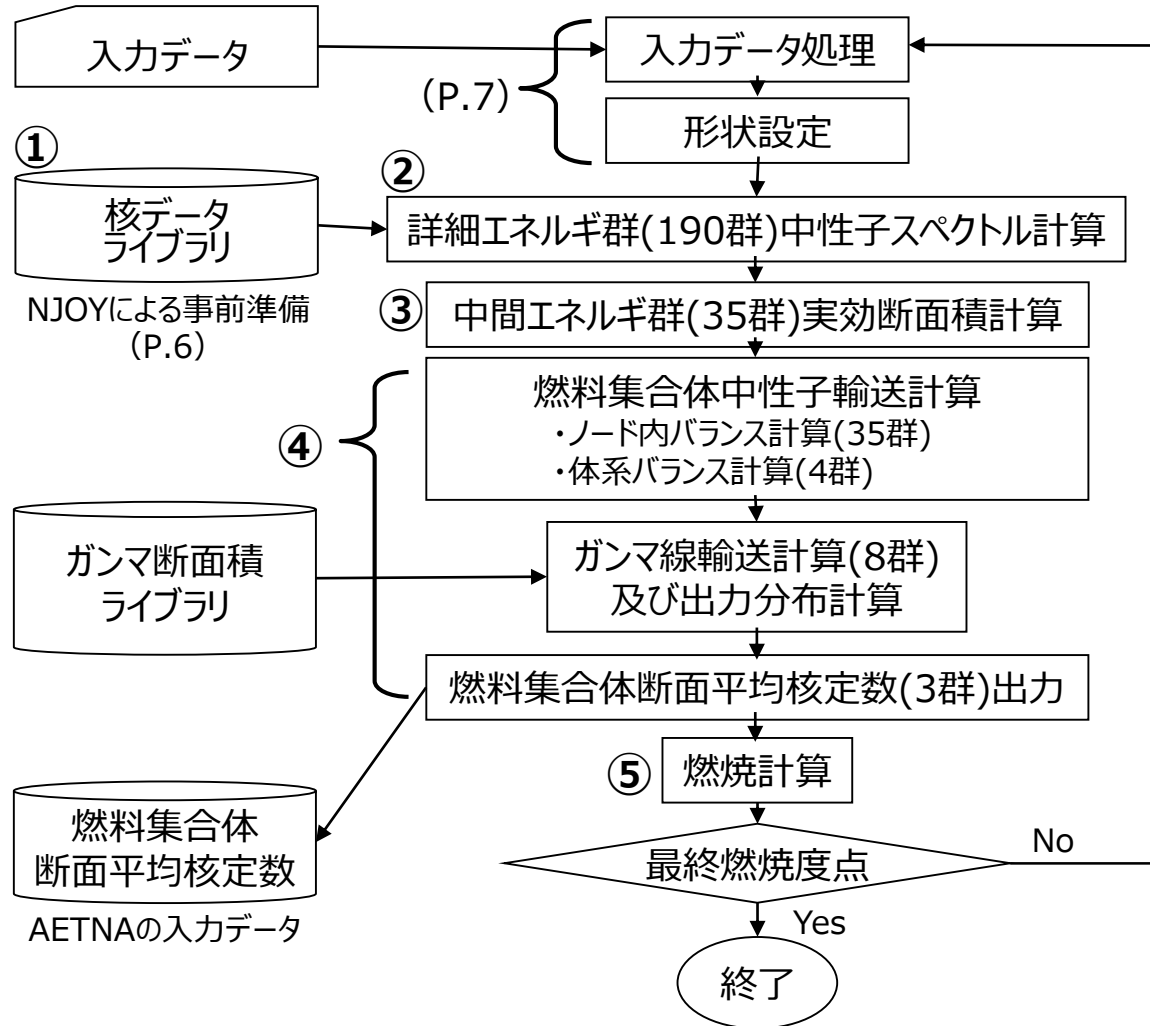


LANCR/AETNAを用いた炉心解析の流れ

2. LANCR解析モデル LANCRの計算フロー

➤ LANCRは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平均核定数を計算する。

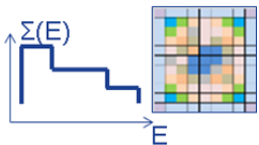
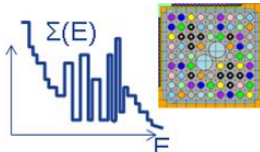
- ① 評価済み核データからNJOYを用いて事前に核データライブラリを準備する。
- ② NJOYで事前に準備した核データライブラリを読み込み、中間エネルギー群（35群）実効断面積の計算に必要な詳細エネルギー群（190群）断面積及び詳細エネルギー群（190群）中性子スペクトルを求める。（P.8）
- ③ 燃料集合体中性子輸送計算に必要な中間エネルギー群（35群）実効断面積を、詳細エネルギー群（190群）中性子スペクトル計算の結果から算出する。（P.9）
- ④ 燃料集合体中性子輸送計算（P.10）、ガンマ線輸送計算及び出力分布計算を行い、その結果からAETNAに必要な燃料集合体断面平均核定数（3群）を作成する。（P.11）
- ⑤ 燃焼計算を行い燃焼領域ごとの核種組成を求める。（P.12）



2. LANCR解析モデル 従来コードとの比較

- 計算精度向上を目指し、開発時点で最新の核データライブラリの採用、燃料集合体内の中性子束分布計算の輸送計算化、その他解析モデルの詳細化により誤差低減を図った。LANCRの解析モデルのうち、従来コードからの変更点を以下に示す。

従来コードとLANCRコードの解析モデルの比較（変更点）

	従来コード (HINES)	LANCR
核データライブラリ (P.6)	ENDF/B-IV,-V	ENDF/B-VII.0
詳細エネルギー群 中性子スペクトル計算 (P.8)	燃料棒体系 衝突確率法 (68+30群)	燃料集合体体系 (円筒クラスタモデル) 衝突確率法 (190群)
中間エネルギー群 実効断面積計算 (P.9)	エネルギー 3 群実効断面積に縮約	エネルギー35群実効断面積に縮約
中性子束分布計算 (P.10)	エネルギー3群 拡散計算法 	エネルギー35群 輸送計算法 
出力分布計算 (P.11)	ガンマ線反応による発熱は核分裂・捕獲反応率から簡易計算し、核分裂反応による発熱と合算して燃料棒出力を計算	中性子束分布計算をもとにガンマ線源を設定してガンマ線輸送計算を行い、ガンマ線反応による発熱を計算し、核分裂反応による発熱と合算して燃料棒出力を計算
燃料集合体断面平均 核定数出力 (P.11)	修正 1 群計算用 核定数出力	3 群計算用 核定数出力
燃焼計算 (P.12)	重核：24核種，FP等：30核種	重核：38核種，FP等：138核種

2. LANCR解析モデル

(1) NJOYによる核データライブラリの事前準備

- 評価済み核データを基に、詳細エネルギー群中性子スペクトル計算で必要となる190群実効断面積を作成する。
- LANCR用核データライブラリを、評価済み核データ ENDF/B-VII.0から核データライブラリ処理コードNJOYにより事前に生成する [3.1.1]。

評価済み核データ
(ENDF/B-VII.0)

