

核設計手法報告書

(技術報告)

2000年5月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

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

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

核設計手法報告書 (技術報告)

高下 浩文^{*1}、樋口 真史^{*2}
富樫 信仁^{*2}、林 達也^{*2}

要 旨

FBR 炉心解析技術について、関連部署への周知及び技術の伝承のために、設計評価 Gr.において用いられている核設計手法についてまとめた。特に当 Gr.で実施してきた 127 本バンドル「もんじゅ」高度化炉心の概念設計に対して用いられている核設計手法を中心に示した。示した項目は実効断面積の作成、2 次元燃焼計算、3 次元拡散計算、反応度係数計算、制御棒価値計算における計算方法である。本報告書で示される手法は、現時点での当 Gr. の標準的な核設計手法である。しかし、今後、評価精度の向上を目指して、計算コードの高度化・整備、「もんじゅ」性能試験データ等を用いた設計評価における補正・不確かさの低減、核データ更新等を実施していく予定であり、それに伴い、核設計手法も見直される可能性があるが、情報の共有化の観点から現時点での当 Gr. の標準的な核設計手法をまとめることとした。

*1 東海事業所 プルトニウム燃料センター 製造加工部 設計評価 Gr

*2 原子力システム（株）

Report on Neutronic Design Calculational Methods

(Technical Report)

Hirofumi Takashita^{*1}, Masashi Higuchi^{*2}
Nobuhito Togashi^{*2}, Tatsuya Hayashi^{*2}

Abstract

This report describes the neutronic design calculational methods used in Fuel Design and Evaluation Group in order to inform other related sections of FBR core analysis technology and hand down the technology. Especially we show the neutronics calculation procedures used for the conceptual design study of the advanced core with 127 pin bundle for MONJU that has been carried out in our group. The topics include effective cross section preparation calculations, two-dimensional depletion calculations, three-dimensional diffusion calculations, reactivity coefficient calculations, and control rod worth calculations. The calculational methods shown in this report are the standard neutronics calculation methods employed in our group at the moment. However, the improvement of calculation codes, the reduction of correction factors and uncertainties for design using the nuclear data obtained in the start-up test for MONJU and so on, and the update of nuclear data file will be planned in order to improve evaluation accuracies. Those may change the neutronic design calculational methods, but we decided to describe the present standard calculational methods in our group from the viewpoint of sharing information in JNC.

*1 Fuel Design and Evaluation Group, Plutonium Fuel Fabrication Division, Plutonium Fuel Center, Tokai Works

*2 Nuclear Energy System Incorporated

目次

第1章 はじめに	1
第2章 実効断面積の作成	11
2.1 原子数密度、炉心形状	11
2.2 断面積作成のフロー	11
2.3 70群実効断面積の作成	12
2.4 70群中性子束の計算	13
2.5 7群断面積の作成	17
2.6 ミクロ断面積ファイルの作成	18
第3章 2次元燃焼計算	46
3.1 発熱エネルギー	46
3.2 計算体系	48
3.3 Pu富化度サーベイ方法	48
3.4 2次元燃焼特性	50
3.4.1 燃焼欠損反応度	50
3.4.2 取出平均燃焼度	50
3.4.3 出力分担率	51
3.4.4 増殖比	51
3.4.5 最大高速中性子束	52
3.4.6 最大高速中性子照射量	53
第4章 3次元拡散計算	58
4.1 原子数密度	58
4.2 制御棒の基準挿入位置設定方法	58
4.3 粗調整棒挿入パターン	60
4.4 最大線出力	60

4.5	集合体出力履歴	61
4.6	軸方向出力分布	62
4.7	出力ピーフィング係数	63
4.8	最大高速中性子束	64
4.9	最大高速中性子照射量	64
4.10	軸方向高速中性子束分布	64
4.11	ピン最大燃焼度	65
第5章 反応度係数		71
5.1	設計計算手法の概要	71
5.2	「PERKY」コードによる摂動計算	71
5.3	縮約実効断面積の作成（18群実効断面積）	72
5.4	ナトリウムボイド反応度	73
5.5	動特性パラメータ	75
5.6	ドップラー係数	76
5.7	密度係数	77
5.8	形状係数	78
5.9	膨張反応度係数	79
5.10	等温温度係数	84
5.11	出力係数	84
5.12	出力補償反応度	85
第6章 制御棒価値計算		90
6.1	制御棒挿入条件	90
6.2	制御棒価値の3次元拡散基準計算	90
6.3	メッシュ補正	91
6.4	群数補正	92
6.5	非均質補正	93
6.6	輸送補正	94

6. 7 余裕反応度	96
第7章 おわりに	100
第8章 参考文献	101
付録－A 原子個数密度の算出	102
付録－B 燃料2重非均質効果	158
付録－C RZ体系のモデリング手法の違いが核特性解析結果に与える影響	169

表目次

表1－1 炉心主要仕様	4
表1－2 炉心燃料集合体の主要仕様	7
表2.1－1 断面積作成時の温度条件例	21
表2.3－1 SLAROMのマクロ断面積計算選択オプション	23
表2.3－2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ	24
表2.3－3 制御棒断面積作成時の「SLAROM」入力データ	29
表2.3－4 核種対応表	31
表2.4－1 2次元RZ体系における各層の外半径	32
表2.4－2 「JOINT」－「CITATION-FBR」 2次元RZ入力データ	34
表2.5－1 JFS-3-J3.2エネルギー群構造及び核分裂スペクトル	36
表2.5－2 70群スペクトルをPDSファイルに変換するデータ	38
表2.5－3 70群→7群へ縮約するデータ	39
表2.6－1 計算機入力データ用の核分裂当たりの放出エネルギー	42
表2.6－2 JOINTコードの入力データ	43
表3.1－1 CITATION計算において平成6年度以前に使用していた 核分裂当たりの放出エネルギー	54
表3.1－2 核分裂当たりの放出エネルギー	55
表4.4－1 最大線出力の算出例	68
表4.5－1 集合体出力履歴の算出方法	69
表5.1－1 高度化炉心の反応度係数算出時における温度条件例	87
表5.1－2 現行高燃焼度炉心の反応度係数算出時における温度条件例	88
表6.7－1 反応度バランス表	99

付録－A

表1.1 現行もんじゅ炉心の体積比結果	139
表1.2 もんじゅ高度化炉心の体積比計算結果	142

表2. 1	組成計算に使用する原子量	145
表2. 2	SUS304、SUS316、PNC1520 鋼の組成及び密度	146
表2. 3	N a の密度	147
表2. 4	現行もんじゅ炉心の原子数密度計算結果	148
表2. 5	もんじゅ高度化炉心の原子数密度計算結果	152
表3. 1	もんじゅ高度化炉心の制御棒リングモデルの原子数密度計算結果	157

付録－B

表2. 1	非均質効果算出用断面積の入力データ	161
表2. 2	各セルモデルが考慮する効果と非均質効果の算出方法	167
表2. 3	もんじゅ高度化炉心の非均質効果	168

付録－C

表1. 1－1	核分裂当たりの放出エネルギー	172
表1. 1－2	2次元R Z体系のモデリングの違いが核特性に与える影響	173
表1. 2－1	2次元R Z体系に於いて炉心部の軸方向領域分割数の違いが 核特性に与える影響	174

図目次

図 1 - 1 炉心構成図	9
図 1 - 2 核設計計算のフロー図	10
図 2. 2 - 1 実効断面積作成フロー	22
図 2. 4 - 1 2次元R Z炉心計算体系（実効断面積作成用）	33
図 3. 2 - 1 2次元R Z炉心計算体系（制御棒領域密閉）	56
図 3. 2 - 2 2次元R Z炉心計算体系（制御棒領域貫通）	57
図 4. 2 - 1 3次元解析時の微調整棒の基準位置	66
図 4. 2 - 2 3次元解析時の粗調整棒の基準位置	67
図 4. 5 - 1 出力履歴算出例	70
図 5. 1 - 1 反応度係数計算のフロー図	89
図 6. 5 - 1 非均質補正係数計算手法	98

付録－A

図 3. 1 制御棒寸法・形状	155
図 3. 2 制御棒リングモデルの形状	156

付録－B

図 2. 1 ピンセルモデルと非均質効果の算出方法	166
---------------------------	-----

付録－C

図 1. 2 - 1 炉心軸方向領域分割数と燃焼欠損反応度の関係	175
----------------------------------	-----

第1章 はじめに

設計評価 Gr.において、127本バンドル「もんじゅ」高度化炉心の概念設計が実施してきた。本報告書でそこで用いられている核設計手法についてまとめる。ここで示される手法は、現時点での当 Gr. の標準的な核設計手法である。しかし、今後、評価精度の向上を目指して、計算コードの高度化・整備、「もんじゅ」性能試験データ等を用いた設計評価における補正・不確かさの低減、核データ更新等を実施していく予定であり、それに伴い、核設計手法も見直される可能性がある。ここでは当 Gr. の現時点での核設計手法を「もんじゅ」高度化炉心を対象として示す。

まず、簡単に「もんじゅ」高度化炉心の概要を示す。「もんじゅ」高度化炉心は、高速炉の実用化に向けた現行「もんじゅ」炉心の高性能化と経済性の向上を目指して設計された。表 1-1 に「もんじゅ」高度化炉心の炉心主要仕様を、表 1-2 に炉心燃料集合体の主要仕様を現行「もんじゅ」炉心と比較して示す。また、炉心構成図を図 1-1 に示す。

原子炉熱出力、1 次冷却系温度条件は現行炉心と同じであるが、運転サイクル長さを 186 日に延長することにより、稼働率は現行高燃焼度炉心の 71% から 75% に上げられている。

炉心外径は現行炉心と同じであるが、炉心中央に照射試験が可能なように照射燃料領域を持つ。照射試験燃料は 6 体装荷される。照射試験燃料の炉心への核・熱的影響を吸収するため、炉中心の粗調整棒を固定吸収体に置き換え、照射試験燃料の燃料体積量に応じて固定吸収体量を調整する仕様としている。

径プランケットはプルトニウム需給バランスの調整の観点から削除され、径プランケット置換反射体に置き換えられている。炉心高さは線出力低減による熱的裕度の確保、運転サイクル延長等の観点から現行炉心より 100mm 増加されている。一方、軸プランケットは上部を削除、下部を 96mm に短縮することにより、燃料要素全長の短縮による流動抵抗の低減、冷却材ボイド反応度の抑制、燃料部材コストの低減が図られている。

燃料交換バッチ数は内側炉心 5 バッチ、外側炉心（第 8 列）6 バッチ、外側炉心

(第9列) 7 バッチであり、この変則バッチの採用により高速中性子照射量が平坦化され、現有の被覆管材料で取出平均燃焼度 10 万 MWd/t が可能となる。

炉心燃料ペレットは、高密度の太径中空 MOX ペレットであり、被覆管には改良オーステナイト鋼（PNC1520 鋼）を用いる。太径燃料要素の採用により、燃料集合体は 127 本バンドル構造となる。

以上の特徴を有する「もんじゅ」高度化炉心を対象として、核特性評価を実施する際に用いた設計手法を次章以下に詳しく示す。ここでは核設計手法の概要を簡単に示す。なお、本報告書の目的は設計評価 Gr. の核設計手法を示すことであり、その手法で評価された「もんじゅ」高度化炉心の核特性については、今後発行される「もんじゅ」127 本バンドル炉心概念設計報告書に示されているので、本報告書では示さない。

図 1-2 に核設計計算の全体フローを示す。核定数ライブラリーは現時点で最新の JFS-3-J3.2 である。JFS-3-J3.2 より SLAROM コードを用いて 70 群実効断面積を作成し、JOINT コードを用いて少数群実効断面積を作成する。輸送断面積についてはカレント重みの輸送断面積を使用する。エネルギー群数は、拡散・燃焼計算では 7 群、各種反応度係数計算では 18 群である。但し、Na ポイド反応度の計算に関しては、必要に応じて 70 群で行う。

各領域毎に 70 群の実効断面積を計算するために SLAROM コードを使用する際、計算用体系として制御棒領域以外では均質セル体系を採用し、制御棒領域においては非均質セル体系とする。

炉心計算は燃料のピン非均質効果を考慮しない均質組成モデルで行う。2 次元燃焼計算は拡散計算コード PENCIL または CITATION で行う。2 次元燃焼計算において制御棒領域はナトリウムフォロワーとして扱う。2 次元燃焼計算により燃焼欠損反応度、燃焼度等の燃焼特性を評価する。

制御棒の挿入効果を取り入れた核特性は 3 次元拡散計算コード MOSES により評価する。「もんじゅ」高度化炉心核設計においては、燃焼計算は 2 次元 RZ 体系で行い、2 次元燃焼計算で得られた燃焼組成を層毎に取り出し、3 次元拡散計算に使用している。MOSES コードには燃焼計算機能があるので、燃焼計算を MOSES

コードで行うことも可能である。但し、3次元燃焼計算は2次元燃焼計算に比較して多くの計算時間要する。

核設計の基準計算は拡散計算コードで行うので、輸送補正が必要な場合は、輸送計算コードを用いて実施する。輸送計算コードは3次元輸送計算ではTRITACコード、2次元輸送計算ではTWOTRAN-IIコードを使用する。

各種反応度係数計算は2次元RZ拡散計算に基づき行う。CITATIONコードによる2次元燃焼計算で得られた平衡初期、末期の組成とCITATION-FBRコードを使用した2次元拡散計算による中性子束及び随伴中性子束を用いて、PERKYコードにより摂動計算にて各種反応度係数を求める。等温温度係数、出力係数などは各種反応度係数をもとにPOST処理プログラムのFBRDBコードを用いて算出する。

表1-1 炉心主要仕様 (1/3)

項目	もんじゅ 現行設計炉心 (高燃焼度炉心)	もんじゅ 高度化炉心 基本仕様
1. 基本プラント仕様		
1) 出力		
原子炉熱出力 (MWt)	714	714
2) 1次冷却系温度条件		
原子炉入口温度 (°C)	397	397
原子炉出口温度 (°C)	529	529
冷却材流量 (kg/h)	1.536×10^7	1.536×10^7
3) プラント運転		
稼動率 (%)	71	75
燃焼期間 (EFPD/サイクル)	148	186
2. 炉心		
1) 炉心型式	径方向ブランケット付 均質炉心	径方向ブランケット無 均質炉心
2) 炉心Pu富化度領域数	2	2
3. 炉心構成		
1) 炉心構成要素数		
炉心燃料集合体 (体)	198	192
内側炉心燃料集合体 (体)	108	102
外側炉心燃料集合体 (体)	90	90
照射試験用燃料集合体 (体)	—	6
径方向ブランケット燃料集合体 (体)	174	—
制御棒集合体 (体)	19	18
粗調整棒集合体 (体)	10	9
微調整棒集合体 (体)	3	3
後備炉停止棒集合体 (体)	6	6
炉中心固定吸収体 (体)	—	1
置換中性子反射体 (体)	—	174
中性子しゃへい体 (体)	316	316
サーベイランス集合体 (体)	12	12
炉心装荷用 (体)	8	8
炉内ラック装荷用 (体)	4	4

表1-1 炉心主要仕様 (2/3)

項目	もんじゅ 現行設計炉心 (高燃焼度炉心)	もんじゅ 高度化炉心 基本仕様
2) 炉心寸法		
炉心高さ	(mm)	930
等価直径	(mm)	1790
容積	(m ³)	2.34
3) ブランケット厚さ		
軸方向上部	(mm)	300
軸方向下部	(mm)	350
4) しゃへい体厚さ		
軸方向上部	(mm)	103
軸方向下部	(mm)	265
径方向 (等価厚さ)	(mm)	423
5) 炉心構成要素配列		
集合体配列ピッチ	(mm)	115.6
集合体高さ	(mm)	4200
6) 組成体積比		
(燃料又は吸収体／空隙／構造材／冷却材)		
炉心燃料集合体	(%)	33.4/2.0/24.7/39.9
照射試験用燃料集合体		33.8/6.0/22.8/37.4
D型 (燃料体積最小)	(%)	—
再装荷型 (燃料体積最大)	(%)	2.2/0.0/32.6/65.2
径方向ブランケット燃料集合体	(%)	23.5/0.0/25.5/51.0
制御棒集合体		—
粗調整棒集合体	(%)	44.8/1.7/19.8/33.7
微調整棒集合体	(%)	19.2/2.3/29.3/49.2
後備炉停止棒集合体	(%)	19.2/2.3/28.5/50.0
後備炉停止棒集合体	(%)	26.0/2.6/22.1/49.2
7) 実効燃料体積比		
炉心燃料集合体	(%)	26.0/2.6/21.3/50.0
		32.1
		28.4

表1-1 炉心主要仕様 (3/3)

項目	もんじゅ 現行設計炉心 (高燃焼度炉心)	もんじゅ 高度化炉心 基本仕様
4. 燃料		
1) 燃料ペレット材料	ウラン・プルトニウム 混合酸化物	ウラン・プルトニウム 混合酸化物
2) Pu富化度 (Pu+Am/U+Pu+Am)		
内側炉心 (wt%)	23.0	24.1
外側炉心 (wt%)	29.9	29.1
3) プルトニウム同位体組成比 (wt%) (Pu-238/239/240/241/242/Am-241)	0/58/24/14/4/0	3/52/27/9.5/7/1.5
4) ウラン濃縮度 (wt%)	0.2	0.3
5) 燃料ペレット密度 (%TD)	85	95
5. 燃料交換		
1) 炉心燃料交換方式		
内側炉心	5バッチ分散方式	5バッチ分散方式
外側炉心 (第8列)	5バッチ分散方式	6バッチ分散方式
外側炉心 (第9列)	5バッチ分散方式	7バッチ分散方式
2) ブランケット燃料交換方式	5バッチ分散方式	—
3) 炉心燃料集合体取出燃焼度 (MWd/t)		
照射試験燃料を装荷しない場合	約82,000	約100,000
再装荷型試験燃料6体装荷の場合	—	約101,000
D型試験燃料6体装荷の場合	—	約102,000
6. 炉心構成要素計画寿命		
1) 炉心燃料集合体		
内側炉心燃料集合体 (サイクル)	5	5
外側炉心燃料集合体 (サイクル)	5	6、7
2) 照射試験用燃料集合体 (サイクル)	—	5
3) 径方向ブランケット燃料集合体 (サイクル)	5	—
4) 制御棒集合体		
粗調整棒集合体 (サイクル)	1	1
微調整棒集合体 (サイクル)	1	1
後備炉停止棒集合体 (サイクル)	1	1
5) 炉中心固定吸収体 (サイクル)	—	1
6) 置換中性子反射体 (サイクル)	—	10

表1-2 炉心燃料集合体の主要仕様 (1/2)

項目	もんじゅ 現行設計炉心 (高燃焼度炉心)	もんじゅ 高度化炉心 基本仕様	
1. 燃料要素			
1) 炉心燃料ペレット			
材質	(U,Pu)O ₂	(U,Pu)O ₂	
外径	(mm)	5.4	6.64
内径	(mm)	—	2.2
高さ	(mm)	約8	約10
密度	(%TD)	85	95
2) 軸方向ブランケット燃料ペレット			
材質	UO ₂	UO ₂	
外径	(mm)	5.4	6.64
高さ	(mm)	約10	約12
密度	(%TD)	93	93
3) 燃料被覆管			
材質	PNC316	PNC1520	
外径	(mm)	6.5	7.8
内径	(mm)	5.56	6.8
肉厚	(mm)	0.47	0.5
4) スペーサワイヤ			
材質	PNC316	PNC1520	
外径	(mm)	1.32	1.30
5) 燃料要素			
全長 (端栓部含む)	(mm)	2813	2400
炉心燃料部長さ	(mm)	930	1030
軸方向ブランケット長さ	(mm)	300/350	12/96
端栓部長さ (上部／下部)	(mm)	25/48	25/48
ガスプレナム部長さ	(mm)	1161	1189
ワイヤ巻き付けピッチ	(mm)	307	200
ペレット一被覆管ギャップ	(mm)	0.16	0.16

表1-2 炉心燃料集合体の主要仕様 (2/2)

項目	もんじゅ 現行設計炉心 (高燃焼度炉心)	もんじゅ 高度化炉心 基本仕様
2. 燃料集合体		
1) 燃料集合体		
形状	正6角形断面	正6角形断面
燃料要素配列	正3角形配列	正3角形配列
燃料要素配列ピッチ	(mm) 7.87	9.15
燃料要素数	169	127
集合体全長	(mm) 4200	4200
集合体総重量	(kg) 約182	約172
核物質重量合計	(kg) 約59	約47
炉心燃料ペレット	(kg) 約34	約42
軸方向ブランケットペレット	(kg) 約26	約5
構造材重量合計	(kg) 約123	約125
2) ラッパ管		
材質	PNC316	PNC1520
外対面間距離	(mm) 110.6	111.0
内対面間距離	(mm) 104.6	105.6
肉厚	(mm) 3.0	2.7
パッド部外対面寸法		
中間パッド	(mm) 114.6	114.6
上部パッド	(mm) 114.9	114.9
下部パッド	(mm) 114.9	114.9

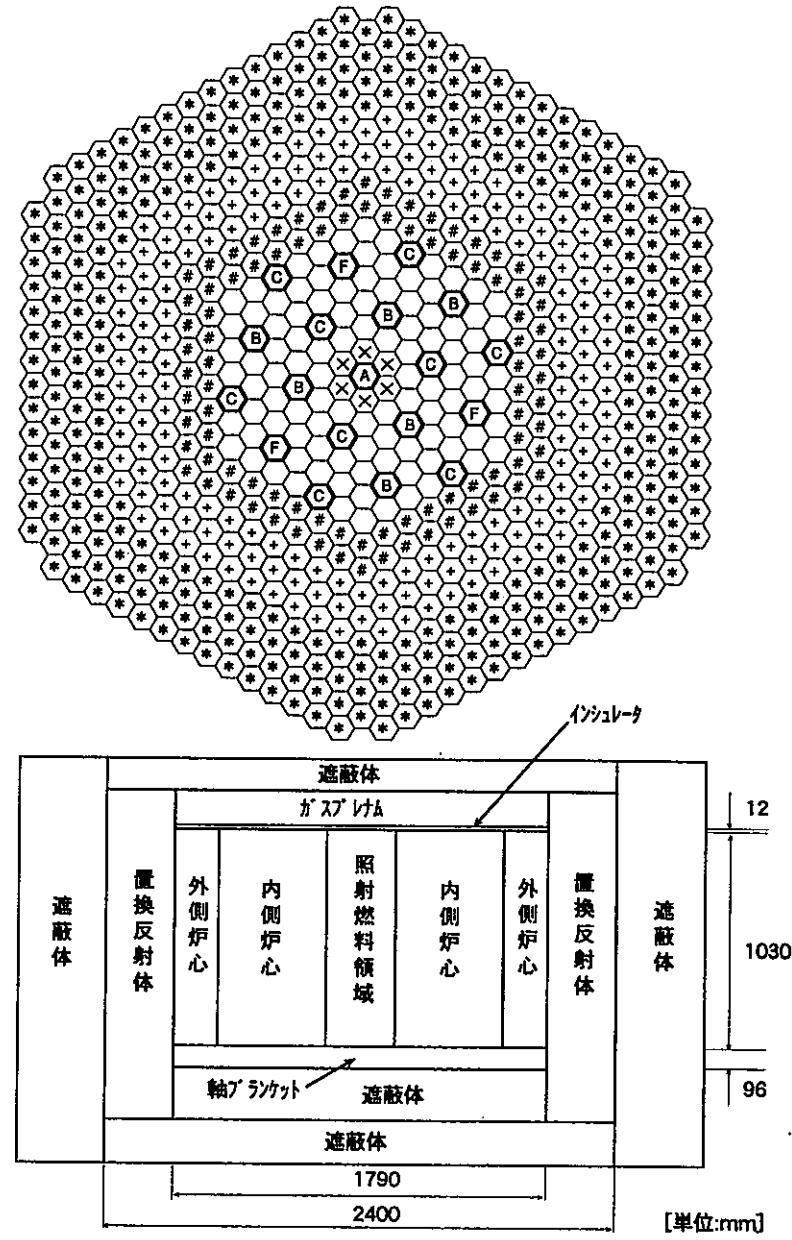
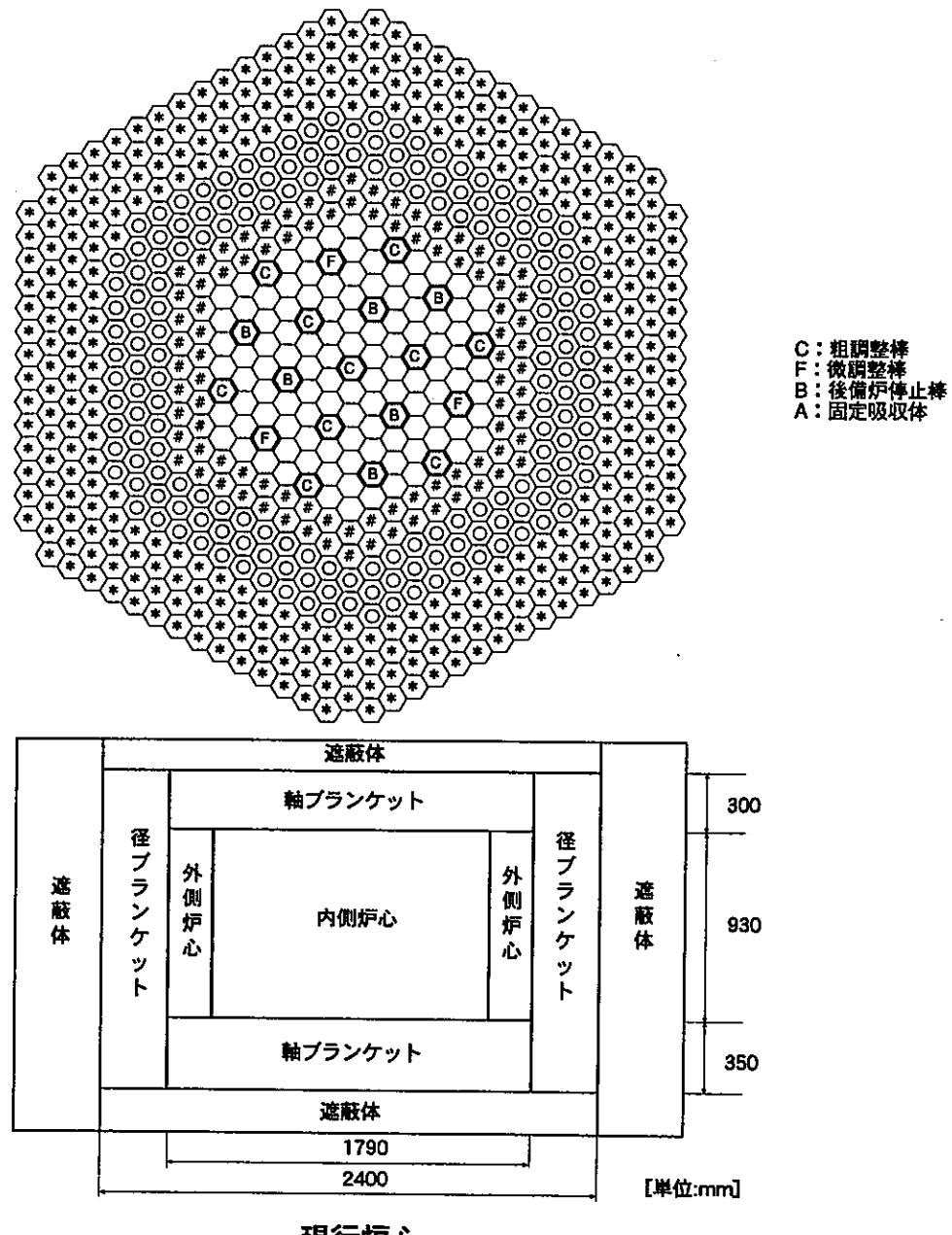


図1-1 炉心構成図

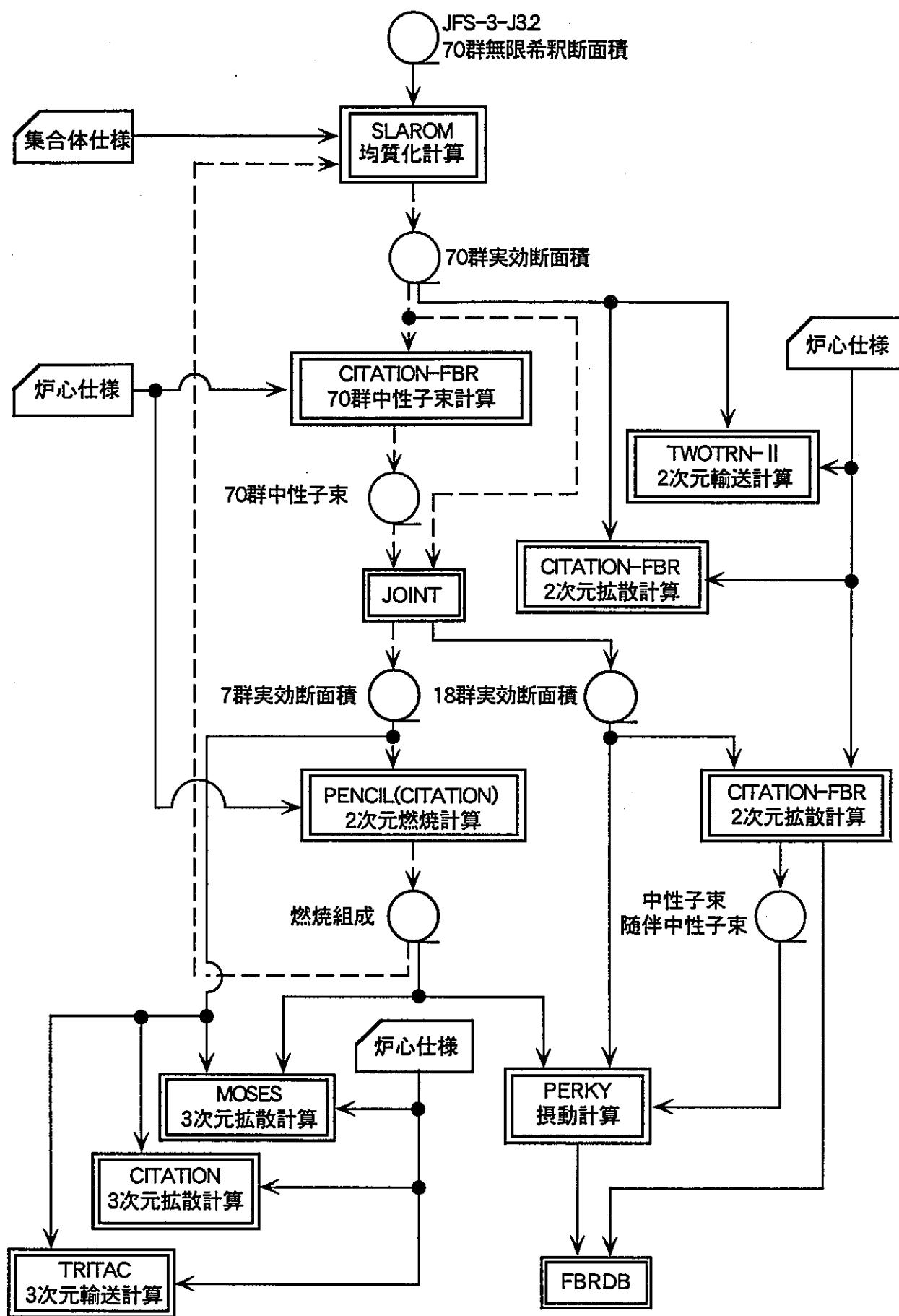


図1-2 核設計計算のフロー図

第2章 実効断面積の作成^[1]

2.1 原子数密度、炉心形状

原子数密度は 20°C の形状に対して計算する。但し、冷却材は表 2.1-1 に示した温度に対する密度を基に計算する。冷却材 (Na) の密度の温度依存式は次式^[2]を用いる。

$$\rho_{\text{Na}} = 0.950075 - 2.29760 \times 10^{-4} T - 1.46049 \times 10^{-8} T^2 + 5.63787 \times 10^{-12} T^3$$

但し、 ρ_{Na} : Na 密度 (g/cm³) , T : 温度 (°C)

燃料のピン非均質効果は考慮しない均質組成モデルを採用する。炉心構成要素の原子数密度及びその算出方法の詳細を付録 A に示す。

原子炉の形状についても 20°C の状態に対して設定する。一方、断面積はその温度依存性を平均的に考慮するために、炉心出力 100% 時の平衡サイクル初期及び末期における燃料温度の平均値を使用する。（冷却材温度についても同様である。）表 2.1-1 に燃料温度を示す。

「もんじゅ」高度化炉心の 2 次元 RZ 体系へのモデル化は炉心の各列毎に体積保存の考え方で円環化した。このとき制御棒チャンネルは燃料領域と分離し、制御棒の体積を保存するように円環化した^[1]。炉心形状のモデル化については、2.4 節で詳しく述べる。

2.2 断面積作成のフロー

炉心構成要素の原子数密度を用いて実効ミクロ断面積を作成する。（原子数密度の基本的な算出方法については付録 A を参照。）

断面積の作成フローを図 2.2-1 に示す。核定数ライブラリ「JFS-3-J3.2」の 70 群無限希釈断面積と集合体仕様（原子数密度等）を基に均質化コード「SLAROM」により、炉心構成要素毎の 70 群実効断面積を作成する。次に、この 70 群断面積をインターフェイスプログラム「JOINT」コードにより拡散計算コード「CITATION-FBR」の入力データに変換し、「CITATION-FBR」コードで 70 群

中性子束分布を計算する。更に、この 70 群中性子束を重みとして 70 群実効断面積を「JOINT」コードにより 18 群実効断面積もしくは 7 群実効断面積に縮約する。

2.3 70 群実効断面積の作成

均質化した集合体組成、温度等のデータを用いて、「SLAROM」コードにより 70 群実効断面積の作成を行う。この断面積について、基本的には反応率を保存するようにフラックス重みで作成したものを使用するが、輸送断面積に関しては、中性子の平均自由行程を保存するようにカレント重みで作成したものを使用する。従って、拡散係数についてもカレント重みの輸送断面積による拡散係数を使用する。

ここで、「SLAROM」コードは作成したミクロ断面積、マクロ断面積およびマクロ輸送断面積より求められる拡散係数を各領域毎に PDS ファイル形式で出力する。しかし、マクロ断面積および拡散係数については SLAROM の 入力オプションの選択により出力される項目内容が異なっており、マクロ輸送断面積および拡散係数についてはカレント重みで作成したものが出力される場合とフラックス重みで作成したものが出力される場合があるので注意が必要である。「SLAROM」コードにおける計算方法および結果出力のオプションの指定方法を表 2.3-1 に示す。

燃焼計算用ミクロ断面積の作成に当たって「SLAROM」コードで 70 群実効断面積を作成する際、入力データとして用いる炉心領域の原子数密度は平衡サイクル初期のものとし、各領域の温度条件は平衡サイクル初期と末期の平均値としている。この原子数密度は、高速炉の場合、中性子スペクトルが硬く運転サイクル時期によるミクロ断面積の変化は少ないが、格子計算で断面積を作成する際も平衡サイクルに近い状態の方がよいとの観点から代表値として使用することとした。

また、反応度係数計算は平衡初期、末期のそれぞれに対して実施することから、反応度係数計算用に平衡初期、末期の原子数密度と領域温度を使用して各々に対する 70 群実効断面積を作成する。

尚、これらの平衡組成は 2 次元燃焼計算を行うことで得られる。ここで、当 Gr.においては「PENCIL」コードで燃焼計算を行い、得られた平衡組成を「SLAROM」コードの入力データに変換するため、後処理プログラムの「CITPOST」を使用し

てしている。また、断面積作成時に使用する各領域の温度条件については 2.1 節で記載した通りである。

(a) 燃料、ブランケット、しゃへい体部の入力データ

集合体組成、温度等により「SLAROM」コードの入力データを作成する。均質化計算の場合、PREP モジュールの入力データのみ必要となる。非均質計算の場合、PREP、PATH、PIJF、EDIT モジュールのデータが必要となる。均質計算時の入力データを表 2.3-2 に示す。(非均質計算については臨界補正の燃料 2 重非均質効果に関する付録 B を参照)

各断面積は、PDS ファイル上にメンバー名付きで出力される。

(b) 制御棒の入力データ

制御棒集合体は、非均質性が強いため、各制御棒を吸収体と構造材および冷却材に分けて同心円上のリング形状とし、その外周に通常燃料を巻き付けてモデル計算を行い、制御棒領域の断面積を作成する。制御棒リングモデルの形状は付録 A 図 3.2 に示されている。「SLAROM」コードの入力データとして PREP、PATH、PIJF、EDIT モジュールのデータが必要となる。入力データを表 2.3-3 に示す。

(c) 使用核種

現在、当 Gr. で使用している核種は Pu238～Pu242、U235、U236、U238、Am241、Am242m、Am243、Np237、Cm242～Cm245、B10、B11、C、O、Na、Fe、Cr、Ni、Mo、Mn、W、FP (U235)、FP (U238)、FP (Pu239)、FP (Pu241) の計 31 核種である。これらの核種に対応する「SLAROM」コードおよび「CITATION」コードの核種番号を表 2.3-4 に示す。

2.4 70 群中性子束の計算

70 群実効断面積を少数群実効断面積へ縮約する際に必要となる 70 群中性子束を「JOINT」-「CITATION-FBR」で計算する。ここで、断面積縮約用の中性子束計算に於いては、詳細設計等で特別に細かい領域毎に断面積を与えて核特性解析を実施する場合を除き、計算時間および容量の観点から計算時の炉心形状は 2 次元 RZ

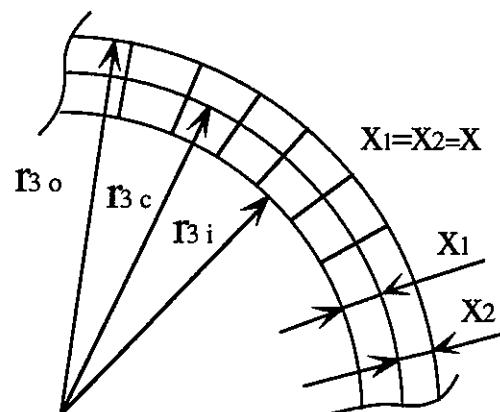
体系とする。2次元 RZ 体系の径方向 (R 方向) の各領域の境界は、集合体を水平断面で見て、各層に配置された集合体分の面積と等価な円を考え、これをもとに決定する。

以下に「もんじゅ」高度化炉心のモデル化の考え方について示す。

(a) 径方向境界

- ① 第 0 層（炉心中心）固定吸収体については、集合体 1 体分の面積（集合体ピッチ (P) : 115.6mm、面積 (V_s) : $1.15730_{0924} \times 10^2$ (cm²)) と等面積の円の半径 (r_0) を用いる。
- ② 第 1 層～第 4 層については、第 0～第 n 層までの集合体数 N_n を求め、 $N_n \cdot V_s$ と等面積の円となる半径 (r_n) を用いる。ここで、制御棒は集合体 1 体分として扱う。
- ③ 第 3 層の制御棒については、以下のとおりとする。
 - イ) 第 3 層の制御棒は、実際の炉心配置で各々の制御棒の中心を通る半径 (r_{3c}) を求める。
 - ロ) 制御棒 6 体分の面積と等しく、以下の条件を満たす円環を求める。その時の外半径 (r_{3o}) と内半径 (r_{3i}) を第 3 層の制御棒領域として用いる。

$$r_{3c} = \frac{r_{3o} + r_{3i}}{2}$$



- ハ) 従って、もんじゅ高度化炉心の場合、第 3 層の制御棒領域は以下の通りとなる。

$$\mathbf{r}_{3c} = \sqrt{7} \cdot \mathbf{P} = 3.05848_8 \times 10^1 \quad (\text{cm})$$