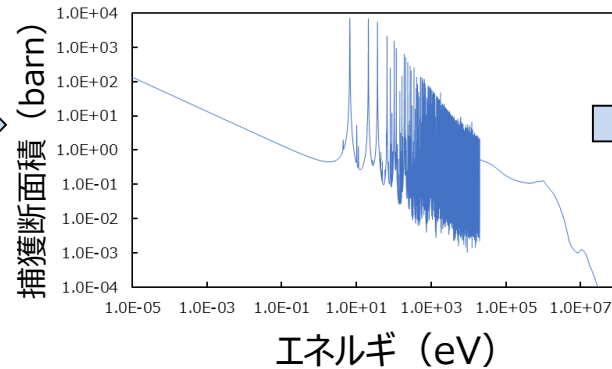
```

...
1.490288+5 6.091120+0 1.806460-1 7.439600-4 2.434410-2 0.000000+0 09237 2151 3454
0.000000+0 0.000000+0 0 0 0 0 09237 2 099999
0.000000+0 0.000000+0 0 0 0 0 09237 0 0 0
9.223800+4 2.360058+2 0 0 0 0 09237 3 1 1
0.000000+0 0.000000+0 0 0 1 3959237 3 1 2
| 395 2 9237 3 1 3
1.000000-5 0.000000+0 2.000000+0 0.000000+0 2.000000+4 1.429020+19237 3 1 4
2.299700+4 1.408890+1 2.300000+4 1.408870+1 2.302800+4 1.408710+19237 3 1 5
2.305900+4 1.408540+1 2.497100+4 1.397690+1 2.500600+4 1.397490+19237 3 1 6
2.504100+4 1.397290+1 2.600000+4 1.391850+1 2.606700+4 1.391520+19237 3 1 7
2.610500+4 1.391550+1 2.614300+4 1.391170+1 2.739500+4 1.385310+19237 3 1 8
2.739900+4 1.385120+1 2.743900+4 1.384930+1 2.817300+4 1.381390+19237 3 1 9
2.821500+4 1.381190+1 2.825700+4 1.380990+1 3.000000+4 1.372600+19237 3 1 10
3.089200+4 1.368990+1 3.094000+4 1.368800+1 3.098800+4 1.368600+19237 3 1 11
3.227000+4 1.363410+1 3.232200+4 1.363200+1 3.237400+4 1.362990+19237 3 1 12
3.500000+4 1.352360+1 3.555400+4 1.350450+1 3.561400+4 1.350240+19237 3 1 13
...

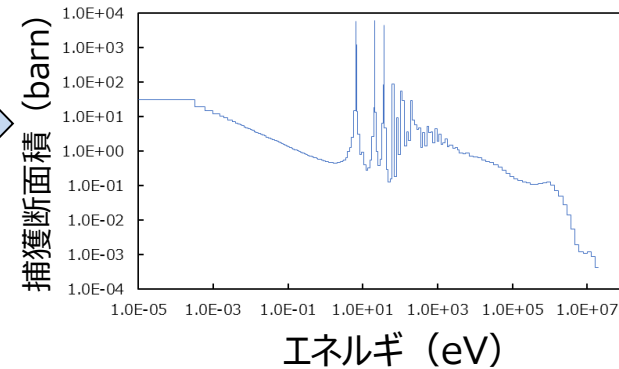
```

共鳴パラメータ
断面積 など

連続エネルギー



LANCR用
核データライブラリ
(エネルギー190群)



NJOYによる詳細エネルギー群断面積データ処理の例 (U-238捕獲断面積)

2. LANCR解析モデル

(2) 入力データ処理, 形状設定

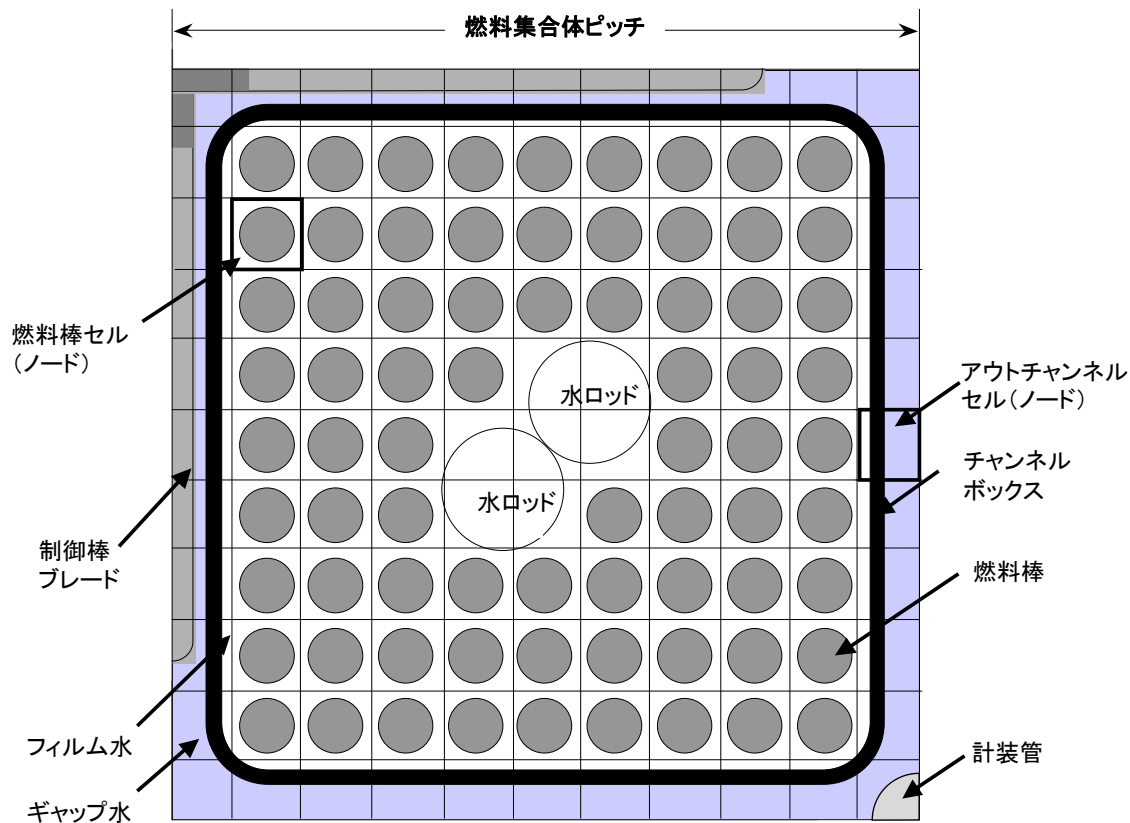
入力データ処理

燃料集合体の形状, 燃料棒ごと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 [1.5.1]

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ごとの物質組成データを設定する。

LANCRでは燃料棒 1 本に相当する領域を“ノード”として中性子輸送計算を行う。



燃料集合体形状と各部名称
(9×9配列の例)

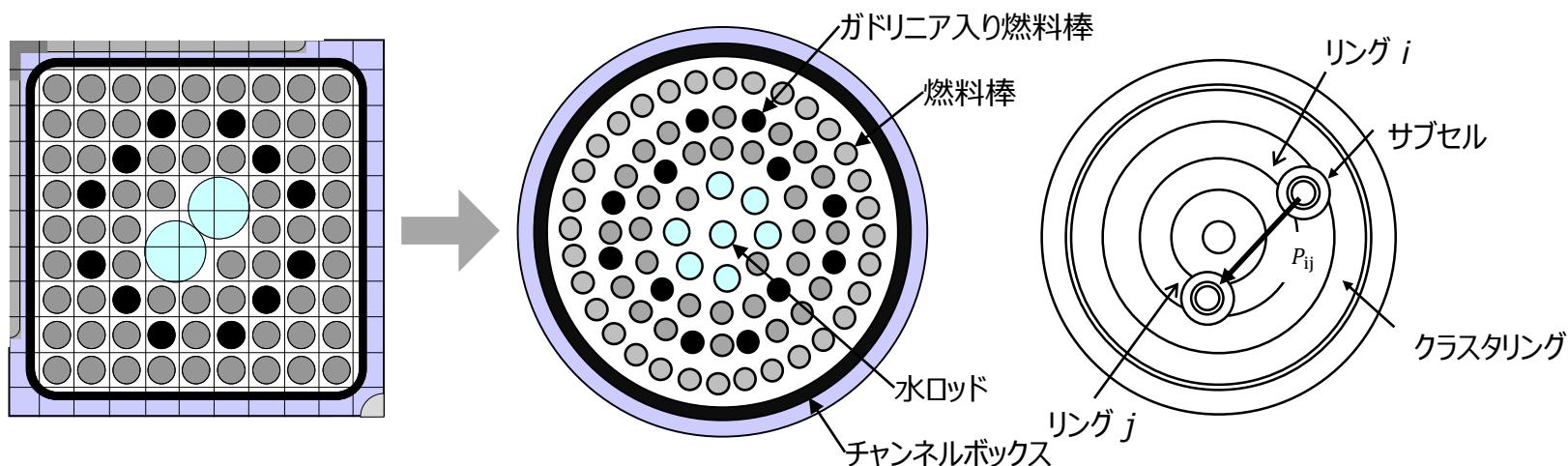
2. LANCR解析モデル

(3) 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算

- NJOYで作成した核データライブラリを読み込み，190群実効断面積を計算し[3.1.2.2]，燃料集合体各領域の190群中性子スペクトルを衝突確率法により計算する[3.1.2.3]。

LANCRでの詳細エネルギー群中性子スペクトル計算の特徴 [3.1.2.1]

- 燃料集合体の2次元断面を円筒クラスタでモデル化
 - 衝突確率法計算により詳細エネルギー群中性子の領域間の動きと減速を算出
 - 中性子スペクトルに影響する非均質性を扱いながら，計算の高速化が可能
- 個々の燃料棒をリング内に置いたサブセル（燃料棒，被覆管，減速材から構成）でモデル化



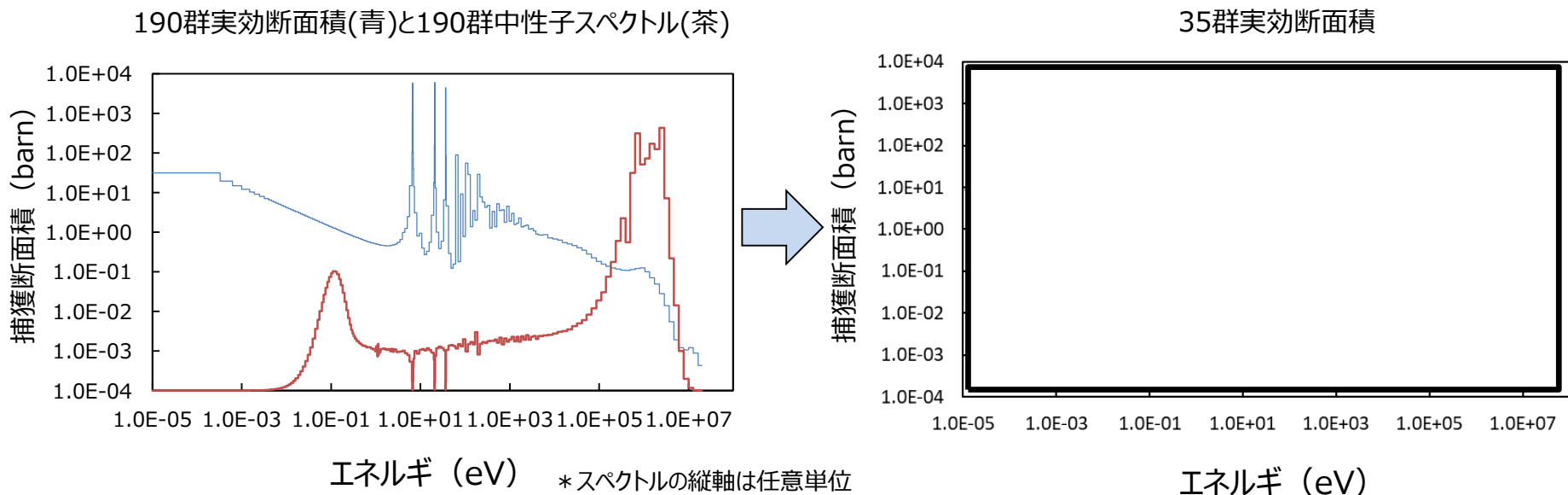
190群中性子スペクトル計算用円筒クラスタ近似

衝突確率法による各領域の中性子スペクトル計算

2. LANCR解析モデル

(4) 中間エネルギー群実効断面積計算

- 燃料集合体中性子輸送計算に使用する各領域の中間エネルギー群（35群）実効断面積を算出する。
 - 詳細エネルギー群中性子スペクトル計算で求めた各領域の190群中性子スペクトルを用いて、核データライブラリを基に計算した190群実効断面積を中間エネルギー群（35群）に反応率を保存するようエネルギー縮約する [3.1.2.5~3.1.2.7]。なお、35群のエネルギー群構造は、核種の主要な共鳴や熱群のスペクトル形状が模擬できるように設定している。

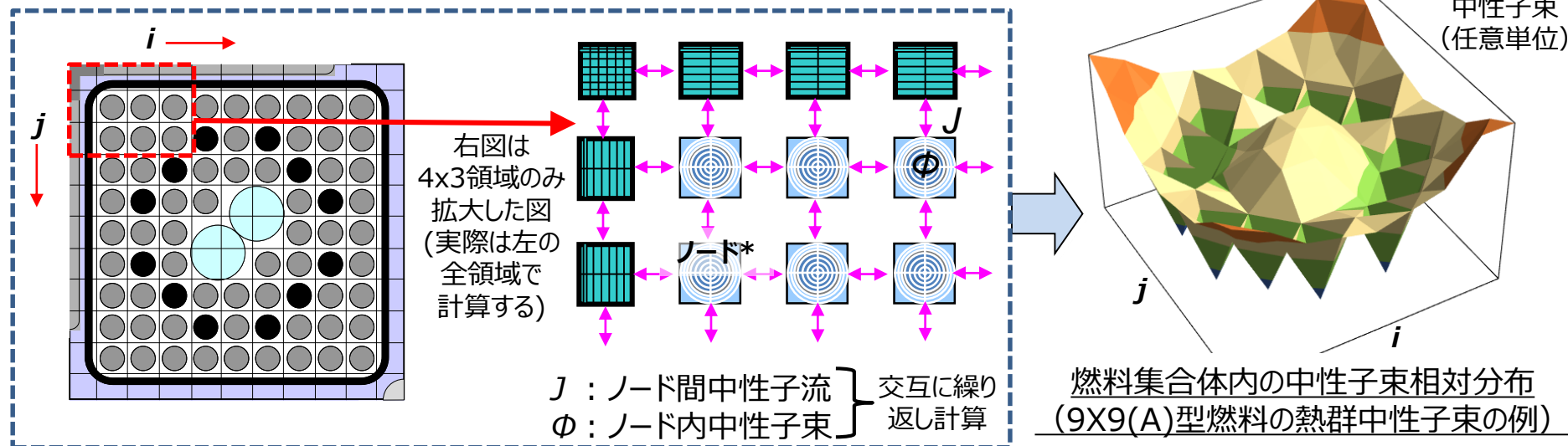


中間エネルギー群実効断面積計算の例（捕獲断面積）

2. LANCR解析モデル

(5) 燃料集合体中性子輸送計算

- 燃料集合体内の中性子束分布を計算するため、2次元燃料集合体体系を対象に、Current Coupling Collision Probability (CCCP：中性子流結合衝突確率) 法による中性子輸送計算を行う [3.1.3.1~3.1.3.2]。