となり、

$$6 \cdot V_s = \pi(r_{3o}^2 - r_{3c}^2)$$

$$\mathbf{r}_{3o} = \mathbf{r}_{3c} + \mathbf{x}$$

$$\mathbf{r}_{3i} = \mathbf{r}_{3c} - \mathbf{x}$$

より、

$$x = 3 \cdot V_s / (2 \cdot r_{3c} \pi) = 1.80667 \quad (\text{cm})$$

$$r_{3o} = 3.23916 \times 10^1 \quad (\text{cm})$$

$$r_{3i} = 2.87782 \times 10^1 \quad (\text{cm})$$

となる。

④ 第5層および第6層については、以下の通りとする。

- イ) 第0～第5層までの集合体数 N_5 を求め、そこから第5層の制御棒6体分を除いた集合体数 $N_5 - 6$ で、②に準じた計算を行う。
- ロ) 第5層および第6層の制御棒は、第5層と第6層の燃料集合体の間で1層の制御棒領域として取り扱う。従って、この制御棒領域の集合体数は12体となり、集合体数を $N_5 + 6$ として②に準じた計算を行う。
- ハ) 第6層は②に準じた計算を行う。
- 二) 以上より、もんじゅ高度化炉心の第5、6層の制御棒を1つの円環にしたときの内半径 (r_{56i}) と外半径 (r_{56o}) は以下の通りとなる。

$$N_5 = 91$$

イ) より、

$$(N_5 - 6) \cdot V_s = \pi \cdot r_{56i}^2$$

$$r_{56i} = 5.59574 \times 10^1 \quad (\text{cm})$$

ロ) より、

$$(N_5 + 6) \cdot V_s = \pi \cdot r_{56o}^2$$

$$r_{56o} = 5.97770 \times 10^1 \quad (\text{cm})$$

となる。

⑤ 第 7 層～第 11 層については、②に準じた計算を行う。ただし、第 11 層の
径プランケット置換反射体については、各頂点の 6 体をしゃへい体として取
扱い、 N_{11} の中には含めない。

⑥ 径方向しゃへい体の領域幅は 40cm とする。

⑦ 各層の外半径

「もんじゅ」高度化炉心における 2 次元 RZ 体系の各層の外半径を表 2.4-
1 に示す。

(b) 2 次元 RZ 体系の入力データ

「もんじゅ」高度化炉心に対する「JOINT」-「CITATION-FBR」の 2 次元
RZ 体系の入力データを作成する。

軸方向しゃへい体の高さは 40cm、上部プレナムの高さは 60cm とする。

メッシュ数は、1 メッシュあたりの幅が 5cm 程度となるように設定する。「も
んじゅ」高度化炉心の集合体ピッチは、「もんじゅ」炉心と同様、11.56cm で
あり、メッシュ幅を 5cm とすると 1 ピッチ約 2 メッシュとなる。従って、径方
向 (R 方向) は上記 (a) で示したとおり領域分割が 16 分割となり、総メッシ
ュ数が 42 メッシュとなる。一方、軸方向 (Z 方向) について上・下部遮へい体
およびガスプレナムは核特性評価に与える影響が少ないとからメッシュ幅を
10cm とし、軸方向プランケットについては基本的にメッシュ幅を 5cm 程度と
し、断面積縮約時のエネルギースペクトルの影響を考慮して縮約領域（その領
域の平均のスペクトルを用いて同一の少数群実効断面積を作成する領域）を 2
領域に分割している。ただし、インシュレータは領域高さが 5cm 以下であるこ
とから 1 分割とする。さらに、炉心部についてはメッシュ幅を 5cm 程度とし、
後に実施する燃焼計算時の燃焼領域を考慮して見かけ上は軸方向を 5 分割にし
ている。これにより、入力データの軸方向領域分割数は 12 分割となり、メッシ
ュ数は 43 メッシュとなる。

縮約領域について、内側炉心は 1 領域とするが、エネルギースペクトルの影響を考慮して外側炉心は 2 領域、径プランケット置換反射体は 3 領域、下部軸プランケットは 2 領域に分けた。通常上部軸プランケットについても 2 領域に分割するが、高度化炉心のインシュレータは領域高さが殆ど無いため 1 領域とした。図 2.4-1 に 2 次元 RZ 体系図を示す。

上記考え方を基に、制御棒全引抜として作成した 70 群中性子束計算用の入力データを表 2.4-2 に示す。

なお、調整棒や後備炉停止棒等の制御棒を縮約する場合の 70 群中性子束は、上記の体系の炉中心に対象とする制御棒を全挿入して求めている。ただし、D 型特殊燃料装荷時の高度化炉心の場合、内側炉心第 1 層に燃料体積比の少ない集合体を装荷しているため、炉中心に制御棒を挿入すると制御棒の中性子スペクトルが柔らかくなり、反応度に対する制御棒価値を過大評価してしまう。従って、内側第 1 層を D 型特殊燃料とせずに内側炉心燃料として計算する必要がある。

ここで、上述した炉心部の軸方向分割数について、高度化炉心検討後に燃焼計算時の軸方向燃焼領域分割数と燃焼欠損反応度の関係からもんじゅクラスの炉心において、この軸方向分割数を 6 以上としている。詳細は第 3 章に記す。

2.5 7 群断面積の作成

70 群中性子スペクトル分布と 70 群実効断面積を用いて、7 群の実効断面積を作成する。70 群から 7 群へ縮約するエネルギー群構造を表 2.5-1 に示す。特に σ_{tr} については、以下に示す方法で 7 群への縮約を行っている。

(a) σ_{tr} の縮約の方法

拡散係数 D の縮約は、中性子束を重み関数として次式で行っている。

$$\mathbf{D}_G = \sum_{g \rightarrow G} \mathbf{D}_g \phi_g / \sum_{g \rightarrow G} \phi_g$$

\mathbf{D}_G : G 群（少数群）の D

\mathbf{D}_g : g 群（多数群）の D

ϕ_g : 領域平均スペクトル

縮約後、マクロ断面積とミクロ断面積を用いて炉心計算を行った場合、同じ結果を得るためにには、ミクロの輸送断面積 σ_{tr} は、 D_G を再現するように縮約しなくてはならない。このため、 σ_{tr} は、次式を用いて縮約することとしている。

$$\sigma_{tr,G}^n = \sum_{g \rightarrow G} \sigma_{tr,g}^n D_g \phi_g / \sum_{g \rightarrow G} D_g \phi_g$$

$\sigma_{tr,G}^n$: G 群（少数群）の σ_{tr}^n (n : 核種)

$\sigma_{tr,g}^n$: g 群（少数群）の σ_{tr}^n (n : 核種)

(b) 7 群縮約入力データ

7 群断面積を作成する手順を以下に示す。

①70 群スペクトルの PDS ファイル作成

「JOINT」コードを用いて 70 群スペクトルの PDS ファイルを作成する。入力データを表 2.5-2 に示す。

②7 群断面積の作成

「JOINT」コードで①の PDS ファイルを用いて、7 群断面積を作成する。入力データを表 2.5-3 に示す。

上記の手順で縮約された 7 群断面積は、PDS ファイル化されている。

2.6 ミクロ断面積ファイルの作成

「MOSES」コードを用いた 3 次元拡散計算、または「PENCIL」、「CITATION」を用いた 2 次元燃焼計算を行う場合、ミクロ断面積ライブラリが必要となる。しかし、これらの計算においては PDS ファイル化されたミクロ断面積を使用できない。

また、一般に外部中性子源が存在しない中性子拡散方程式の解を $\phi(r)$ とすると、 $c \phi(r)$ (c : const.) も解となるので、拡散方程式だけでは中性子束の絶対値（絶対中性子束）は決まらない。そこで、絶対中性子束を決めるために規格化定数 c を決定する条件を課す。通常それは原子炉出力であり、各部の発熱量の合計が原子炉出力と等しくなる条件を課す。この各部の発熱量を計算するためには、核発熱データが必要となる。

以上のことから、「JOINT」コードを用いて PDS ファイル化された断面積を核

発熱データの情報を含めたミクロ断面積ファイルに変換する必要がある。

ただし、「MOSES」コードは「CITATION」コードと異なり、計算オプションで核発熱の計算方法を変更できるため、上述のミクロ断面積ファイルに含められた核発熱データを必要としない場合もある。

(a) 核発熱データの取扱い方

① ミクロ断面積ファイルに含める核発熱データ

核発熱データの取扱い方について、絶対中性子束を求めるための核発熱データとしては、大きく以下の2つに分類できる。

- (i) 核分裂で発生するエネルギー ($\sigma_f \phi$ に比例)
- (ii) 中性子捕獲で発生するエネルギー ($\sigma_c \phi$ に比例)

しかし、「CITATION」コードは核発熱データを1種類しか取り扱わない。従って、ミクロ断面積ファイルに含める核発熱データは、表 2.6-1 に示すとおり (i) のエネルギーに核分裂反応に対する (ii) の割合を考慮するための補正係数を乗じて求めたものとしている。

② 「MOSES」コードで扱う核発熱データ

「MOSES」コードは上記の「CITATION」コードと同様の計算も行えるが、上記の2つの核発熱データを入力して等価発生エネルギーを算出することもできる。

さらに、後処理プログラムを用いて以下の3つの発熱データを考慮した断面積をミクロ断面積ファイルに含めた場合、その断面積を用いてより詳細な発熱を模擬することができる。

- (i) 核分裂で発生するエネルギー ($\sigma_f \phi$ に比例)
- (ii) 中性子捕獲で発生するエネルギー ($\sigma_c \phi$ に比例)
- (iii) 高速中性子が減速する際のエネルギー ($\sigma_s \phi$ に比例)

(b) 7群ミクロ断面積作成用入力データ

「JOINT」コードを用いて 7 群ミクロ断面積を作成する。入力データを表 2.6-2 に示す。計算時に使用する原子量は、付録 A の組成計算で算出した値を用いる。

表2.1-1 断面積作成時の温度条件例

単位 (°C)

	領域名	現行炉心			高度化炉心		
		基準計算用 (平均値)	反応度係数計算用		基準計算用 (平均値)	反応度係数計算用	
			平衡初期	平衡末期		平衡初期	平衡末期
領域温度	内側炉心	1097.5	1,098.0	1,097.0	1136.6	1,143.4	1,129.7
	外側炉心	1002	1,017.0	987.0	1025.1	1,032.2	1,018.0
	径プラ	496	489.0	503.0	—	—	—
	軸プラ	552	547.0	557.0	492.2	480.1	504.2
	炉心上部プレナム	400	400.0	400.0	400	400.0	400.0
	径プラ上部プレナム	400	400.0	400.0	—	—	—
	その他	400	400.0	400.0	400	400.0	400.0
冷却材温度 (個数密度計算用)	内側炉心	472.5	474.0	471.0	478.1	480.0	476.1
	外側炉心	465.5	468.0	463.0	466.6	468.0	465.2
	径プラ	436	434.0	438.0	—	—	—
	軸プラ	464.5	465.0	464.0	462.7	462.3	463.0
	炉心上部プレナム	400	400.0	400.0	400	400.0	400.0
	径プラ上部プレナム	400	400.0	400.0	—	—	—
	その他	400	400.0	400.0	400	400.0	400.0

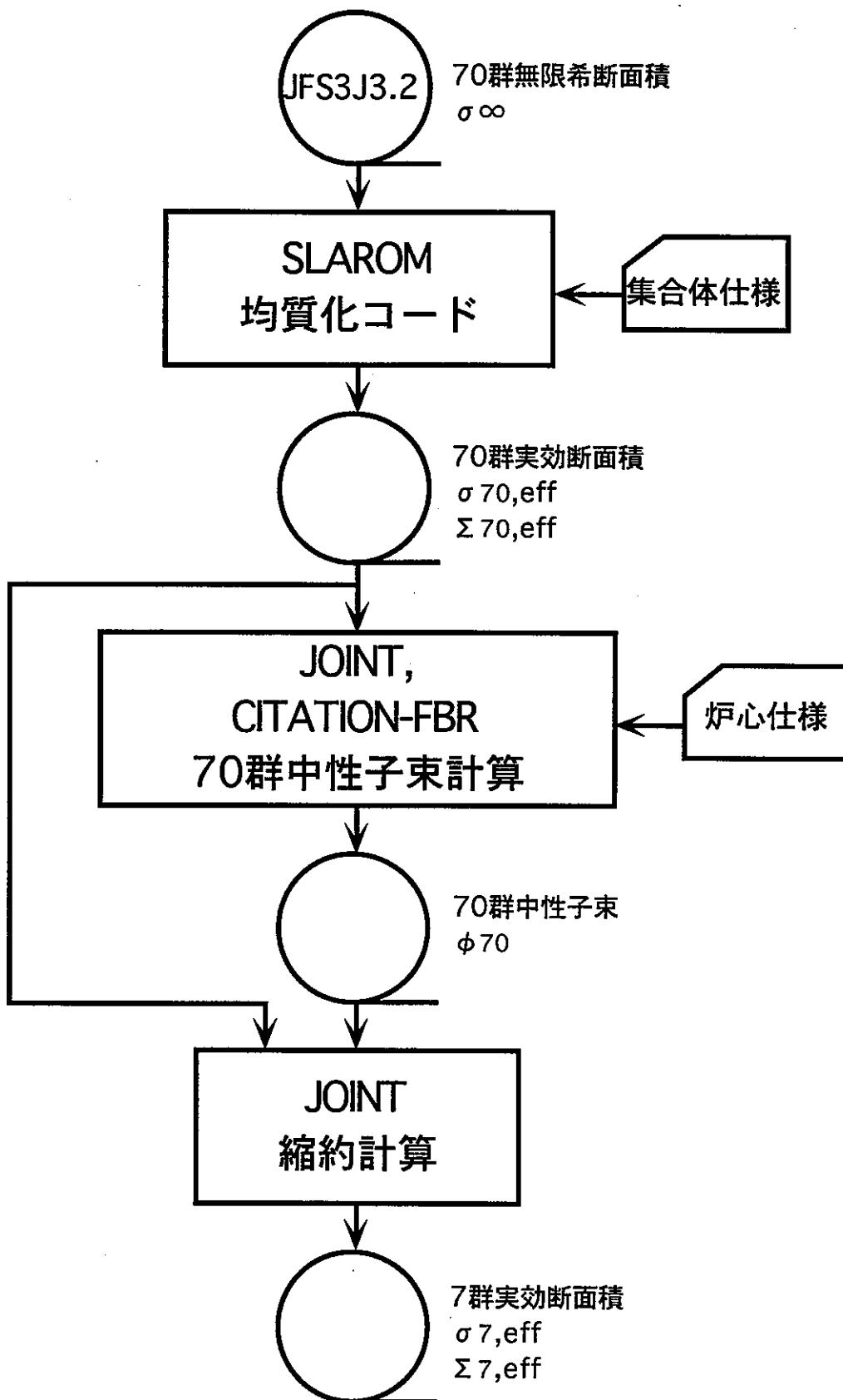


図2.2-1 実効断面積作成フロー

表2.3-1 SLAROMのマクロ断面積計算選択オプション

ICASE	IBSW	マクロ断面積出力項				
		D _{ave}	D _{para}	D _{perp}	Σ _{tr}	Σ _t
1	1 or 2	D _{ave} (ϕ)	D _{para} (ϕ)	D _{perp} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _t (ϕ)
	0	D _{ave} (ϕ)	D _{para} (ϕ)	D _{perp} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _t (ϕ)
	-1	D _{ave} (▼)	D _{para} (▼)	D _{perp} (▼)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _t (ϕ)
0	1 or 2	D _{ave} (ϕ)	D _{para} (ϕ)	D _{perp} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)
	0	D _{ave} (ϕ)	D _{para} (ϕ)	D _{perp} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _{tr} (ϕ)
	-1	D _{ave} (▼)	D _{para} (▼)	D _{perp} (▼)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _t (ϕ)
-1	1 or 2	D _{ave} (▼)	D _{para} (▼)	D _{perp} (▼)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _{tr} (▼) *
	0	D _{ave} (▼)	D _{para} (▼)	D _{perp} (▼)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _{tr} (▼) *
	-1	D _{ave} (▼)	D _{para} (▼)	D _{perp} (▼)	Σ _{tr} (ϕ)	Σ _t (ϕ)

- ・▼はカレント重み、ϕはフラックス重みを意味している
- ・太枠のオプションを指定し、2STEP計算を行うことで非均質断面積を作成できる。
- ・*印はSLAROMで衝突確率を算出する際に使用したものである。

表 2.3-2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ (1/5)

PREP

INNER - CORE

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 1409.6 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 5.70014E-05 949 9.83880E-04 940 5.08729E-04 941 1.78253E-04
 942 1.30800E-04 925 1.82278E-05 926 0.00000E+00 928 5.98120E-03
 951 0.00000E+00 950 2.81451E-05 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.55359E-02 11 8.19222E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

ICORE

PREP

OUTER - CORE

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 1298.1 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 6.91444E-05 949 1.19348E-03 940 6.17104E-04 941 2.16226E-04
 942 1.58665E-04 925 1.70520E-05 926 0.00000E+00 928 5.59535E-03
 951 0.00000E+00 950 0.00000E+00 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.55653E-02 11 8.21919E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

OCORE

PREP

INSULATOR (CORE)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 765.2 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 0.00000E+00 949 0.00000E+00 940 0.00000E+00 941 0.00000E+00
 942 0.00000E+00 925 2.62286E-05 926 0.00000E+00 928 8.60653E-03
 951 0.00000E+00 950 0.00000E+00 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.73518E-02 11 8.22974E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

INSCOR

表 2.3-2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ (2/5)

PREP

AXIAL - BLANKET (LOWER)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 765.2 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 0.00000E+00 949 0.00000E+00 940 0.00000E+00 941 0.00000E+00
 942 0.00000E+00 925 2.62286E-05 926 0.00000E+00 928 8.60653E-03
 951 0.00000E+00 950 0.00000E+00 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.73518E-02 11 8.22974E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

AXBLK

PREP

IRRADIATION - CORE (TYPE:D)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 1298.1 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 3.99008E-06 949 6.88715E-05 940 3.56110E-05 941 1.24776E-05
 942 9.15600E-06 925 1.27595E-06 926 0.00000E+00 928 4.18684E-04
 951 0.00000E+00 950 0.00000E+00 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.08751E-03 11 1.42963E-02 26 1.71504E-02 24 4.54829E-03
 28 5.37271E-03 42 4.10836E-04 25 5.02218E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

IRCORE

PREP

INSULATOR (IRRADIATION TYPE:D)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
 765.2 0.0 0.0
 28
 1.0
 948 0.00000E+00 949 0.00000E+00 940 0.00000E+00 941 0.00000E+00
 942 0.00000E+00 925 1.66960E-06 926 0.00000E+00 928 5.47855E-04
 951 0.00000E+00 950 0.00000E+00 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.10454E-03 11 1.43618E-02 26 1.71504E-02 24 4.54829E-03
 28 5.37271E-03 42 4.10836E-04 25 5.02218E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

INSIR

表 2.3-2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ (3/5)

PREP

NA - FOLLOWER

1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	70
673.0	0.0	0.0										
7												
1.0												
11	2.06473E-02		26	4.17804E-03		24	1.10802E-03		28	1.30886E-03		
42	1.00084E-04		25	1.22346E-04		74	0.00000E+00					

NAFOL

PREP

UPPER - PLENUM (CORE)

1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	70
673.0	0.0	0.0										
7												
1.0												
11	8.37505E-03		26	1.20029E-02		24	3.18318E-03		28	3.76016E-03		
42	2.87528E-04		25	3.51484E-04		74	0.00000E+00					

PLECOR

PREP

UPPER - PLENUM (IRRADIATION TYPE:D)

1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	70
673.0	0.0	0.0										
7												
1.0												
11	1.46154E-03		26	1.71504E-02		24	4.54829E-03		28	5.37271E-03		
42	4.10835E-04		25	5.02218E-04		74	0.00000E+00					

PLEIR

PREP

UPPER - SHIELD (CORE)

1	1	-1	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	70
673.0	0.0	0.0										
7												
1.0												
11	8.37505E-03		26	1.20029E-02		24	3.18318E-03		28	3.76016E-03		
42	2.87528E-04		25	3.51484E-04		74	0.00000E+00					

UPSHIC

表 2.3-2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ (4/5)

PREP

UPPER - SHIELD (IRRADIATION TYPE:D)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70

673.0 0.0 0.0

7

1.0

11 1.46154E-03 26 1.71504E-02 24 4.54829E-03 28 5.37271E-03

42 4.10835E-04 25 5.02218E-04 74 0.00000E+00

UPSHII

PREP

LOWER - SHIELD (CORE)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70

673.0 0.0 0.0

7

1.0

11 8.09168E-03 26 3.59172E-02 24 1.00431E-02 28 7.06576E-03

42 8.00442E-04 25 9.50529E-04 74 0.00000E+00

LWSHIC

PREP

LOWER - SHIELD (IRRADIATION TYPE:D)

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70

673.0 0.0 0.0

7

1.0

11 8.09168E-03 26 3.59172E-02 24 1.00431E-02 28 7.06576E-03

42 8.00442E-04 25 9.50529E-04 74 0.00000E+00

LWSHII

PREP

RADIAL - REFLECTOR

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70

673.0 0.0 0.0

7

1.0

11 6.34809E-03 26 3.77369E-02 24 1.00078E-02 28 1.18219E-02

42 9.03982E-04 25 1.10506E-03 74 0.00000E+00

REFLE

表 2.3-2 均質化断面積作成時の「SLAROM」入力データ (5/5)

PREP

RADIAL - SHIELD

1 1 -1 1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70

673.0 0.0 0.0

7

1.0

11 5.02191E-03 26 4.59545E-02 24 1.33748E-02 28 6.18204E-03

42 1.20994E-04 25 1.32492E-03 74 0.00000E+00

RDSHI

表 2.3-3 制御棒断面積作成時の「SLAROM」入力データ (1/2)

PREP

CCR (RING CASE)

7 0 -1 1 1 0 3 -20 0 0 0 0 70 /
 673.0 1.30 0.0 /
 3 7 3 7 3 7 28 /
 0.61000 0.90332 0.61336 1.07180 0.63498 2.23597 9.98877 /
 105 4.30810E-02 115 6.12848E-02 6 2.60914E-02 /
 11 6.26261E-03 26 3.53525E-02 24 9.88520E-03 28 6.95468E-03
 42 7.87857E-04 25 9.35585E-04 74 0.00000E+00 /
 105 4.30810E-02 115 6.12848E-02 6 2.60914E-02 /
 11 1.02048E-02 26 2.67309E-02 24 7.47445E-03 28 5.25861E-03
 42 5.95719E-04 25 7.07420E-04 74 0.00000E+00 /
 105 4.30810E-02 115 6.12848E-02 6 2.60914E-02 /
 11 1.51940E-02 26 1.74543E-02 24 4.88053E-03 28 3.43367E-03
 42 3.88982E-04 25 4.61918E-04 74 0.00000E+00 /
 948 5.70014E-05 949 9.83880E-04 940 5.08729E-04 941 1.78253E-04
 942 1.30800E-04 925 1.82278E-05 926 0.00000E+00 928 5.98120E-03
 951 0.00000E+00 950 2.81451E-05 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.55359E-02 11 8.19222E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

PATH

CCR

70 7 2 1 0 0 0 /
 3 12 12 0 12 0 0 0 0 0 6 1 0 0 2 0 /
 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7 7 7 7 /
 0.00000 0.61000 1.51332 2.12668 3.19848 3.83346 6.06943
 7.73423 9.39902 11.06382 12.72861 14.39341 16.05820 /

PIJF

37 0 5 3 1 0 0 0 /
 2 100 1.E-4 1.E-5 0.01 1.4 /
 0 /

EDIT

2 2 1 1 0 /
 1 6 1 6 /

CCRCYL

表 2.3-3 制御棒断面積作成時の「SLAROM」入力データ (2/2)

PREP

BCR (RING CASE)

7 0 -1 1 1 0 3 -20 0 0 0 0 70 /
 673.0 1.30 0.0 /
 3 7 3 7 3 7 28 /
 0.71000 0.69453 0.83094 0.85038 0.86024 2.12334 9.98877 /
 105 9.45776E-02 115 9.55757E-03 6 2.60338E-02 /
 11 9.38089E-03 26 2.48935E-02 24 6.96065E-03 28 4.89713E-03
 42 5.54769E-04 25 6.58792E-04 74 0.00000E+00 /
 105 9.45776E-02 115 9.55757E-03 6 2.60338E-02 /
 11 1.29006E-02 26 1.81778E-02 24 5.08282E-03 28 3.57599E-03
 42 4.05105E-04 25 4.81064E-04 74 0.00000E+00 /
 105 9.45776E-02 115 9.55757E-03 6 2.60338E-02 /
 11 1.57314E-02 26 1.59693E-02 24 4.46531E-03 28 3.14155E-03
 42 3.55889E-04 25 4.22620E-04 74 0.00000E+00 /
 948 5.70014E-05 949 9.83880E-04 940 5.08729E-04 941 1.78253E-04
 942 1.30800E-04 925 1.82278E-05 926 0.00000E+00 928 5.98120E-03
 951 0.00000E+00 950 2.81451E-05 953 0.00000E+00 937 0.00000E+00
 962 0.00000E+00 963 0.00000E+00 964 0.00000E+00 965 0.00000E+00
 8 1.55359E-02 11 8.19222E-03 26 1.20029E-02 24 3.18318E-03
 28 3.76016E-03 42 2.87528E-04 25 3.51484E-04 74 0.00000E+00
 854 0.00000E+00 884 0.00000E+00 894 0.00000E+00 814 0.00000E+00

PATH

BCR

70 7 2 1 0 0 0 /
 3 12 12 0 12 0 0 0 0 0 6 1 0 0 2 0 /
 1 2 3 4 5 6 7 7 7 7 7 7 7 /
 0.00000 0.71000 1.40453 2.23547 3.08585 3.94609 6.06943
 7.73423 9.39902 11.06382 12.72861 14.39341 16.05820 /

PIJF

37 0 5 3 1 0 0 0 /
 2 100 1.E-4 1.E-5 0.01 1.4 /
 0 /

EDIT

2 2 1 1 0 /
 1 6 1 6 /

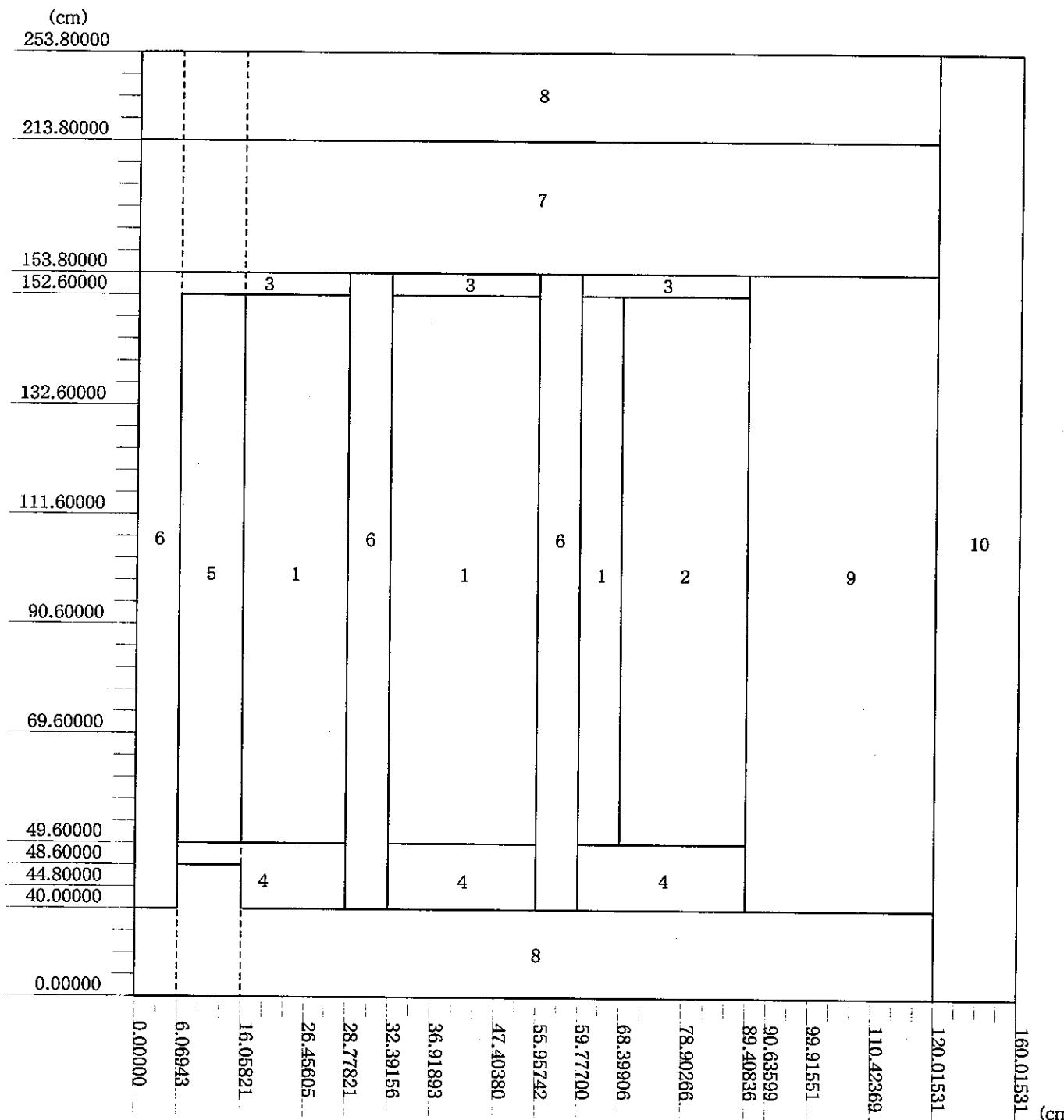
BCRCYL

表2.3-4 核種対応表

核種	SLAROM	CITATION
PU-238	948	1
PU-239	949	2
PU-240	940	3
PU-241	941	4
PU-242	942	5
U-235	925	6
U-236	926	7
U-238	928	8
AM-241	951	9
AM-242M	950	10
AM-243	953	11
NP-237	937	12
CM-242	962	13
CM-243	963	14
CM-244	964	15
CM-245	965	16
B-10	105	17
B-11	115	18
C	6	19
O	8	20
NA	11	21
FE	26	22
CR	24	23
NI	28	24
MO	42	25
MN	25	26
W	74	27
FP(U235)	854	28
FP(U238)	884	29
FP(P239)	894	30
FP(P241)	814	31

表2.4-1 2次元RZ体系における各層の外半径

層	第0層からの 集合体数	領域	外半径 (cm)	領域幅 (cm)
0	1	Naフオロワ (固定吸収体)	6.06943	6.06943
1	7	照射用特殊燃料	16.05821	9.98878
2	19	内側炉心	26.45605	10.39784
		"	28.77821	2.32216
		CCR, BCR	32.39156	3.61336
3	37	内側炉心	36.91893	4.52736
4	61	"	47.40380	10.48487
5	85	"	55.95742	8.55362
	97	CCR, BCR, FCR	59.77700	3.81958
6	127	内側炉心	68.39905	8.62206
7	169	外側炉心	78.90265	10.50360
8	217	"	89.40835	10.50570
9	271	径方向ブランケット	99.91550	10.50715
10	331	"	110.42368	10.50818
11	391	"	120.01529	9.59162
12	任意	しゃへい体	160.01529	40.00000
Σ				



- | | |
|---------------|--------------------|
| 1 : 内側炉心 | 6 : ナトリウムフォロワ |
| 2 : 外側炉心 | 7 : ガスプレナム |
| 3 : インシュレータ | 8 : 軸方向しやへい体 |
| 4 : 下部軸プランケット | 9 : 径方向プランケット置換反射体 |
| 5 : 特殊燃料 | 10 : 径方向しやへい体 |

図2.4-1 2次元RZ炉心計算体系（実効断面積作成用）

表 2.4-2 「JOINT」 - 「CITATION-FBR」 2 次元 RZ 入力データ (1/2)

CITATION

ICORE SLAROM

70G 2D-RZ MODEL MONJYU ADVANCED CORE

JFS-3-J3.2 HOMOGENEOUS CELL

001

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

003

0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
												1.0000E-4	1.0000E-5								

004

2	6.06943	3	9.98878	3	10.39784	2	2.32216	2	3.61336	2	4.52736										
3	10.48487	2	8.55362	2	3.81958	2	8.62206	3	10.50360	3	10.50570										
1	1.22763	2	9.27952	3	10.50818	3	9.59162	4	40.00000												
4	40.00000	6	60.00000	1	1.20000	5	20.00000	5	21.00000	5	21.00000										
5	21.00000	5	20.00000	1	1.20000	1	3.60000	1	4.80000	4	40.00000										

005

14	17	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	19	19	19	19	19	20				
13	16	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	19	19	19	19	19	20				
10	8	4	4	11	4	4	4	12	4	4	4	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	7	1	1	11	1	1	1	12	1	2	3	19	19	19	19	19	20				
10	9	6	6	11	6	6	6	12	6	6	6	19	19	19	19	19	20				
10	18	6	6	11	6	6	6	12	6	6	6	19	19	19	19	19	20				
10	18	5	5	11	5	5	5	12	5	5	5	19	19	19	19	19	20				
15	18	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	19	19	19	19	19	20				

008

-70 70 0 20 0 1 1 1

1

ICORE SLAROM

2

OCORE SLAROM

3

OCORE SLAROM

表 2.4-2 「JOINT」 - 「CITATION-FBR」 2 次元 RZ 入力データ (2/2)

4	
INSCOR	SLAROM
5	
AXBLK	SLAROM
6	
AXBLK	SLAROM
7	
IRCORE	SLAROM
8	
INSIR	SLAROM
9	
INSIR	SLAROM
10	
NAFOL	SLAROM
11	
NAFOL	SLAROM
12	
NAFOL	SLAROM
13	
PLECOR	SLAROM
14	
UPSHIC	SLAROM
15	
LWSHIC	SLAROM
16	
PLEIR	SLAROM
17	
UPSHII	SLAROM
18	
LWSHII	SLAROM
19	
REFLE	SLAROM
20	
RDSHI	SLAROM
ICORE	SLAROM
023	
0 0 0 7	
999	

表2.5-1 JFS-3-J3.2エネルギー群構造及び核分裂スペクトル (1/2)

エネルギー範囲	70群		18群		7群	
	群	Fission Spect.	群	Fission Spect.	群	Fission Spect.
10.00000 (MeV)~ 7.78800 (MeV)	1	6.74448×10^{-3}				
7.78800 ~ 6.06530	2	2.07453×10^{-2}	1	2.74898×10^{-2}	1	1.47715×10^{-1}
6.06530 ~ 4.72370	3	4.50724×10^{-2}				
4.72370 ~ 3.67880	4	7.51524×10^{-2}	2	1.20225×10^{-1}		
3.67880 ~ 2.86500	5	1.02811×10^{-1}				
2.86500 ~ 2.23130	6	1.19954×10^{-1}	3	2.22765×10^{-1}	2	4.57446×10^{-1}
2.23130 ~ 1.73770	7	1.22413×10^{-1}				
1.73770 ~ 1.35340	8	1.12268×10^{-1}	4	2.34681×10^{-1}		
1.35340 ~ 1.05400	9	9.52128×10^{-2}				
1.05400 ~ 0.82085	10	7.78531×10^{-2}	5	1.73066×10^{-1}		
0.82085 ~ 0.63928	11	6.08637×10^{-2}				
0.63928 ~ 0.49787	12	4.60329×10^{-2}	6	1.40731×10^{-1}		
0.49787 ~ 0.38774	13	3.38342×10^{-2}				
0.38774 ~ 0.30197	14	2.43171×10^{-2}				
0.30197 ~ 0.23518	15	1.72311×10^{-2}	7	5.36425×10^{-2}	3	3.85779×10^{-1}
0.23518 ~ 0.18316	16	1.20942×10^{-2}				
0.18316 ~ 0.14264	17	8.43456×10^{-3}				
0.14264 ~ 0.11109	18	5.83420×10^{-3}	8	1.83397×10^{-2}		
0.11109 ~ 0.08652	19	4.07096×10^{-3}				
86.51700 (keV)~ 67.37900 (keV)	20	2.82124×10^{-3}				
67.37900 ~ 52.47500	21	1.94780×10^{-3}	9	6.11199×10^{-3}		
52.47500 ~ 40.86800	22	1.34295×10^{-3}				
40.86800 ~ 31.82800	23	9.25079×10^{-4}				
31.82800 ~ 24.78800	24	6.36830×10^{-4}	10	1.99986×10^{-3}	4	8.76110×10^{-3}
24.78800 ~ 19.30500	25	4.37955×10^{-4}				
19.30500 ~ 15.03400	26	3.00775×10^{-4}				
15.03400 ~ 11.70900	27	2.06209×10^{-4}	11	6.49252×10^{-4}		
11.70900 ~ 9.11880	28	1.42268×10^{-4}				
9.11880 ~ 7.10170	29	9.82063×10^{-5}				
7.10170 ~ 5.53080	30	6.75111×10^{-5}	12	2.12120×10^{-4}		
5.53080 ~ 4.30740	31	4.64022×10^{-5}				
4.30740 ~ 3.35460	32	3.18865×10^{-5}				
3.35460 ~ 2.61260	33	2.19026×10^{-5}	13	6.88345×10^{-5}	5	3.03225×10^{-4}
2.61260 ~ 2.03470	34	1.50453×10^{-5}				
2.03470 ~ 1.58460	35	1.03243×10^{-5}				
1.58460 ~ 1.23410	36	7.08261×10^{-6}	14	2.22709×10^{-5}		
1.23410 ~ 0.96112	37	4.86401×10^{-6}				

表2.5-1 JFS-3-J3.2エネルギー群構造及び核分裂スペクトル (2/2)

エネルギー範囲	70群		18群		7群	
	群	Fission Spect.	群	Fission Spect.	群	Fission Spect.
961.12 (eV) ~ 748.52 (MeV)	38	0.0				
748.52 ~ 582.95	39	0.0	15	0.0		
582.95 ~ 454.00	40	0.0				
454.00 ~ 353.58	41	0.0				
353.58 ~ 275.36	42	0.0	16	0.0		
275.36 ~ 214.45	43	0.0				
214.45 ~ 167.02	44	0.0				
167.02 ~ 130.07	45	0.0	17	0.0		
130.07 ~ 101.30	46	0.0				
101.30 ~ 78.893	47	0.0				
78.893 ~ 61.442	48	0.0				
61.442 ~ 47.851	49	0.0				
47.851 ~ 37.267	50	0.0				
37.267 ~ 29.023	51	0.0				
29.023 ~ 22.603	52	0.0				
22.603 ~ 17.603	53	0.0				
17.603 ~ 13.710	54	0.0				
13.710 ~ 10.677	55	0.0				
10.677 ~ 8.3153	56	0.0				
8.3153 ~ 6.4760	57	0.0				
6.4760 ~ 5.0435	58	0.0				
5.0435 ~ 3.9279	59	0.0	18	0.0	7	0.0
3.9279 ~ 3.0590	60	0.0				
3.0590 ~ 2.3824	61	0.0				
2.3824 ~ 1.8554	62	0.0				
1.8554 ~ 1.4450	63	0.0				
1.4450 ~ 1.1254	64	0.0				
1.1254 ~ 0.87642	65	0.0				
0.87642 ~ 0.68256	66	0.0				
0.68256 ~ 0.53158	67	0.0				
0.53158 ~ 0.41399	68	0.0				
0.41399 ~ 0.32242	69	0.0				
0.32242 ~ 10 ⁻⁵	70	0.0				