全ノードでノード間中性子流(J)を用い、ノード内の衝突確率からノード内中性子束(ϕ)分布を算出
(ノード内バランス計算 (35群) [3.1.3.3])



中性子束分布が収束するまで両者を繰り返し計算する。

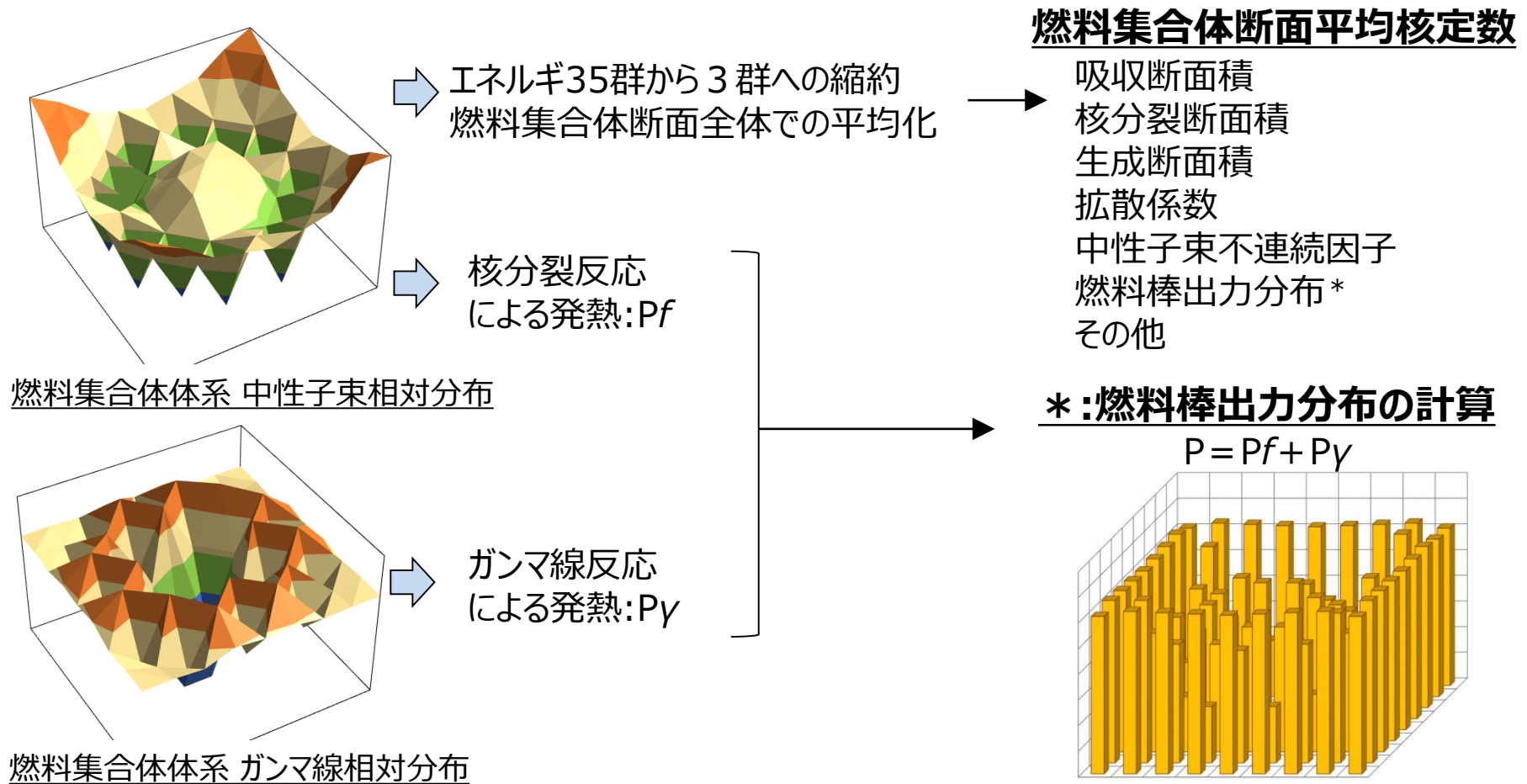
全ノードのノード内中性子束 (ϕ)を用い、燃料集合体体系でバランスするようノード間中性子流(J)を算出
(体系バランス計算 (4群) [3.1.3.4])

* ノード：計算において離散化された単位領域に対する呼称。LANCRでは燃料棒1本の領域を1つのノードとしている。

2. LANCR解析モデル

(6) ガンマ線輸送計算及び出力分布計算, 燃料集合体断面平均核定数出力

- 中性子束分布等にもとづき燃料集合体断面平均核定数を計算する[3.1.3.8]。
- ガンマ線についても輸送計算により燃料集合体内の分布を算出する[3.1.3.5]。
- 核分裂反応とガンマ線反応による発熱を考慮して燃料棒出力を算出する[3.1.3.7]。



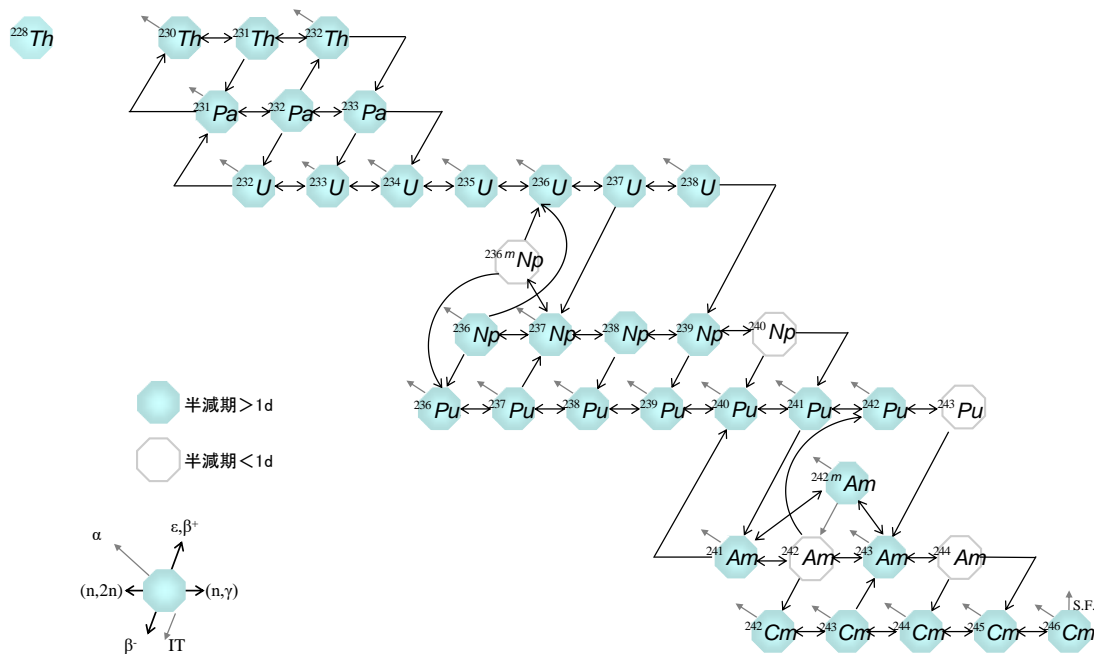
2. LANCR解析モデル

(7) 燃焼計算

- 核分裂反応や中性子の吸収，核種自身の壊変による燃料組成の変化を模擬するため，反応率（生成率，消滅率）と原子数密度に関する以下の燃焼方程式を解いて，燃焼度ごとの核種の原子数密度を求める [3.1.4]。無限格子体系と炉心体系の差異を考慮するため，反応率は臨界状態にある炉内を模擬した中性子スペクトルで調整する [3.1.4.3]。

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = P_i(t) - D_i(t) \quad i: \text{核種}, N_i: \text{原子数密度}, P_i: \text{生成率}, D_i: \text{消滅率}$$

- 燃焼チェーンは，重核38核種，核分裂生成核136核種，擬似FP核種2種類より構成する [3.1.4.4]。



生成・崩壊チェーン（アクチノイド核種の例）

3. AETNA解析モデル

AETNAの概要

- AETNAでは以下の中性子エネルギー3群の拡散方程式を解くことにより、炉心内の中性子束分布や実効増倍率を把握する核計算を行う。

$$-\nabla D_{g=1}^i \phi_{g=1}^i(x, y, z) + \Sigma_{rg=1}^i \phi_{g=1}^i(x, y, z) = \frac{1}{\lambda} \sum_{g'} v \Sigma_{fg'}^i \phi_{g'}^i(x, y, z)$$

$$-\nabla D_{g=2}^i \phi_{g=2}^i(x, y, z) + \Sigma_{rg=2}^i \phi_{g=2}^i(x, y, z) = \Sigma_{g=1 \rightarrow 2}^i \phi_{g=1}^i(x, y, z)$$

$$-\nabla D_{g=3}^i \phi_{g=3}^i(x, y, z) + \Sigma_{rg=3}^i \phi_{g=3}^i(x, y, z) = \Sigma_{g=2 \rightarrow 3}^i \phi_{g=2}^i(x, y, z)$$

ϕ_g^i : 第g群 中性子束
 J_g^i : 第g群 中性子流
 Σ_{rg}^i : 第g群 除去断面積
 $v \Sigma_{fg}^i$: 第g群 生成断面積
 D_g^i : 第g群 拡散係数
 λ : 実効増倍率

$g=1, 2, 3$ はそれぞれ高速群,
 共鳴群, 熱群を示す。
 i はノードに対するインデクス

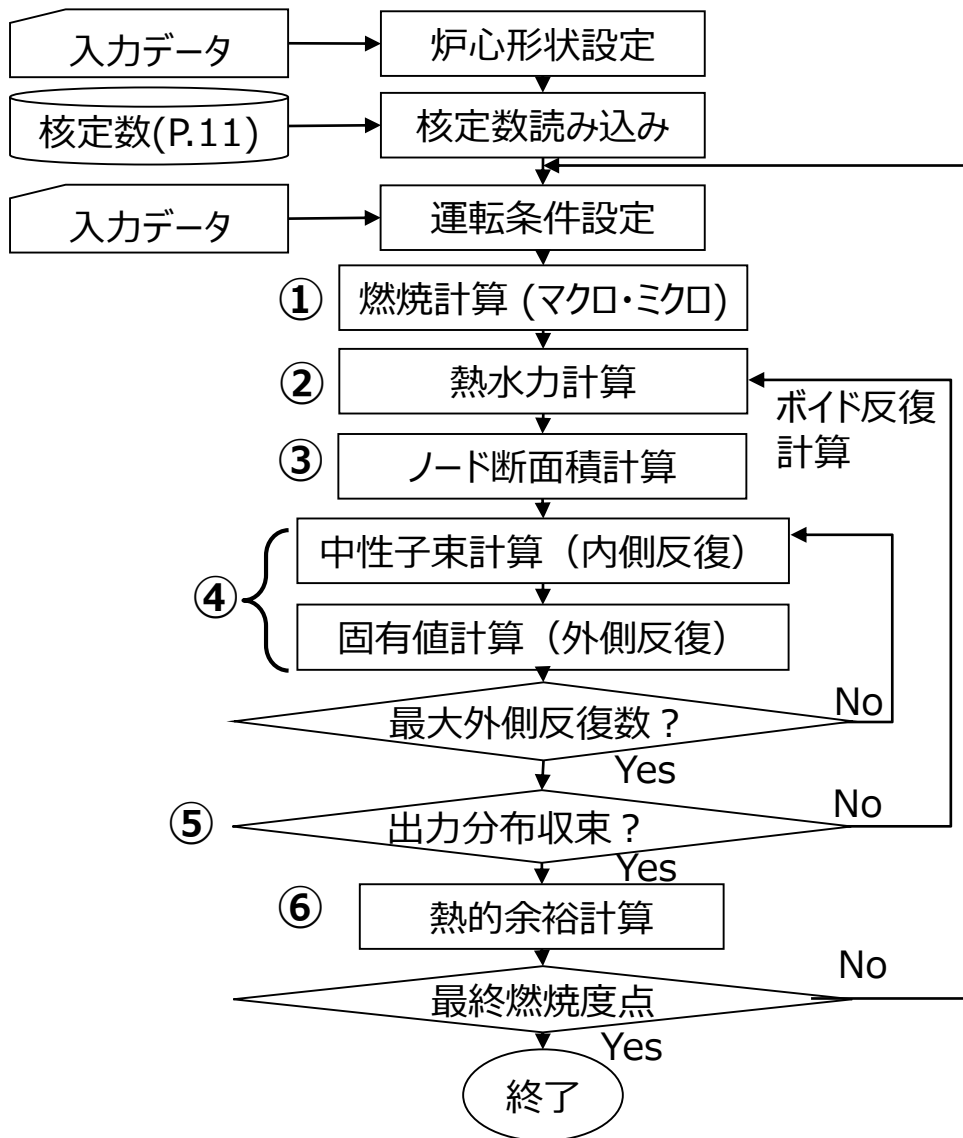
- 上記を解くにはノード*ごとの断面積が必要である。そのためにはノードごとの水密度（ボイド率）が必要であり、それを把握するための熱水力計算を行う必要があるが、熱水力計算を行うには前述の核計算から求まる炉心内の出力分布が必要となる。
- このように、核計算と熱水力計算は相互に影響を及ぼすため、核計算と熱水力計算を交互に反復し、計算結果が収束するまで計算する。

* ノード：計算において離散化された単位領域に対する呼称。AETNAでは燃料集合体を軸方向に24分割した約15cm立方の領域を1つのノードとしている。

3. AETNA解析モデル AETNAの計算フロー

➤ AETNAは炉心全体に対して、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、出力分布や熱的余裕などの各種炉心特性を評価する。

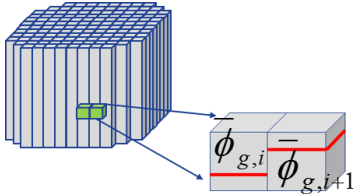
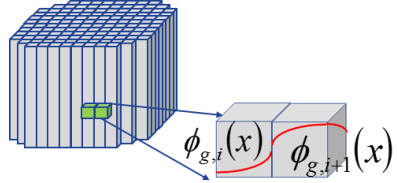
- ① マクロ燃焼で履歴データ(E/UHSPH)を計算する。(P.16) また、ミクロ燃焼で対象核種の原子数密度を計算する。
- ② チャンネル圧損による流量配分計算とドリフトフラックスモデルによるノード平均ボイド率計算を反復して行い、ノードごとの平均ボイド率(瞬時相対水密度U)を計算する。(P.17)
- ③ E, UHSPH, Uからノード断面積を計算するとともに、ドップラ効果・CBH効果・ミクロ燃焼効果を考慮して断面積を補正し、ノードごとの3群断面積を計算する。(P.18)
- ④ 中性子源分布を基に各群の中性子束分布を求め(内側反復)、中性子束分布を基に核分裂中性子源を更新し、出力分布と固有値(実効増倍率)を求める(外側反復)。(P.19)
- ⑤ ノード断面積は熱水力計算から得られるノードごとのボイド率の影響を受けるが、ボイド率は出力分布の影響を受ける。そのため、出力分布が収束するまで②～④を繰り返す。
- ⑥ 再構築モデルにより計算した燃料棒出力からMLHGRを計算するとともに、R因子を再評価しMCPRを計算する。(P.20)