表 2.5-2 70 群スペクトルを PDS ファイルに変換するデータ

CITATIONPOST

0 2
70 20 1 0
ICOREF
OCORF1
OCORF2
INSCOF
AXBKF1
AXBKF2
IRCORF
INSIR1
INSIR2
NAFOF1
NAFOF2
NAFOF3
PLECOF
UPSHCF
LWSHCF
PLEIRF
UPSHIF
LWSHIF
REFLEF
RDSHIF

表 2.5-3 70 群→7 群へ縮約するデータ (1/3)

CITATIONPOST

1

1 2
 7
 4 8 19 28 37 46 70

PDSIN	ICORE	SLAR	0	1
PDSOUT	ICORE	SLAR		
USERPDS	ICOREF	CITA		
INNER_CORE			(1)	
PDSIN	OCORE	SLAR	0	1
PDSOUT	OCORE1	SLAR		
USERPDS	OCORF1	CITA		
OUTER_CORE_1			(2)	
PDSIN	OCORE	SLAR	0	1
PDSOUT	OCORE2	SLAR		
USERPDS	OCORF1	CITA		
OUTER_CORE_2			(3)	
PDSIN	INSCOR	SLAR	0	1
PDSOUT	INSCOR	SLAR		
USERPDS	INSCOF	CITA		
INSLATOR_CORE			(4)	
PDSIN	AXBLLK	SLAR	0	1
PDSOUT	AXBLLK1	SLAR		
USERPDS	AXBKF1	CITA		
AXIAL_BLANKET_1			(5)	
PDSIN	AXBLLK	SLAR	0	1
PDSOUT	AXBLLK2	SLAR		
USERPDS	AXBKF2	CITA		
AXIAL_BLANKET_2			(6)	
PDSIN	IRCORE	SLAR	0	1
PDSOUT	IRCORE	SLAR		
USERPDS	IRCORF	CITA		
IRRADIATION_CORE			(7)	
PDSIN	INSIR	SLAR	0	1
PDSOUT	INSIRU	SLAR		
USERPDS	INSIR1	CITA		
IRRAD_INSULATOR	UPPER		(8)	
PDSIN	INSIR	SLAR	0	1
PDSOUT	INSIRL	SLAR		
USERPDS	INSIR2	CITA		
IRRAD_INSULATOR	LOWER		(9)	

表 2.5-3 70 群→7 群へ縮約するデータ (2/3)

PDSIN	NAFOL	SLAR	0	1
PDSOUT	NAFOL1	SLAR		
USERPDS	NAFOF1	CITA		
NA_FOLLOWER_1 (10)				
PDSIN	NAFOL	SLAR	0	1
PDSOUT	NAFOL2	SLAR		
USERPDS	NAFOF2	CITA		
NA_FOLLOWER_2 (11)				
PDSIN	NAFOL	SLAR	0	1
PDSOUT	NAFOL3	SLAR		
USERPDS	NAFOF3	CITA		
NA_FOLLOWER_3 (12)				
PDSIN	PLECOR	SLAR	0	1
PDSOUT	PLECOR	SLAR		
USERPDS	PLECOF	CITA		
UPPER_PLENUM (CORE) (13)				
PDSIN	UPSHIC	SLAR	0	1
PDSOUT	UPSHIC	SLAR		
USERPDS	UPSHCF	CITA		
UPPER_SHIELD (CORE) (14)				
PDSIN	LWSHIC	SLAR	0	1
PDSOUT	LWSHIC	SLAR		
USERPDS	LWSHCF	CITA		
LOWER_SHIELD (CORE) (15)				
PDSIN	PLEIR	SLAR	0	1
PDSOUT	PLEIR	SLAR		
USERPDS	PLEIRF	CITA		
UPPER_PLENUM (IRRAD) (16)				
PDSIN	UPSHII	SLAR	0	1
PDSOUT	UPSHII	SLAR		
USERPDS	UPSHIF	CITA		
UPPER_SHIELD (IRRAD) (17)				
PDSIN	LWSHII	SLAR	0	1
PDSOUT	LWSHII	SLAR		
USERPDS	LWSHIF	CITA		
LOWER_SHIELD (IRRAD) (18)				
PDSIN	REFLE	SLAR	0	1
PDSOUT	REFLE	SLAR		
USERPDS	REFLEF	CITA		
RADIAL_REFLECTOR (19)				

表 2.5-3 70 群→7 群へ縮約するデータ (3/3)

PDSIN	RDSHI	SLAR	0 1
PDSOUT	RDSHI	SLAR	
USERPDS	RDSHIF	CITA	
RADIAL_SHIELD			(20)

表2.6-1 計算機入力データ用の核分裂当たりの放出エネルギー

核種	核分裂による放出エネルギー E_f (MeV)	捕獲反応の補正係数 f	補正後の放出エネルギー $f \cdot E_f$ (MeV)	補正後の放出エネルギー $f \cdot E_f$ (E-11 W)
Pu-238	197.212	—	197.212	3.15969
Pu-239	199.9228	1.007	201.3222596	3.22554
Pu-240	197.794	1.025	202.73885	3.24824
Pu-241	201.975	1.005	202.984875	3.25218
Pu-242	200.88	1.027	206.30376	3.30535
U-233	191.041	1.003	191.614123	3.07000
U-234	189.085	—	189.085	3.02948
U-235	193.7174	1.009	195.4608566	3.13163
U-236	191.62	1.088	208.48256	3.34026
U-238	194.808	1.123	218.769384	3.50507
Am-241	201.02	1.1	221.122	3.54277
Am-242m	215.5	—	—	3.45269
Am-243	201.02	1.07	215.0914	3.44615
Np-237	193.695	1.077	208.609515	3.34229
Np-239	—	—	—	3.31000
Cm-244	205.61	1.034	212.60074	3.40624
Cm-242	219.4	—	—	3.51518
Cm-243	243.06	—	—	3.51600
Cm-245	245.066	—	—	3.52900

表 2.6-2 JOINT コードの入力データ (1/3)

表 2.6-2 JOINT コードの入力データ (2/3)

OCORE2 28 OUTER CORE 2
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 INSCOR 28 INSULATOR (CORE)
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 AXBLK1 28 AXIAL BLANKET 1
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 AXBLK2 28 AXIAL BLANKET 2
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 IRCORE 28 IRRADIATION CORE (TYPE:D)
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 INSIRU 28 INSULATOR UPPER (IRRADIAT)
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 INSIRL 28 INSULATOR LOWER (IRRADIAT)
 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 20 21 22 23 24 25 26 27
 28 29 30 31
 NAFOL1 7 NA FOLLOWER 1
 21 22 23 24 25 26 27
 NAFOL2 7 NA FOLLOWER 2
 21 22 23 24 25 26 27
 NAFOL3 7 NA FOLLOWER 3
 21 22 23 24 25 26 27
 PLECOR 7 UPPER PLENUM (CORE)
 21 22 23 24 25 26 27
 UPSHIC 7 UPPER SHIELD (CORE)
 21 22 23 24 25 26 27
 LWSHIC 7 LOWER SHIELD (CORE)
 21 22 23 24 25 26 27
 PLEIR 7 UPPER PLENUM (IRRADIAT)
 21 22 23 24 25 26 27
 UPSHII 7 UPPER SHIELD (IRRADIAT)
 21 22 23 24 25 26 27
 LWSHII 7 LOWER SHIELD (IRRADIAT)
 21 22 23 24 25 26 27
 REFLE 7 RADIAL REFLECTOR
 21 22 23 24 25 26 27

表 2.6-2 JOINT コードの入力データ (3/3)

RDSHI	7 RADIAL SHIELD
21 22 23 24 25 26 27	
CCR07G	9 CCR
17 18 19 21 22 23 24 25 26 27	
BCR07G	9 BCR
17 18 19 21 22 23 24 25 26 27.	

第3章 2次元燃焼計算

2次元燃焼計算は、Pu富化度調整計算コード「PENCIL」または「CITATION」を用いて実施する。ここで、当Grが所有している「PENCIL」コードにはBurnup-Factor計算ルーチンが組み込まれている。さらに、「PENCIL」コードのバージョンによっては増殖比計算でPu241のDecayを考慮するものもあるが、当Grでは「PENCIL」コードにその計算ルーチンを組み込みますに後処理プログラムを用いてPu241のDecayを考慮した増殖比を求めている。

3.1 発熱エネルギー

「PENCIL」および「CITATION」コードは、発熱エネルギーを求める際、核分裂による発熱と中性子捕獲反応による発熱を区別して取り扱うことができない。そこで、平成6年度までは、核分裂により放出されるエネルギーに中性子捕獲により放出される γ 線エネルギーが含まれるものとして発熱エネルギーを求めていた。以下にその定義を示し、実際に使用していた値を表3.1-1^[3]に示す。

$$E = A_1 \sigma_f \phi \cdots \quad (1)$$

$$A_1 = EFR + EB + EGP + EGD + ENP + END + (ECA)_{HM} \cdots \quad (2)$$

E : 発熱エネルギー

σ_f : 核分裂断面積

ϕ : 中性子束

A_1 : 核分裂により放出されるエネルギー

EFR : 核分裂片の運動エネルギー（中性子放出後）

EB : 核分裂当たりの放出 β 線エネルギー

EGP : 核分裂当たりの即発 γ 線エネルギー

EGD : 核分裂当たりの遅発 γ 線エネルギー

ENP : 核分裂当たりの即発中性子の平均エネルギー

END : 核分裂当たりの遅発中性子の平均エネルギー

$(ECA)_{HM}$: 核分裂を生ずる核種の中性子捕獲により発生する γ 線のエネルギー

ここで、上記(1)式で得られる発熱エネルギーは、核分裂反応とともに中性子捕獲反応が同時に起こっていると見なされる。

しかし、実際には核分裂反応と中性子捕獲反応の反応率は異なっている。そこで、平成6年度以降は文献[4]の知見に従い、核分裂による放出エネルギーに核分裂反応に対する中性子捕獲反応の割合を考慮できる補正係数を乗じて求められる発熱エネルギーを使用する事とした。以下にその定義を示す。

$$E = A_2 \cdot \sigma_f \cdot \phi \cdots (4)$$

$$A_2 = f E_f \cdots (5)$$

$$E_f = EFR + EB + EGP + EGD + ENP + END - EINC \cdots (6)$$

$$f = 1 + R \cdot E_c / E_f \cdots (7)$$

E : 発熱エネルギー

σ_f : 核分裂断面積

ϕ : 中性子束

A_2 : 補正後の放出エネルギー

f : 補正係数

E_f : 核分裂による放出エネルギー

EFR～END : (2)式と同様

EINC : 入射中性子の運動エネルギー

E_c : 捕獲反応による放出エネルギー

R : 中性子反応比 (捕獲／核分裂)

上記、補正係数fについて、文献[4]によると補正係数に含まれている中性子捕獲反応と核分裂反応との反応比(R)は金属燃料炉心の炉心平均スペクトルに対する値であるが、補正係数の精度を考慮すると酸化物燃料炉心等に流用しても差し支えなく、むしろ補正係数の精度を向上させるのであれば、「MOSES」コードのように核分裂反応と中性子捕獲反応を別々に扱える計算コードで解析するべきであると記されていることから、当Grにおいても文献[4]記載値を使用する事とした。

次に、(6) 式の核分裂による放出エネルギー E_f は Sher の論文^[5] を基に計算したもので、論文の QG から ENU (ニュートリノのエネルギー) を引いたものと同じであり、核分裂によって放出される正味のエネルギーとなる。(ただし、ニュートリノにより持ち去られるエネルギーは除く)

さらに、当 Gr では MeV から W への単位変換係数に精度の良い $1.60217733 \times 10^{-13}$ (W/MeV)^[6] を使用している。表 3.1-2^[3] に現在当 Gr で用いている核分裂による放出エネルギーの値を示す。

3.2 計算体系

2 次元燃焼計算を行う際の計算体系は基本的に RZ 体系としている。ここで、もんじゅ現行炉心および高度化炉心設計において、対象炉心の制御棒領域を Na フォロワとして RZ モデルにする際、その制御棒領域内の炉心部および軸方向プランケット部に当たる領域のみ Na フォロワとして扱っており、制御棒を挿入する際は制御棒領域下部に遮へい体を残し、中途挿入の際は制御棒と下部遮へい体の間を Na フォロワとした体系でモデル化している（制御棒領域密封）。しかし、高度化炉心解析以降の当 Gr の解析に於いてはリング効果等の影響は大きいものの 2 次元計算で簡易的に制御棒効果を評価することが予想されるため制御棒領域の上下端に遮へい体やガスプレナム等を残さない体系（制御棒領域貫通）とし、より現実的なモデル化を行っている。各々の体系を図 3.2-1、図 3.2-2 に示す。

実際にもんじゅ高度化炉心を対象に両体系の違いが 2 次元燃焼特性に与える影響を調査した結果を付録 C に示す。

3.3 Pu 富化度サーベイ方法

Pu 富化度の定義としては、MOX 燃料の酸素重量を含まない重金属 (U, Pu, Am) 重量のみを用いた以下のものを使用する。

$$\text{Pu 富化度 (wt\%)} = (\text{Pu} + \text{Am}) / (\text{Pu} + \text{U} + \text{Am})$$

Pu : Pu の重量

U : U の重量

Am : Am-241 の重量

Pu 富化度のサーベイは「PENCIL」コードを用いて実施する。このとき、平衡末期の実効増倍率および内側炉心と外側炉心の最大線出力比が判定条件となる。なお、体系は 2 次元 RZ 体系で制御棒についてはパーク位置もしくは全引き抜き (Na フォロワ状態) とする。

この判定条件について、値の設定は現行設計と同様に平衡末期の実効増倍率が臨界($1.0 + \text{運転余裕} + \text{バイト分} (0.3\% \Delta k / kk')$) となるようにし、最大線出力比については 3 次元拡散計算の平衡初期の結果が 1.0 となるようにしている。

従って、平衡末期の実効増倍率の値は常に 1.003 となるが、最大線出力比の値については、初め 1.0 で Pu 富化度サーベイを行い、その計算で得られた平衡初期の組成を用いて「MOSES」コードで 3 次元拡散計算を実施して最大線出力比を求め、出力平坦化確認を行って再び Pu 富化度サーベイを行う必要がある。ここで、当 Gr では Pu 富化度サーベイで得られた燃焼組成を 3 次元拡散計算コード「MOSES」の入力形式に変換するため、後処理プログラム「CITPOST」を使用している。

なお、この 3 次元解析は燃焼欠損反応度等を考慮した制御棒挿入位置で実施する。従って、サイクル初期の制御棒位置は、粗調整棒が燃焼欠損反応度分（約 $2.9\% \Delta k / kk'$ ）の挿入位置、微調整棒が運転余裕とバイト分 ($0.3\% \Delta k / kk'$) の挿入位置、後備炉停止棒が全引抜き（炉心上端）位置となり、サイクル末期は、粗調整棒、微調整棒、後備炉停止棒共に全引抜き（炉心上端）位置となる。さらに、「MOSES」で求めた最大線出力を集合体内に着目した燃料ピン単位の結果するために後処理プログラムの集合体内出力分布評価プログラムを用いている。また、3 次元解析は拡散計算であるため最大線出力には「PENCIL」による燃焼計算で得られた Burnup-Factor を乗じるが、保守的な評価結果するために最大線出力発生点の値ではなく、層毎の最大値を使用している。

次に、上述の最大線出力算出手法に基づいて求められた最大線出力比と初めの Pu 富化度サーベイ時に判定条件として使用した最大線出力比を比較し、3 次元解

析で最大線出力比が 1.0 となる値を求め、その値と上述した平衡末期の実効増倍率を用いて再び Pu 富化度サーベイを行っている。

3.4 2 次元燃焼特性

2 次元燃焼特性は Pu 富化度調整計算コード「PENCIL」または「CITATION」を用いて算出している。しかし、炉心形状により計算結果を 2 次元燃焼特性としてそのまま用いることができない項目もある。従って、これらの項目の算出方法について以降に示す。

3.4.1 燃焼欠損反応度

「PENCIL」コードで編集出力されたサイクル初期、末期の実効増倍率を用いて燃焼欠損反応度を以下の式で算出する。

$$\text{燃焼欠損反応度} = (k - k') / (k \times k')$$

k : 初期の実効増倍率

k' : 末期の実効増倍率

3.4.2 取出平均燃焼度

対象炉心の燃料交換バッチが単一バッチの場合は、「PENCIL」コードで編集出力された結果をそのまま使用できる。しかし、対象炉心が高度化炉心のように変則バッチを採用している場合、炉心トータルの出力と各燃焼領域毎に得られる平衡初期、末期の出力分担率の平均値、及びインベントリから、燃料交換バッチで区切られた領域毎の燃焼度を算出し、得られた各燃焼度を、その領域毎のインベントリ重みで均質化している。式で表すと

$$(\overline{BU}) = \frac{\sum_n (BU)_n W_n}{\sum_n W_n}$$

(\overline{BU}) : 取出平均燃焼度

$(BU)_n$: 領域 n の燃焼度

W_n : 領域 n のインベントリ

となる。ここで、 $(BU)_n$ は

$$(BU)_n = P_{\text{tot}} \cdot \frac{(R^{\text{BOC}} + R^{\text{EOC}})_n}{2} \cdot B_n \cdot D / W_n$$

P_{tot} : 炉心全出力

R_n^{BOC} : 領域 n のサイクル初期の出力分担率

R_n^{EOC} : 領域 n のサイクル末期の出力分担率

B_n : 領域 n の燃料交換バッチ数

D : 運転サイクル長さ

W_n : 領域 n のインベントリ

である。

3.4.3 出力分担率

「PENCIL」コードで編集出力される出力分担率は、常に、炉心燃料、軸方向ブランケット、径方向ブランケットの3領域のみの割合である。従って、対象炉心が高度化炉心と同様に変則バッチを採用している等の理由により指定領域毎の出力分担率を必要とする場合は、「PENCIL」計算で出力機番の51番にファイル出力された各燃焼領域毎の出力と炉心全体の出力を用いて、別途算出しなければならない。

3.4.4 増殖比

増殖比にはAm241の崩壊を考慮して計算したものと、考慮せずに計算したものがある。ここで、Am241の崩壊を考慮して計算した値は、より精度の高い増殖比となるが、「PENCIL」コードは核種の崩壊を考慮した増殖比の計算ができない。

従って、Am241の崩壊を考慮した増殖比は、「PENCIL」計算で領域毎の原子個数密度、核種の吸収、散乱割合等の情報を出力している52番ファイルを用いて

後処理プログラムの「CITPOST」で算出する。

もんじゅ高度化炉心設計では、増殖比の定義に Pu241 の崩壊を含め、また、U235 を核分裂核種として扱わず、Pu 増殖比として以下のように定義している。

$$\text{増殖比} = \frac{[\text{U238(cap)} + \text{Pu238(cap)} + \text{Pu240(cap)}]}{[\text{Pu239(abs)} + \text{Pu241(abs)} + \text{Pu241(decay)}]}$$

ここで、cap は捕獲、abs は吸収、decay は崩壊を表す。また、U238(cap)などは U の捕獲反応率などを表す。

3.4.5 最大高速中性子束

「PENCIL」コードは、各サイクル毎に各燃焼ステップ毎の最大高速中性子束、および初期と末期の最大高速中性子束の平均値を編集出力する。

ここで、「PENCIL」計算結果の最大高速中性子束を用いる際、通常は平衡サイクルに於いて、各燃焼ステップ毎に求められた最大高速中性子束の中から最大値を選び出し、その値を最大高速中性子束としている。しかし、もんじゅ高度化炉心検討に於いて 2 次元核特性解析結果として用いた最大高速中性子束は高速中性子照射量との整合性を保つために平衡初期と末期の平均中性子束の最大値とした。

さらに、「PENCIL」コードの編集出力機能は単一バッチ炉心のみ対応しており変則バッチ炉心には対応していないため、変則バッチ採用炉心の場合、編集出力の高速中性子照射量の値を使用できない。これに伴い、「PENCIL (CITATION)」コードの標準出力結果から高速中性子照射量を求める際に必要となる高速中性子束分布を求める必要がある。再計算は以下に基づいて行われる。

表 2.5-1 で示した通り少數群の 7 群で核計算を行った場合は第 3 群に 0.1MeV の境界が含まれている。0.1MeV 以上の中性子束を求めるには、レサジー幅を用いた補間を行う必要がある。即ち、1 群、2 群、3 群の中性子束をそれぞれ ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 とすると、

$$0.1 \text{ MeV} \text{ 以上の高速中性子束} = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 \times K$$

$$\text{但し、 } K = \frac{\ln(1.3534/0.1)}{\ln(1.3534/0.086517)} = 0.94734$$

となる。

3.4.6 最大高速中性子照射量

高速中性子照射量 Φ は、0.1MeV 以上の高速中性子束に照射時間 Δt (サイクル長さ × バッチ数) を乗じて算出する。この時の中性子束は平衡サイクルの初期と末期の平均高速中性子束 ($E \geq 0.1\text{MeV}$ 以上) を用いる。

$$\Phi = \frac{1}{2} [\phi(\text{初期}) + \phi(\text{末期})] \times \Delta t$$

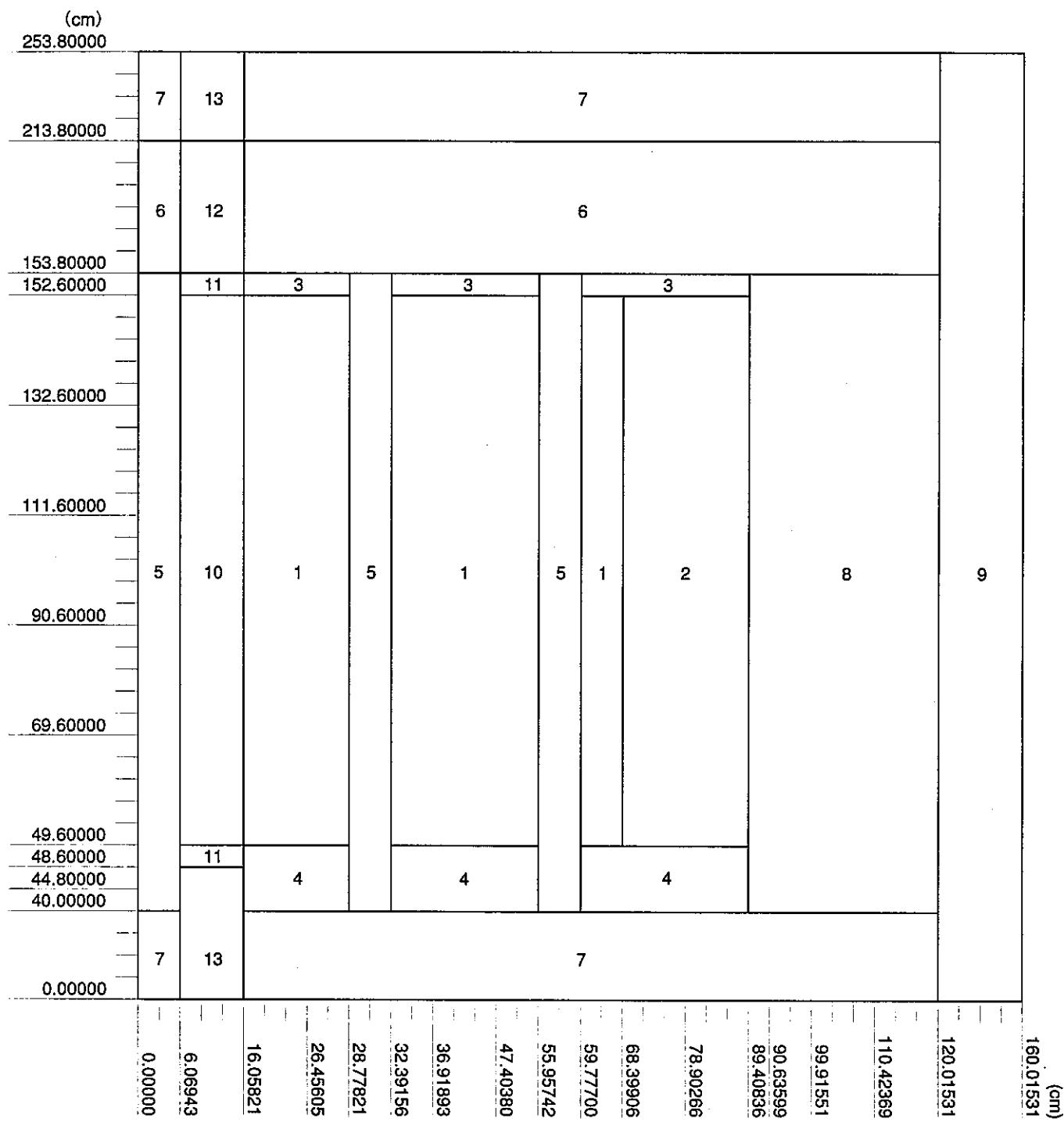
従って、上記の高速中性子束の算出で記したとおり、単一バッチ炉心の場合は「PENCIL」コード編集出力結果の最大高速中性子束の平均値を使用し、変則バッチ採用炉心の場合は平衡サイクル初期、末期の平均値が最大となる高速中性子束を求め、秒単位に換算した運転サイクル日数および燃料交換バッチを掛けて算出している。

表3.1-1 CITATION計算において平成6年度以前に
使用していた核分裂当たりの放出エネルギー^[3]

核種	もんじゅ設計値 [設計書記載値] (MeV)	大型炉設計値 [プラント室設定値] (MeV)
U235	194.6	201.6
U236	191.6	202.2
U238	194.6	206.6
Pu238	197.1	208.1
Pu239	199.1	208.5
Pu240	195.4	209.7
Pu241	200.7	210.3
Pu242	198.9	211.0
Am241	201.5	209.7

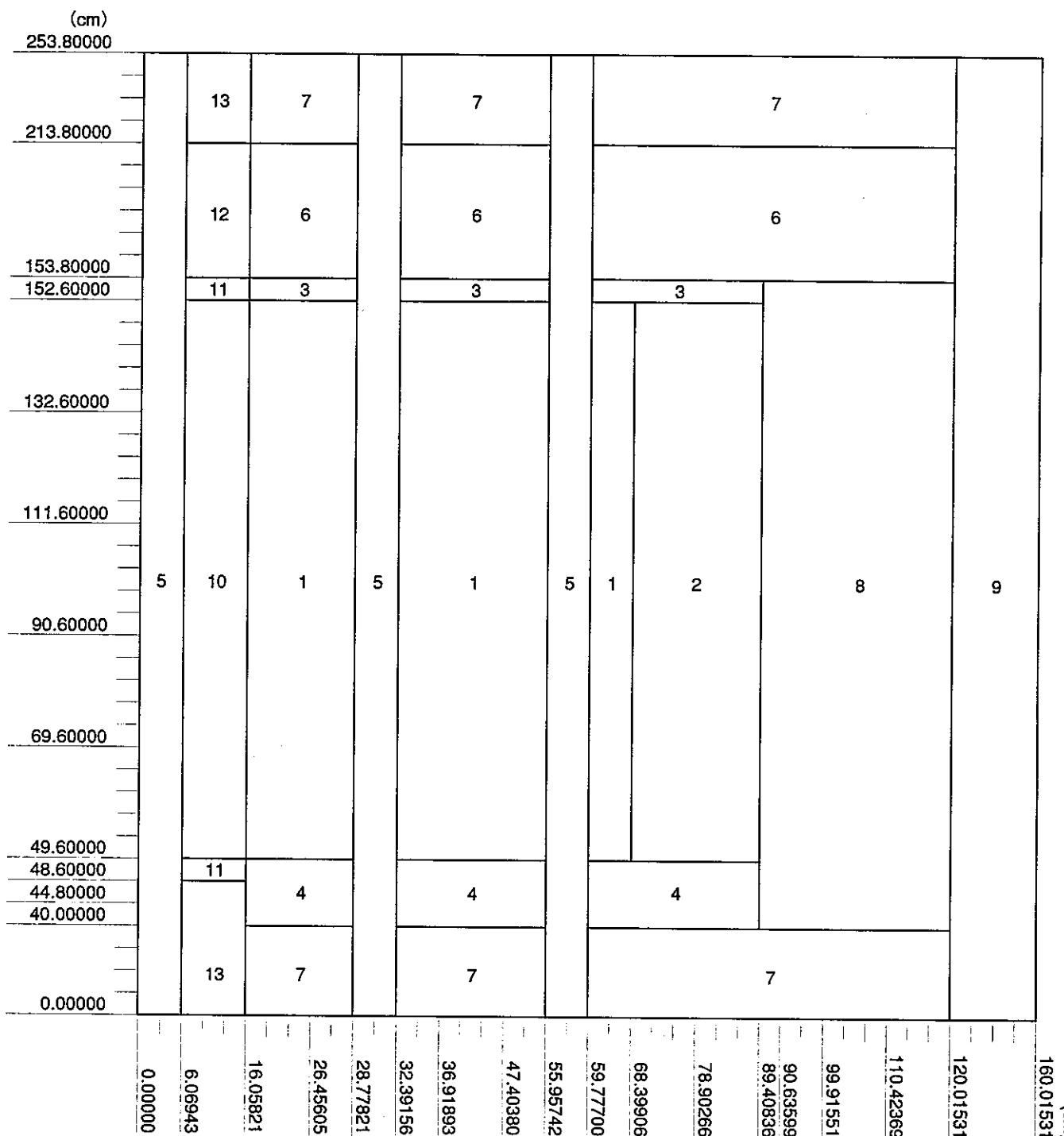
表3.1-2 核分裂当たりの放出エネルギー^[3]

核種	核分裂による放出 エネルギーE ₁ (MeV)	捕獲反応の 補正係数f	補正後の放出エネ ルギーA ₂ (=fE ₁) (MeV)	補正後の放出 エネルギーA ₂ (E-11W)
U233	191.04	1.003	191.61	3.070
U234	189.09	—	189.09	3.029
U235	193.72	1.009	195.46	3.132
U236	191.62	1.088	208.48	3.340
U238	194.81	1.123	218.77	3.505
Np237	193.70	1.077	208.61	3.342
Pu238	197.21	—	197.21	3.160
Pu239	199.92	1.007	201.32	3.226
Pu240	197.79	1.025	202.74	3.248
Pu241	201.98	1.005	202.98	3.252
Pu242	200.88	1.027	206.30	3.305
Am241	201.02	1.100	221.12	3.543
Am243	201.02	1.070	215.09	3.446
Cm244	205.61	1.034	212.60	3.406



- 1: 内側炉心
- 2: 外側炉心
- 3: インシュレータ (炉心部)
- 4: 下部軸ブランケット
- 5: ナトリウムフォロワ
- 6: ガスブレナム (炉心部)
- 7: 軸方向しゃへい体 (炉心部)
- 8: 径方向ブランケット置換反射体
- 9: 径方向しゃへい体
- 10: 特殊燃料
- 11: インシュレータ (特燃部)
- 12: ガスブレナム (特燃部)
- 13: 軸方向しゃへい体 (特燃部)

図3.2-1 2次元RZ炉心計算体系（制御棒領域密閉）



- | | | |
|------------------|-------------------|--------------------|
| 1: 内側炉心 | 6: ガスプレナム (炉心部) | 11: インシュレータ (特燃部) |
| 2: 外側炉心 | 7: 軸方向しゃへい体 (炉心部) | 12: ガスプレナム (特燃部) |
| 3: インシュレータ (炉心部) | 8: 径方向ブランケット置換反射体 | 13: 軸方向しゃへい体 (特燃部) |
| 4: 下部軸ブランケット | 9: 径方向しゃへい体 | |
| 5: ナトリウムフォロワ | 10: 特殊燃料 | |

図3.2-2 2次元RZ炉心計算体系 (制御棒領域貫通)

第4章 3次元拡散計算

4.1 原子数密度

3次元拡散計算は「MOSES」コードで実施する。平衡サイクル炉心の解析を行う場合、「MOSES」コードに入力する原子数密度は基本的に2次元燃焼計算で各燃焼領域毎に得られる燃焼組成とする。

ここで、平成10年度以前のバージョンの「MOSES」コードは、計算する領域数に制限があり、その上限が60領域となっていた。この制限により、それまでの「もんじゅ」高度化炉心解析においては、2次元燃焼計算で得られた各燃焼領域毎の組成を全て使用することができなかった。従って、2次元燃焼計算で得られた平衡組成のうち炉心部について軸方向のものを3領域程度に均質化したものを使用していた。

しかし、平成10年度以降に「MOSES」コードは改良され、その計算する領域数制限を変更できるようになった。従って、現在の3次元解析は2次元燃焼計算で燃焼領域毎に得られる全ての組成を使用した計算を行っている。

4.2 制御棒の基準挿入位置設定方法

2次元解析では基本的に制御棒領域をNaフォロワーとして解析を行うが、3次元解析時では制御棒の挿入情報が必要となる。そこで、各制御棒の基準位置の設定方法について以下に示す。制御棒の基準挿入位置は基本的に燃焼欠損反応度の担保、および運転余裕とバイト分の反応度の担保の2つの観点から設定する。従って、燃焼欠損反応度の担保については平衡サイクル末期で全制御棒がパーク位置にあるものとし、平衡サイクル初期の制御棒挿入効果が2次元燃焼計算結果の燃焼欠損反応度分となる位置を3次元拡散計算でサーベイする必要がある。また、運転余裕とバイト分の反応度は平衡サイクルを通して担保するため、平衡初期、末期共に制御棒の挿入位置を一定とする。

ここで、もんじゅ高度化炉心解析時のパーク位置は制御棒の吸収体部分(B_4C 領域)の下端を炉心部上端に合わせた位置としている。

以下に各種制御棒の基準位置についてのサーベイ方法を示す。

a) 後備炉停止棒の基準位置

常にパーク位置とする。

b) 微調整棒の基準位置

微調整棒により運転余裕とバイト分の反応度を担保する。この基準位置は後備炉停止棒をパーク位置に置き、粗調整棒を炉中心まで挿入した状態で微調整棒をパーク位置から挿入し、その挿入深度が運転余裕とバイト分として 0.3% $\Delta k/kk'$ の反応度を担保できる位置（図 4.2-1 参照）とする。なお、基準位置のサーベイは平衡初期組成を用いて実施する。

c) 粗調整棒の基準位置

粗調整棒により 2 次元燃焼計算結果の燃焼欠損反応度分の反応度を担保する。後備炉停止棒及び微調整棒を上述で求めた基準位置に置き、粗調整棒をパーク位置から挿入していき、その挿入効果が 2 次元燃焼計算結果の燃焼欠損反応度分となる位置を（図 4.2-2 参照）求め、その位置を粗調整棒の平衡初期解析時の基準位置とし、平衡末期解析時の基準位置をパーク位置とする。

ここで、「MOSES」コードの注意点として制御棒を中途挿入した状態を計算する場合、計算体系に於ける軸方向領域分割の境界と挿入した制御棒の吸収体部分の下端位置 (B_4C を含む領域と含まない領域の境界) について、両者を常に一致させなければならない。「MOSES」コードは基本的には制御棒の駆動方法について制限していないが、計算は入力データで分割された領域毎に行うため、制御棒の吸収体部分の下端位置が軸方向に分割された領域内に置かれると吸収体の組成と軸方向に隣接する領域の組成を均質化してしまうためである。

また、制御棒の挿入位置については、その挿入深度を炉心上端から表現する場合とパーク位置から表現する場合がある。

4.3 粗調整棒挿入パターン

もんじゅ高度化炉心解析に於いては、上記4.2節で設定した制御棒挿入位置の計算を基準計算とし、これに対してもんじゅ現行設計と同様に炉の反応度の誤差吸収($\pm 1.0\% \Delta k/kk'$)を考慮する。

この炉の反応度の誤差吸収は粗調整棒の上記4.2節で設定した基準位置からの挿入効果で考慮する。また、粗調整棒については全挿入状態および全引き抜き状態の計算も実施している。以下に、もんじゅ高度化炉心解析で用いた3次元拡散計算時の粗調整棒挿入パターンを示す。

a) 平衡初期

- i) 炉の反応度の誤差吸収として増加分($+1.0\% \Delta k/kk'$)を考慮する。従って、基準位置から $1.0\% \Delta k/kk'$ の反応度分だけ挿入した位置となる。
- ii) 炉の反応度の誤差吸収として減少分($-1.0\% \Delta k/kk'$)を考慮する。従って、基準位置から $1.0\% \Delta k/kk'$ の反応度分だけ引き抜いた位置となる。
- iii) 全挿入状態
- iv) 全引き抜き状態

b) 平衡末期

- i) 炉の反応度の誤差吸収として増加分($+1.0\% \Delta k/kk'$)を考慮する。従って、基準位置であるパーク位置から $1.0\% \Delta k/kk'$ 分だけ挿入した位置となる。
- ii) 全挿入状態
- iii) 全引き抜き状態

4.4 最大線出力

高度化炉心検討は上記4.3節に示したとおり、炉の反応度の誤差吸収を考慮した粗調整棒挿入パターン毎に3次元解析を行っている。従って、各挿入パターン毎に流量領域毎または層毎の最大線出力を求め、その中からさらに内側および外側炉心で最大となる値を求め、それを最大線出力としている。

なお、この最大線出力は集合体内の燃料ピンに着目して評価する必要がある。しかし、「MOSES」コードは集合体内の1点または6点で計算を実施しているため、

「MOSES」コード単体では集合体内の燃料ピンについて精度良い評価ができない。従って、当 Gr では「MOSES」で求められた最大出力発生集合体に対し、集合体内の燃料ピン毎の出力評価を行うために後処理プログラムの集合体内出力分布評価プログラムを用い、それにより求められた値を最大線出力としている。この集合体内出力分布評価プログラムは「MOSES」コードで計算された集合体内の 6 点（または 1 点）及び、その周辺の中性子束を含めて関数（3 次関数）当てはめにより、集合体内のピン毎の出力評価を行うものである。

さらに、3 次元解析は拡散計算であることから、上述で求められた最大線出力に、2 次元燃焼計算で求められた Burnup-Factor（新燃料組成での出力密度とバッチ平均燃焼組成での出力密度の比）を乗じ、集合体のバッチ交換および燃料の組成変化の効果を考慮する必要がある。ここで、Burnup-Factor は制御棒領域を Na フォロワとした 2 次元 RZ 燃焼計算により得られるもので、2 次元 RZ 体系の各燃焼領域毎に求められるが、上記で求めた最大線出力の発生位置に対応する燃焼領域における最大値を使用している。

最大線出力の算出例を表 4.4-1 に示す。

4.5 集合体出力履歴

集合体出力履歴は、「MOSES」で求められた流量領域毎の最大出力発生集合体に対するもので、燃料交換バッチ分の履歴とする。ここで、3 次元解析は拡散計算であるため、対象とする集合体の平衡サイクル初期および末期の集合体平均出力に 2 次元燃焼計算で各バッチに対して求められた Burnup-Factor を乗じて履歴を作成している。