3. AETNA解析モデル 従来コードとの比較

- 計算精度向上を目指し、中性子エネルギー群の多群化、ノード内の中性子束分布を考慮するためのノード法の採用等により誤差低減を図った。AETNAの解析モデルのうち、従来コードからの変更点を以下に示す。なお、熱水力計算の解析モデルは、実績のある従来コードで採用していたモデルを踏襲している。

従来コードとAETNAコードの解析モデルの比較（変更点）

	従来コード（PANACH）	AETNA
燃焼計算 (P.16)	E/UH（履歴相対水密度）	E/UHSPH（スペクトル履歴相対水密度）
中性子束計算 (P.19)	エネルギー修正1群 有限差分法 	エネルギー3群 解析的多項式ノード法 
熱的余裕計算 (P.20)	燃料集合体核特性計算で得られる燃料棒出力/R因子を用いる。	炉心計算において、ノード内中性子束、ノード内燃焼度分布を考慮して燃料棒出力/R因子を再構築し用いる。 燃料棒燃焼度についても再構築する。

3. AETNA解析モデル

(1) 燃焼計算

- ノード断面積計算に必要なノードごとの履歴データ（燃焼度および履歴相対水密度）を計算する。

燃焼度(E) [3.2.4.1]

燃焼終了時のノードの燃焼度は、前回燃焼度に対しノード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) [3.2.4.3]

断面積（核定数）を参照する指標として、従来コードでは瞬時相対水密度（U）から計算される履歴相対水密度(UH)を用いていたが、AETNAでは炉心体系でのスペクトルミスマッチの影響を考慮するため、核特性と直接関係するノード平均の中性子エネルギースペクトル指標（高速群と熱群の中性子束比； $\bar{\phi}_3/\bar{\phi}_1$ ）から計算されるスペクトル履歴相対水密度（UHSPH）を用いる。

AETNAで明示的に計算される $\bar{\phi}_3/\bar{\phi}_1$ を以下で瞬時相対水密度相当値 U_0 に変換し、従来コードで用いられてきたUからUHを計算する手法と同じ方法で、 U_0 からUHSPHを計算する。

なお、燃焼度、履歴相対水密度のいずれについても、従来コードはノード平均値を用いていたが、AETNAではノード内分布を考慮する。これにより、ノード法による中性子束のノード内分布に加え、断面積のノード内分布も熱的余裕計算に考慮できる [3.2.4.4]。

3. AETNA解析モデル

(2) 熱水力計算

- ノード断面積計算に必要なノードごとの平均ボイド率（瞬時相対水密度）を以下の反復計算で評価する。

計算手順

- 全インチャンネル流量（全燃料集合体のチャンネルボックス内側の冷却材（水ロッドを除く）流量の合計）とバイパス流量（チャンネルボックスの外側及び水ロッドの冷却材流量の合計）を炉心出力・炉心流量依存で計算する [3.2.5.1]。
- 全燃料集合体で圧力損失が等しくなるように、全インチャンネル流量を各燃料集合体のインチャンネル流量に配分する [3.2.5.6]。
- 出力分布から定まる燃料棒での発熱や構造材での発熱などを考慮したエネルギーの収支計算により冷却材に付与されるエンタルピを計算する [3.2.5.4]。

計算では、エネルギーのインチャンネル（除熱寄与分）からバイパス（除熱に寄与しない分）への伝熱も考慮するため、壁面熱伝達計算を行う [3.2.5.5]。

- ドリフトフラックスモデルに基づき燃料集合体のノードごとのボイド率を計算する [3.2.5.8]。

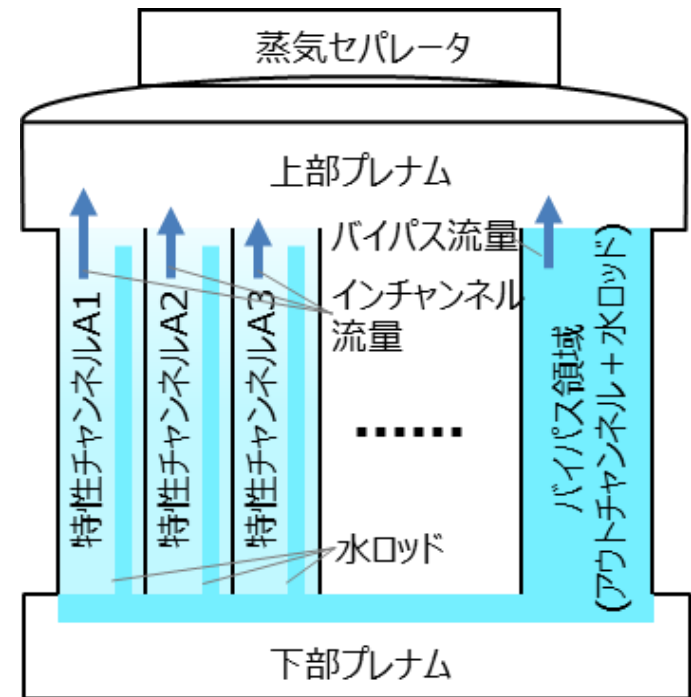
計算では、サブクール沸騰の影響も考慮する [3.2.5.8.2]。

- 摩擦・局所・加速・位置の各圧力損失計算から全圧損を計算する [3.2.5.3]。

運動量保存式を積分した結果得られる圧力損失に関する式を用いて、壁面との摩擦による摩擦圧損、スペーサなどの構造材による局所圧損、流路面積や密度変化による加速圧損、重力の影響による位置圧損をそれぞれ計算し、チャンネルごとの全圧損を評価する。

- インチャンネル流量および圧力損失が収束するまで a.～e. を繰り返す。

計算における冷却材流路の構成



※各燃料集合体のチャンネルボックスの外側（アウトチャンネル）と、各燃料集合体の水ロッドを全て合わせて1つの流路としてバイパス領域を設定する [3.2.5.1]。

3. AETNA解析モデル

(3) ノード断面積計算

- 中性子束分布計算に用いるノードの断面積を求める [3.2.3]。
- LANCR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、ノードの断面積 X は、燃焼度 E 、スペクトル履歴水密度 $UHSPH$ 、瞬時相対水密度 U 、減速材温度(冷温時)の関数としてフィッティングする [3.2.3.1]。



- ノード断面積は、以下のモデルにより反応度に与える影響を考慮した補正を行う。

キセノン毒作用モデル [3.2.3.3.1]

Xe-135数密度は出力密度履歴に大きく依存するため、実際出力密度履歴が燃料集合体計算と異なる効果をマイクロ燃焼モデルを用いて計算し、熱群の吸収断面積を補正する。

ドップラモデル [3.2.3.3.2]

燃料集合体計算でのベース温度と、炉心計算での燃料温度(燃料温度モデル)の差からドップラ反応度を計算し、共鳴群の吸収断面積を補正する。

CBH (制御棒履歴効果) 反応度モデル [3.2.3.3.3]

制御棒挿入状態での燃料集合体計算結果を基に、CBH効果が反応度に及ぼす影響を補正する。

3. AETNA解析モデル

(4) 中性子束計算（内側反復），固有値計算（外側反復）

- 中性子束分布を求めるためにエネルギー3群拡散方程式を反復計算で解く [3.2.1.1]。

$$\underbrace{\nabla \cdot J_g^i(x, y, z)}_{\text{(中性子の漏れ)}} + \underbrace{\Sigma_{rg}^i \phi_g^i(x, y, z)}_{\text{(中性子の吸収)}} = \underbrace{Q_g^i(x, y, z)}_{\text{(中性子の生成)}}$$