さらに、高度化炉心解析に於ける集合体出力履歴は、補正值を乗じて炉の反応度の誤差吸収を考慮したものとなっている。具体的には、まず、各粗調整棒挿入パターン毎に流量領域毎の最大出力発生集合体に対する出力履歴を作成する。次に、各流量領域毎に粗調整棒挿入パターン毎に求められた燃料交換バッチ分の出力履歴を比較し、その中で最大となる集合体出力と基準計算における集合体出力の比から補正係数を求める。さらに、求められた各流量領域毎の燃料交換バッチ分の補正係

数の中から最大値を選出する。選出した値を最終的な補正係数として基準計算結果の各流量領域毎の燃料交換バッチ分の集合体出力に乘じたものを出力履歴としている。算出例を表 4.5-1 に示し、図にしたものと表 4.5-1 をしめす。

ここで、Burnup-Factorについて、この値は 2 次元燃焼計算時の燃焼ゾーン毎に求められる。しかし、出力履歴は集合体 1 体当たりの出力に着目したものである。従って、径方向は層単位で分けられるが、軸方向については燃焼ゾーン毎に求められた値を出力重みで平均操作している。以下に平均操作の手法を示す。

$$(BF)_{ave}^I = \frac{\sum_z (BF)_z^I P_z^I}{\sum_z P_z^I}$$

$(BF)_{ave}^I$: 軸方向が平均化された層 I の Burnup-Factor

$(BF)_z^I$: 層 I におけるゾーン Z の Burnup-Factor

P_z^I : 層 I におけるゾーン Z の出力

\sum : 和は層 I の軸方向ゾーン全てに対して行う

4.6 軸方向出力分布

軸方向出力分布は、各流量領域毎の最大出力発生集合体に対するものとし、「MOSES」で軸方向の各プレーン毎に求められた集合体内径方向平均の出力密度に対して 2 次元燃焼計算で求めた Burnup-Factor を乗じ、得られた軸方向の出力密度の中の最大値を 1.0 とした相対値で求めている。なお、出力密度は平衡初期、末期ともに基準計算の結果のみ使用している。

ここで、高度化炉心解析は炉の反応度の誤差吸収を考慮した粗調整棒挿入パターン毎に計算を行っているが、上記 4.4 節で求めた最大線出力や 4.5 節で求めた出力履歴の様な補正係数は求めない。これは、最大値を 1.0 とした相対値の分布に対して補正係数を算出してもその効果がキャンセルされるためである。つまり、この粗調整棒の位置変動の効果に対する補正係数は、粗調整棒位置の変動により各流量領域毎の集合体出力が変動することから、保守的な観点で出力変動の範囲内の最大値

を求めるために使用した係数である。従って、集合体 1 体当たりの補正係数は各部で同一の値となるため、粗調整棒を基準位置としたときの計算結果に補正係数を掛けたとしても、最大出力密度を 1.0 とすると出力分布は補正前のものと同等となってしまう。

次に、Burnup-Factor について、Burnup-Factor は 2 次元燃焼計算時の燃焼ゾーン毎に求められる。しかし、上記 4.1 で示したとおり平成 10 年度以前のバージョンの「MOSES」コードは計算できる領域数に制限があり、入力する組成についても 2 次元燃焼計算で得られた軸方向の複数領域の組成を均質化して計算を実施していた。従って、同様に Burnup-Factor についても、径方向を層単位に分け、軸方向を入力組成の均質化と同じ燃焼ゾーンで平均操作を行う。なお、Burnup-Factor の平均操作は燃焼ゾーンの出力重みで行っている。よって、軸方向出力分布に用いる Burnup-Factor は、炉心部とプランケット部で使用する値が異なり、4.5 節の出力履歴の算出に用いている値と異なっている。以下に平均操作の手法を示す。

$$(BF)_{ave}^i = \frac{\sum_{Z \in i} (BF)_Z P_Z}{\sum_{Z \in i} P_Z}$$

$(BF)_{ave}^i$: グループ i として複数ゾーンを平均化した Burnup-Factor

$(BF)_Z$: グループ i に含まれるゾーン Z の Burnup-Factor

P_Z : グループ i に含まれるゾーン Z の出力

\sum : 和はグループ i に含まれるゾーン全てに対して行う

4.7 出力ピーピング係数

出力ピーピング係数は、上記 4.4 節で示した最大線出力と同様に、流量領域毎または層毎の最大出力発生集合体に対するものとし、集合体内の燃料ピンに着目した評価を行う必要がある。従って、集合体内出力分布評価プログラムを用いて、集合体内の燃料ピン毎の特性評価を行い、集合体内の軸方向平均の出力ピーピング係数を求めている。

ここで、集合体内出力分布評価プログラムには、燃料評価用（「FLOWER」コ

ード用)として、燃料ピン全長に亘って積分した出力に基づく分布を求める機能がある。しかし、本機能は集合体内の最大出力を 1.0 とした相対値で出力するため、集合体内平均出力を 1.0 としたピーピング係数に変換する必要がある。

また、高度化炉心解析では、炉の反応度の誤差吸収を考慮した各粗調整棒挿入パターン毎に 3 次元解析を行っている。従って、まず、各粗調整棒挿入パターン毎に上述の手法で流量領域毎の最大出力発生集合体に対する出力ピーピング係数を求め、各々の出力ピーピング係数を流量領域毎に比較して最大値を求める。次に、その最大値と基準計算のピーピング係数から各流量領域毎に補正係数を算出し、求めた補正係数の中から最大値を選出する。この選出した値を最終的な補正係数として基準計算の流量領域毎の値に乘じたものを出力ピーピング係数としている。

4.8 最大高速中性子束

最大高速中性子束についても、上記 4.4 節の最大線出力および 4.7 節の出力ピーピング係数と同様に「MOSES」計算で得られた流量領域毎または層毎の最大出力発生集合体に対するものとし、集合体内の燃料ピンに着目した評価を行う必要がある。従って、集合体内出力分布評価プログラムを用いて集合体内の燃料ピン毎の特性評価を行い、集合体内の最大高速中性子束を求めている。

4.9 最大高速中性子照射量

最大高速中性子束に照射時間を乗じて最大高速中性子照射量を求める。このとき平衡初期と末期で最大高速中性子束が発生する集合体もしくは燃料ピンが異なる場合は、両集合体もしくは燃料ピンについて平衡初期および末期の高速中性子束を求め、平衡サイクルを通した平均の高速中性子束が大きいものを用いて最大高速中性子照射量を求める。ただし、高度化炉心解析においては暫定的に両者の平衡サイクル平均の高速中性子束をさらに平均した値を用いて算出している。

4.10 軸方向高速中性子束分布

最大高速中性子束発生集合体の軸方向の高速中性子束分布は、最大値を 1.0 とし

た相対値で求める。最大値を 1.0 とした相対値で求めるため分布は軸方向出力分布と同様、高度化炉心解析時の炉の反応度の誤差吸収を考慮した補正係数の算出は行わない。なぜなら、制御棒の位置変動に伴う補正係数は、各部の中性子束に対する最大値を求めるためのもので、基準計算（制御棒が基準位置にあるときの計算）における中性子束に一律に掛けるので、相対値で表す軸方向分布の場合は、補正係数の影響がキャンセルされるためである。

さらに、高速中性子束分布については集合体のバッチ交換および燃料の組成変化についても考慮しないため Burnup-Factor も乗じていない。

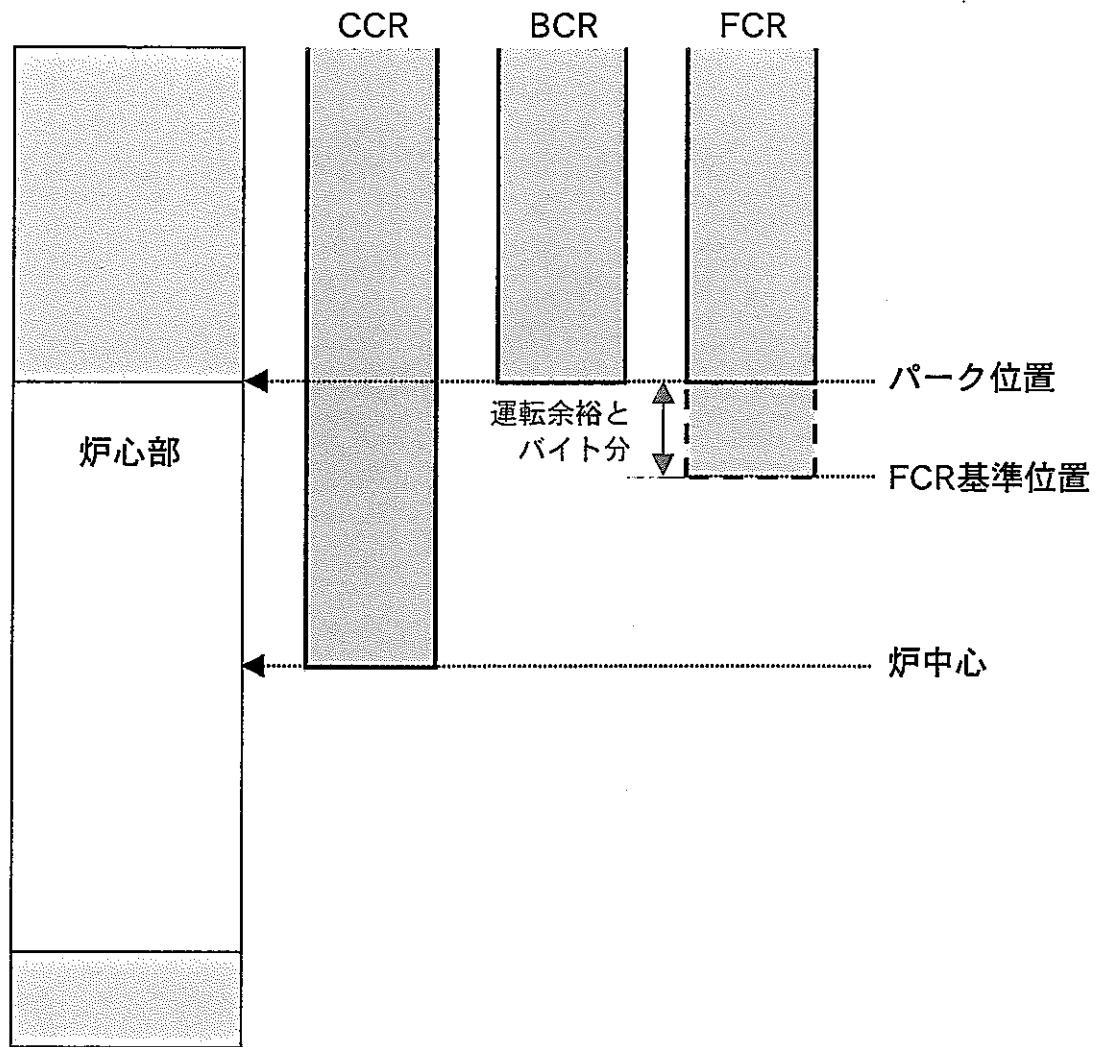
4.11 ピン最大燃焼度

集合体および燃料ピンの燃焼度は以下のように定義する。

- ・集合体燃焼度 = (平衡初期の集合体出力 + 平衡末期の集合体出力) / 2
×運転サイクル長さ × 燃料交換バッチ数 / 初期炉心の重金属量 (集合体)
- ・ピン最高燃焼度 = (平衡初期のピン出力 + 平衡末期のピン出力) / 2
×運転サイクル長さ × 燃料交換バッチ数 / 初期炉心の重金属量 (ピン)

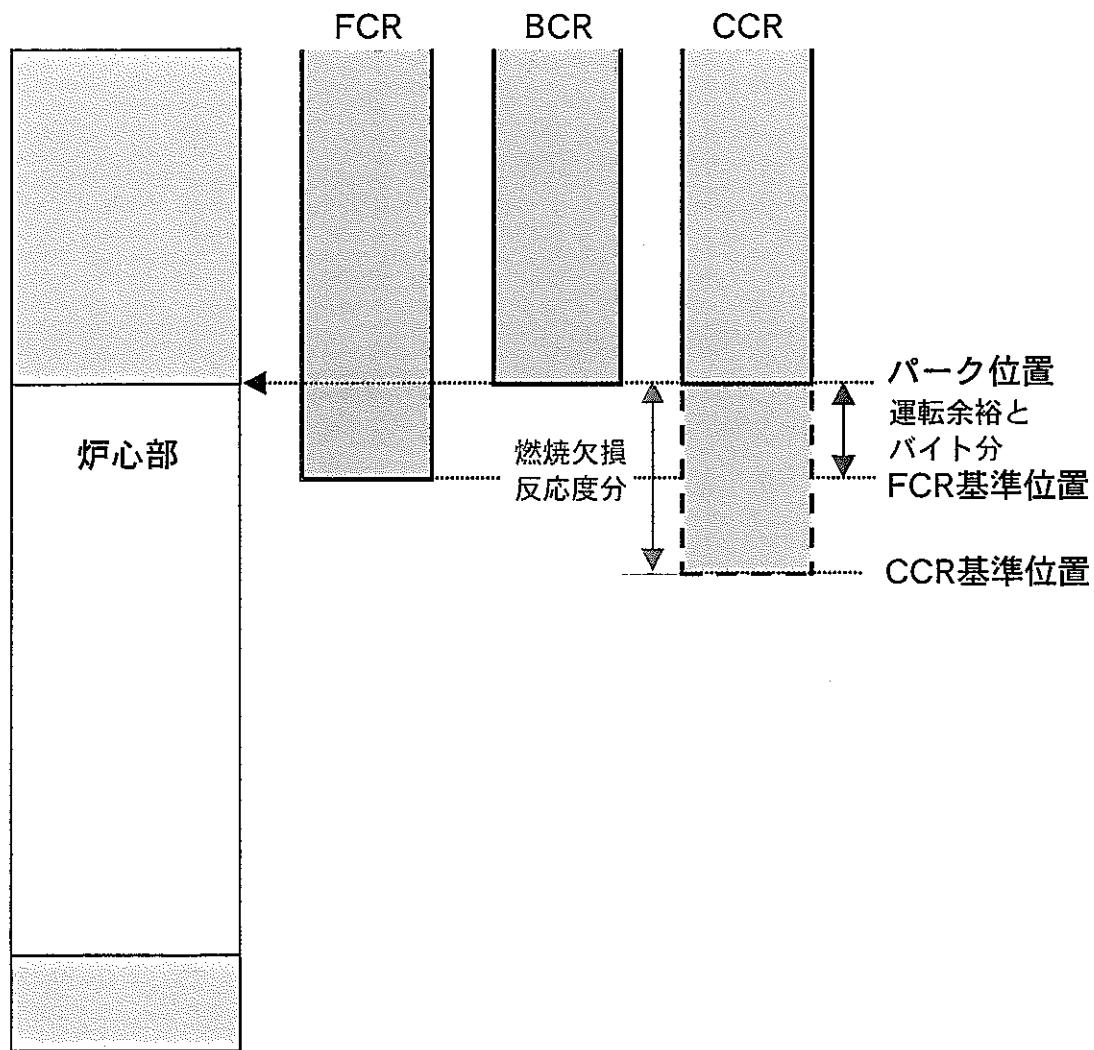
ここで、ピン最高燃焼度を求める際、ピン出力は燃料ピン全長に亘って積分した出力ではなく、燃料ピンに於ける炉心燃料部分の平均出力とする。従って、当 Gr では集合体内出力分布評価プログラムに指定した軸方向領域範囲内で集合体内の燃料ピン毎の平均出力を算出する機能を追加し、これを利用している。

また、上記式中の初期炉心の重金属量は、「CITATION」で計算された重金属量を集合体体数および燃料ピン本数で割った値を用いている。



※ 本図では各種制御棒のパーク位置を全て同じ位置にあるものとして示している。

図4.2-1 3次元解析時の微調整棒の基準位置



※ 本図では各種制御棒のパーク位置を全て同じ位置にあるものとして示している。

図4.2-2 3次元解析時の粗調整棒の基準位置

表4.4-1 最大線出力の算出例

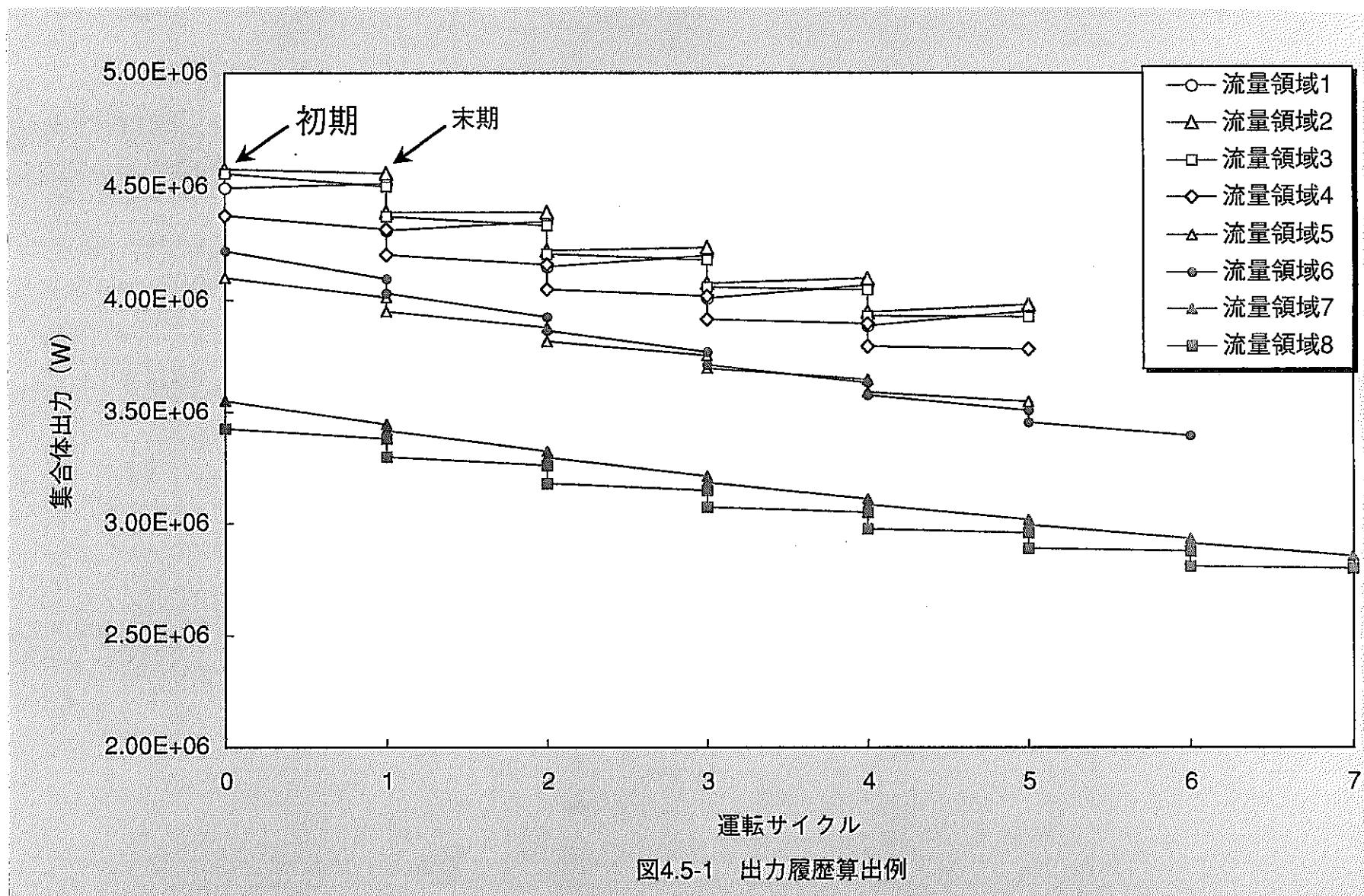
粗調整棒位置	最大線出力* (W/cm)	
	内側炉心	外側炉心
パーク	476.2	422.0
炉の反応度の誤差吸収分 基準位置から引き抜き	488.3	432.6
基準位置	484.3	435.0
炉の反応度の誤差吸収分 基準位置から挿入	477.4	437.5
全挿入	441.5	432.8

* : 表中の値は全てBurnup-Factorを乗じている。

□ : 対象炉心の最大線出力

表4.5-1 集合体出力履歴の算出方法

流量領域	運転サイクル	粗調整棒位置										各流量領域の各サイクルにおける最大値	基準結果と最大値の補正係数	補正係数の最大値	基準位置の計算結果に補正係数の最大値を乗じたもの				
		炉の反応度の誤差吸収分基準位置から引き抜き		基準位置		炉の反応度の誤差吸収分基準位置から挿入													
		集合体No.	集合体出力 (W)	集合体No.	集合体出力 (W)	集合体No.	集合体出力 (W)	集合体No.	集合体出力 (W)	集合体No.	集合体出力 (W)								
内側炉心	1	1	4.472E+06	9	4.447E+06	9	4.427E+06	9	4.472E+06	9	4.494E+06	1.00553	1.00446	4.494E+06					
		2	4.289E+06		4.266E+06		4.246E+06		4.289E+06		4.311E+06								
		3	4.130E+06		4.108E+06		4.089E+06		4.130E+06		4.151E+06								
		4	3.991E+06		3.969E+06		3.951E+06		3.991E+06		4.011E+06								
		5	3.867E+06		3.846E+06		3.828E+06		3.867E+06		3.887E+06								
	2	1	4.552E+06	22	4.532E+06	22	4.515E+06	22	4.552E+06	22	4.580E+06	1.00446	1.00446	4.580E+06					
		2	4.361E+06		4.342E+06		4.326E+06		4.361E+06		4.388E+06								
		3	4.196E+06		4.177E+06		4.162E+06		4.196E+06		4.222E+06								
		4	4.051E+06		4.033E+06		4.019E+06		4.051E+06		4.076E+06								
		5	3.923E+06		3.906E+06		3.892E+06		3.923E+06		3.947E+06								
外側炉心	3	1	4.518E+06	40	4.513E+06	40	4.511E+06	40	4.518E+06	40	4.561E+06	1.00099	1.00099	4.561E+06					
		2	4.330E+06		4.325E+06		4.323E+06		4.330E+06		4.371E+06								
		3	4.166E+06		4.161E+06		4.159E+06		4.166E+06		4.206E+06								
		4	4.021E+06		4.017E+06		4.015E+06		4.021E+06		4.060E+06								
		5	3.894E+06		3.890E+06		3.888E+06		3.894E+06		3.931E+06								
	4	1	4.327E+06	65	4.329E+06	65	4.331E+06	65	4.331E+06	65	4.375E+06	1.00055	1.00055	4.375E+06					
		2	4.156E+06		4.157E+06		4.160E+06		4.160E+06		4.201E+06								
		3	4.005E+06		4.007E+06		4.009E+06		4.009E+06		4.049E+06								
		4	3.872E+06		3.874E+06		3.876E+06		3.876E+06		3.915E+06								
		5	3.754E+06		3.756E+06		3.758E+06		3.758E+06		3.796E+06								
外側炉心	5	1	4.040E+06	96	4.058E+06	132	4.075E+06	132	4.075E+06	132	4.101E+06	1.00428	1.00428	4.101E+06					
		2	3.892E+06		3.909E+06		3.926E+06		3.926E+06		3.951E+06								
		3	3.761E+06		3.777E+06		3.794E+06		3.794E+06		3.817E+06								
		4	3.644E+06		3.660E+06		3.675E+06		3.675E+06		3.699E+06								
		5	3.538E+06		3.554E+06		3.569E+06		3.569E+06		3.592E+06								
	6	1	4.153E+06	132	4.174E+06	175	4.201E+06	175	4.201E+06	175	4.219E+06	1.00625	1.00625	4.219E+06					
		2	3.969E+06		3.990E+06		4.015E+06		4.015E+06		4.032E+06								
		3	3.805E+06		3.824E+06		3.848E+06		3.848E+06		3.865E+06								
		4	3.657E+06		3.675E+06		3.698E+06		3.698E+06		3.714E+06								
		5	3.523E+06		3.541E+06		3.563E+06		3.563E+06		3.578E+06								
外側炉心	7	1	3.473E+06	175	3.512E+06	173	3.550E+06	173	3.550E+06	173	3.550E+06	1.01060	1.01060	3.550E+06					
		2	3.343E+06		3.381E+06		3.417E+06		3.417E+06		3.417E+06								
		3	3.226E+06		3.262E+06		3.297E+06		3.297E+06		3.297E+06								
		4	3.118E+06		3.154E+06		3.187E+06		3.187E+06		3.187E+06								
		5	3.020E+06		3.055E+06		3.087E+06		3.087E+06		3.087E+06								
		6	2.932E+06		2.965E+06		2.996E+06		2.996E+06		2.996E+06								
		7	2.851E+06		2.883E+06		2.914E+06		2.914E+06		2.914E+06								
外側炉心	8	1	3.381E+06	173	3.391E+06	173	3.397E+06	173	3.397E+06	173	3.427E+06	1.00191	1.00191	3.427E+06					
		2	3.255E+06		3.264E+06		3.270E+06		3.270E+06		3.299E+06								
		3	3.141E+06		3.149E+06		3.155E+06		3.155E+06		3.183E+06								
		4	3.036E+06		3.044E+06		3.050E+06		3.050E+06		3.077E+06								
		5	2.941E+06		2.949E+06		2.954E+06		2.954E+06		2.980E+06								
		6	2.854E+06		2.862E+06		2.867E+06		2.867E+06		2.892E+06								
		7	2.776E+06		2.783E+06		2.788E+06		2.788E+06		2.813E+06								



第5章 反応度係数

5.1 設計計算手法の概要

2次元解析で各種反応度係数を求める。反応度係数計算のフロー図を図5.1-1示す。

ドップラ反応度、ボイド反応度、動特性パラメータならびに各密度係数は、2次元・3次元拡散摂動理論計算コード「PERKY」による中性子束および随伴中性子束に基づく摂動計算で求められる。また、形状係数等の一部の反応度係数については、「CITATION」コードを用いた拡散直接計算で求め、膨張係数、等温温度係数、出力係数は上述で求めた各種反応度係数および各領域の体積比、温度条件等を入力情報として後処理プログラムである「FBRDB」コードを用いて求める。なお、「FBRDB」を用いて各種係数を算出する際の温度条件は断面積作成時に比べ、より詳細な情報が必要となる。表5.1-1に高度化炉心解析時に用いる反応度係数算出時の温度条件例を示し、表5.1-2に現行高燃解析時に用いる温度条件例を示す。

ここで、上述の中性子束および随伴中性子束は「CITATION-FBR」コードにより求められる。また、動特性パラメータ算出時には遅発中性子データが必要となるが、当Grで用意しているものは18群用のデータのみである。従って、反応度係数計算の一連の流れの中で用いる断面積は全て18群としている。また、後処理プログラムの「FBRDB」コードは大洗工学センターで温度係数計算コードとして整備されたものであるが、当Grではそれを基に改良し、同様の計算を表計算ソフトで行えるようにしている。

5.2 「PERKY」コードによる摂動計算

「PERKY」コードには一次摂動計算と厳密摂動計算があり、各々に対してミクロ断面積と原子数密度を入力とした核種毎のミクロ計算と、マクロ断面積を入力とした領域毎のマクロ計算を実施する事ができる。しかし、当Grは通常、一次摂動理論に基づくミクロ計算をレファレンスとしている。

5.3 縮約実効断面積の作成（18群実効断面積）

反応度係数計算を実施する場合、基準の縮約実効断面積と摂動用の縮約実効断面積が必要となる。以下にその作成手順を示す。

- ① 「CITATION」コードを用いて各燃料仕様の炉心で燃焼計算を実施し、各領域毎に平衡サイクル初期および末期の原子数密度を算出する。この時の実効断面積は第2章に記した設計基準炉心計算用の7群実効断面積である。
- ② 反応度係数は平衡サイクル初期および末期の各々の反応度を計算するため、
①で算出した平衡初期、末期の原子数密度と必要時点（平衡初期、末期）の各領域温度を用いて「SLAROM」コードで70群実効断面積を作成する。ただし、断面積作成時の領域温度を第2章の表2.1-1に示したものじゅ高度化炉心検討用の必要時点（初期、末期）の評価温度とするため、Naの個数密度については燃焼計算で得られた値をそのまま使用せずに、2.1節の式と必要時点の評価温度を用いて新たに計算した値としている。

また、高度化炉心解析時はこの断面積作成に於いて拡散係数をフラックス重みの輸送断面積から得られるものとしていた。その内容については③に記す。

- ③ 上述で作成した70群断面積を「JOINT-CITATION」コードを用いて18群実効断面積に縮約する。

ここで、高度化炉心解析を行っていた当時、「JOINT」コードを用いたカレント重みの断面積の縮約方法についてミクロ断面積はその縮約方法が明確にされていたが、マクロ断面積の縮約方法については明確にされていなかった。

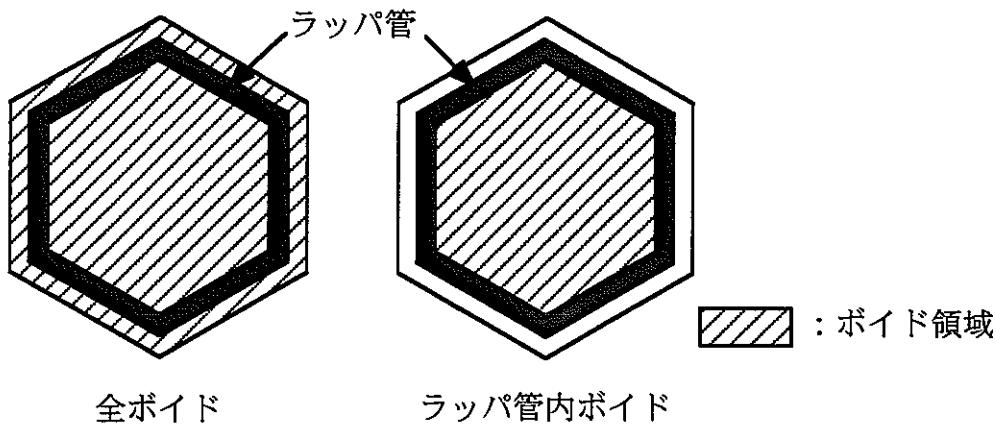
従って、「PERKY」によりミクロ断面積を用いた摂動計算を行う場合には問題なかったが、摂動計算で必要となる中性子束および随伴中性子束については「CITATION-FBR」コードでマクロ断面積を用いた計算で求められるため、反応度係数計算の一連の流れの中で不整合が生じる可能性があった。これにより高度化炉心解析では②の70群断面積作成に於いて拡散係数をフラックス重みの輸送断面積から得られるものとしていた。

- ④ 一次摂動のミクロ計算でドップラ反応度およびボイド反応度を計算する場合、各々に摂動計算用断面積が必要となる。ドップラ係数計算用は、各領域温度を

500°C増加させた実効断面積で、ナトリウムボイド反応度計算用は、各領域をボイド状態（全Naボイドもしくはラッパ管内Naボイド）にした実効断面積である。従って、基準断面積と同様に上述②～③の手順で摂動計算用断面積を作成する。

5.4 ナトリウムボイド反応度

ナトリウムボイド反応度には、摂動計算を行って求める方法（摂動計算法）と、2次元RZ拡散計算により基準炉心の実効増倍率と、ナトリウムボイド組成を用いた炉心の実効増倍率を算出し、直接反応度変化量を求める方法（直接計算法）がある。また、ナトリウムボイド組成としては、ラッパ管間ギャップを含めた全てのナトリウムをボイド状態にした全ボイドとラッパ管内のナトリウムのみをボイド状態にしたラッパ管内ボイドがある。全ボイドラッパ管内ボイドの違いを以下に示す。



(a) 摂動計算法

摂動計算は「PERKY」コードで実施する。「PERKY」コードは4種類の摂動計算（厳密摂動計算または一次摂動計算に対して、マクロ計算またはミクロ計算の計4種類）を実施できるが、通常は一次摂動のミクロ計算をレファレンスとしている。一次摂動ミクロ計算では、「CITATION-FBR」コードを用いた2次元RZ拡散計算で求めた基準炉心の中性子束および随伴中性子束、各領域毎の摂動前後の組成データ、そして、基準炉心および摂動計算用の実効断面積を使用する。当Grではこ

の基準炉心用断面積及びNa ボイド組成断面積（ナトリウムをボイド状態にした場合の断面積）の群数は18群としている。

(b) 直接計算法

直接計算は「CITATION-FBR」コードを用いた2次元RZ拡散計算で実施する。通常は70群の基準断面積とボイド組成断面積を用いて計算を実施するが、摂動計算法の結果と比較するために18群断面積で計算する場合もある。拡散計算の結果を用いて反応度変化量は下式で求められる。

$$\rho = \frac{\Delta k}{kk'}$$

$$\Delta k = k' - k$$

k : 基準炉心の実効増倍率

k' : Na ボイド時の実効増倍率

ここで、直接計算法で求める反応度変化量には、①各領域毎に求めていく方法と②ボイド組成領域を炉中心から炉外に拡大させて求める方法がある。具体的に、内側炉心および外側炉心の反応度を求める場合、①は内側炉心をボイド組成にしたときの反応度変化量と外側炉心をボイド組成にしたときの反応度変化量を求め、各々の反応度変化量の合計を炉心部（内側炉心+外側炉心）の反応度変化量とする方法である。②は、内側炉心をボイド組成にしたときの反応度変化量と炉心部（内側炉心+外側炉心）をボイド組成にしたときの反応度変化量を求め、炉心部の反応度変化量から内側炉心の反応度変化量を差し引くことで外側炉心の反応度変化量を求める方法である。

上記の議論は内側炉心のみをボイドにしたときのNa ボイド反応度（ $\Delta k(\text{内})$ ）と外側炉心のみをボイドにしたときのNa ボイド反応度（ $\Delta k(\text{外})$ ）の合計が、内側炉心及び外側炉心を同時にボイドにしたときのNa ボイド反応度（ $\Delta k(\text{内+外})$ ）と厳密には等しくならないことから来ている。直接計算は厳密摂動計算に対応しており、厳密摂動計算においては、一般に $\Delta k(\text{内}) + \Delta k(\text{外}) \neq \Delta k(\text{内+外})$ である。ちなみに

一次摂動計算では $\Delta k(\text{内}) + \Delta k(\text{外}) = \Delta k(\text{内+外})$ が成立するので、上記の議論は不要である。

5.5 動特性パラメータ

動特性パラメータは、基準炉心を対象として「CITATION-FBR」コードの2次元RZ拡散計算で求められた中性子束および随伴中性子束を基に、摂動計算コード「PERKY」を用いて算出する。以下に動特性パラメータの計算式を示す。

また、「PERKY」コードで入力している18群遅発中性子スペクトルは、JFS-3-J3.2核定数ライブラリーと Saphier のデータ^[7]のエネルギー境界が一致していないため、Saphier のデータを基にレサジー幅を考慮して算出したスペクトルとなっている。

(a) 実効遅発中性子割合 (β_{eff})

$$\beta_{\text{eff}} = \sum_j \beta_{\text{eff}}^j$$

$$\beta_{\text{eff}}^j = \frac{\sum_m \beta_j^m \int V \left\{ \sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \phi^i \right\} \left\{ \sum_i \chi_d^{m,i} \phi^{*i} \right\} dV}{\sum_m \int V \left\{ \sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \phi^i \right\} \left\{ \beta_j^m \sum_i \chi_d^{m,i} \phi^{*i} + (1 - \beta_j^m) \sum_i \chi_p^{m,i} \phi^{*i} \right\} dV}$$

(b) 即発中性子寿命

$$\tau_p = \frac{\int V \sum_i (\phi^i \phi^{*i} \sqrt{V^i}) dV}{\sum_m \int V \left\{ \sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \phi^i \right\} \left\{ \sum_i \chi_p^{m,i} \phi^{*i} \right\} dV}$$

(c) 崩壊定数

$$\lambda_{\text{eff}}^j = \frac{\sum_m \lambda_j^m \beta_j^m \int V \left(\sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \phi^i \right) dV}{\sum_m \beta_j^m \int V \left(\sum_i \nu \Sigma_f^{m,i} \phi^i \right) dV}$$

(d) 逆時間反応度 (Ih)

$$I_h = \frac{\ell_p}{T \cdot k_{\text{eff}}} + \sum_j \frac{\beta_{\text{eff}}^j}{1 + \lambda_{\text{eff}}^j \cdot T}$$

記号

I : エネルギーグループ

m : 元素

j : j 番目遅発中性子グループ

 β_j^m : 元素 m の遅発中性子割合 $\chi_d^{m,i}$: 元素 m の遅発中性子スペクトル $\chi_p^{m,i}$: 元素 m の即発中性子スペクトル

v : 核分裂当たり平均中性子発生数

 $\Sigma_f^{m,i}$: 元素 m の i エネルギーグループの核分裂断面積 ϕ^i : i エネルギーグループの中性子束 ϕ^{*i} : i エネルギーグループの随伴中性子束 V^i : i エネルギーグループの平均中性子速度 λ_j^m : 元素 m の崩壊定数

T : ペリオド

 k_{eff} : 実効増倍率

5.6 ドップラー係数

ドップラー係数は、定格出力運転時の燃料温度分布に基づいて計算したマクロ断面積 $\Sigma(T)$ (T : 温度 $^{\circ}\text{K}$) と領域温度を一様に 500°K 増加した場合のマクロ断面積 $\Sigma'(T')$ ($T' = T + 500^{\circ}\text{K}$) との差 $\delta \Sigma = \Sigma' - \Sigma$ を用いて摂動反応度 $\Delta k/kk'$ を求めた後、下式をもとに計算する。

$$T \frac{dk/kk'}{dT} = \frac{\Delta k/kk'}{\ln\left(\frac{T+500}{T}\right)}$$

T : 温度 ($^{\circ}\text{K}$)

摂動反応度は「PERKY」コードで求める。「PERKY」コードは4種類の摂動計算を実施できるが、通常は一次摂動のミクロ計算をレファレンスとしている。

一次摂動ミクロ計算は、「CITATION-FBR」コードを用いた2次元RZ拡散計算で求めた基準炉心の中性子束および随伴中性子束を基に、各領域毎の組成データと18群基準断面積および18群ドップラー断面積を用いて計算を実施する。

次に、求められた摂動反応度を用いて上記式に基づいた計算をすることでドップラー係数が求められる。

5.7 密度係数

密度係数は、燃料、構造材、冷却材の各組成が変化したときの反応度変化割合である。従って、次式で定義される。

$$K_x = \frac{(\Delta k/kk')}{(\Delta \rho/\rho)_x}$$

x : 各組成 (燃料 : F、構造材 : S、冷却材 : C)

$(\Delta \rho/\rho)_x$: 各組成密度の変化割合

$\Delta k/kk'$: 反応度変化

① 燃料密度係数 : K_F

燃料組成 (U, Pu, O₂, FP, TRU) が変化したときの反応度変化。

② 構造材密度係数 : K_S

構造材組成 (Fe, Cr, Ni, Mo, Mn, etc.) が変化したときの反応度変化。

③ 冷却材密度係数 : K_C

冷却材組成 (Na) が変化したときの反応度変化。

密度係数は「PERKY」コードと後処理プログラムである「POSTPK」を用いて求められる。「PERKY」コードは4種類の摂動計算を実施できるが、通常は一次摂動のミクロ計算をレファレンスとしている。