右辺 (Q_g^i) を条件に左辺 (J_g^i, ϕ_g^i) を計算：内側反復
 左辺 (J_g^i, ϕ_g^i) を条件に右辺 (Q_g^i) を計算：外側反復

ϕ_g^i : 第g群 中性子束

J_g^i : 第g群 中性子流

Σ_{rg}^i : 第g群 除去断面積

Q_g^i : 第g群 中性子源項

g=1,2,3はそれぞれ高速群, 共鳴群, 熱群

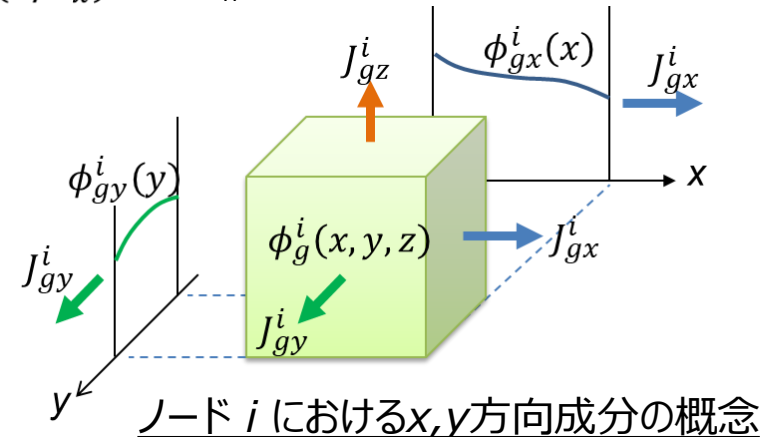
- 拡散近似 $J_{gx}^i = -D_g^i d\phi_{gx}^i(x)/dx$ (D_g^i : 拡散係数), ノード間の J_{gx}^i の連続条件に基づく方程式について数値解を求め, 各ノードの平均中性子束 $\bar{\phi}_g^i$ を算出する。

- ノード内の中性子束分布は, x,y,z方向に分解し以下で近似する [3.2.1.2]。

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

- ノード内の中性子束分布を基に内側反復計算における中性子流を補正し, 上記の計算を再度行う (非線形反復法) [3.2.1.3]。

- 以上の計算を結果が収束するまで繰り返し行い, 中性子束分布を得る。



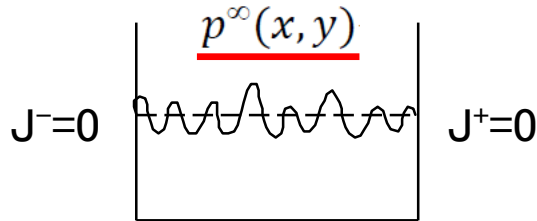
3. AETNA解析モデル

(5) 熱的余裕計算

- 出力分布の確定後、熱的制限値に対する余裕として、最小限界出力比 (MCPR) と最大線出力密度 (MLHGR) を計算する[3.2.6.1], [3.2.6.2]。
- これに必要となる各ノードの燃料棒出力は、隣接ノードの影響を考慮するため、燃料棒出力再構築計算により求める[3.2.2.1]。MCPRの計算は、従来コードと同じ沸騰遷移相関式に基づくCPR評価を用いるが、これに必要なR因子も再構築後燃料棒出力に基づき計算する。

燃料棒出力再構築モデル

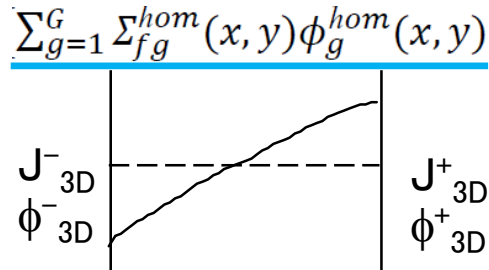
LANCR (詳細メッシュ) による無限格子体系 (反射境界条件) での非均質燃料棒出力分布



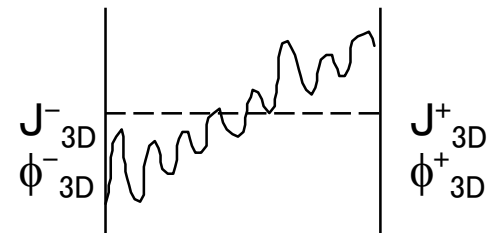
再構築された燃料棒出力分布

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

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)



合成



※ 燃料棒燃焼度についても、燃料集合体計算結果とノード内燃焼度分布から同様に再構築する[3.2.2.3]。

参考① モデル性能比較表の各モデルとの関係

(1) LANCR モデル性能比較表

➤ LANCRのモデル性能比較表に示す各モデルと本資料での関連ページを以下に示す（緑字）。

				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												
														6	9	8		10	11		12					
				無限増倍率	局所出力分布	ガドリニア価値	ボイド反応度	トップラ反応度	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 [3.1.1, 3.1.3.5.1]	エネルギー群構造 [3.1.1, 3.1.3.5.1]	実効断面積計算 [3.1.2.2]	詳細エネルギー スペクトル計算 [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 (チェーン・領域分割) [3.1.4]	燃焼スペクトル調整 [3.1.4.3]		
物理現象	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																						
		光子反応	中性子束分布																							
			ガンマ線反応断面積																							
			ガンマ線束分布																							
	熱・水力的現象	構造物	冷却材 化学組成変化	SLC																						
			その他	3次元効果	燃焼スペクトル																					
		熱	核分裂発熱																							
			ガンマ線発熱																							
			減速材, 構造材直接発熱																							
水力	冷却材密度分布	集合体内ボイド率分布																								
	冷却材物性変化	過熱蒸気の水密度変化																								
材料的現象	核反応	燃料組成 (時間変化)	中性子反応, 放射崩壊																							
		燃料組成 (分布)	Gd燃料棒																							
		制御棒組成	制御棒内の組成分布																							
	放射線	形状変化	チャンネルボックス曲がり																							

グレーハッチング箇所は島根3号炉非適用。

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。

参考① モデル性能比較表の各モデルとの関係

(2) AETNA モデル性能比較表 (核的現象)

➤ AETNAのモデル性能比較表に示す各モデルと本資料での関連ページを以下に示す (緑字)。

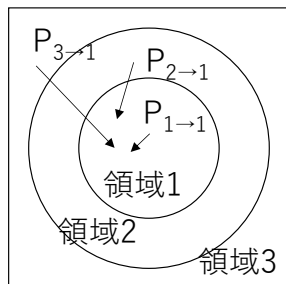
		重要度ランキング (PIRT)										モデル性能比較表 (“-”: 関連しない, “○”: 関連する, “N/A”: モデル無)																						
		通常運転時					過渡時					核計算					熱水力計算					その他												
		核的制限値					熱的制限値			安定性		熱的制限値		19					20					18										
		余裕度	炉停止余裕	最大制御棒価値	反応度係数	スクラム反応度	スクラム反応度	ほう酸水注入系停止機能	熱機械 (MLHGR)	設計出力履歴 (燃焼度)	焼損 (MCPR)	未臨界度	表面熱流束	焼損 (MCPR)	最高ランク	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]	燃焼履歴モデル [3.2.4]	マイクロ燃焼モデル [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]	パイロ熱伝達 [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										H																					
		(2) 遅発中性子割合*	スクラム反応度										H																					
		(3) 3次元出力分布 (定常)											H																					
		(4) 3次元高次モード分布 (定常)											H																					
		(5) 3次元出力分布(過渡)	スクラム反応度										H																					
		(6) 局所出力分布 *	燃料棒出力再構築, R因子										H																					
		(7) 局所燃焼度分布	設計出力履歴										【履歴】	H																				
	フィードバック	(8) 制御棒価値 *											H																					
		(9) ボイド反応度 *											【履歴含む】	H																				
		(10) ドップラ反応度 *											H																					
		(11) ほう酸価値 *											H																					
		(12) 減速材温度 *											M																					
		(13) 燃料減損 *											【履歴】	H																				
		(15) 核分裂生成物反応度	毒物効果, 長期停止効果										【履歴】	M																				
		(17) スクラム時 制御棒価値	スクラム反応度										H																					
		(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)										M																					
		構成体起因	(20) 制御棒履歴	CBH効果 (片燃え)										【履歴】	M																			
	(21) 多種類制御棒												M																					
	(22) 制御棒減損												【履歴】	M																				
	(25) 水ロッド形状		断面効果はLANCR, 隣接燃料効果はBDF因子										M																					
	計装		(27) 炉内計装管応答	TIP/LPRM学習 (プロセス計算機編)										H																				