「PERKY」コードの一次摂動ミクロ計算で密度係数を計算する場合、

「CITATION-FBR」コードの2次元RZ拡散計算で基準炉心を対象として求めた中性子束および随伴中性子束、および各領域毎の組成変化のデータと18群基準断面積が必要となる。

ここで、当Grでは密度係数算出時の組成変化量を2倍としている。これは、後処理プログラムの「POSTPK」が上記式の組成変化割合($\Delta \rho / \rho$)を次式で表しており、その式中の組成変化量(a)が2倍で固定されているためである。

$$\Delta \rho / \rho = (a\rho - \rho) / \rho = a - 1$$

従って、実証炉設計時の原電手法のように、組成変化量を10%減少として一次摂動のミクロ計算を実施する場合は、出力結果にa=0.9として $1/(a-1)$ を掛け必要がある。

5.8 形状係数

形状係数は以下に示すとおり、炉心組成を変えずに炉心高さ或いは炉心半径が増加した場合の反応度変化の割合であり、「CITATION-FBR」コードを用いた2次元RZ拡散計算で求められる。この時、炉心部の高さ方向および半径方向の形状変化幅は炉心領域3%増、ブランケット領域10%増とする。この変化幅は「もんじゅ炉心設計書」で用いている値であり、実証炉設計の原電手法では炉心領域10%増している。

また、形状係数は直接計算で求められるため、70群実効断面積を用いて計算することもできるが、密度係数とともに出力係数等の算出に用いられるため18群実効断面積を用いて計算する。さらに、出力係数等を算出する際は、内側および外側の各炉心領域毎の形状係数が必要となる。従って、直接計算で求めた炉心部の形状係数を各領域の燃料密度係数の比で重み付けして各領域の形状係数を求めている。

(a) 炉心高さ係数： K_H

炉心高さをHとしたとき、炉心高さを ΔH 増加させた時の反応度変化 $\Delta k/kk'$ により次の通り算出する。

$$K_H = \frac{(\Delta k/kk')}{(\Delta H/H)}$$

(b) 炉心半径係数 : K_R

炉心半径を R としたとき、炉心半径を ΔR 増加させた時の反応度変化 $\Delta k/kk'$ により次の通り算出する。

$$K_R = \frac{(\Delta k/kk')}{(\Delta R/R)}$$

5.9 膨張反応度係数

膨張反応度係数は炉心およびブランケット中の燃料、構造材、冷却材の温度が変化し、膨張効果等により反応度が変化する割合を表し、形状係数および温度条件、各領域の体積比を基に「FBRDB」コードで算出される。膨張係数には①瞬間膨張係数と②平均膨張係数がある。以下に膨張反応度係数の定義式と算出方法を示す。

(a) 線膨張係数

線膨張係数は、燃料、構造材、冷却材の各膨張反応度係数を算出する際に用いる係数である。この線膨張係数を算出する物性式に瞬間膨張係数を求めるものと平均膨張係数を求めるものがある。

(i) 燃料

燃料の線膨張係数は下式で表される。ただし、下式は MOX 燃料に対する物性式である。

① 瞬間膨張係数

$$\alpha_{F1}(T) = \{1 - 5.1 \cdot (O/M - 2)\} \times \{W/O \times \alpha_1 + (1 - W/O) \times \alpha_2\}$$

$$\alpha_1 = 8.496 \times 10^{-6} + 4.302 \times 10^{-9} \times T + 11.14 \times 10^{-16} \times T^2$$

$$\alpha_2 = 7.107 \times 10^{-6} + 5.162 \times 10^{-9} \times T + 3.42 \times 10^{-13} \times T^2$$

T : 温度 (°C)

O/M : O/M 比

W/O : PuO₂ 富化度 (w/o)

② 平均膨張係数

$$\alpha_{F2}(T_1, T_2) =$$

$$\{1 - 5.1 \cdot (O/M - 2)\} \times \left\{ W/O \times \frac{\alpha_1(T_1) - \alpha_1(T_2)}{T_1 - T_2} + (1 - W/O) \times \frac{\alpha_2(T_1) - \alpha_2(T_2)}{T_1 - T_2} \right\}$$

$$\alpha_1(T) = 8.496 \times 10^{-6} \times T + \frac{4.302 \times 10^{-9}}{2} \times T^2 + \frac{11.14 \times 10^{-16}}{3} \times T^3$$

$$\alpha_2(T) = 7.107 \times 10^{-6} \times T + \frac{5.162 \times 10^{-9}}{2} \times T^2 + \frac{3.42 \times 10^{-13}}{3} \times T^3$$

(ii) 構造材

構造材の線膨張係数は下式で表される。ただし、下式は SUS316 に対する物性式である。

① 瞬間膨張係数

$$\alpha_{S1}(T) =$$

$$\{14.8778 + 1.6999 \times 10^{-2} \times T - 1.4541 \times 10^{-5} \times T^2 + 4.5929 \times 10^{-9} \times T^3\} \times 10^{-6}$$

② 平均膨張係数

$$\alpha_{S2}(T_1, T_2) = \frac{\alpha(T_1) - \alpha(T_2)}{T_1 - T_2} \times 10^{-6}$$

$$\alpha(T) =$$

$$14.8778 \times T + \frac{1.6999 \times 10^{-2}}{2} \times T^2 - \frac{1.4541 \times 10^{-5}}{3} \times T^3 + \frac{4.5929 \times 10^{-9}}{4} \times T^4$$

(iii) 冷却材

冷却材の線膨張係数は下式で表される。

① 瞬間膨張係数

$$\alpha_{C1}(T) = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}$$

$$\alpha_1 = -0.22976 - 2 \times 1.46 \times 10^{-5} \times T + 3 \times 5.638 \times 10^{-9} \times T^2$$

$$\alpha_2 = 950.1 - 0.22976 \times T - 1.46 \times 10^{-5} \times T^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times T^3$$

② 平均膨張係数

$$\alpha_{C2}(T_1, T_2) = \frac{\alpha_2(T_1) - \alpha_2(T_2)}{(T_1 - T_2) \times \alpha_2(T_1)}$$

$$\alpha_2(T) = 950.1 - 0.22976 \times T - 1.46 \times 10^{-5} \times T^2 + 5.638 \times 10^{-9} \times T^3$$

(b) 燃料（軸方向）膨張係数

炉心燃料が膨張し、炉心高さ、軸方向プランケット高さが増加する。これに応じて、炉心燃料密度は減少する。ただし、径方向には燃料ペレットが膨張しても、均質組成としては、不变であるので、反応度変化は生じない。

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{T} \right)_{fuel} = \alpha_F(T) \cdot (K_H - K_F)$$

T : 温度 (°C)

$\alpha_F(T)$: 燃料の線膨張係数

(c) 構造材膨張係数

(i) 被覆管膨張係数

被覆管が軸方向に膨張することにより、炉心内構造材密度が減少する。

$$\frac{\Delta k/kk'}{T} = -\alpha_S(T) \cdot \frac{V_{clad}}{V_S} \cdot K_S$$

$\alpha_S(T)$: 構造材の線膨張係数

V_S : 構造材の体積比 ($V_S = V_{clad} + V_{wrapper} + V_{spacer}$)

V_{clad} : 被覆管の体積比

$V_{wrapper}$: ラッパ管の体積比

V_{spacer} : スペーサの体積比

径方向に膨張すると、冷却材を排除し、冷却材体積比を減少させ、これにより冷却材原子数密度が減少する。

$$\frac{\Delta k/kk'}{T} = -2\alpha_s(T) \cdot \frac{V_{pin}}{V_{Na}} \cdot K_C$$

V_{pin} : 燃料要素の体積比

V_{Na} : 冷却材の体積比

従って、これらをまとめると

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{T} \right)_{clad} = -\alpha_s(T) \cdot \left(\frac{V_{clad}}{V_s} \cdot K_s + \frac{2V_{pin}}{V_{Na}} \cdot K_C \right)$$

となる。ただし、スペーサの膨張効果は無視する。

(ii) ラッパ管膨張係数

(i)と同じ考え方により、軸方向の膨張による反応度変化は

$$\frac{\Delta k/kk'}{T} = -\alpha_s(T) \cdot \frac{V_{wrapper}}{V_s} \cdot K_s$$

径方向の膨張による反応度変化は

$$\frac{\Delta k/kk'}{T} = -2\alpha_s(T) \cdot \frac{V_{wrapper}}{V_{Na}} \cdot K_C$$

従って、これらをまとめると

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{T} \right)_{wrapper} = -\alpha_s(T) \cdot \left(\frac{V_{wrapper}}{V_s} \cdot K_s + \frac{2V_{wrapper}}{V_{Na}} \cdot K_C \right)$$

となる。

(d) 冷却材膨張係数

冷却材密度の減少に伴い、反応度が変化する。

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{T} \right)_{\text{Coolant}} = \alpha_c(T) \cdot K_c$$

$\alpha_c(T)$: 冷却材の線膨張係数

(e) 炉心支持板の膨張係数

炉心入口冷却材温度が増加して、燃料集合体を支える炉心下部の支持板が熱膨張すると、集合体間隔が径方向に広がり、以下の現象が生じる。

- (i) Na が流入増加する。
- (ii) 炉心半径、径方向プランケットの内外径が増加する。
- (iii) 燃料や構造材密度が減少する。

(i) の反応度に対する効果は次式で表せる。

$$\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} = 2\alpha_s(T) \cdot \frac{1 - V_{Na}}{V_{Na}} \cdot K_c$$

(ii) については径方向形状係数を用いて次式で表せる。

$$\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} = -2\alpha_s(T) \cdot K_R$$

(iii) については次式で表せる。

$$\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} = -2\alpha_s(T) \cdot (K_F + K_S)$$

ここで K_S には制御棒チャンネルの構造材も含むべきであるが、 K_F に較べて小さいとみなし、無視する。

(i)、(ii)、(iii) の効果をまとめると、支持板の膨張反応度係数は

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} \right)_{\text{support}} = \alpha_s(T) \cdot \left[-2 \cdot (K_F + K_S) + K_R + 2 \cdot \frac{1 - V_{Na}}{V_{Na}} \cdot K_c \right]$$

で表される。

5.10 等温温度係数

等温温度係数は膨張反応度係数とドップラー係数を基に「FBRDB」コードで算出する。計算式を以下に示す。ここで、膨張反応度係数には瞬間線膨張係数で求めた値と平均線膨張係数で求めた値があるが、もんじゅ高度化炉心検討では平均線膨張係数を用いている。

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} \right) = \sum_i \left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} \right)_i + \frac{\alpha_D}{\Delta T_D} \ln \left(\frac{T + \Delta T_D}{T} \right)$$

$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} \right)$: 等温温度係数

$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta T} \right)_i$: 各部膨張反応度係数

α_D : ドップラー係数

T : 基準温度 (°K)

ΔT_D : ドップラー効果用温度上昇分

ここで、「FBRDB」コードでは上式の膨張反応度係数を瞬間とした場合は ΔT_D が 1 (°K) となる。

5.11 出力係数

出力変化に伴う反応度変化は、大別して 2 つの要因からなる。

(a) 燃料、構造材、冷却材等の温度変化による、膨張変化に伴う反応度変化
(=膨張反応度係数)

(b) 炉心組成の温度変化による実効共鳴断面積の変化に伴う反応度変化
(=ドップラー係数)

したがって、出力変化に伴う炉心各部の温度変化を算出し、膨張反応度係数、ドップラー係数を用いて「FBRDB」コードで反応度変化を計算することによって、単位出力変化当たりの反応度、即ち、出力係数を算出する。また、使用する膨張反応度係数は瞬間線膨張係数を基に算出した値を用いる。

炉心各部の温度が出力に比例するとして、出力係数を求める。単位出力当たりの

各部の微少温度変化を ΔT_i とすると、瞬間の出力係数は次式で表される。

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta P} \right) = \sum_i \Delta \rho_i \Delta T_i + \alpha_D \ln \frac{T_f + \Delta T_f}{T_f}$$

$$\left(\frac{\Delta k/kk'}{\Delta P} \right) : \text{瞬間の出力係数}$$

ΔP : 炉心出力変化

$\Delta \rho_i$: 炉心各部の膨張反応度係数（瞬間線膨張係数）

ΔT_i : 炉心各部の温度変化

α_D : ドップラー係数

T_f : 燃料温度（°K）

ΔT_f : 燃料の微少温度変化 (=1°K)

ここで、「FBRDB」コードでは瞬間膨張反応度係数を用いた等温温度係数に温度上昇率 ($\Delta T / \Delta P$) を掛けることで出力係数を求めている。しかし、瞬間膨張反応度係数を用いた等温温度係数の温度変化が 1°K であるのに対して、現状で 1°K の温度変化に対する出力変化 ΔP は求められていない。従って、出力係数算出時に用いている温度上昇率 ($\Delta T / \Delta P$) は現状で求められている出力変化（例：もんじゅ炉心、30%～100% の出力変化）を用いて算出している。

5.12 出力補償反応度

出力補償反応度は、次式で表される平均膨張反応度係数を基に「FBRDB」コードで算出している。

$$\Delta k/kk' = \sum_i \Delta \rho_i \Delta T_i + \alpha_D \ln \frac{T_f + \Delta T_f}{T_f}$$

ΔP : 炉心出力変化

$\Delta \rho_i$: 炉心各部の膨張反応度係数（平均線膨張係数）

ΔT_i : 炉心各部の温度変化

α_D : ドップラー係数

T_f : 燃料温度 ($^{\circ}\text{K}$)

ΔT_f : 燃料温度変化 ($^{\circ}\text{K}$)

ここで、「FBRDDB」コードでは平均膨張反応度係数を用いた等温温度係数に温度上昇率 ($\Delta T / \Delta P$) を掛けることで出力補償反応度を算出している。

表5.1-1 高度化炉心の反応度係数算出時における温度条件例

単位：℃

出力状態	領域	平衡初期					平衡末期				
		燃料	被覆管	ラッパ管	冷却材	炉心支持板	燃料	被覆管	ラッパ管	冷却材	炉心支持板
100%出力時	内側炉心	1143.4	502.4	447.0	480.0	397.0	1129.7	498.2	445.0	476.1	397.0
	外側炉心	1032.2	487.4	444.0	468.0	397.0	1018.0	484.4	440.0	465.2	397.0
	特殊燃料	1143.4	502.4	447.0	480.0	397.0	1129.7	498.2	445.0	476.1	397.0
	上部インシュレータ(炉心)	480.1	463.1	445.0	462.3	397.0	504.2	463.0	444.0	461.9	397.0
	下部軸プラ(炉心)	480.1	463.1	445.0	462.3	397.0	504.2	463.0	444.0	461.9	397.0
	上部インシュレータ(特燃)	480.1	463.1	445.0	462.3	397.0	504.2	463.0	444.0	461.9	397.0
	下部インシュレータ(特燃)	480.1	463.1	445.0	462.3	397.0	504.2	463.0	444.0	461.9	397.0
	ブリーム(炉心)	—	546.4	546.4	546.4	397.0	—	546.4	546.4	546.4	397.0
	ブリーム(特燃)	—	546.4	546.4	546.4	397.0	—	546.4	546.4	546.4	397.0
	置換集合体	—	463.0	444.0	463.0	397.0	—	463.0	444.0	463.0	397.0
	固定吸收体	—	420.0	412.0	412.0	397.0	—	420.0	412.0	412.0	397.0
	Naフタワ(炉心)	—	—	412.0	412.0	397.0	—	—	412.0	412.0	397.0
	Naフタワ(固定)	—	—	412.0	412.0	397.0	—	—	412.0	412.0	397.0
30%出力時	内側炉心	591.6	428.6	371.0	421.8	340.0	588.0	427.4	370.0	420.6	340.0
	外側炉心	563.3	424.2	369.0	418.2	340.0	559.7	423.2	367.0	417.4	340.0
	特殊燃料	591.6	428.6	371.0	421.8	340.0	588.0	427.4	370.0	420.6	340.0
	上部インシュレータ(炉心)	421.7	416.7	370.0	416.5	340.0	436.9	416.7	370.0	416.4	340.0
	下部軸プラ(炉心)	421.7	416.7	370.0	416.5	340.0	436.9	416.7	370.0	416.4	340.0
	上部インシュレータ(特燃)	421.7	416.7	370.0	416.5	340.0	436.9	416.7	370.0	416.4	340.0
	下部インシュレータ(特燃)	421.7	416.7	370.0	416.5	340.0	436.9	416.7	370.0	416.4	340.0
	ブリーム(炉心)	—	430.7	430.7	430.7	340.0	—	430.7	430.7	430.7	340.0
	ブリーム(特燃)	—	430.7	430.7	430.7	340.0	—	430.7	430.7	430.7	340.0
	置換集合体	—	383.0	369.0	383.0	340.0	—	383.0	369.0	383.0	340.0
	固定吸收体	—	360.0	350.0	350.0	340.0	—	360.0	350.0	350.0	340.0
	Naフタワ(炉心)	—	—	350.0	350.0	340.0	—	—	350.0	350.0	340.0
	Naフタワ(固定)	—	—	350.0	350.0	340.0	—	—	350.0	350.0	340.0
0%出力時	内側炉心	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	外側炉心	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	特殊燃料	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	上部インシュレータ(炉心)	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	下部軸プラ(炉心)	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	上部インシュレータ(特燃)	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	下部インシュレータ(特燃)	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	ブリーム(炉心)	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	ブリーム(特燃)	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	置換集合体	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	固定吸收体	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	Naフタワ(炉心)	—	—	180.0	180.0	180.0	—	—	180.0	180.0	180.0
	Naフタワ(固定)	—	—	180.0	180.0	180.0	—	—	180.0	180.0	180.0

表5.1-2 現行高燃焼度炉心の反応度係数算出時における温度条件例

単位: °C

出力状態	領域	平衡初期					平衡末期				
		燃料	被覆管	ラッパ管	冷却材	炉心支持板	燃料	被覆管	ラッパ管	冷却材	炉心支持板
100%出力時	内側炉心	1098.0	498.0	447.0	474.0	397.0	1097.0	495.0	445.0	471.0	397.0
	外側炉心	1017.0	489.0	444.0	468.0	397.0	987.0	482.0	440.0	463.0	397.0
	上部軸プラ	547.0	470.0	445.0	465.0	397.0	557.0	470.0	444.0	464.0	397.0
	炉心部プレナム	—	546.4	546.4	546.4	397.0	—	546.4	546.4	546.4	397.0
	下部軸プラ	547.0	470.0	445.0	465.0	397.0	557.0	470.0	444.0	464.0	397.0
	径プラ	489.0	436.0	424.0	434.0	397.0	503.0	441.0	427.0	438.0	397.0
	径プラ上部プレナム	—	443.0	443.0	443.0	397.0	—	443.0	443.0	443.0	397.0
	Naフロウ	—	—	412.0	412.0	397.0	—	—	412.0	412.0	397.0
30%出力時	内側炉心	557.0	395.0	371.0	387.0	340.0	555.0	393.0	370.0	385.0	340.0
	外側炉心	529.0	390.0	369.0	383.0	340.0	518.0	387.0	367.0	380.0	340.0
	上部軸プラ	406.0	383.0	370.0	381.0	340.0	408.0	383.0	370.0	381.0	340.0
	炉心部プレナム	—	430.7	430.7	430.7	340.0	—	430.7	430.7	430.7	340.0
	下部軸プラ	406.0	383.0	370.0	381.0	340.0	408.0	383.0	370.0	381.0	340.0
	径プラ	378.0	362.0	356.0	361.0	340.0	384.0	365.0	358.0	364.0	340.0
	径プラ上部プレナム	—	367.0	367.0	367.0	340.0	—	367.0	367.0	367.0	340.0
	Naフロウ	—	—	350.0	350.0	340.0	—	—	350.0	350.0	340.0
0%出力時	内側炉心	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	外側炉心	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	上部軸プラ	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	炉心部プレナム	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	下部軸プラ	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	径プラ	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
	径プラ上部プレナム	—	180.0	180.0	180.0	180.0	—	180.0	180.0	180.0	180.0
	Naフロウ	—	—	180.0	180.0	180.0	—	—	180.0	180.0	180.0

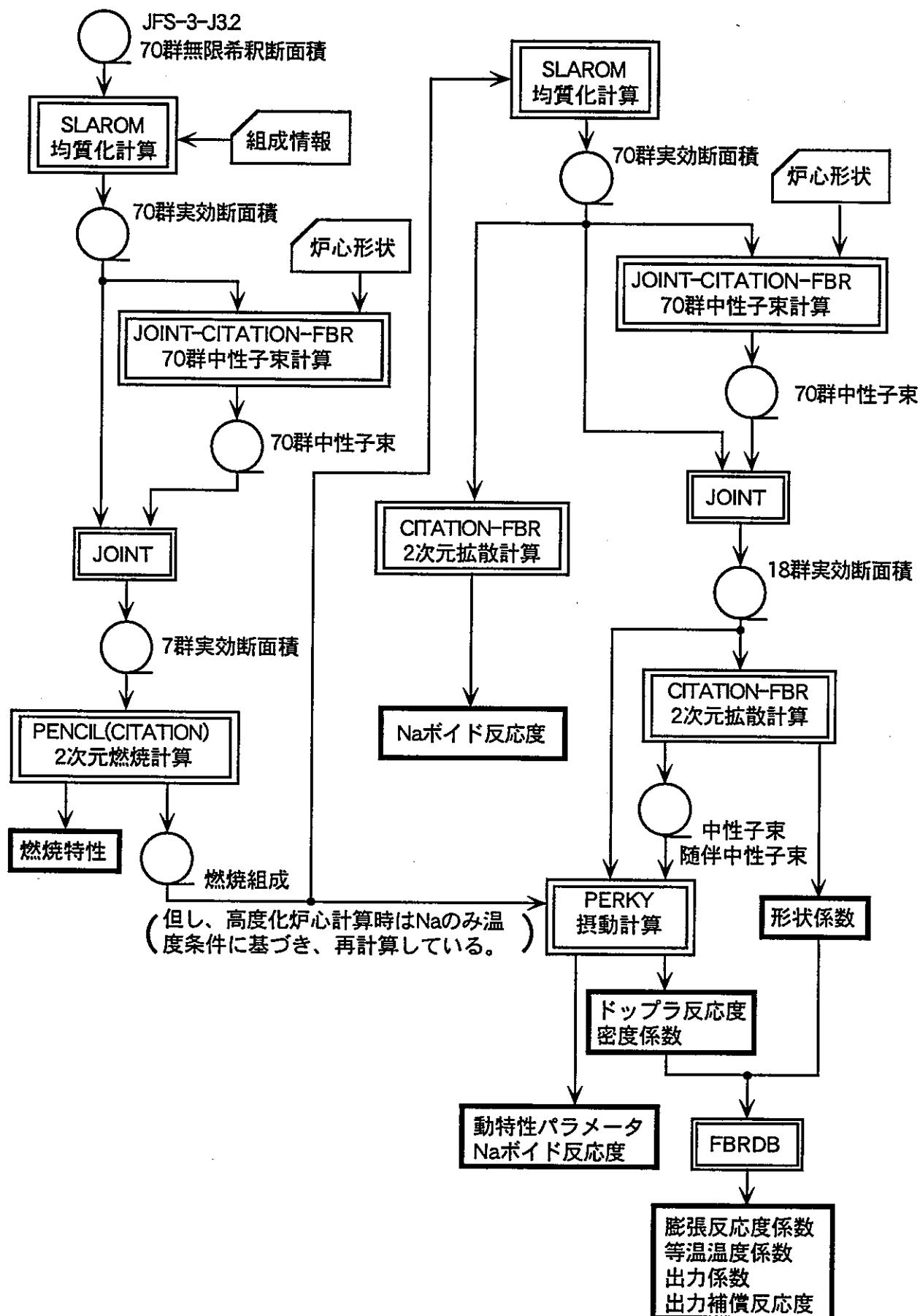


図5.1-1 反応度係数計算のフロー図

第6章 制御棒価値計算

制御棒価値は、パーク位置にある制御棒が設計条件として要求される挿入、引き抜き状態になったときの反応度として求められる。この制御棒価値は、「MOSES」コードを用いて3次元拡散計算を行い、それにより求められた反応度にメッシュ補正、群数補正、非均質補正、輸送補正を考慮したものとする。

6.1 制御棒挿入条件

設計条件で要求される制御棒の挿入、引き抜き状態を以下に示す。これに対して全制御棒がパーク位置にある状態を基準状態とする。

- (1) 微調整棒全挿入（その他はパーク位置）
- (2) 粗調整棒全挿入（その他はパーク位置）
- (3) 粗調整棒ワンロッドスタック (FCR3 本全挿入、その他はパーク位置)
- (4) 後備炉停止棒ワンロッドスタック（粗調整棒全挿入状態時）
- (5) 後備炉停止棒ワンロッドスタック（粗調整棒全引き抜き状態時）

6.2 制御棒価値の3次元拡散基準計算

制御棒価値の3次元拡散基準計算として、「MOSES」コードを用いて6.1節の制御棒挿入条件毎の計算を実施する。この時の体系は全炉心体系とし、計算メッシュはTri-Zメッシュとしている。また、入力データの一部で使用する原子数密度は、基本的に、2次元燃焼計算で得られた燃焼領域毎の平衡サイクル初期のものとするため、層毎にそこに属する集合体の組成が均質化されているものとして扱う。

ここで、「MOSES」コードは、高度化炉心解析以降に改良が加えられ、2次元燃焼計算で得られる全ての燃焼領域毎の組成が使用可能となった。しかし、高度化炉心検討当時に用いていた「MOSES」コードは、取り扱える領域数に制限があったため、2次元燃焼計算で燃焼領域毎に得られた組成のうち、炉心部の軸方向の組成を3領域に均質化している。

なお、使用する断面積は詳細発熱データの情報を含めた7群ミクロ断面積としている(2.6参照)。従って、2次元燃焼計算を実施して得られた平衡サイクル初期

の組成を基に「SLAROM」コードで作成した 70 群実効断面積を「JOINT-CITATION」コードで 7 群実効断面積に縮約し、「JOINT」コードでファイル形式の変換を行い、「HEATLIB」コードを用いて 7 群ミクロ断面積に詳細発熱データの情報を含める必要がある。ここで、70 群実効断面積作成時にマクロ断面積ファイルに出力される拡散係数はカレント重みの輸送断面積から得られるものとしている。

6.3 メッシュ補正^[8]

6.2 節の 3 次元拡散基準計算は Tri-Z メッシュ体系で実施している。従って、その結果を無限小メッシュ相当のものにするための補正係数を下式に基づいて求め る。なお、係数は各制御棒挿入条件に対する 3 次元拡散基準計算の結果毎に求める ものとする。

$$\text{メッシュ補正係数} = \frac{\Delta\rho_\infty}{\Delta\rho_{\text{Tri-Z}}}$$

$\Delta\rho_\infty$: 無限小メッシュ体系で得た制御棒価値

$\Delta\rho_{\text{Tri-Z}}$: Tri-Z メッシュ体系で得た制御棒価値

上記の無限小メッシュ体系の制御棒価値を求めるために必要な実効増倍率は、3 次元拡散基準計算と同様に各制御棒挿入条件に対して「MOSES」コードによる Hex-Z メッシュ計算を行い、3 次元拡散基準計算および Hex-Z メッシュ計算の各々 による実効増倍率を使用し、下式に基づいて外挿することで求められる。

$$\begin{aligned} k_\infty &= k_{\text{Hex-Z}} + \Delta k_R + \Delta k_Z \\ \Delta k_R &= \frac{6}{5} \cdot (k_{\text{Tri-Z}} - k_{\text{Hex-Z}}) \\ \Delta k_Z &= \frac{6}{5} \cdot (k_{\text{Hex-2Z}} - k_{\text{Hex-Z}}) \end{aligned}$$

k_∞ : 無限小メッシュ実効増倍率

$k_{\text{Hex-Z}}$: Hex-Z メッシュ実効増倍率

Δk_R : 径方向メッシュ補正值

Δk_Z : 軸方向メッシュ補正值

k_{Tri-Z} : Tri-Z メッシュ実効増倍率

k_{Hex-2Z} : Hex-Z 軸方向 2 倍メッシュ実効増倍率

ここで、軸方向のメッシュ補正に関して、高度化炉心検討で用いた「MOSES」コードは計算メッシュ数を 60 メッシュ以下とする制限があった。従って、もんじゅクラスの炉心を対象にメッシュ幅を 5cm 程度とすると、メッシュ数が 60 メッシュを越えてしまい軸方向メッシュ補正を求められなかった。しかし、「CITATION」コードで XYZ メッシュモデルを使用し、径方向 (XY 方向) のみ無限メッシュ相当に補正した制御棒価値と径方向および軸方向 (XYZ 方向) を無限メッシュ相当に補正した制御棒価値を求めた結果、両者の差は 1%程度の値であった。従って、制御棒価値に対する軸方向メッシュ補正の効果は小さいと考えられ、「MOSES」コードを用いた軸方向メッシュ補正の算出は実施しなかった。ただし、高度化炉心解析以降の「MOSES」コードは改良され、メッシュ数による制限を受けないため、もんじゅクラスの炉心を対象としても軸方向メッシュ補正を算出することが出来る。

6.4 群数補正^[8]

6.2 節の 3 次元拡散基準計算は少数群の 7 群断面積を用いた計算である。従って、その結果を 70 群断面積で解析したものに相当する値とするための群数補正係数を以下に示す式に基づいて求める。係数は上記メッシュ補正と同様、各制御棒挿入条件に対する 3 次元拡散基準計算の結果毎に求めるものとする。

$$\text{群数補正係数} = \frac{\Delta\rho_{70}}{\Delta\rho_7}$$

$\Delta\rho_{70}$: 70 群断面積で得た制御棒価値

$\Delta\rho_7$: 7 群断面積で得た制御棒価値

この補正係数算出で、使用する断面積は2次元燃焼計算を実施して得られた平衡サイクル初期の組成を基に、「SLAROM」コードで作成した70群実効断面積との断面積を「JOINT-CITATION」コードで縮約した7群実効断面積である。ただし、70群実効断面積作成時にマクロ断面積ファイルに出力される拡散係数はカレント重みの輸送断面積から得られるものとする。

ここで、高度化炉心検討に於ける群数補正係数は、当時の「MOSES」コードが70群断面積を扱えなかったことから、「CITATION」コードを用いた3次元拡散計算で求められている。さらに、70群断面積を用いた解析を行う際は計算時間、メモリ容量、出力ファイル容量の観点から、計算メッシュをTri-Zメッシュ体系とせずにHex-Zメッシュ体系としている。なお、高度化炉心検討以降は「MOSES」コードが改良され、70群断面積を用いた計算も可能となっている。

6.5 非均質補正^[8]

制御棒価値計算時の各制御棒の断面積は、非均質性を考慮して吸收体をピン領域にまとめた制御棒リングモデルで中性子束を求め、これを重みとして断面積を均質化している。しかし、体系計算では吸收体が制御棒領域全域にスミアされるため、均質化断面積作成時に非均質性を考慮しても必ずしも反応率が保存されるとは限らない。従って、非均質な制御棒断面積を用いた解析相当にするための補正係数を算出する。

この補正係数は「SLAROM」コードを用いて算出する。図6.5-1に示す3種類の各セルモデルに対して求められた実効増倍率から、反応度を求め、以下に示す式に基づいて非均質補正係数が求められる。なお、3種類のセルモデルは吸收体をリングモデルで非均質化しその外側に燃料を巻いたモデル（付録A 図3.2と同様である。）、制御棒領域を中性子束重みで均質化しその外側に燃料を巻いたモデル、Naフォロワ領域に燃料を巻いたモデルである。また、微調整棒と粗調整棒は構造が同一なため、計算は粗調整棒と後備炉停止棒の2種類についてのみ行う。

$$\text{非均質補正係数} = \frac{\Delta\rho_{\text{hetero}}}{\Delta\rho_{\text{homo}}}$$

$\Delta\rho_{\text{hetero}}$: 非均質セルモデルと Na フォロワモデルの反応度

$\Delta\rho_{\text{homo}}$: 非均質領域を中性子束重みで均質化したセルモデルと Na フォロワモデルの反応度

ここで、本補正は「SLAROM」コードを用いたセルモデル計算で求めたものであり、全炉心計算ではないため制御棒挿入パターンによる補正值への影響は考慮されていない。この影響は無視できる程度の大きさであると思われるが、今後確認する必要がある。

6.6 輸送補正^[8]

6.2 節で求めた結果は「MOSES」コードを用いた3次元拡散計算によるものである。従って、その結果を中性子輸送効果を考慮した輸送計算によるものに相当する値とするための補正係数を以下に示す式に基づいて求める。なお、係数は上記メッシュ、群数補正と同様、各制御棒挿入条件に対する3次元拡散基準計算の結果毎に求めるものとする。

$$\text{輸送補正係数} = \frac{\Delta\rho_{\text{trans}}}{\Delta\rho_{\text{dif}}}$$

$\Delta\rho_{\text{trans}}$: 輸送計算で得た制御棒価値

$\Delta\rho_{\text{dif}}$: 拡散計算の XYZ 無限小メッシュ体系で得た制御棒価値

3次元輸送計算は「TRITAC」コードを用いた全炉心体系で実施し、Sn 次数は S4 とする。ここで、「TRITAC」コードは3次元 XYZ メッシュモデルのみの取り扱いとなっている。しかし、「MOSES」コードはこの体系を取り扱っていないため、係数算出に当たり「CITATION」コードを用いて XYZ メッシュモデルの拡散計算を再度実施する必要がある。なお、「TRITAC」コード、「CITATION」コードともにマクロ断面積を用いた計算とし、拡散係数は等方拡散係数 ($1/3 \sum_t$) とした。

ここで、断面積は2次元燃焼計算により得られた平衡サイクル初期の組成を基に「SLAROM」コードで70群実効断面積を作成し、「JOINT-CITATION」コードで縮約した7群実効断面積とする。ただし、高度化炉心検討で本補正の算出に伴う70群実効断面積作成に於いて、マクロ断面積ファイルに出力される拡散係数はフラックス重みの輸送断面積から得られるものとしている。これは、高度化炉心検討当時、各コード間のインターフェイスに不具合があり、「SLAROM」コードでファイル出力されたカレント重みのマクロ輸送断面積が「JOINT-CITATION」コードで扱えなかったこと、これに伴い拡散係数をカレント重みの輸送断面積から得られるものとした場合、縮約後のマクロ断面積ファイルで拡散係数と輸送断面積の整合が取れていなかつたことによる。なお、ミクロ断面積を用いた計算については、その当時、既に各コード間のインターフェイスの問題が解消されていた。

また、「TRITAC」コードによる輸送計算は一般的にSn次数をS4、メッシュ幅を5cm程度とした場合、 $S4 \rightarrow S\infty$ へのSn次数効果と5cm→無限小メッシュへのメッシュ効果が相殺し、計算結果が $S\infty$ 、無限小メッシュ相当となると言われている。これを前提とし、輸送効果のみを得るためにには「CITATION」コードを用いた拡散計算で求められた結果も無限小メッシュ相当に補正する必要がある。以下に拡散計算の結果を無限メッシュ相当の値にするための手法を示す。

$$\begin{aligned} k_{dif(\infty)} &= k_{XYZ} + \Delta k_R + \Delta k_Z \\ \Delta k_R &= \frac{4}{3} \cdot (k_{2X2YZ} - k_{XYZ}) \\ \Delta k_Z &= \frac{4}{3} \cdot (k_{XY2Z} - k_{XYZ}) \end{aligned}$$

$k_{dif(\infty)}$ ：拡散計算、XYZモデル無限小メッシュ実効増倍率

k_{XYZ} ：拡散計算、XYZモデル実効増倍率

Δk_R ：径方向(XY)メッシュ補正值

Δk_Z ：軸方向(Z)メッシュ補正值

k_{2X2YZ} ：拡散計算、XYZモデル径方向(XY)2倍メッシュ実効増倍率

k_{XY2Z} ：拡散計算、XYZモデル軸方向(Z)2倍メッシュ実効増倍率

6.7 余裕反応度

上記、各種補正係数を考慮した制御棒価値と出力補償反応度等の制御すべき反応度の合計から余裕反応度を求める。まず、余裕反応度を求めるにあたって反応度バランスを求める必要がある。制御すべき反応度には出力補償反応度、燃焼補償（燃焼欠損反応度）、炉の反応度の誤差吸収（設置許可申請書ベース）、運転余裕とバイト（設置許可申請書ベース）、炉停止余裕（設置許可申請書ベース）等を考慮し、出力補償反応度に±30%の設計補正を加える事で制御すべき反応度の最大値と最小値を求めている。これに対して、制御棒価値は±10%の設計補正を加えて制御棒価値の最大値および最小値を求めている。

さらに、上記の制御すべき反応度と制御棒価値を粗調整棒全挿入、微調整棒全挿入、主炉停止系ワンロッドスタック、後備炉停止系ワンロッドスタックの4ケースについて算出し、反応度バランスを求める。以下に各ケースに対する反応度バランスの算出方法を示す。

a) 粗調整棒全挿入

粗調整棒は低温0%～30%出力変化に伴う反応度変化を補償する必要があることから、制御すべき反応度の算出に使用する出力補償反応度は、低温0%～30%出力時の値とし、この値に±30%の設計補正を加え、燃焼補償（燃焼欠損反応度）、炉の反応度の誤差吸収、炉停止余裕（1\$相当）を考慮する。

b) 微調整棒全挿入

微調整棒は30%～100%出力変化に伴う反応度変化を補償する必要があることから、制御すべき反応度の算出に使用する出力補償反応度は、30%～100%出力時の値とし、この値に±30%の設計補正を加え、運転余裕とバイトを考慮する。

c) 主炉停止系ワンロッドスタック

主炉停止系の持つ機能から、制御すべき反応度に使用する出力補償反応度は

低温 0%～30%出力時および 30%～100%出力時の値とし、それぞれの値に±30%の設計補正を加え、燃焼補償（燃焼欠損反応度）、炉の反応度の誤差吸収、運転余裕とバイト、炉停止余裕（1\$相当）を考慮する。

d) 後備炉停止系ワンロッドスタック

後備炉停止系の持つ機能から、制御すべき反応度に使用する出力補償反応度は低温 0%～30%出力時および 30%～100%出力時の値とし、それぞれの値に±30%の設計補正を加え、炉停止余裕（1\$相当）を考慮する。

上記で求められた反応度バランスより、制御すべき反応度の最大値と制御棒価値の最小値を用いて余裕反応度を求めている。表 6.7-1 に反応度バランスの算出方法をまとめたものを示す。

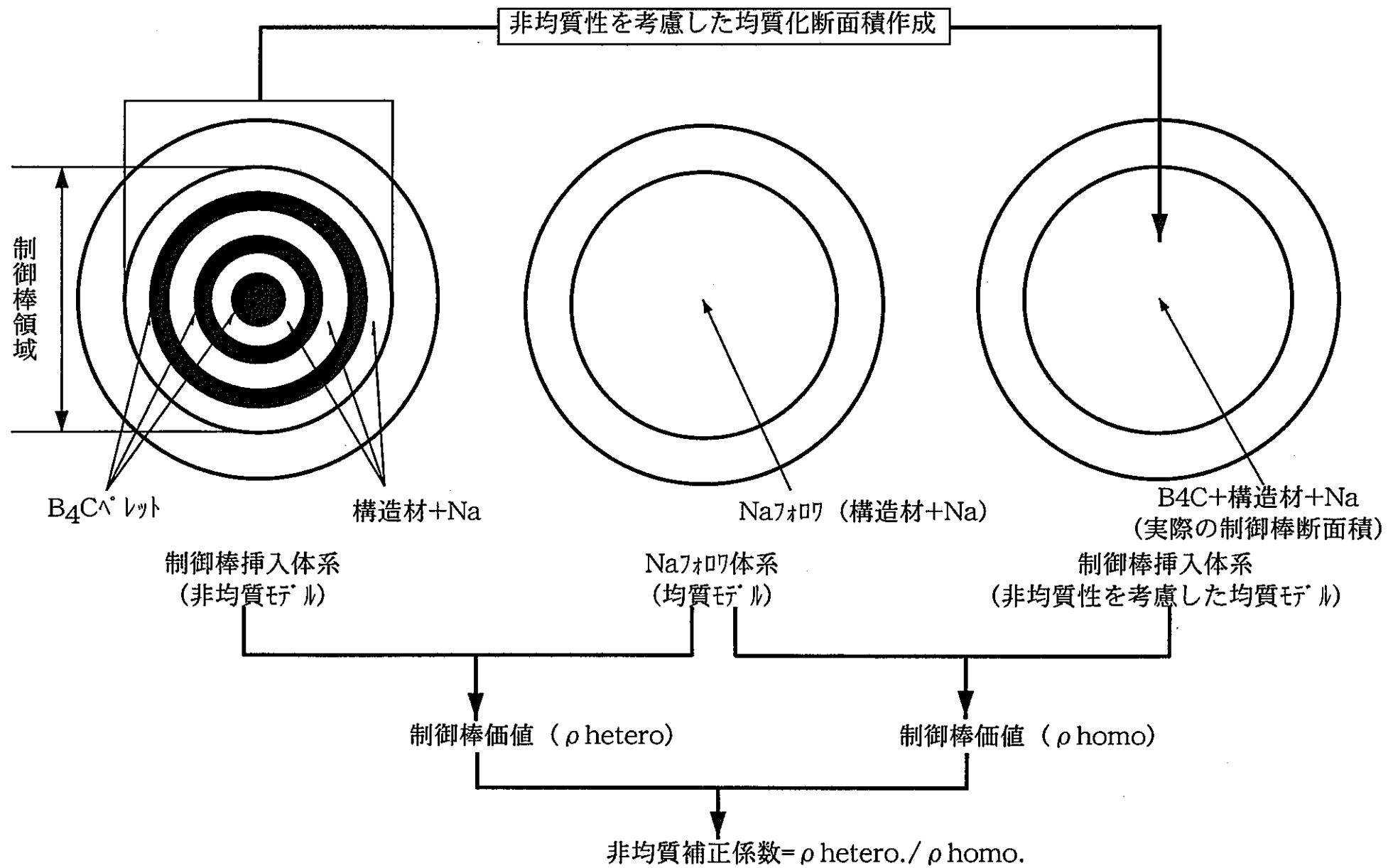


図6.5-1 非均質補正係数計算手法

表6.7-1 反応度バランス表

単位 % $\Delta k/kk'$

制御棒系統			主炉停止系									後備炉停止系		
項目	制御棒 挿入法	粗調整棒全挿入 粗調整棒 10本			微調整棒全挿入 微調整棒 3本			主炉停止系 ワンロット・スタック時 ¹⁾			後備炉停止棒 ワンロット・スタック時 ²⁾			
		値の範囲	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値	最大値	標準値	最小値
(1) 出力補償 (I) ³⁾ 低温0%~30%出力	基準値 +30%	基準値 -30%	—	—	—	基準値 +30%	基準値 -30%	—	基準値 +30%	基準値 -30%	—	基準値 +30%	基準値 -30%	
(1) 出力補償 (II) ³⁾ 30%~定格出力 ⁽¹⁾	—	—	—	基準値 +30%	基準値 -30%	基準値 +30%	基準値 -30%	基準値 +30%	基準値 -30%	基準値 +30%	基準値 -30%	基準値 +30%	基準値 -30%	
(3) 燃焼補償 ⁴⁾	基準値	基準値	基準値	—	—	—	基準値	基準値	基準値	—	—	—	—	
(4) 炉の反応度の誤差吸収	1.0	1.0	1.0	—	—	—	1.0	1.0	1.0	—	—	—	—	
(5) 運転余裕とバイト	—	—	—	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	—	—	—	—	
(6) 炉停止余裕 ⁵⁾	0.4	0.4	0.4	—	—	—	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	
制御すべき反応度合計	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	合計値	
制御棒価値設計値 ^{6), 7)}	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 +10%	基準値 -10%	基準値 -10%	
備考	1) 粗調整棒は最も反応度変化が大きい粗調整棒を除く9本を挿入し、微調整棒は3本を挿入している。 2) 粗調整棒10本全挿入状態および全調整棒引き抜き状態について算出する。 3) 最大値、最小値は標準値に±30%の設計補正を考慮することで得られる。 4) 現状では2次元燃焼計算結果を使用している。 5) 1 \$ = 0.4% $\Delta k/kk'$ として換算している。 6) 標準値はメッシュ補正、群数補正、非均質補正、輸送補正を考慮した制御棒価値である。 7) 最大値、最小値は、標準値に±10%の設計補正を考慮することで得られる。													

第7章 おわりに

設計評価 Gr.において用いられている核設計手法について、当 Gr.で実施してきた 127 本バンドル「もんじゅ」高度化炉心の概念設計に対して用いられている核設計手法を中心に示した。実効断面積の作成、2 次元燃焼計算、3 次元拡散計算、反応度係数計算、制御棒価値計算の各計算方法を説明した。原子数密度の計算方法も付録に示した。「もんじゅ」高度化炉心解析時と現在とで異なる手法については、その都度説明を加えた。従って、ここで示した手法は、現時点での当 Gr. の標準的な核設計手法である。しかし、この核設計手法が改良の余地のないベストな手法であるわけではなく、今後、最新の知見・情報を取り入れ、評価精度の向上を目指して核設計手法を見直していくつもりである。

第8章 参考文献

- [1] 貝瀬 他：“FBRにおいて燃料組成の変化が炉心特性に与える影響検討”
PNC-ZJ8214 92-002 (1992)
- [2] G.H.Golden, J.V.Tokar : "Thermophysical Properties of Sodium",
ANL7323 (1967)
- [3] Eシート：“CITATIONコードにおける核分裂当たりの放出エネルギーについて”，
炉燃-07-386 (1996)
- [4] 三田, 山本：“高速炉における核発熱データの検討”, DM-87-032 (1987)
- [5] R.Sher : "Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides",
Proc.Conf.on Nucl.Data Evaluation Method & Procedures, BNFL (1980),
P.835
- [6] E.R.Cohen and B.N.Taylor : "The 1986 Adjustment of the Fundamental
Physical Constants", Rev.Mod.Phys., Vol.59, No4 (1980) 1121
- [7] D.Saphier, et al. : "Evaluated Delayed Neutron Spectra and Their
Importance in Reactor Calculations", Nuclear Science and Engineering 62
(1977) , P.660-694
- [8] 鈴木 他：“高速増殖炉「もんじゅ」JENDL-3.2によるもんじゅ制御棒価値解
析” PNC-ZN2410 97-003 (1997)

付録-A 原子個数密度の算出

核特性解析の際に必要な炉心構成要素（炉心燃料、ブランケット燃料、しゃへい体等）の体積比及び原子数密度の算出方法についてまとめ、「もんじゅ高度化」炉心を対象に炉心構成要素の体積比及び原子数密度を算出する。

1.1 体積比計算

各部体積比は単位長さ当たりで算出する。ただし、下部しゃへい体については構造が複雑なため現行もんじゅ設計を参考に各構成要素毎の体積を求め、体積比を求める。

(a) 炉心部、軸方向ブランケット部、径方向ブランケット部

集合体体積

$$V_s = P^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.1)$$

P : 集合体ピッチ

ダクト体積比

$$V_d = \left\{ D_r^2 - (D_r - 2 \times D_d)^2 \right\} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \div V_s \quad (1.2)$$

D_r : ダクト外対面寸法

D_d : ダクト肉厚

被覆管体積比

$$V_c = \left\{ \left(\frac{C_r}{2} \right)^2 - \left(\frac{C_r}{2} - C_d \right)^2 \right\} \times \pi \times n \div V_s \quad (1.3)$$

C_r : 被覆管外径 C_d : 被覆管肉厚 n : 燃料ピン本数

ワイヤー体積比

$$V_w = \left(\frac{W_r}{2} \right)^2 \times \frac{\sqrt{W_p^2 + (C_r \times \pi)^2}}{W_p} \times \pi \times n \div V_s \quad (1.4)$$

 W_r : ワイヤー径 W_p : ワイヤー巻付ピッチ C_r : 被覆管外径 n : 燃料ピン本数

ペレット体積比

$$V_f = \left\{ \left(\frac{F_r}{2} \right)^2 - \left(\frac{F_h}{2} \right)^2 \right\} \times \pi \times TD \times n \div V_s \quad (1.5)$$

 F_r : ペレット外径 F_h : ペレット中空径

TD : ペレット理論密度

 n : 燃料ピン本数

ペレットと被覆管のギャップ体積比

$$V_p = \left\{ \left(\frac{C_r}{2} - C_d \right)^2 - \left(\frac{F_r}{2} \right)^2 \right\} \times \pi \times n \div V_s \quad (1.6)$$

ペレットに含まれるボイドの体積比

$$V_v = \left\{ \left(\frac{F_r}{2} \right)^2 - \left(\frac{F_h}{2} \right)^2 \right\} \times \pi \times (1 - TD) \times n \div V_s \quad (1.7)$$

ペレットの中空部の体積比

$$V_{fh} = \left(\frac{F_h}{2} \right)^2 \times \pi \times n \div V_s \quad (1.8)$$

冷却材体積比

$$V_{Na} = 1 - (V_d + V_e + V_w + V_f + V_p + V_v + V_{fh}) \quad (1.9)$$

(b) 制御棒吸収体部

以下に均質計算の式を示すが、実効断面積作成時は制御棒リングモデル計算（3.1参照）で原子個数密度を算出する。

案内管体積比

$$V_g = \left\{ \left(\frac{G_r}{2} \right)^2 - \left(\frac{G_r}{2} - G_d \right)^2 \right\} \times \pi \div V_s \quad (1.10)$$

G_r : 案内管外径

G_d : 案内管肉厚

V_s : (a) 参照

保護管体積比

$$V_{su} = \left\{ \left(\frac{S_r}{2} \right)^2 - \left(\frac{S_r}{2} - S_d \right)^2 \right\} \times \pi \div V_s \quad (1.11)$$

S_r : 保護管外径

S_d : 保護管肉厚

V_s : (a) 参照

冷却材体積比

$$V_{Na} = 1 - (V_g + V_{su} + V_c + V_w + V_f + V_p + V_v) \quad (1.12)$$

V_c, V_w, V_f, V_p, V_v : (a) 参照

(c) 固定吸收体

計算式は (a) と同様であるが、実効断面積作成時は制御棒リングモデル計算 (3.1参照) を行う。

(d) Naフォロワー部

冷却材体積比

$$V_{Na} = 1 - V_g \quad (1.13)$$

V_g : (b) 参照

(e) 中性子しゃへい体しゃへい部

外側中性子しゃへい体体積比

$$V_{sho} = \left\{ \left(\frac{S_{hor}}{2} \right)^2 - \left(\frac{S_{hor}}{2} - S_{hod} \right)^2 \right\} \times \pi \div V_s \quad (1.14)$$

S_{hor} : 外側中性子しゃへい体外径

S_{hod} : 外側中性子しゃへい体内厚

V_s : (a) 参照

内側中性子しゃへい体体積比

$$V_{shi} = \left(\frac{S_{hir}}{2} \right)^2 \times \pi \div V_s \quad (1.15)$$

S_{hir} : 内側中性子しゃへい体外径

V_s : (a) 参照

冷却材体積比

$$V_{Na} = 1 - (V_d + V_{sho} + V_{shi}) \quad (1.16)$$

V_d : (a) 参照

(f) 上部しゃへい体

計算式は1.1と同様であるが、 V_f (燃料体積比) をボイドとして取り扱う。

(g) 下部しゃへい体

算出方法を付録2に示す。

(h) 径方向ブランケット置換反射体

しゃへい体体積比

$$V_{sh} = \left(\frac{S_h}{2} \right)^2 \times \pi \times n \div V_s \quad (1.17)$$

S_h : しゃへい体外径

n : しゃへい体本数

V_s : (a) 参照

冷却材体積比

$$V_{Na} = 1 - (V_d + V_{sh}) \quad (1.18)$$

V_d : (a) 参照

1.2 「現行もんじゅ」体積比計算例

(a) 炉心部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・集合体ピッチ : $P = 115.6$ (mm)
- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 110.6$ (mm)
- ・" 肉厚 : $D_d = 3.0$ (mm)
- ・燃料ピン本数 : $n = 169$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 6.5$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 0.47$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.32$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 307.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 5.40$ (mm)
- ・ペレット中空径 : $F_h = 0.0$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : $TD = 85$ (%)

上記値を (1.1) 式に代入し計算すると

$$V_s = 1.15730 \times 10^4 \text{ (mm}^2\text{)}$$

となる。従って (1.2) ~ (1.9) 式に上記値を代入し計算すると

$$V_d = 9.66224 \times 10^{-2}$$

$$V_c = 1.30019 \times 10^{-1}$$

$$V_w = 2.00280 \times 10^{-2}$$

$$V_f = 2.84274 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 2.01123 \times 10^{-2}$$

$$V_v = 5.01660 \times 10^{-2}$$

$$V_{fh} = 0.0$$

$$V_{Na} = 3.98779 \times 10^{-1}$$

となる。

(b) 軸方向ブランケット部

(a) で使用したパラメータと異なる部分は、ペレット理論密度である。従って、諸体積比の計算結果で (a) と異なるのは V_f および V_v である。

- ・ペレット理論密度 : $TD = 93$ (%)

上記値を (1.5) ~ (1.7) 式に代入し計算すると

$$V_f = 3.11029 \times 10^{-1}$$

$$V_v = 2.34108 \times 10^{-2}$$

となる。

(c) 径方向ブランケット部

(a) で使用したパラメータと異なる部分は、以下の通りである。従って、

(a) の体積比と異なるのは V_c , V_w , V_f , V_p , V_v , V_{Na} である。

- ・燃料ピン本数 : $n = 61$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 11.6$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 0.5$ (mm)
- ・ワイヤー径 (最外周) : $W_r = 0.9$ (mm) (24本分)
(中央部) : $W_r = 1.5$ (mm) (37本分)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 251.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 10.4$ (mm)

- ・ペレット理論密度 : TD = 93 (%)

上記値を (1.3) ~ (1.7), (1.9) 式に代入し計算すると

$$V_c = 9.19023 \times 10^{-2}$$

$$V_w = 7.04209 \times 10^{-3}$$

$$V_f = 4.16412 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 1.73869 \times 10^{-2}$$

$$V_v = 3.13428 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 3.39292 \times 10^{-1}$$

となる。

(d) 調整棒吸収体部 (均質モデル)

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・案内管外径 : $G_r = 110.6$ (mm)
- ・" 肉厚 : $G_d = 3.0$ (mm)
- ・保護管外径 : $S_r = 94.0$ (mm)
- ・" 肉厚 : $S_d = 2.0$ (mm)
- ・ピン本数 : $n = 19$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 16.9$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 2.0$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.2$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 239.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 12.2$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : TD = 95 (%)

上記値を (1.3) ~ (1.7), (1.12) ~ (1.14) 式に代入し計算すると

$$V_g = 8.76268 \times 10^{-2}$$

$$V_{su} = 4.99484 \times 10^{-2}$$

$$V_c = 1.53700 \times 10^{-1}$$

$$V_w = 1.90204 \times 10^{-3}$$

$$V_f = 1.82323 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 2.26553 \times 10^{-2}$$

$$V_v = 9.59593 \times 10^{-3}$$

$$V_{Na} = 4.92249 \times 10^{-1}$$

となる。

(e) 後備炉停止棒吸収体部（均質モデル）

(d) で使用したパラメータと異なる部分は、以下のとおりである。従って、

(d) の体積比と異なるのは $V_c, V_w, V_f, V_p, V_v, V_{Na}$ である。

- ・被覆管肉厚 : $C_d = 1.0$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 300.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 14.2$ (mm)

上記値を (1.3) ~ (1.7), (1.14) 式に代入し計算すると

$$V_c = 8.20076 \times 10^{-2}$$

$$V_w = 1.88563 \times 10^{-3}$$

$$V_f = 2.47000 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 2.62657 \times 10^{-2}$$

$$V_v = 1.30000 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 4.92266 \times 10^{-1}$$

となる。

(f) 固定吸收体部（均質モデル）

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 110.6$ (mm)
- ・" 肉厚 : $D_d = 3.0$ (mm)
- ・燃料ピン本数 : $n = 7$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 36.4$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 2.0$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.2$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 300.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 37.8$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : $TD = 95$ (%)

上記値を (1.2) ~ (1.7), (1.9) 式に代入し計算すると

$$V_d = 9.66224 \times 10^{-2}$$

$$V_c = 1.14192 \times 10^{-1}$$

$$V_w = 7.21570 \times 10^{-4}$$

$$V_f = 3.47457 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 7.95156 \times 10^{-3}$$

$$V_v = 1.82872 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 4.14768 \times 10^{-1}$$

となる。

(g) 中性子しゃへい体部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 110.6$ (mm)
- ・ " 肉厚 : $D_d = 3.0$ (mm)
- ・ 外側中性子しゃへい体外径 : $S_{hor} = 101.0$ (mm)
- ・ " 肉厚 : $S_{hod} = 34.0$ (mm)
- ・ 内側中性子しゃへい体径 : $S_{hir} = 30.0$ (mm)

上記値を (1.2) , (1.15) ~ (1.17) 式に代入し計算すると

$$V_d = 9.66224 \times 10^{-2}$$

$$V_{sho} = 6.18383 \times 10^{-1}$$

$$V_{shi} = 6.10782 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 2.23917 \times 10^{-1}$$

となる。

(h) Naフォロワ一部

(d) で求めた V_g 及び (1.18) 式より制御棒吸収体部の Na フォロワーの冷却材体積比は以下のようになる。

$$V_{Na} = 9.12373 \times 10^{-1}$$

(i) 上部しゃへい体 (炉心燃料、径方向ブランケット燃料)

上部しゃへい体は、炉心部の場合、1.2-(a)の炉心部の体積比計算結果をそのまま使用し、 V_f (燃料体積比) をボイドとして取り扱う。

また、径方向ブランケットの場合も、同様に1.2-(c)の径方向ブランケットの体積比計算結果を使用し、 V_f をボイドとして取り扱う。

(j) 下部しゃへい体

付録2の結果から、炉心燃料部は

$$\text{構造材体積比} = 6.21366 \times 10^{-1}$$

$$\text{冷却材体積比} = 3.78634 \times 10^{-1}$$

となり、径方向ブランケット部は

$$\text{構造材体積比} = 5.37010 \times 10^{-1}$$

$$\text{冷却材体積比} = 4.62990 \times 10^{-1}$$

となる。

以上の結果を表1.1に示す。但し、制御棒リングモデルの結果は3.2節で示す。

1.3 もんじゅ高度化炉心体積比計算例

1.3.1 炉心部、ブランケット部、遮へい体等

(a) 炉心部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・集合体ピッチ : $P = 115.6$ (mm)
- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 111.0$ (mm)
- ・" 肉厚 : $D_d = 2.7$ (mm)
- ・燃料ピン本数 : $n = 127$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 7.8$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 0.50$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.30$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 196.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 6.64$ (mm)
- ・ペレット中空径 : $F_h = 2.2$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : $TD = 95$ (%)

上記値を (1.1) 式に代入し計算すると

$$V_s = 1.15730 \times 10^4 \text{ (mm}^2\text{)}$$

となる。従って (1.2) ~ (1.9) 式に上記値を代入し計算すると

$$V_d = 8.75259 \times 10^{-2}$$

$$V_c = 1.25835 \times 10^{-1}$$

$$V_w = 1.46792 \times 10^{-2}$$

$$V_f = 3.21371 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 1.85339 \times 10^{-2}$$

$$V_v = 1.69142 \times 10^{-2}$$

$$V_{fh} = 4.17150 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 3.73427 \times 10^{-1}$$

となる。

(b) 軸方向ブランケット部

(a) で使用したパラメータと異なる部分は、ペレット中空径およびペレット理論密度である。従って諸体積比の計算結果で (a) と異なるのは V_f および V_v , V_{fh} である。

- ・ペレット中空径 : $F_h = 0.0 \text{ (mm)}$

- ・ペレット理論密度 : $TD = 93 \text{ (%)}$

上記値を (1.5) ~ (1.7) 式に代入し計算すると

$$V_f = 3.53400 \times 10^{-1}$$

$$V_v = 2.66000 \times 10^{-2}$$

$$V_{fh} = 0.0$$

となる。

(c) 径方向プランケット置換反射体部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 111.0$ (mm)
- ・" 肉厚 : $D_d = 2.7$ (mm)
- ・しゃへい体本数 : $n = 7$ (本)
- ・しゃへい体径 : $C_r = 36.4$ (mm)

上記値を (1.2) , (1.10) , (1.11) 式に代入し計算すると

$$V_d = 8.75259 \times 10^{-2}$$

$$V_{sh} = 6.29426 \times 10^{-1}$$

$$V_{Na} = 2.83049 \times 10^{-1}$$

となる。

(d) 調整棒吸収体部 (均質モデル)

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・案内管外径 : $G_r = 111.0$ (mm)
- ・" 肉厚 : $G_d = 2.7$ (mm)
- ・保護管外径 : $S_r = 94.0$ (mm)
- ・" 肉厚 : $S_d = 2.0$ (mm)
- ・ピン本数 : $n = 19$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 16.9$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 2.0$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.2$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 239.0$ (mm)

- ・ペレット径 : $F_r = 12.2$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : TD = 95 (%)

上記値を (1.3) ~ (1.7), (1.12) ~ (1.14) 式に代入し計算すると

$$\begin{aligned} V_g &= 7.93772 \times 10^{-2} \\ V_{su} &= 4.99484 \times 10^{-2} \\ V_c &= 1.53700 \times 10^{-1} \\ V_w &= 1.90204 \times 10^{-3} \\ V_f &= 1.82323 \times 10^{-1} \\ V_p &= 2.26553 \times 10^{-2} \\ V_v &= 9.59593 \times 10^{-3} \\ V_{Na} &= 5.00499 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

となる。

(e) 後備炉停止棒吸収体部 (均質モデル)

- (d) で使用したパラメータと異なる部分は、以下のとおりである。従って、(d) の体積比と異なるのは $V_c, V_w, V_f, V_p, V_v, V_{Na}$ である。

- ・被覆管肉厚 : $C_d = 1.0$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 300.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 14.2$ (mm)

上記値を (1.3) ~ (1.7), (1.14) 式に代入し計算すると

$$\begin{aligned} V_c &= 8.20076 \times 10^{-2} \\ V_w &= 1.88563 \times 10^{-3} \\ V_f &= 2.47000 \times 10^{-1} \\ V_p &= 2.62657 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$V_v = 1.30000 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 5.00515 \times 10^{-1}$$

となる。

(f) 固定吸収体部（均質モデル）

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・ダクト外対面寸法 : $D_r = 110.6$ (mm)
- ・" 肉厚 : $D_d = 3.0$ (mm)
- ・燃料ピン本数 : $n = 7$ (本)
- ・被覆管外径 : $C_r = 32.1$ (mm)
- ・" 肉厚 : $C_d = 2.0$ (mm)
- ・ワイヤー径 : $W_r = 1.2$ (mm)
- ・ワイヤー巻付ピッチ : $W_p = 300.0$ (mm)
- ・ペレット径 : $F_r = 27.8$ (mm)
- ・ペレット理論密度 : $TD = 95$ (%)

上記値を (1.2) ~ (1.7), (1.9) 式に代入し計算すると

$$V_d = 9.66224 \times 10^{-2}$$

$$V_c = 1.14192 \times 10^{-1}$$

$$V_w = 7.21570 \times 10^{-4}$$

$$V_f = 3.47457 \times 10^{-1}$$

$$V_p = 7.95156 \times 10^{-3}$$

$$V_v = 1.82872 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 4.14768 \times 10^{-1}$$

となる。

(g) 中性子しゃへい体部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- ・ ダクト外対面寸法 : $D_r = 110.6$ (mm)
- ・ " 肉厚 : $D_d = 3.0$ (mm)
- ・ 外側中性子しゃへい体外径 : $S_{hor} = 101.0$ (mm)
- ・ " 肉厚 : $S_{hod} = 34.0$ (mm)
- ・ 内側中性子しゃへい体径 : $S_{hir} = 30.0$ (mm)

上記値を (1.15) ~ (1.17) 式に代入し計算すると

$$V_d = 9.66224 \times 10^{-2}$$

$$V_{sho} = 6.18383 \times 10^{-1}$$

$$V_{shi} = 6.10782 \times 10^{-2}$$

$$V_{Na} = 2.23917 \times 10^{-1}$$

となる。

(h) Naフォロワー部

(d) で求めた V_g 及び (1.18) 式より制御棒吸収体部の Na フォロワーの冷却材体積比は以下のようになる。

$$V_{Na} = 9.20623 \times 10^{-1}$$

また、H8高度化炉心に於いては固定吸収体部を Na フォロワーとした解析を行うため、下式を用いて冷却材体積比を求める。

$$V_{Na} = 1 - V_d \quad (1.3.1)$$

$$V_d : 1.1 \text{ (a) 参照}$$

よって、冷却材体積比は (f) で求めた V_d を用いて以下の値となる。

$$V_{Na} = 9.03378 \times 10^{-1}$$

(i) 上部しゃへい体（炉心燃料部）

上部しゃへい体は、炉心部の場合、(a) の炉心部の体積比計算結果をそのまま使用し、 V_f （燃料体積比）をボイドとして取り扱う。

(j) 下部しゃへい体（炉心燃料部）

付録2の結果から、炉心燃料部は

$$\text{構造材 体積比} = 6.39208 \times 10^{-1}$$

$$\text{冷却材体積比} = 3.60792 \times 10^{-1}$$

となる。

1.3.2 もんじゅ高度化炉心の特殊燃料部

もんじゅ高度化炉心は内側炉心第1層の集合体6体分の領域を照射試験領域として扱うことを想定し、核特性解析時はその領域に暫定的に設定した特殊燃料を装荷している。この特殊燃料の燃料部体積比の算出方法について以下に示す。

ペレット体積比

$$V_{fi} = V_f \times I_r \quad (1.3.2)$$

I_r : 出力比

V_f : 1.3.1-(a)参照

構造材体積比

$$V_{sti} = (1 - V_{fi}) \times \frac{1}{3} \quad (1.3.3)$$

冷却材体積比

$$V_{Nai} = (1 - V_{fi}) \times \frac{2}{3} \quad (1.3.4)$$

(a) 燃料部

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

- 出力比 : $I_r = 7.0 / 70.0$ (D型特殊燃料 / 再装荷型特殊燃料 %)

1.3.1 (a) で求めた値および上記値を (1.3.2), (1.3.3), (1.3.4) 式に代入し計算すると

(D型特殊燃料 / 再装荷型特殊燃料)

$$V_{fi} = 2.24959 \times 10^{-2} / 2.34601 \times 10^{-1}$$

$$V_{sti} = 3.25835 \times 10^{-1} / 2.55133 \times 10^{-1}$$

$$V_{Nai} = 6.15669 \times 10^{-1} / 5.10266 \times 10^{-1}$$

となる。

(b) インシュレータ、下部軸ブランケット

全て (a) の値を使用する。

(c) 上部しゃへい体

特殊燃料についても、炉心燃料部と同様に (a) の結果を使用し、 V_{fi} をボイドとして取り扱う。

(d) 下部しゃへい体

1.3.1 (j) の炉心燃料部と同じ値を使用する。

以上の結果を表1.2に示す。但し、制御棒リングモデルの結果は3.2節で示す。

2.1 原子個数密度計算式

体積比より、燃料、構造材、冷却材等の原子個数密度を算出する。各元素の原子量並びにSUSの組成比及び密度、Naの密度を表2.1～2.3に示す。

(a) 燃料の原子個数密度の計算

1.1節で求めた燃料ペレット体積比、およびPu富化度、燃料組成比等のデータから燃料中の各組成毎の原子数密度を算出する。

- ・組成比（存在比）の単位換算式 (wt% → at%)

$${}^i A_j = \frac{{}^i W_j / {}^i M_j}{\sum_i ({}^i W_j / {}^i M_j)} \times 100 \quad (2.1)$$

${}^i A_j$: 元素 j の組成比 (at%)

${}^i W_j$: 元素 j の組成比 (wt%)

${}^i M_j$: 元素 j の原子量 (amu)

- ・Puの平均質量数 (^{241}Am を含む) の算出式

$$M'_{\text{Pu}} = \sum_i \left(\frac{{}^i A_{\text{Pu}}}{100} \times {}^i M_{\text{Pu}} \right) \quad (2.2)$$

${}^i A_{\text{Pu}}$: ${}^i \text{Pu}$ の組成比 (at%)

${}^i M_{\text{Pu}}$: ${}^i \text{Pu}$ の原子量 (amu)

- Uの平均質量数の算出式

$$M'_{\text{U}} = \sum_i \left(\frac{i A_U}{100} \times i M_U \right) \quad (2.3)$$

$i A_U$: i U の組成比 (at%)

$i M_U$: i U の原子量 (amu)

- Pu-fissile富化度 ($\frac{^{239}\text{Pu} + ^{241}\text{Pu}}{\text{Pu} + \text{U}}$) からPu富化度 ($\frac{\text{Pu}}{\text{Pu} + \text{U}}$) への換算式

$$P' = \frac{P'_{\text{f}}}{^{239}\text{W}_{\text{Pu}} + ^{241}\text{W}_{\text{Pu}}} \times 100 \quad (2.4)$$

P' : Pu富化度 (wt%)

P'_{f} : Pu-fissile富化度 (wt%)

$^{239}\text{W}_{\text{Pu}}$: ^{239}Pu の組成比 (wt%)

$^{241}\text{W}_{\text{Pu}}$: ^{241}Pu の組成比 (wt%)

- Pu富化度の単位換算式 (wt% → at%)

$$P = \frac{P' / M'_{\text{Pu}}}{P' / M'_{\text{Pu}} + (100 - P') / M'_{\text{U}}} \times 100 \quad (2.5)$$

P : Pu富化度 (at%)

P' : Pu富化度 (wt%)

M'_{Pu} : Puの平均質量数 (amu)

M'_{U} : Uの平均質量数 (amu)

- Pu富化度 ($\frac{\text{Pu}}{\text{Pu} + \text{U}}$) から PuO_2 富化度 ($\frac{\text{PuO}_2}{\text{PuO}_2 + \text{UO}_2}$) への換算式

$$P_e = \frac{P(M'_{\text{Pu}} + OM \times M_O)}{P(M'_{\text{Pu}} + OM \times M_O) + (100 - P)(M'_{\text{U}} + OM \times M_O)} \times 100 \quad (2.6)$$

P : Pu富化度 (at%)

P_e : PuO_2 富化度 (at%)

$\text{OM} : \text{O}/\text{M比} (\text{O}/(\text{Pu} + \text{U}))$ $M'_{\text{Pu}} : \text{Puの平均質量数 (amu)}$ $M'_{\text{U}} : \text{Uの平均質量数 (amu)}$ $M_{\text{O}} : \text{酸素の原子量 (amu)}$

・燃料密度 (g / cm³) を次の式で与える。

a) UO_2 燃料 : $\rho = 10.96$

b) MOX燃料 : $\rho = 0.48 \times (P_e/100) + 10.96 - 2.5 \times (2 - \text{OM}) \quad (2.7)$

 $P_e : \text{PuO}_2 \text{富化度 (at\%)}$

上記で与えられた組成比、平均質量数、PuO₂富化度、燃料密度を使用し、次式より燃料中の各組成毎の原子数密度が与えられる。

 ${}^i\text{Pu}$ の原子個数密度

$$X_{\text{Pu}} = \frac{V_f \times \rho \times P_e/100}{(M'_{\text{Pu}} + \text{OM} \times M_{\text{O}})} \times A_n \quad (2.8)$$

$${}^i\text{Pu} = X_{\text{Pu}} \times {}^iA_{\text{Pu}}/100 \quad (2.9)$$

 $V_f : \text{燃料体積比}$ $\rho : \text{燃料密度 (g / cm}^3)$ $P_e : \text{PuO}_2 \text{富化度 (at\%)}$ $M'_{\text{Pu}} : \text{Puの平均質量数 (amu)}$ $M_{\text{O}} : \text{酸素の原子量 (amu)}$ $\text{OM} : \text{O}/\text{M比} (\text{O}/(\text{Pu} + \text{U}))$ $A_n : \text{アボガドロ数 / } 10^{24}$ ${}^iA_{\text{Pu}} : {}^i\text{Pu の組成比 (at\%)}$

ⁱUの原子個数密度

$$X_U = \frac{V_f \times \rho \times (1 - P_e/100)}{(M'_U + OM \times M_O)} \times A_n \quad (2.10)$$

$${}^iU = X_U \times {}^iA_U / 100 \quad (2.11)$$

 V_f : 燃料体積比 ρ : 燃料密度 (g / cm³) P_e : PuO₂富化度 (at%) M'_U : Uの平均質量数 (amu) M_O : 酸素の原子量 (amu) OM : O/M比 (O/(Pu + U)) A_n : アボガドロ数 / 10²⁴ iA_U : ⁱUの組成比 (at%)

○の原子個数密度

$$O = (X_{Pu} + X_U) \times OM \quad (2.12)$$

 OM : O/M比 (O/(Pu + U))

(b) ナトリウムの原子個数密度の計算

$$Na = \frac{V_{Na} \times \rho_{Na}}{M_{Na}} \times A_n \left[+ \frac{V_p \times \rho_{Na}}{M_{Na}} \times A_n \right] \quad (2.13)$$

 V_{Na} : 冷却材体積比 ρ_{Na} : Na密度 (g / cm³) 添付資料-5参照 M_{Na} : Naの原子量 (amu)

[] 内はNaボンド使用時に加算する。

(c) 構造材 (Fe, Cr, Ni, Mo, Mn) の原子個数密度の計算

$$SUS_j = \frac{V_s \times \rho_{sus} \times (A_{susj}/100)}{M_{susj}} \times A_n \quad (2.14)$$

 V_s : 構造材体積比 ρ_{sus} : 構造材密度 (g / cm³) A_{susj} : 構造材 (j) の組成比 (wt%) M_{susj} : 構造材 (j) の原子量 (amu)(d) B₄Cペレットの原子個数密度の計算

Bの平均質量数

$$M'_B = \sum_i \left(\frac{i A_B}{100} \times i M_B \right) \quad (2.15)$$

 $i A_B$: i Bの組成比 (at%) $i M_B$: i Bの原子量 (amu)B₄C密度 (g / cm³) を次の式で与える。i) ¹⁰B濃縮度 34.0% : $\rho_{B_4C} = 2.49$ ii) ¹⁰B濃縮度 99.8% : $\rho_{B_4C} = 2.367$ ¹⁰B濃縮度が上記以外の場合は、上記値を内挿して求める。

Y=-1.869300912E-03 × X + 2.553556231

X : ¹⁰B濃縮度 (at%)Y : 内挿して求めたB₄C密度 (g/cm³)

ⁱBの原子個数密度

$$X_B = \frac{V_B \times \rho_{B_4C} \times CB}{M'_B \times CB + M_c} \times A_n \quad (2.16)$$

$${}^iB = X_B \times {}^iA_B / 100 \quad (2.17)$$

 V_B : B_4C ペレット体積比 ρ_{B_4C} : B_4C 密度 (g / cm^3) CB : B対C元素比 (=4) M'_B : Bの平均質量数 M_c : 炭素の原子量 (amu) A_n : アボガドロ数 / 10^{24} iA_B : iB の組成比 (at%)

Cの原子個数密度

$$C = X_B / CB \quad (2.18)$$

 CB : B対C元素比 (=4)

2.2 現行もんじゅ（高燃）炉心の原子個数密度計算例

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

(a) 炉心燃料

炉心部

- Pu-fissile富化度(内側 / 外側) : 16.11 / 21.56 (wt%)
- Pu-組成(^{238}Pu / ^{239}Pu / ^{240}Pu / ^{241}Pu / ^{242}Pu / ^{241}Am)
: 0.0 / 58.0 / 24.0 / 14.0 / 4.0 / 0.0 (wt%)
- ^{235}U 濃縮度 : 0.2 (wt%)
- O/M比 : 1.97
- 構造材 : SUS 316

軸方向プランケット部

- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.2 (wt%)
- ・O/U比 : 2.01 (2.00~2.02)
- ・構造材 : SUS316

(b) 径方向プランケット燃料

- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.2 (wt%)
- ・O/U比 : 2.01 (2.00~2.02)
- ・構造材 : SUS316

(c) 制御棒、固定吸收体

- ・ ^{10}B 濃縮度 (調整棒 / 後備炉停止棒 / 固定吸收体)
: 39.0 / 90.0 / 18.2 (wt%)
- ・構造材 : SUS316

(d) 中性子しゃへい体

- ・構造材
 - i) 遮蔽体 : SUS304
 - ii) ダクト : SUS316

(e) 上部、下部しゃへい体

- ・構造材 : SUS316

(f) 冷却材温度

- ・内側炉心 : 476.0 ($^{\circ}\text{C}$)

- ・外側炉心 : 471.0 (°C)
- ・軸方向ブランケット : 467.0 (°C)
- ・径方向ブランケット : 436.0 (°C)
- ・軸方向しゃへい体 : 400.0 (°C)
- ・径方向しゃへい体 : 400.0 (°C)
- ・制御棒 : 400.0 (°C)
- ・その他 : 400.0 (°C)

以上のパラメータを使用した計算結果を表 2.4 に示す。ただし、制御棒は全て均質モデルの結果である。

2.3 もんじゅ高度化炉心の原子個数密度計算例

計算に当たり以下のパラメータを使用する。

(a) 炉心燃料

炉心部

- ・Pu-組成(^{238}Pu / ^{239}Pu / ^{240}Pu / ^{241}Pu / ^{242}Pu / ^{241}Am)
: 3.0 / 52.0 / 27.0 / 9.5 / 7.0 / 1.5 (wt%)
- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.3 (wt%)
- ・O/M比 : 1.97
- ・構造材 : PNC 1520

軸方向ブランケット部

- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.2 (wt%)
- ・O/M比 : 2.01
- ・構造材 : PNC 1520

(b) 特殊燃料

D型特殊燃料、再装荷型特殊燃料

- ・Pu-組成(^{238}Pu / ^{239}Pu / ^{240}Pu / ^{241}Pu / ^{242}Pu / ^{241}Am)
: 3.0 / 52.0 / 27.0 / 9.5 / 7.0 / 1.5 (wt%)
- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.3 (wt%)
- ・O/M比 : 1.97
- ・構造材 : PNC 1520

軸方向ブランケット部

- ・ ^{235}U 濃縮度 : 0.2 (wt%)
- ・O/M比 : 2.01
- ・構造材 : PNC 1520

(c) 制御棒、固定吸收体

- ・ ^{10}B 濃縮度 (調整棒 / 後備炉停止棒 / 固定吸收体)
: 39.0 / 90.0 / 18.2 (wt%)
- ・構造材 (調整棒 / 後備炉停止棒 / 固定吸收体)
: PNC1520 / PNC1520 / SUS316