グレーハッチング箇所は島根3号炉非適用。

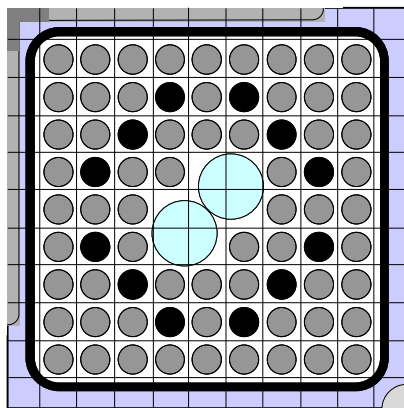
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

参考② 衝突確率法

- 中性子輸送計算の解法の一つ。
- 計算の対象とする範囲（体系）を領域に分割し，ある領域で発生した中性子が着目する領域で衝突する確率（衝突確率）を用いることで中性子束を求める方法である。
- 衝突確率法のイメージを以下の図に示す。図は燃料棒体系の例であり，燃料ペレット（領域1），被覆管（領域2），減速材（領域3）からなる。



領域1の中性子束は，領域1～3で発生した中性子が領域1まで移動し領域1で衝突する確率 $P_{i(i=1\sim3)\rightarrow 1}$ と各領域の中性子源から求める。

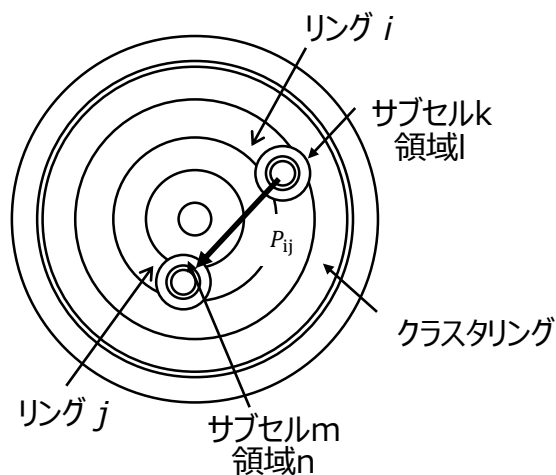


衝突確率法の課題は，領域の数が増えるほど，中性子が発生及び衝突する領域の組み合わせが膨大に増えるため，計算コストが多大となることである。

参考③ 円筒クラスタモデルでの衝突確率法

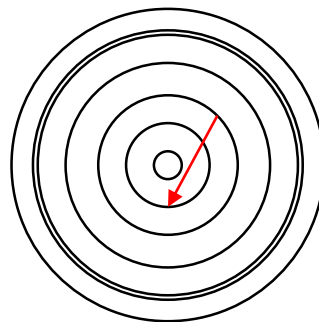
- ▶ LANCERの詳細エネルギー群スペクトル計算では、燃料集合体を円筒クラスタにモデル化する。
- ▶ 円筒クラスタモデルでの各領域の衝突確率は、燃料棒をモデル化したサブセルでの衝突確率と、リング状に配置される燃料棒や周囲の減速材を均質化したクラスタリング（以降、「リング」という。）での衝突確率の組み合わせにより計算する。
 - ▶ サブセル内で発生しサブセル境界に到達する中性子は、サブセル内の衝突確率計算で取り扱う。
 - ▶ リング間を移動する中性子は、通過する各リング間での衝突確率計算で取り扱う。
 - ▶ リングに到達した中性子は、リングに配置されたサブセルに均等に割り振る。
 - ▶ サブセル境界に到達した中性子は、サブセル内の衝突確率計算で取り扱う。
- ▶ 下のリング構成を例に、山本の方法による衝突確率の計算プロセスのイメージを①～④に示す。

リング構成例



山本の方法による衝突確率の計算プロセス

①サブセルkの領域で発生した中性子がサブセル境界に到達する確率



②サブセル境界に到達した中性子がリング内側境界から別のリングjに移動する確率

③リングjに到達した中性子がリングj内のサブセルの境界に到達（サブセルタイプによる区別はされず、リング状に配置されたサブセルの本数で配分）

④サブセル境界に到達した中性子がサブセルm内の領域nで衝突する確率

①～④を掛け合わせて衝突確率を計算する。

参考④ エネルギー縮約，空間縮約

- LANCR/AETNAでは，計算の各段階において取り扱うエネルギー群数が異なるが，これは，計算の対象とする範囲（体系）の領域分けの度合いの違いにより，計算コストの観点で取り扱うことができるエネルギー群数に制約ができるためである。
- 詳細なエネルギー群の多群断面積から少ないエネルギー群の多群断面積を作成する際は，一般的に反応率を保存するために，以下の式により各エネルギー群の中性子束を重みとして平均化する（エネルギー縮約）。

$$\sigma^g = \frac{\sum_{h \in g} \sigma^h \phi^h}{\sum_{h \in g} \phi^h}$$

- また，炉心計算では，燃料棒単位の詳細な領域分けで計算することは，計算コストの観点で現実的ではないため，燃料集合体単位に均質化する（空間縮約）。この均質化も中性子束を重みとして行われる。（上式のエネルギー群識別子 g が空間領域識別子 i となる）

参考⑤ マクロ燃焼モデルとミクロ燃焼モデル

- 燃料内では、核分裂反応や中性子の吸収、核種自身の壊変により核種組成が変化していくため、ノード断面積が変化する。
- そのため、多くの炉心解析コードでは以下の方法を用いる。
 - ① 燃料集合体核特性計算において、燃焼計算において燃焼方程式を解くことで、核種ごとの原子数密度を把握し、これを組成条件として燃焼度点ごとのノード断面積を核定数として保存する。
 - ② 炉心計算では、燃料集合体核特性計算にて核定数として保存したノード断面積を参照して核計算に使用する。ノード断面積を参照するにあたっては、ノードごとの燃焼度等の履歴データが必要であるため、燃焼計算によりこれらを求める。この際には、厳密な核種ごとの原子数密度を把握する燃焼方程式を解くことは行っていない。(マクロ燃焼モデル)
 - * 反応度への影響が大きく、出力密度に依存するキセノン135の影響は考慮される。
- AETNAでは、上記同様のマクロ燃焼モデルによりノード断面積を計算するとともに、ノードごとに代表核種の燃焼方程式を解くことにより、それらの原子数密度を把握し、これと核定数として保存された核種ごとのミクロ断面積を用いてノード断面積を補正することが可能である。(ミクロ燃焼モデル)
- AETNAのミクロ燃焼モデルでは、以下の核種についてノードごと・核種ごとに考慮できる。

キセノン135, プロメシウム147(Pm-147)～サマリウム149(Sm-149)系列,
サマリウム152(Sm-152)～ガドリニウム155(Gd-155), ロジウム105(Rh-105),
プルトニウム239(Pu-239)～プルトニウム241(Pu-241)～アメリシウム241(Am-241)