(d) 径方向置換集合体、径方向しゃへい体

- ・構造材
 - i) 遮蔽体 (置換集合体 / しゃへい体) : PNC 1520 / SUS304
 - ii) ダクト (置換集合体 / しゃへい体) : PNC 1520 / SUS316

(e) 上部、下部しゃへい体

- ・構造材 : PNC 1520

(f) 冷却材温度

- ・内側炉心 : 478.1 (°C)

- ・外側炉心 : 466.6 (°C)
- ・特殊燃料 : 478.1 (°C)
- ・軸方向ブランケット : 462.1 (°C)
- ・軸方向しゃへい体 : 400.0 (°C)
- ・径方向しゃへい体 : 400.0 (°C)
- ・制御棒 : 400.0 (°C)
- ・その他 : 400.0 (°C)

以上のパラメータを使用した計算結果を表 2.5 に示す。ただし、制御棒は全て均質モデルの結果である。

3 制御棒リングモデルの体積及び個数密度の計算

3.1.1 体積比の計算方法

① 高度化炉心の制御棒の寸法を図 3.1 に示す。制御棒内をペレット (B_4C) とギャップ、ワイヤ、被覆管、案内管、保護管および冷却材 (SUS+Na) の領域に分け、リング状にモデル化して原子数密度を求める。リングモデルの形状を図 3.2 (調整棒および後備炉停止棒) に示す。本節においては制御棒をリング形状にモデル化する際の手法のみを述べているが、高度化炉心の固定吸収体についても考え方は同様である。

尚、炉心燃料集合体配列ピッチを P_A とすると制御棒集合体等価半径 r_o は次のようになる。

$$r_o = \sqrt{\frac{P_A^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2}}{\pi}}$$

ただし、 P_A ：炉心燃料集合体配列ピッチ (115.6 mm)

② ペレット (B_4C) 領域の取り扱いは以下の通りとする。

(a) 制御棒要素の配列位置にリングの中心径を合わせる。従って、各ペレット (B_4C) 領域の中心半径は次のようになる。

$$r_1 : 0.00 \text{ mm}$$

$$r_2 : 18.20 \text{ mm}$$

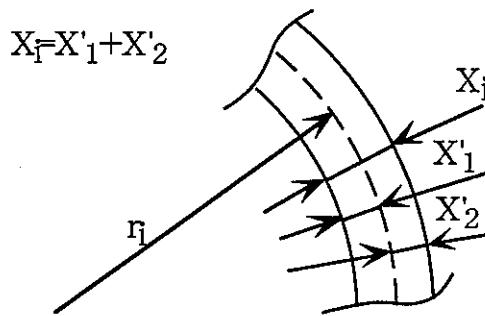
$$r_3 = \sqrt{\left(P \times \frac{\sqrt{3}}{2} + P\right)^2 + \left(\frac{P}{2}\right)^2}$$

ただし、 P ：制御棒要素ピッチ (18.20 mm)

(b) 各リングの幅 (X_i) は、そのリングの面積が制御棒要素本数分の B_4C ペレットの面積と等しくなるようにする。従って、第 2 リングは、中心半径が r_2 で制御棒要素 6 本分の B_4C ペレットの面積と等しい円環となる。また、

第3リングは中心半径が r_3 で制御棒要素 12 本分の B_4C ペレットの面積と等しい円環となる。

$$X_1 = B_r \quad , \quad X_i = \frac{\pi \times B_r^2 \times n_i}{2 \times \pi \times r_i}$$



ここで B_r : 制御棒ペレットの半径

(調整棒: 6.1 mm、炉停止棒: 7.1 mm)

i : リング No. (2, 3)

n_i : 制御棒ペレットの本数

(第2リング: 6 本、第3リング: 12 本)

r_i : リングの中心半径 (a) 参照

③ 各領域 (B_4C 、SUS+Na) の体積比の算出方法は以下の通りとなる。

(a) B_4C ペレット領域の単位長さ当たりの体積は②で求めた通りであるが、他の材料を含めないため B_4C ペレットの体積比はペレット理論密度そのものとなる。

(b) 制御棒要素 1 本当たりのギャップ (V_G)、及び被覆管 (V_C)、ワイヤ (V_W) の単位長さ当たりの体積を求める。

$$V_G = \pi \times (C_{rin}^2 - B_r^2)$$

$$V_C = \pi \times (C_{rou}^2 - C_{rin}^2)$$

$$V_W = \pi \times \left(\frac{W_r}{2} \right)^2 \times \frac{\sqrt{W_p^2 + (2 \times \pi \times C_{rou})^2}}{W_p}$$

ここで B_r : 制御棒ペレットの半径

(調整棒 : 6.10 mm、炉停止棒 : 7.10 mm)

C_{rin} : 被覆管の内半径

(調整棒 : 6.45 mm、炉停止棒 : 7.45 mm)

C_{rou} : 被覆管の外半径

(調整棒 : 8.45 mm、炉停止棒 : 8.45 mm)

W_r : ワイヤ径

(調整棒 : 1.20 mm、炉停止棒 : 1.20 mm)

W_p : ワイヤ巻付けピッチ

(調整棒 : 239.0 mm、炉停止棒 : 300.0 mm)

(c) 保護管 (V_S) 及び案内管 (V_R) の単位長さ当たりの体積を求める。

$$V_S = \pi \times (S_{rou}^2 - S_{rin}^2)$$

$$V_R = \pi \times (R_{rou}^2 - R_{rin}^2)$$

ここで S_{rin} : 保護管の内半径

(調整棒 : 45.0 mm、炉停止棒 : 45.0 mm)

S_{rou} : 保護管の外半径

(調整棒 : 47.0 mm、炉停止棒 : 47.0 mm)

R_{rin} : 案内管の内半径

(調整棒 : 52.8 mm、炉停止棒 : 52.8 mm)

R_{rou} : 案内管の外半径

(調整棒 : 55.3 mm、炉停止棒 : 55.3 mm)

(d) ペレットリングの間 (V_{I-1} , V_{I-2}) 及び最外層 (V_O) の単位長さ当たりの体積を求める。

$$V_{I-1} = \pi \times \left\{ \left(\mathbf{r}_2 - \frac{\mathbf{X}_2}{2} \right)^2 - \mathbf{X}_1^2 \right\}$$

$$V_{I-2} = \pi \times \left\{ \left(\mathbf{r}_3 - \frac{\mathbf{X}_3}{2} \right)^2 - \left(\mathbf{r}_2 + \frac{\mathbf{X}_2}{2} \right)^2 \right\}$$

$$V_O = \pi \times \left\{ \mathbf{r}_O^2 - \left(\mathbf{r}_3 + \frac{\mathbf{X}_3}{2} \right)^2 \right\}$$

ここで r_2 , r_3 : ペレットリングの中心半径 (②—(a) で算出)

$X_{1 \sim 3}$: ペレットリングの幅 (②—(b) で算出)

r_O : 制御棒集合体等価半径 (①で算出)

(e) 各ペレットリングの間 (V_{I-1} , V_{I-2}) 、および最外層 (V_O) に含まれる構造材 (V_{SUS}) 、ギャップ (V_{GAP}) の単位長さ当たりの体積を求め、そこから Na (V_{Na}) の単位長さ当たりの体積を求める。さらに求めた単位長さ当たりの体積から各々の体積比を求める。

まず、ペレットリング間は

$$V_{GAP-i} = V_G \times N'_i$$

$$V_{SUS-i} = (V_C + V_w) \times N'_i$$

$$V_{Na-i} = V_{I-i} - (V_{SUS-i} + V_{GAP-i})$$

ここで i : リング No. (1, 2)

N'_i : ペレットリング間で扱う要素本数

$N'_1 = 4$: 制御棒集合体中心の要素+第2リング要素本数の半分

$N'_2 = 9$: 第2リング要素本数の半分+第3リング要素本数の半分

次に最外層は

$$V_{GAP-O} = V_G \times N_3$$

$$V_{SUS-O} = (V_C + V_w) \times N_3 + (V_S + V_R)$$

$$V_{Na-O} = V_O - (V_{SUS-O} + V_{GAP-O})$$

ここで、 $N_3 = 6$ ：第3リング要素本数の半分

従って、各リングに於ける各々の体積比は

- ・第1ペレットリング

$$VR_{P-1} = TD \quad (TD : ペレット理論密度)$$

- ・第1-2ペレットリング間

$$VR_{GAP-1} = V_{GAP-1} / V_{I-1}$$

$$VR_{SUS-1} = V_{SUS-1} / V_{I-1}$$

$$VR_{Na-1} = V_{Na-1} / V_{I-1}$$

- ・第2ペレットリング

$$VR_{P-2} = TD \quad (TD : ペレット理論密度)$$

- ・第2-3ペレットリング間

$$VR_{GAP-2} = V_{GAP-2} / V_{I-2}$$

$$VR_{SUS-2} = V_{SUS-2} / V_{I-2}$$

$$VR_{Na-2} = V_{Na-2} / V_{I-2}$$

- ・第3ペレットリング

$$VR_{P-3} = TD \quad (TD : ペレット理論密度)$$

- ・第3ペレットリング-最外層間

$$VR_{GAP-O} = V_{GAP-O} / V_{I-O}$$

$$VR_{SUS-O} = V_{SUS-O} / V_{I-O}$$

$$VR_{Na-O} = V_{Na-O} / V_{I-O}$$

3.1.2 計算結果

① 制御棒集合体等価半径 r_o

$$r_o = 60.69434 \text{ (mm)}$$

② ペレット (B_4C) リングは以下の通りとなる。

(a) ペレット (B_4C) リングの中心半径

$$r_1 : 0.00 \text{ (mm)}$$

$$r_2 : 18.20 \text{ (mm)}$$

$$r_3 : 35.15970 \text{ (mm)}$$

(b) 各リングの幅 (X_i)

$$X_1 \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 6.10 / 7.10 \text{ (mm)}$$

$$X_2 \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 6.13352 / 8.30934 \text{ (mm)}$$

$$X_3 \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 6.34988 / 8.60246 \text{ (mm)}$$

③ 各領域の単位長さ当たりの体積および体積比は以下の通りとなる。

$$V_G \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 13.79945 / 15.99856 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_C \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 93.61946 / 49.95132 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_W \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 1.15854 / 1.14855 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_S \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 578.05305 / 578.05305 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_R \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 918.63311 / 918.63311 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_{I-1} \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 602.57320 / 461.37834 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$V_{I-2} \text{ (調整棒/炉停止棒)} : 1793.06325 / 1421.61407 \text{ (mm}^2\text{)}$$

V_{I-O} (調整棒/炉停止棒) : 6956.29820 / 6681.03080 (mm²)

V_{GAP-1} (調整棒/炉停止棒) : 55.19778 / 63.99424 (mm²)

V_{SUS-1} (調整棒/炉停止棒) : 379.11202 / 204.39949 (mm²)

V_{Na-1} (調整棒/炉停止棒) : 168.26340 / 192.98461 (mm²)

V_{GAP-2} (調整棒/炉停止棒) : 124.19501 / 143.98705 (mm²)

V_{SUS-2} (調整棒/炉停止棒) : 853.00204 / 459.89884 (mm²)

V_{Na-2} (調整棒/炉停止棒) : 815.86620 / 817.72819 (mm²)

V_{GAP-O} (調整棒/炉停止棒) : 82.79667 / 95.99136 (mm²)

V_{SUS-O} (調整棒/炉停止棒) : 2065.35418 / 1803.28538 (mm²)

V_{Na-O} (調整棒/炉停止棒) : 4808.14735 / 4781.75405 (mm²)

VR_{P-1} (調整棒/炉停止棒) : 0.95 / 0.95

VR_{GAP-1} (調整棒/炉停止棒) : 0.09160 / 0.13870

VR_{SUS-1} (調整棒/炉停止棒) : 0.62916 / 0.44302

VR_{Na-1} (調整棒/炉停止棒) : 0.27924 / 0.41828

VR_{P-2} (調整棒/炉停止棒) : 0.95 / 0.95

VR_{GAP-2} (調整棒/炉停止棒) : 0.06926 / 0.10128

VR_{SUS-2} (調整棒/炉停止棒) : 0.47572 / 0.32350

VR_{Na-2} (調整棒/炉停止棒) : 0.45501 / 0.57521

VR_{P-3} (調整棒/炉停止棒) : 0.95 / 0.95

VR_{GAP-O} (調整棒/炉停止棒) : 0.01190 / 0.01437

VR_{SUS-O} (調整棒/炉停止棒) : 0.29690 / 0.26991

VR_{Na-O} (調整棒/炉停止棒) : 0.69119 / 0.71572

3.2 個数密度の計算結果

3.1.2 項で求めた体積比に基づき算出した各領域の原子数密度を表 3.1 (調整棒および炉停止棒) に示す。また、尚、原子数密度の算出に当たって使用する密度および組成比等の条件は 2.1 節および 2.3 節に示したとおりである。

表1.1 現行もんじゅ炉心の体積比結果 (1/3)

		内側／外側炉心	軸方向プランケット	径方向プランケット
ペレット	V_f	2.84274E-01	3.11029E-01	4.16412E-01
ペレット中のボイド	V_v	5.01660E-02	2.34108E-02	3.13428E-02
ペレット-被覆管ギャップ	V_p	2.01123E-02	2.01123E-02	1.73869E-02
ボイド+ギャップ	V_v+V_p	7.02782E-02	4.35230E-02	4.87297E-02
被覆管	V_c	1.30019E-01	1.30019E-01	9.19023E-02
スペーサワイヤ	V_w	2.00280E-02	2.00280E-02	7.04209E-03
ラッパ管	V_d	9.66224E-02	9.66224E-02	9.66224E-02
保護管	V_{gu}			
案内管	V_g			
構造材 (SUS316)		2.46669E-01	2.46669E-01	1.95567E-01
構造材 (SUS304)				
冷却材	V_{Na}	3.98779E-01	3.98779E-01	3.39292E-01

表1.1 現行もんじゅ炉心の体積比結果 (2/3)

	V_f	1.82323E-01	調整棒		後備炉停止棒		固定吸収体
			Naフロウ		Naフロウ		
ペレット					2.47000E-01		3.47457E-01
ペレット中のボイド	V_v	9.59593E-03			1.30000E-02		1.82872E-02
ペレット-被覆管ギャップ	V_p	2.26553E-02			2.62657E-02		7.95156E-03
ボイド+ギャップ	V_v+V_p	3.22512E-02			3.92657E-02		2.62388E-02
被覆管	V_c	1.53700E-01			8.20076E-02		1.14192E-01
スペーサワイヤ	V_w	1.90204E-03			1.88563E-03		7.21570E-04
ラッパ管	V_d						9.66224E-02
保護管	V_{gu}	4.99484E-02			4.99484E-02		
案内管	V_g	8.76268E-02	8.76268E-02		7.93772E-02	7.93772E-02	
構造材 (SUS316)		2.93177E-01	8.76268E-02	2.13219E-01	7.93772E-02	2.11536E-01	
構造材 (SUS304)							
冷却材	V_{Na}	4.92249E-01	9.12373E-01	5.00515E-01	9.20623E-01	4.14768E-01	

表1.1 現行もんじゅ炉心の体積比結果 (3/3)

		しゃへい体				
		炉心上部	径プラ上部	炉心下部	径プラ下部	径方向しゃへい体
ボイド	V_v	3.54552E-01	4.65142E-01			
被覆管	V_c	1.30019E-01	9.19023E-02			
スペーサワイヤ	V_w	2.00280E-02	7.04209E-03		-	
内側しゃへい体	V_{shi}					6.10782E-02
外側しゃへい体	V_{sho}					6.18383E-01
遮蔽体部	V_{ish}			1.74160E-01	1.66841E-01	
遮蔽体固定ピン	V_{ishp}			6.42236E-03	6.15243E-03	
下部端栓	V_{lc}			7.03764E-02	2.64584E-02	
ノックバー	V_n			1.38945E-02		
支持グリッド	V_{gr}				1.23832E-02	
エントランスノズル	V_e			3.34113E-01	3.01370E-01	
ラッパ管	V_d	9.66224E-02	9.66224E-02	1.21326E-02	2.38055E-02	9.66224E-02
構造材 (SUS316)		2.46669E-01	1.95567E-01	6.11099E-01	5.37010E-01	9.66224E-02
構造材 (SUS304)						6.79461E-01
冷却材	V_{Na}	3.98779E-01	3.39292E-01	3.88901E-01	4.62990E-01	2.23917E-01

表1.2 もんじゅ高度化炉心の体積比計算結果 (1/3)

	内側／外側炉心	軸プラ	特殊燃料		特殊燃料インシューラ	
			D型	再装荷型	D型	再装荷型
ペレット	V_f	3.21371E-01	3.53400E-01	2.24959E-02	2.34601E-01	2.24959E-02
中空部	V_h	4.17150E-02	0.0			
ペレット中のボイド	V_v	1.69142E-02	2.66000E-02			
ペレット+被覆管+ギヤップ	V_p	1.85339E-02	1.85339E-02			
中空部+ボイド+ギヤップ	$V_h+V_v+V_p$	7.71632E-02	4.51339E-02			
被覆管	V_c	1.25835E-01	1.25835E-01			
スペーサワイヤ	V_w	1.46792E-02	1.46792E-02			
ラッパ管	V_d	8.75259E-02	8.75259E-02			
保護管	V_{su}					
案内管	V_g					
構造材 (PNC1520)		2.28040E-01	2.28040E-01	3.25835E-01	2.55133E-01	3.25835E-01
構造材 (SUS316)						
構造材 (SUS304)						
冷却材	V_{Na}	3.73427E-01	3.73427E-01	6.51669E-01	5.10266E-01	6.51669E-01
						5.10266E-01

表1.2 もんじゅ高度化炉心の体積比計算結果 (2/3)

		調整棒		後備炉停止棒		固定吸收体	
		Na7±0%	吸收体	Na7±0%	吸收体	Na7±0%	吸收体
ペレット	V_f		1.82323E-01		2.47000E-01		3.47457E-01
中空部	V_h						
ペレット中のボイド	V_v		9.59593E-03		1.30000E-02		1.82872E-02
ペレット-被覆管ギャップ	V_p		2.26553E-02		2.62657E-02		7.95156E-03
中空部+ボイド+ギャップ	$V_h+V_v+V_p$		3.22512E-02		3.92657E-02		2.62388E-02
被覆管	V_c		1.53700E-01		8.20076E-02		1.14192E-01
スペーサワイヤ	V_w		1.90204E-03		1.88563E-03		7.21570E-04
ラッパ管	V_d					9.66224E-02	9.66224E-02
保護管	V_{su}		4.99484E-02		4.99484E-02		
案内管	V_g	7.93772E-02	7.93772E-02	7.93772E-02	7.93772E-02		
構造材 (PNC1520)		7.93772E-02	2.84927E-01	7.93772E-02	2.13219E-01		
構造材 (SUS316)						9.66224E-02	2.11536E-01
構造材 (SUS304)							
冷却材	V_{Na}	9.20623E-01	5.00499E-01	9.20623E-01	5.00515E-01	9.03378E-01	4.14768E-01

表1.2 もんじゅ高度化炉心の体積比計算結果 (3/3)

		しゃへい体					
		炉心上部&ブレム	D型特燃上部&ブレム	再装荷型特燃上部&ブレム	炉心&特燃燃料下部	径方向置換反射体	径方向遮蔽体
ボイド	V_v	3.98534E-01	2.24959E-02	2.34601E-01			
被覆管	V_c	1.25835E-01					
スペーサワイヤ	V_w	1.46792E-02					
置換しゃへい体	V_{sh}					6.29426E-01	
内側しゃへい体	V_{shi}						6.10782E-02
外側しゃへい体	V_{sho}						6.18383E-01
遮蔽体部	V_{lsh}				2.24000E-01		
遮蔽体固定ピン	V_{lshp}				3.78696E-03		
下部端栓	V_{lc}				4.37617E-02		
ノックバー	V_n				8.19294E-03		
エントランスノズル	V_e				3.52986E-01		
ラッパ管	V_d	8.75259E-02			6.48051E-03	8.75259E-02	9.66224E-02
構造材 (PNC1520)		2.28040E-01	3.25835E-01	2.55133E-01		7.16951E-01	
構造材 (SUS316)					6.39208E-01		9.66224E-02
構造材 (SUS304)							6.79461E-01
冷却材	V_{Na}	3.73427E-01	6.51669E-01	5.10266E-01	3.60792E-01	2.83049E-01	2.23917E-01

表2.1 組成計算に使用する原子量

アボガドロ数 : $0.6022045 \times 10^{24} \text{ mol}^{-1}$ (理科年表S61より)

元素	質量数	元素	質量数
¹⁰ B	10.0129380	²³⁸ Pu	238.0495552
¹¹ B	11.0093050	²³⁹ Pu	239.0521578
¹² C	12.0000000	²⁴⁰ Pu	240.0538087
¹⁶ O	15.9949146	²⁴¹ Pu	241.0568469
Na	22.9897700	²⁴² Pu	242.0587385
Cr	51.9956100	²³⁵ U	235.0439252
Ni	58.6900000	²³⁶ U	236.0455629
Mo	95.9400000	²³⁸ U	238.0507858
Fe	55.8470000	²⁴¹ Am	241.0568246
⁵³ Mn	54.9380000	²⁴² Am	242.0595412
		²⁴² Cm	242.0588313
		²³⁷ Np	237.0481688
(理科年表S61より)		(放射線データブック)	

表2.2 SUS 304、SUS 316、PNC 1520鋼の組成及び密度

	SUS 304 ^{*1}	SUS 316 相当鋼 ^{*2}	PNC 1520 ^{*3}	
密度 (g/cm ³)	7.93	7.93	8.04	
組成 (w/o)				
C	0.08 以下 (*4)	(—)	0.04~0.08 (*4)	(—)
Si	1.00 以下	(—)	0.40~1.00	(—)
Mn	2.00 以下	(2.00)	1.40~2.00	(1.70)
P	0.045 以下	(—)	0.015~0.040	(—)
S	0.030 以下	(—)	0.010 以下	(—)
Ni	8.0~10.5	(9.25)	13.0~14.0	(13.50)
Cr	18.0~20.0	(19.00)	16.0~18.0	(17.00)
Mo	—	(0.00)	2.0~3.0	(2.50)
B	—	(—)	0.002~0.006	(—)
Ti	—	(—)	0.05~0.10	(—)
Nb	—	(—)	0.05~0.10	(—)
Fe	残り	(69.75)	残り	(65.30)
			残り	(60.80)

*1 : JISハンドブック（密度：JIS G 4310、組成：JIS G 4303（1982））

*2 : もんじゅ燃料体設認被覆管の鋼材をSUS316として使用する。

（密度：JIS G 4310、組成：PNC ZN8410 94-260「高速増殖炉「もんじゅ」装荷燃料体作成設計書」）

*3 : PNC ZN9410 92-112「高速炉炉心構成要素用改良オーステナイト鋼（PNC1520）材料強度基準（案）」

*4 : () 内の値を計算に使用する。

注) : 尚、Mn、Ni、Cr、Mo以外の組成は全てFeと見なす。

表2.3 Naの密度

温度 (°C)	密度 (g/cm ³)
400	$8.561950397 \times 10^{-1}$
424	$8.504608963 \times 10^{-1}$
436	$8.475905841 \times 10^{-1}$
467	$8.401661153 \times 10^{-1}$
468	$8.399263963 \times 10^{-1}$
471	$8.392071591 \times 10^{-1}$
473	$8.387276013 \times 10^{-1}$
476	$8.380081654 \times 10^{-1}$
477	$8.377683273 \times 10^{-1}$

Naの密度を求める際に、密度の温度依存性を下式にて考慮する。
 下式の出典は、ANL.7323 Thermophysical Properties of Sodiumである。

$$D_{\text{Na}}(T) = 0.950075 - 2.96760 \times 10^{-4} T \\ - 1.46049 \times 10^{-8} T^2 + 5.63787 \times 10^{-12} T^3$$

ここで $D_{\text{Na}}(T)$: Na密度 (g/cm³)
 T : 温度 (°C)

表2.4 現行もんじゅ炉心の原子数密度計算結果 (1/4)

単位: ×10²⁴ 個/cm³

No.	元素名	内側炉心			外側炉心		
		初装荷炉心	低燃焼度炉心	高燃焼度炉心	初装荷炉心	低燃焼度炉心	高燃焼度炉心
1	¹⁰ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	¹¹ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	¹² C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	¹⁶ O	1.37221E-02	1.37290E-02	1.37340E-02	1.37610E-02	1.37684E-02	1.37734E-02
5	²³ Na	8.75116E-03	8.75116E-03	8.75367E-03	8.76118E-03	8.76118E-03	8.76619E-03
6	Cr	3.87561E-03	3.87561E-03	3.87561E-03	3.87561E-03	3.87561E-03	3.87561E-03
7	Ni	2.72666E-03	2.72666E-03	2.72666E-03	2.72666E-03	2.72666E-03	2.72666E-03
8	Mo	3.08888E-04	3.08888E-04	3.08888E-04	3.08888E-04	3.08888E-04	3.08888E-04
9	Fe	1.38604E-02	1.38604E-02	1.38604E-02	1.38604E-02	1.38604E-02	1.38604E-02
10	Mn	3.66807E-04	3.66807E-04	3.66807E-04	3.66807E-04	3.66807E-04	3.66807E-04
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	8.07381E-04	8.62171E-04	9.01750E-04	1.11493E-03	1.17406E-03	1.21391E-03
13	²⁴⁰ Pu	3.32695E-04	3.55272E-04	3.71581E-04	4.59424E-04	4.83793E-04	5.00212E-04
14	²⁴¹ Pu	1.93264E-04	2.06380E-04	2.15854E-04	2.66882E-04	2.81038E-04	2.90576E-04
15	²⁴² Pu	5.49899E-05	5.87215E-05	6.14172E-05	7.59365E-05	7.99642E-05	8.26781E-05
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	1.12968E-05	1.11131E-05	1.09804E-05	1.02656E-05	1.00673E-05	9.93365E-06
18	²³⁸ U	5.56589E-03	5.47539E-03	5.41001E-03	5.05783E-03	4.96012E-03	4.89428E-03

表2.4 現行もんじゅ炉心の原子数密度計算結果 (2/4) 単位 : $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	軸方向ブランケット		径方向ブランケット	
		低燃焼度炉心	高燃焼度炉心	低燃焼度炉心	高燃焼度炉心
1	¹⁰ B	0.0	0.0	0.0	0.0
2	¹¹ B	0.0	0.0	0.0	0.0
3	¹² C	0.0	0.0	0.0	0.0
4	¹⁶ O	1.52713E-02	1.52713E-02	2.04455E-02	2.04455E-02
5	²³ Na	8.77370E-03	8.77621E-03	7.55852E-03	7.53301E-03
6	Cr	3.87561E-03	3.87561E-03	3.07270E-03	3.07270E-03
7	Ni	2.72666E-03	2.72666E-03	2.16178E-03	2.16178E-03
8	Mo	3.08888E-04	3.08888E-04	2.44896E-04	2.44896E-04
9	Fe	1.38604E-02	1.38604E-02	1.09889E-02	1.09889E-02
10	Mn	3.66807E-04	3.66807E-04	2.90816E-04	2.90816E-04
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	1.53893E-05	1.53893E-05	2.06035E-05	2.06035E-05
18	²³⁸ U	7.58225E-03	7.58225E-03	1.01513E-02	1.01513E-02

表2.4 現行もんじゅ炉心の原子数密度計算結果 (3/4)

単位: $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	調整棒		後備炉停止棒		固定吸収体
			Naフロフ		Naフロフ	
1	¹⁰ B	8.26804E-03	0.0	2.45902E-02	0.0	7.58231E-03
2	¹¹ B	1.17617E-02	0.0	2.48497E-03	0.0	3.05827E-02
3	¹² C	5.00743E-03	0.0	6.76879E-03	0.0	9.54125E-03
4	¹⁶ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	²³ Na	1.10399E-02	2.04623E-02	1.10403E-02	2.04623E-02	9.30224E-03
6	Cr	4.60633E-03	1.37677E-03	3.47966E-03	1.37677E-03	3.32360E-03
7	Ni	3.24076E-03	9.68620E-04	2.44810E-03	9.68620E-04	2.33830E-03
8	Mo	3.67128E-04	1.09730E-04	2.77331E-04	1.09730E-04	2.64893E-04
9	Fe	1.64737E-02	4.92377E-03	1.24443E-02	4.92377E-03	1.18862E-02
10	Mn	4.35966E-04	1.30305E-04	3.29333E-04	1.30305E-04	3.14562E-04
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	²³⁸ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表2.4 現行もんじゅ炉心の原子数密度計算結果 (4/4)

単位: $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	しゃへい体				
		炉心上部	径アラ上部	炉心下部	径アラ下部	径方向しゃへい体
1	¹⁰ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	¹¹ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	¹² C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	¹⁶ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	²³ Na	8.94364E-03	7.60948E-03	8.72209E-03	1.03837E-02	5.02191E-03
6	Cr	3.87561E-03	3.07270E-03	9.60145E-03	8.43738E-03	1.33748E-02
7	Ni	2.72666E-03	2.16178E-03	6.75505E-03	5.93607E-03	6.18204E-03
8	Mo	3.08888E-04	2.44896E-04	7.65242E-04	6.72465E-04	1.20994E-04
9	Fe	1.38604E-02	1.09889E-02	3.43378E-02	3.01747E-02	4.59545E-02
10	Mn	3.66807E-04	2.90816E-04	9.08730E-04	7.98556E-04	1.32492E-03
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	²³⁸ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表2.5 もんじゅ高度化炉心の原子数密度計算結果 (1/3)

単位: $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	内側炉心	外側炉心	軸方向ブランケット	特殊燃料		特殊燃料上下部インシュレータ	
					D型	再装荷型	D型	再装荷型
1	¹⁰ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	¹¹ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	¹² C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	¹⁶ O	1.55359E-02	1.55653E-02	1.73518E-02	1.08751E-03	1.13412E-02	1.10454E-03	1.15188E-02
5	²³ Na	8.19222E-03	8.21919E-03	8.22974E-03	1.42963E-02	1.11942E-02	1.43618E-02	1.12455E-02
6	Cr	3.18318E-03	3.18318E-03	3.18318E-03	4.54829E-03	3.56137E-03	4.54829E-03	3.56137E-03
7	Ni	3.76016E-03	3.76016E-03	3.76016E-03	5.37271E-03	4.20691E-03	5.37271E-03	4.20691E-03
8	Mo	2.87528E-04	2.87528E-04	2.87528E-04	4.10836E-04	3.21690E-04	4.10836E-04	3.21690E-04
9	Fe	1.20029E-02	1.20029E-02	1.20029E-02	1.71504E-02	1.34290E-02	1.71504E-02	1.34290E-02
10	Mn	3.51484E-04	3.51484E-04	3.51484E-04	5.02218E-04	3.93244E-04	5.02218E-04	3.93244E-04
11	²³⁸ Pu	5.70014E-05	6.91444E-05	0.0	3.99008E-06	4.16109E-05	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	9.83880E-04	1.19348E-03	0.0	6.88715E-05	7.18232E-04	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	5.08729E-04	6.17104E-04	0.0	3.56110E-05	3.71372E-04	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	1.78253E-04	2.16226E-04	0.0	1.24776E-05	1.30124E-04	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	1.30800E-04	1.58665E-04	0.0	9.15600E-06	9.54840E-05	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	2.81451E-05	3.41409E-05	0.0	1.97016E-06	2.05459E-05	0.0	0.0
17	²³⁵ U	1.82278E-05	1.70520E-05	2.62286E-05	1.27595E-06	1.33063E-05	1.66960E-06	1.74115E-05
18	²³⁸ U	5.98120E-03	5.59535E-03	8.60653E-03	4.18684E-04	4.36628E-03	5.47855E-04	5.71334E-03

表2.5 もんじゅ高度化炉心の原子数密度計算結果 (2/3)

単位： $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	調整棒		後備炉停止棒		固定吸收体	
			Na7#07		Na7#07		Na7#07
1	¹⁰ B	8.26804E-03	0.0	2.45902E-02	0.0	7.58231E-03	0.0
2	¹¹ B	1.17617E-02	0.0	2.48497E-03	0.0	3.05827E-02	0.0
3	¹² C	5.00743E-03	0.0	6.76879E-03	0.0	9.54125E-03	0.0
4	¹⁶ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	²³ Na	1.12250E-02	2.06473E-02	1.12253E-02	2.06473E-02	9.30224E-03	2.02606E-02
6	Cr	3.97727E-03	1.10802E-03	2.97629E-03	1.10802E-03	3.32360E-03	1.51811E-03
7	Ni	4.69818E-03	1.30886E-03	3.51578E-03	1.30886E-03	2.33830E-03	1.06806E-03
8	Mo	3.59256E-04	1.00084E-04	2.68841E-04	1.00084E-04	2.64893E-04	1.20994E-04
9	Fe	1.49972E-02	4.17804E-03	1.12228E-02	4.17804E-03	1.18862E-02	5.42923E-03
10	Mn	4.39167E-04	1.22346E-04	3.28640E-04	1.22346E-04	3.14562E-04	1.43681E-04
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	²³⁸ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表2.5 もんじゅ高度化炉心の原子数密度計算結果 (3/3)

単位: $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	しゃへい体					
		炉心上部、アケム	D型特燃上部、アケム	再装荷型特燃上部、アケム	炉心、特燃燃料下部	径方向置換反射体	径方向遮蔽体
1	¹⁰ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	¹¹ B	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	¹² C	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	¹⁶ O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	²³ Na	8.37505E-03	1.46154E-02	1.14440E-02	8.09168E-03	6.34809E-03	5.02191E-03
6	Cr	3.18318E-03	4.54829E-03	3.56137E-03	1.00431E-02	1.00078E-02	1.33748E-02
7	Ni	3.76016E-03	5.37271E-03	4.20690E-03	7.06576E-03	1.18219E-02	6.18204E-03
8	Mo	2.87528E-04	4.10835E-04	3.21690E-04	8.00442E-04	9.03982E-04	1.20994E-04
9	Fe	1.20029E-02	1.71504E-02	1.34290E-02	3.59172E-02	3.77369E-02	4.59545E-02
10	Mn	3.51484E-04	5.02218E-04	3.93244E-04	9.50529E-04	1.10506E-03	1.32492E-03
11	²³⁸ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	²³⁹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	²⁴⁰ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	²⁴¹ Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	²⁴² Pu	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	²⁴¹ Am	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	²³⁵ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	²³⁸ U	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

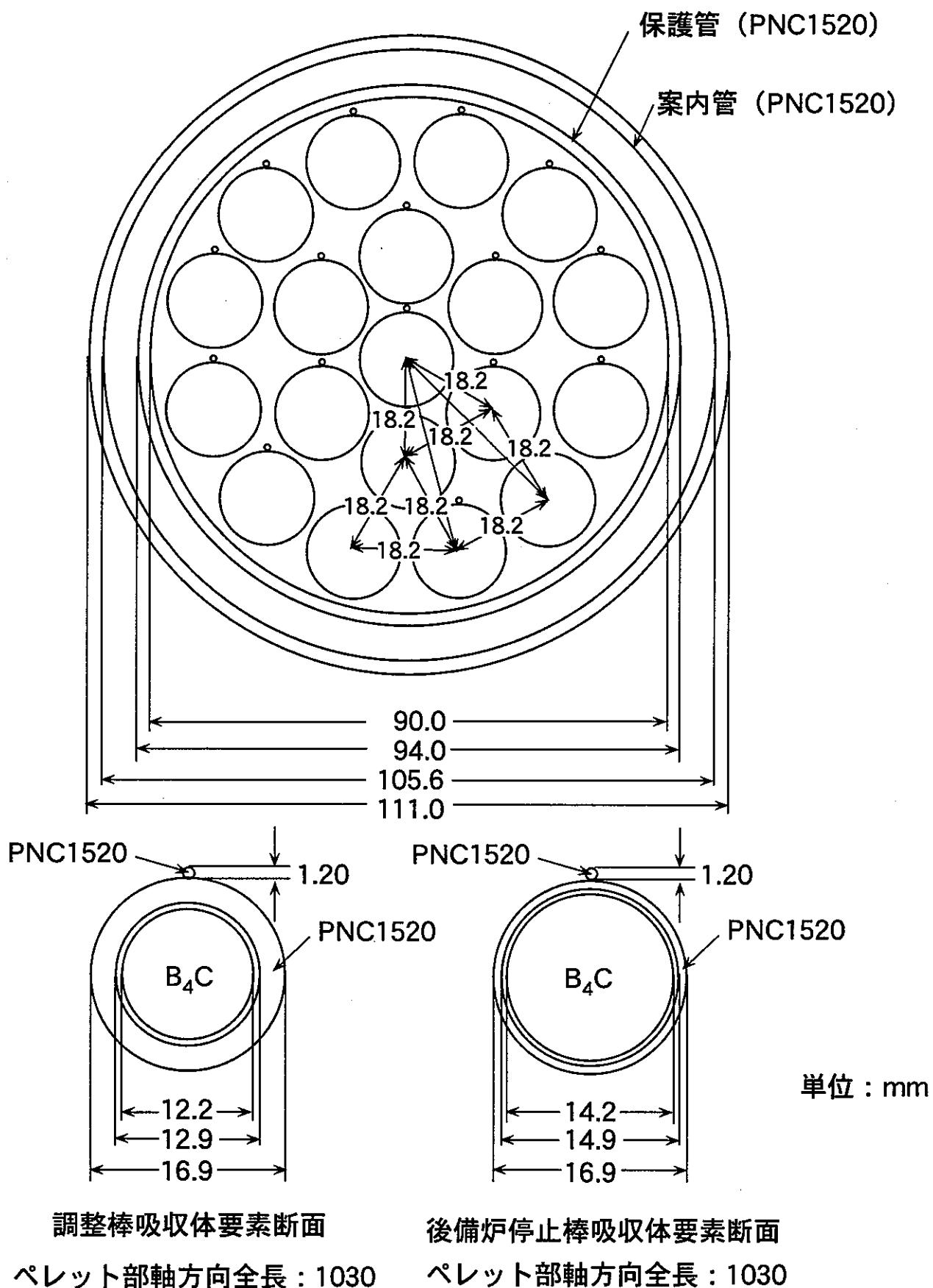


図3.1 制御棒寸法・形状

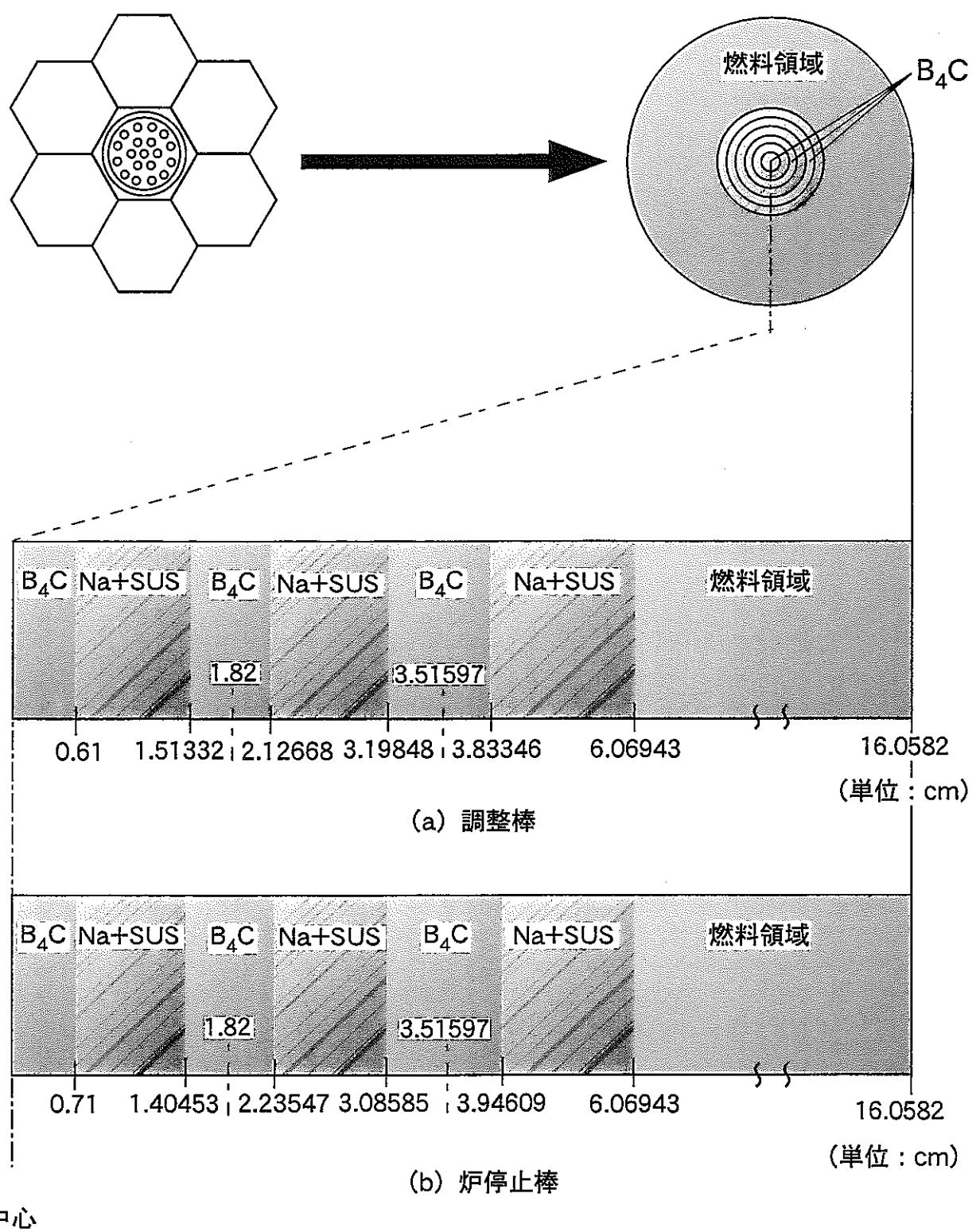


図3.2 制御棒リングモデルの形状

表3.1 もんじゅ高度化炉心の制御棒リング モデルの原子数密度計算結果

単位： $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	調整棒					
		第1ペレットリング	Na + SUS	第2ペレットリング	Na + SUS	第3ペレットリング	Na + SUS
1	¹⁰ B	4.30810E-02	0.0	4.30810E-02	0.0	4.30810E-02	0.0
2	¹¹ B	6.12848E-02	0.0	6.12848E-02	0.0	6.12848E-02	0.0
3	¹² C	2.60914E-02	0.0	2.60914E-02	0.0	2.60914E-02	0.0
4	¹⁶ O	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	²³ Na	0.00	6.26270E-03	0.00	1.02048E-02	0.00	1.55018E-02
6	Cr	0.00	8.78230E-03	0.00	6.64056E-03	0.00	4.14445E-03
7	Ni	0.00	1.03742E-02	0.00	7.84423E-03	0.00	4.89567E-03
8	Mo	0.00	7.93283E-04	0.00	5.99825E-04	0.00	3.74357E-04
9	Fe	0.00	3.31157E-02	0.00	2.50398E-02	0.00	1.56276E-02
10	Mn	0.00	9.69734E-04	0.00	7.33246E-04	0.00	4.57627E-04

単位： $\times 10^{24}$ 個/cm³

No.	元素名	後備炉停止棒					
		第1ペレットリング	Na + SUS	第2ペレットリング	Na + SUS	第3ペレットリング	Na + SUS
1	¹⁰ B	9.45776E-02	0.0	9.45776E-02	0.0	9.45776E-02	0.0
2	¹¹ B	9.55757E-03	0.0	9.55757E-03	0.0	9.55757E-03	0.0
3	¹² C	2.60338E-02	0.0	2.60338E-02	0.0	2.60338E-02	0.0
4	¹⁶ O	0.00	0.0	0.00	0.0	0.00	0.0
5	²³ Na	0.00	9.38097E-03	0.00	1.29006E-02	0.00	1.60519E-02
6	Cr	0.00	6.18405E-03	0.00	4.51576E-03	0.00	3.76766E-03
7	Ni	0.00	7.30497E-03	0.00	5.33429E-03	0.00	4.45058E-03
8	Mo	0.00	5.58590E-04	0.00	4.07897E-04	0.00	3.40323E-04
9	Fe	0.00	2.33184E-02	0.00	1.70277E-02	0.00	1.42068E-02
10	Mn	0.00	6.82838E-04	0.00	4.98627E-04	0.00	4.16022E-04

付録-B 燃料2重非均質効果 [付B1]

1 燃料2重非均質効果について

燃料集合体は燃料ペレット、被覆管、スペーサワイヤ等からなる燃料要素を複数本束ねてラッパ管に詰めたものである。しかし、現状では集合体内に多数の燃料要素を詰めた構造の格子計算を実施して非均質断面積を作成する計算コードが無いため、通常、基準計算に用いる燃料集合体の実効断面積は均質計算で作成したものとしている。従って、以降に示す計算手法を用いて非均質性を考慮した計算を行い、その結果を臨界性に対する補正值の一つとして扱い、燃料2重非均質効果とする。

2 計算手法

燃料集合体の非均質効果の考慮に当たっては、以下の4項目を考慮する必要がある。

効果A ピン燃料の非均質効果（ピン位置依存性）

効果B 集合体内の中性子束分布の効果

効果C 燃料ピン周辺の中性子ストリーミング効果

効果D ラッパ管周辺の中性子ストリーミング効果

しかし、現状は一度に上記4効果を全て考慮した計算を行う格子計算コードがない。そこで、初めに4つの効果のうち何れかを考慮したセルモデルを3種類用意し、各セルモデルに対して SLAROM コードで格子計算を行い、得られた断面積に基づいて CITATION-FBR コードで体系計算を行い、その結果を組み合わせることで対象炉心の非均質効果を求めている。但し、効果Aに含まれる位置依存性を考慮したピンの自己遮へい効果については、上記3種類のセルモデルを使用しても考慮できないため、その効果は両極端な2つのケースの間に存在するものとしている。尚、この手法はもんじゅ性能確認用炉心特性評価(V)で用いられた手法である。図2.1に3種類のセルモデルと非均質効果の算出方法の関係を示し、表2.1に非均質モデル計算時の SLAROM コードの入力データの例を示す。

ここで、断面積作成時に使用する3種類のセルモデルについて各々の特徴を記す。

- Model-1

このセルモデルは燃料ピンについて燃料領域、構造材領域、冷却材領域の3領域構造にモデル化して1ステップ目の格子計算を行い、その結果を2ステップ目の格子計算で集合体内に反映したものである。従って、上記の(A+B+C)の効果を考慮できる断面積を作成する事になる。

但し、効果Aについて1ステップ目の計算で燃料ピンの自己遮へい効果を考慮する際、ラッパ管の効果を取り入れていないため燃料ピンの非均質効果を過大評価する傾向にある。

- Model-2

このセルモデルは燃料ピンについて燃料領域、構造材領域、冷却材領域の3領域構造にモデル化し、その周囲にラッパ管とラッパ管周辺の冷却材を均質化して燃料ピン1本当たりに換算したものを巻き付けて1ステップ目の格子計算を行い、その結果の中から燃料ピン部分のものを2ステップ目の格子計算で集合体内に反映したものである。従って、上記のModel-1と同様に(A+B+C)の効果を考慮できる断面積を作成する事になる。

但し、効果Aについて1ステップ目の計算で燃料ピンの自己遮へい効果を考慮する際にラッパ管の効果を取り入れたことで、集合体内で均一に燃料ピンの自己遮へい効果に対するラッパ管の効果が考慮されるため、燃料ピンの非均質効果を過小評価することになる。

- Model-3

このセルモデルは燃料ピンについて燃料領域、構造材領域、冷却材領域の3領域構造にモデル化し、その周囲にラッパ管とラッパ管周辺の冷却材を均質化して燃料ピン1本当たりに換算したものを巻き付けた格子計算の結果を集合体レベルの結果として扱ったものである。従って、上記の(A+D)の効果を考慮できる断面積を作成する事になる。

但し、効果AについてはModel-2と同様に燃料ピンの非均質効果を過小評価することになる。

体系計算は全てマクロ断面積に基づいて実施される。この体系計算に於いて非等方拡散係数 (Benoist の D)、あるいは格子計算で求められた輸送断面積から定義される等方拡散係数 ($1/3 \Sigma_{tr}$) を指定できるため、その両者による計算結果の差から中性子ストリーミングの効果を評価できる。従って、前述した 3 種類の各断面積に対して 2 通りの体系計算を行うため、基準ケースを含めると 7 通りの体系計算が必要となる。表 2.2 に各計算ケースとそのケースで評価できる項目、および各効果の算出方法についてまとめたものを示す。また、もんじゅ高度化炉心を対象に算出した燃料 2 重非均質効果の値を表 2.3 に示す。

ここで、SLAROM コードは格子計算で作成した断面積を PDS ファイルに書き出し、マクロ断面積に関しては本文の 2.3 節に記したとおり計算オプションを指定することで、その出力項目を変更することが出来る。従って、このオプション選択によりカレント重みのマクロ輸送断面積をマクロ記録 PDS ファイル中の 7 番目の部分 ($\Sigma(PDS7)$) に出力できる。

一方、高度化炉心解析当時の JOINT-CITATION コードに於いて拡散係数を等方拡散係数として格子計算で得られたマクロ輸送断面積から定義する場合、マクロ記録 PDS ファイル中の 6 番目の部分 ($\Sigma(PDS6)$) を読み込むように設定されており、 $\Sigma(PDS7)$ のカレント重みのマクロ輸送断面積から定義することが出来なかった。なお、 $\Sigma(PDS6)$ は SLAROM コードの計算オプションに関わらず常に ϕ 重みのマクロ輸送断面積が出力される。従って、もんじゅ高度化炉心解析までの非均質効果を算出は全て ϕ 重みで定義された拡散係数で実施していた。

3 参考文献

[付 B1] 鈴木 他：“高速増殖原型炉「もんじゅ」JENDL-3.2 によるもんじゅ臨界性解析 一初臨界炉心・初期炉心一”，PNC-ZN2410 97-014 (1997)

表 2.1 非均質効果算出用断面積の入力データ (1/5)

PREP

INNER-CORE1 PIN-CELL1 "(FUEL+VOID), CLAD, NA"
 3 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 0 70 /
 1416.4 1.3 0 /
 17 5 1 /
 0.34000 0.05542 0.08499 /
 948 1.20928E-04 949 2.29349E-03 940 1.28331E-03 941 3.73695E-04
 942 3.20763E-04 925 3.30358E-05 926 2.66151E-06 928 1.43080E-02
 951 6.78991E-05 952 3.76545E-08 962 6.89284E-06 937 1.29194E-07
 8 3.89826E-02 884 8.62228E-05 854 9.85889E-06 894 6.19305E-04
 814 2.23433E-04 /
 24 1.39589E-02 28 1.64891E-02 42 1.26087E-03 26 5.26351E-02
 25 1.54133E-03 /
 11 2.19260E-02 /

PATH

INNER-CORE1 PIN-CELL1 "(FUEL+VOID), CLAD, NA"
 70 3 2 1 0 0 0 /
 3 3 3 0 3 0 0 0 0 6 1 0 0 1 0 /
 1 2 3 /
 0.00000 0.34000 0.39542 0.48041 /

PIJF

37 0 5 3 1 0 0 0 /
 2 100 1.00E-04 1.00E-05 0.01 1.4 /
 0 /

EDIT

2 2 1 0 0 /

IN1PI1

表 2.1 非均質効果算出用断面積の入力データ (2/5)

PREP

INNER-CORE1 PIN-CELL2(:MODEL3) "(FUEL+VOID),CLAD,NA,(NA+WRAP+NA)/127"
 4 0 0 1 1 0 1 0 0 0 0 70 /
 1416.4 1.3 0 /
 17 5 1 6 /
 0.34000 0.05542 0.08499 0.05817 /
 948 1.20928E-04 949 2.29349E-03 940 1.28331E-03 941 3.73695E-04
 942 3.20763E-04 925 3.30358E-05 926 2.66151E-06 928 1.43080E-02
 951 6.78991E-05 952 3.76545E-08 962 6.89284E-06 937 1.29194E-07
 8 3.89826E-02 884 8.62228E-05 854 9.85889E-06 894 6.19305E-04
 814 2.23433E-04 /
 24 1.39589E-02 28 1.64891E-02 42 1.26087E-03 26 5.26351E-02
 25 1.54133E-03 /
 11 2.19260E-02 /
 11 1.25341E-02 24 5.97922E-03 28 7.06301E-03 42 5.40088E-04
 26 2.25460E-02 25 6.60220E-04 /

PATH

INNER-CORE1 PIN-CELL2(:MODEL3) "(FUEL+VOID),CLAD,NA,(NA+WRAP+NA)/127"
 70 4 2 1 0 0 0 /
 3 4 4 0 4 0 0 0 0 6 1 0 0 1 0 /
 1 2 3 4 /
 0.00000 0.34000 0.39542 0.48041 0.53858 /

PIJF

37 0 5 3 1 0 0 0 /
 2 100 1.00E-04 1.00E-05 0.01 1.4 /
 0 /

EDIT

2 2 1 0 0 /

IN1MD3

表 2.1 非均質効果算出用断面積の入力データ (3/5)

EDIT

2 2 1 1 0 /
 1 3 1 3 /

IN1PI2

PREP

INNER-CORE1 "MODEL1,2" "(PIN:HOMO)*127,NA(IN),WRAP,NA(OUT)"
 4 0 0 1 1 0 1 0 0 0 2 0 70 /
 1416.4 1.3 0 /
 23 1 5 1 /
 5.41394 0.13046 0.28352 0.24152 /
 948 6.05706E-05 949 1.14877E-03 940 6.42787E-04 941 1.87177E-04
 942 1.60664E-04 925 1.65470E-05 926 1.33310E-06 928 7.16661E-03
 951 3.40094E-05 952 1.88605E-08 962 3.45250E-06 937 6.47109E-08
 8 1.95257E-02 11 7.07155E-03 24 2.46513E-03 28 2.91195E-03
 42 2.22669E-04 26 9.29532E-03 25 2.72197E-04 884 4.31874E-05
 854 4.93813E-06 894 3.10198E-04 814 1.11913E-04 /
 11 2.19260E-02 /
 24 1.39589E-02 28 1.64891E-02 42 1.26087E-03 26 5.26351E-02
 25 1.54133E-03 /
 11 2.19260E-02 /

3

INNER-CORE1 "MODEL1,2" WRAP

IN1WRP

4

INNER-CORE1 "MODEL1,2" NA(AROUND-WRAP)

IN1COL

表 2.1 非均質効果算出用断面積の入力データ (4/5)

PATH
 INNER-CORE1 MODEL1 "PIN-CELL1*127(HOMO),NA(IN),WRAP,NA(OUT)"
 70 3 2 1 0 1 0 /
 3 10 10 0 10 0 0 0 0 0 6 1 0 0 1 0 /
 1 1 1 1 1 1 1 3 2 3 /
 0.00000 0.48041 1.27104 2.09406 2.92222 3.75212 4.58281 5.41394
 5.54440 5.82792 6.06943 /
 1.30E-03 /
 IN1PI1
 IN1PI1
 IN1WRP
 IN1COL
 PIJF
 37 0 5 3 1 0 0 0 /
 2 100 1.00E-04 1.00E-05 0.01 1.4 /
 0 /
 EDIT
 2 2 1 0 0 /
 IN1MD1
 PATH
 INNER-CORE1 MODEL2 "PIN-CELL2*127(HOMO),NA(IN),WRAP,NA(OUT)"
 70 3 2 1 0 1 0 /
 3 10 10 0 10 0 0 0 0 0 6 1 0 0 1 0 /
 1 1 1 1 1 1 1 3 2 3 /
 0.00000 0.48041 1.27104 2.09406 2.92222 3.75212 4.58281 5.41394
 5.54440 5.82792 6.06943 /
 1.30E-03 /
 IN1PI2
 IN1PI2
 IN1WRP
 IN1COL

表 2.1 非均質効果算出用断面積の入力データ (5/5)

PIJF

37 0 5 3 1 0 0 0 /
2 100 1.00E-04 1.00E-05 0.01 1.4 /
0 /

EDIT

2 2 1 0 0 /

IN1MD2

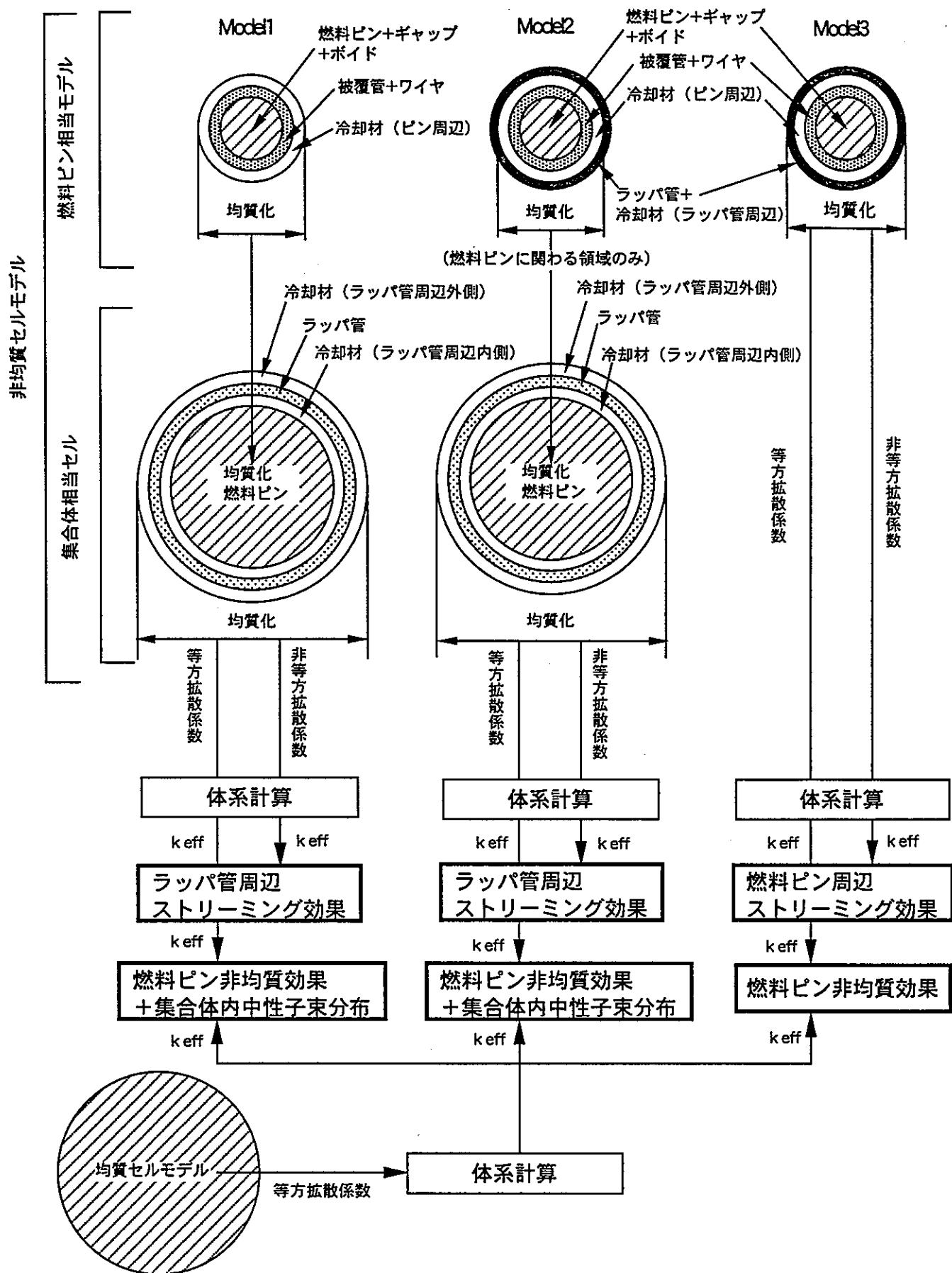


図2.1 ピンセルモデルと非均質効果の算出方法

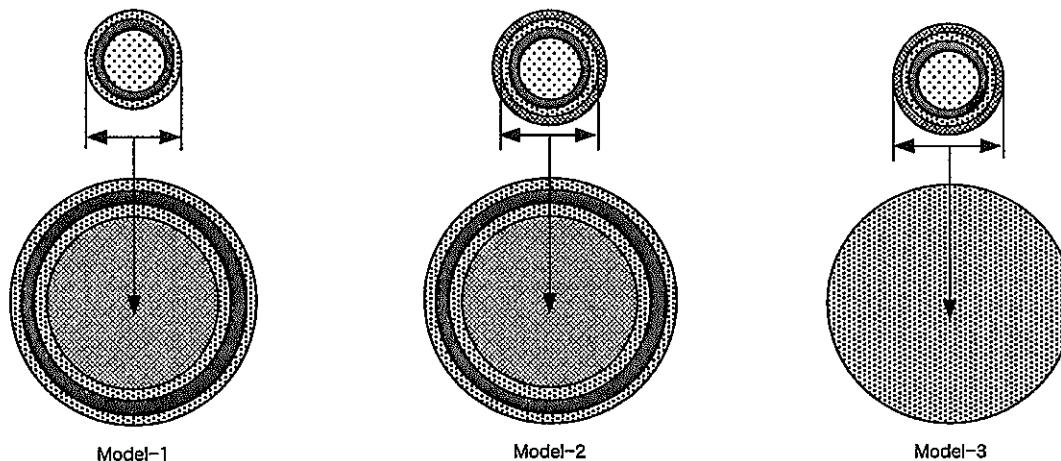


表2.2 各セルモデルが考慮する効果と非均質効果の算出方法

ケース	セルモデル	拡散係数	(a) ピン燃料非均質効果	(b) 集合体内中性子束分布	(c) ピン周辺中性子ストリーミング効果	(d) ラッパ管周辺中性子ストリーミング効果
(1)	均質	$1/3 \Sigma tr$	×	×	×	×
(2)	Model1	$1/3 \Sigma tr$	○ (過大評価)	○	×	×
(3)	Model1	Benoist D	○ (過大評価)	○	×	○
(4)	Model2	$1/3 \Sigma tr$	○ (過小評価)	○	×	×
(5)	Model2	Benoist D	○ (過小評価)	○	×	○
(6)	Model3	$1/3 \Sigma tr$	○ (過小評価)	×	×	×
(7)	Model3	Benoist D	○ (過小評価)	×	○	×

効果		算出方法
(a)過大評価+(b) 燃料ビン因子+セル内中性子束分布		(2)-(1)
(a)過小評価+(b) 燃料ビン因子+セル内中性子束分布		(4)-(1)
(a)過小評価 燃料ビン因子		(6)-(1)
(c) ラッパ管周辺ストリーミング		(3)-(2)
(d) ピッソ周辺ストリーミング		(7)-(6)
(A) < 非均質効果 < (B)		(A) : (a)過小評価+(b)+(c)+(d) (B) : (a)過大評価+(b)+(c)+(d)
平均補正值		$\{(A)+(B)\}/2$

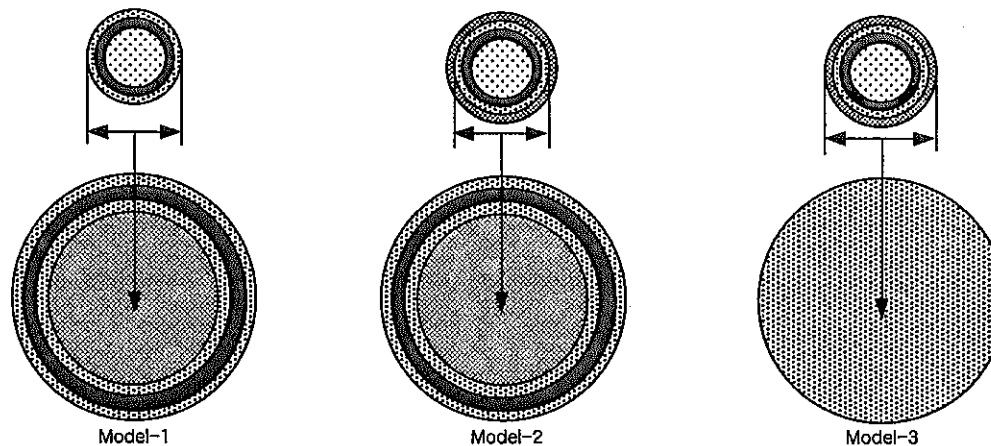


表2.3 もんじゅ高度化炉心の非均質効果

ケース	モデル	拡散係数	D型特殊燃料装荷時				再装荷型特殊燃料装荷時			
			平衡初期		平衡末期		平衡初期		平衡末期	
			Buckling 無し	Buckling 有り						
(1)	均質	1/3 Σ tr	1.0421017		1.0127120		1.0434871		1.0147067	
(2)	Model1	1/3 Σ tr	1.0472047	1.0474865	1.0175909	1.0178187	1.0483823	1.0486625	1.0193993	1.0196269
(3)	Model1	Benoist D	1.0468169	1.0470977	1.0172135	1.0174407	1.0479771	1.0482564	1.0190052	1.0192323
(4)	Model2	1/3 Σ tr	1.0459431	1.0462166	1.0164399	1.0166571	1.0472109	1.0474871	1.0183274	1.0185478
(5)	Model2	Benoist D	1.0455555	1.0394185	1.0160627	1.0162793	1.0468061	1.0470815	1.0179336	1.0181534
(6)	Model3	1/3 Σ tr	1.0447598	1.0450184	1.0152645	1.0154929	1.0460364	1.0462981	1.0171617	1.0173928
(7)	Model3	Benoist D	1.0442472	1.0444953	1.0147669	1.0149860	1.0455106	1.0457619	1.0166506	1.0168722

効果	算出方法	D型特殊燃料装荷時				再装荷型特殊燃料装荷時			
		平衡初期		平衡末期		平衡初期		平衡末期	
		Buckling 無し	Buckling 有り						
(a)過大評価+(b) 燃料ビン因子+セル内中性子束分布	(2)-(1)	0.468	0.493	0.473	0.495	0.447	0.473	0.454	0.476
(a)過小評価+(b) 燃料ビン因子+セル内中性子束分布	(4)-(1)	0.352	0.377	0.362	0.383	0.341	0.366	0.350	0.372
(a)過小評価 燃料ビン因子	(6)-(1)	0.244	0.268	0.248	0.270	0.234	0.257	0.238	0.260
(c) ラバーブラック管周辺ストリーミング	(3)-(2)	-0.085	-0.085	-0.036	-0.037	-0.037	-0.037	-0.038	-0.038
(d) ビン周辺ストリーミング	(7)-(6)	-0.047	-0.048	-0.048	-0.049	-0.048	-0.049	-0.049	-0.050
非均質効果	(A) (a)過小評価+(b)+(c)+(d)	0.270	0.294	0.277	0.297	0.256	0.280	0.263	0.283
	(B) (a)過大評価+(b)+(c)+(d)	0.385	0.410	0.389	0.410	0.363	0.387	0.366	0.387
※ 平均補正値		0.328	0.352	0.333	0.354	0.309	0.334	0.315	0.335

※ 平均補正値 : {(A)+(B)}/2

付録-C RZ 体系のモデリング手法の違いが核特性解析結果に与える影響

Pu 富化度調整計算コード「PENCIL」または「CITATION」を用いた 2 次元燃焼計算に於いて、対象炉心を 2 次元 RZ 体系にモデリングする際の手法の違いが核特性結果に与える影響を以下に示す。尚、ここでは Na フォロワ領域のモデリング手法と炉心部の軸方向領域分割数の設定方法について着目する。本文中で示した図 3.2-1、図 3.2-2 の違いは Na フォロワ領域のモデリング手法の違いである。

1.1 Na フォロワ領域のモデリング手法

もんじゅ高度化炉心解析に於いて 2 次元燃焼計算を実施する際は、リング効果の観点から制御棒を全引き抜き状態とし、その制御棒挿入領域を Na フォロワ領域として扱っている。ここで、Na フォロワ領域のモデリング手法の違いとは制御棒挿入領域内を全て Na フォロワ領域にした場合とその領域の上端にガスプレナム領域と遮へい体領域を、下端には遮へい体領域を設けるかの違いである。（図 3.2-1、図 3.2-2 参照）

もんじゅ高度化炉心を対象に以下の条件で各々の手法を用いて計算した結果を表 1.1-2 に示す。

解析条件

- ・対象炉心：D 型特殊燃料装荷時のもんじゅ高度化炉心
- ・解析コード：PENCIL
- ・取扱い核種数：26
- ・放出エネルギー：表 1.1-1 参照
- ・断面積：7 群ミクロ断面積
- ・Pu 富化度（内側／外側炉心）：24.05／29.11 (wt%)
- ・軸方向総メッシュ数：43
- ・軸方向領域総分割数：12
- ・炉心部軸方向メッシュ数：25
- ・炉心部軸方向領域分割数：5

各々の手法で 2 次元燃焼計算を実施した結果、実効増倍率の差は平衡初期で約 0.06 (% $\Delta k/kk'$)、平衡末期で約 0.07 (% $\Delta k/kk'$) 程度であり、他の項目につい

ても大きな影響は見られず、最終的に考慮すべく各種補正量に比べて極めて小さいものであった。従って、もんじゅ高度化炉心解析は Na フォロワ領域（制御棒挿入領域）の上端に遮へい体およびガスプレナム領域を、下端に遮へい体を領域を設けた体系の結果とした。しかし、高度化炉心解析以降に於いては 2 次元計算で簡易的に制御棒効果を評価することが予想されることから制御棒挿入領域を全て Na フォロワとしたモデリング手法をレファレンスとしている。

1.2 炉心部軸方向領域分割数の検討

2 次元燃焼計算を実施するに当たって対象炉心を 2 次元 RZ 計算体系にモデル化する際、その領域区分を細かく設定することにより詳細な結果が得られる。ここで、一般的に径方向については層単位で領域を分割しているが、軸方向については構成物質が異なる領域毎に分割した後、計算時間および計算容量の観点から核特性に与える影響が少ない遮へい体、ガスプレナム等の領域は 1 領域として扱い、軸方向ブランケットや、炉心部の領域分割については経験的な値を使用している。もんじゅ現行炉心解析の場合、軸方向ブランケットは 2 領域程度、炉心部は 5 領域程度に分割しており、高度化炉心解析に於いても同様の領域分割をしている。（但し、上部インシュレータ部分については領域高さが殆ど無いため 1 領域としている。）

従って、この炉心部の軸方向領域分割数の妥当性を検討するため、炉心部軸方向領域分割数をパラメータに核特性解析を行った。この時の解析条件を以下に示す。なお、軸方向領域分割数をパラメータにする際、軸方向の総メッシュ数は一定とし、メッシュ幅の調整を行っている。

解析条件

- ・ 対象炉心：D 型特殊燃料装荷時のもんじゅ高度化炉心
- ・ 解析コード：PENCIL
- ・ 取扱い核種数：26
- ・ 放出エネルギー：表 1.1-1 参照
- ・ 断面積：7 群ミクロ断面積
- ・ Pu 富化度（内側／外側炉心）：24.05／29.11 (wt%)

- ・ 軸方向総メッシュ数：43
- ・ 軸方向領域分割数：12
- ・ 炉心部軸方向メッシュ数：25
- ・ 炉心部軸方向領域分割数：5

結果をまとめたものを表 1.2-1 に示す。各々の結果を比較すると実効増倍率は軸方向領域分割数を 4 から 5 に変更した場合、約 0.03/0.05（平衡初期/末期）% $\Delta k/kk'$ 程度の減少で、5 から 6 及び 6 から 8 に変更した場合は約 0.02/0.02（平衡初期/末期）% $\Delta k/kk'$ 程度の減少であった。これに伴い、燃焼欠損反応度は軸方向領域分割数を 4 から 5、6、8 と増やすことで、分割数を 1 としたときの値に対して 4.4%、5.0%、5.3%、5.6%と増加し、領域分割数が 5 以上になると飽和し始める傾向にある。軸方向領域分割数と燃焼欠損反応度の関係を図 1.2-1 に示す。

上記より、もんじゅ高度化炉心解析に於いては炉心部の軸方向領域分割数を 5 としていたが、以降の解析に於いてはその分割数を 6 以上としている。

表1.1-1 核分裂当たりの放出エネルギー

核種	質量数	放出エネルギー	
		MeV	W
PU-238	238.04956	197.2120	3.15969E-11
PU-239	239.05216	201.3223	3.22554E-11
PU-240	240.05381	202.7389	3.24824E-11
PU-241	241.05685	202.9849	3.25218E-11
PU-242	242.05874	206.3038	3.30535E-11
U-235	235.04393	195.4609	3.13163E-11
U-236	236.04556	208.4826	3.34026E-11
U-238	238.05079	218.7694	3.50507E-11
AM-241	241.05682	221.1220	3.54277E-11
AM-242	242.05954	215.5000	3.45269E-11
CM-242	242.05883	219.4000	3.51518E-11
NP-237	237.04817	208.6095	3.34229E-11
B-10	10.01294	0.00	0.0E+00
B-11	11.00931	0.00	0.0E+00
C	12.00000	0.00	0.0E+00
O	15.99491	0.00	0.0E+00
NA	22.98977	0.00	0.0E+00
CR	51.99561	0.00	0.0E+00
NI	58.69000	0.00	0.0E+00
MO	95.94000	0.00	0.0E+00
FE	55.84700	0.00	0.0E+00
MN	54.93800	0.00	0.0E+00
FP(U238)	238.00000	0.00	0.0E+00
FP(U235)	235.00000	0.00	0.0E+00
FP(P239)	239.00000	0.00	0.0E+00
FP(P241)	241.00000	0.00	0.0E+00

注) MeV→Wへの変換係数は

1.60217733E-13 (W/MeV) を使用している。

表1.1-2 2次元RZ体系のモデリングの違いが核特性に与える影響

RZ計算体系	CASE1	CASE2	
対象炉心	D型特燃装荷時の高度化炉心		
断面積ライブラリ	JFS3J3		
少数群断面積	7群		
拡散係数の定義	カレント重み		
核分裂当りの放出エネルギー	表1参照		
炉心高さ (cm)	103		
軸プラ高さ (cm)	1.2/9.6		
運転サイクル日数	186		
燃料交換バッチ数 (内側/外側1/外側2)	5/6/7		
Pu富化度 (wt%)	内側炉心	24.05	
	外側炉心	29.11	
実効増倍率	BOEC	1.032898	
	EOEC	1.002953	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/k'$)		2.891	
最大線出力 ^{注1)} (W/cm)	BOEC	内側炉心	448.9
		外側炉心	398.9
	EOEC	内側炉心	435.5
		外側炉心	388.6
最大線出力比 (外側炉心/内側炉心)		0.892	
取出平均燃焼度 ^{注2)} (MWd/t)		102,218	
出力分担率 (%)	BOEC	内側炉心	57.9
		外側炉心1	21.0
		外側炉心2	19.4
		軸方向ブランケット	1.4
		D型特殊燃料	0.3
	EOEC	内側炉心	57.5
		外側炉心1	20.9
		外側炉心2	19.4
		軸方向ブランケット	1.8
		D型特殊燃料	0.3
増殖比 ^{注3)}	BOEC	炉心 ^{注4)}	0.69
		TOTAL	0.74
	EOEC	炉心 ^{注4)}	0.71
		TOTAL	0.76
物質収支	装荷重量 (kg)	7,153	
最大高速中性子束 (n/cm ² · s)		3.08E+15	
高速中性子照射量 (n/cm ²)		2.47E+23	
		2.48E+23	

CASE1 : Naフォロワ領域の上端に遮へい体およびガスプレナムを、下端に遮へい体を設置。

CASE2 : 制御棒插入領域を全てNaフォロワ領域とした体系。

注1) 出力ミスマッチファクターを考慮している。

注2) 燃料交換変則バッチを考慮している。

注3) Am241の崩壊を含む

注4) 照射燃料は含んでいない

表1.2-1 2次元RZ体系に於いて炉心部の軸方向領域分割数の違いが核特性に与える影響

対象炉心		D型特燃装荷時の高度化炉心				
断面積ライブラリ		JFS3J3				
少数群断面積		7群				
拡散係数の定義		カレント重み				
核分裂当りの放出エネルギー		表1参照				
炉心高さ (cm)		103				
軸プラ高さ (cm)		1.2/9.6				
運転サイクル日数		186				
燃料交換バッチ数 (内側/外側1/外側2)		5/6/7				
Pu富化度 (wt%)	内側炉心	24.05				
	外側炉心	29.11				
炉心部軸方向領域分割数		1	4	5	6	8
実効増倍率	BOEC	1.036144	1.033248	1.032898	1.032715	1.032540
	EOEC	1.007411	1.003442	1.002953	1.002704	1.002460
燃焼欠損反応度 (%Δk/kk)		2.753	2.875	2.891	2.898	2.906
		1.000	1.044	1.050	1.053	1.056
最大線出力 ^(注1) (W/cm)	BOEC	内側炉心	450.7	449.0	448.9	448.7
		外側炉心	402.4	399.1	398.9	398.6
	EOEC	内側炉心	442.4	436.5	435.5	435.7
		外側炉心	397.2	389.7	388.6	388.7
最大線出力比 (外側炉心/内側炉心)		0.898	0.893	0.892	0.892	0.892
取出平均燃焼度 ^(注2) (MWd/t)		102,284	102,225	102,218	102,213	102,210
出力分担率 (%)	BOEC	内側炉心	57.9	57.9	57.9	57.9
		外側炉心1	21.1	21.0	21.0	21.0
		外側炉心2	19.4	19.4	19.4	19.4
		軸方向ブランケット	1.3	1.4	1.4	1.4
		D型特殊燃料	0.3	0.3	0.3	0.3
	EOEC	内側炉心	57.5	57.5	57.5	57.5
		外側炉心1	20.9	20.9	20.9	20.9
		外側炉心2	19.5	19.4	19.4	19.4
		軸方向ブランケット	1.7	1.8	1.8	1.8
		D型特殊燃料	0.3	0.3	0.3	0.3
増殖比 ^(注3)	BOEC	炉心 ^(注4)	0.69	0.70	0.69	0.69
		TOTAL	0.74	0.73	0.74	0.74
	EOEC	炉心 ^(注4)	0.71	0.72	0.71	0.71
		TOTAL	0.76	0.75	0.76	0.76
物質収支	装荷重量 (kg)	7,153	7,153	7,153	7,153	7,153
最大高速中性子束 (n/cm ² · s)		3.11E+15	3.08E+15	3.08E+15	3.08E+15	3.08E+15
高速中性子照射量 (n/cm ²)		2.50E+23	2.48E+23	2.47E+23	2.47E+23	2.47E+23

注1) 出力ミスマッチファクターを考慮している。

注2) 燃料交換変則バッチを考慮している。

注3) Am241の崩壊を含む

注4) 照射燃料は含んでいない

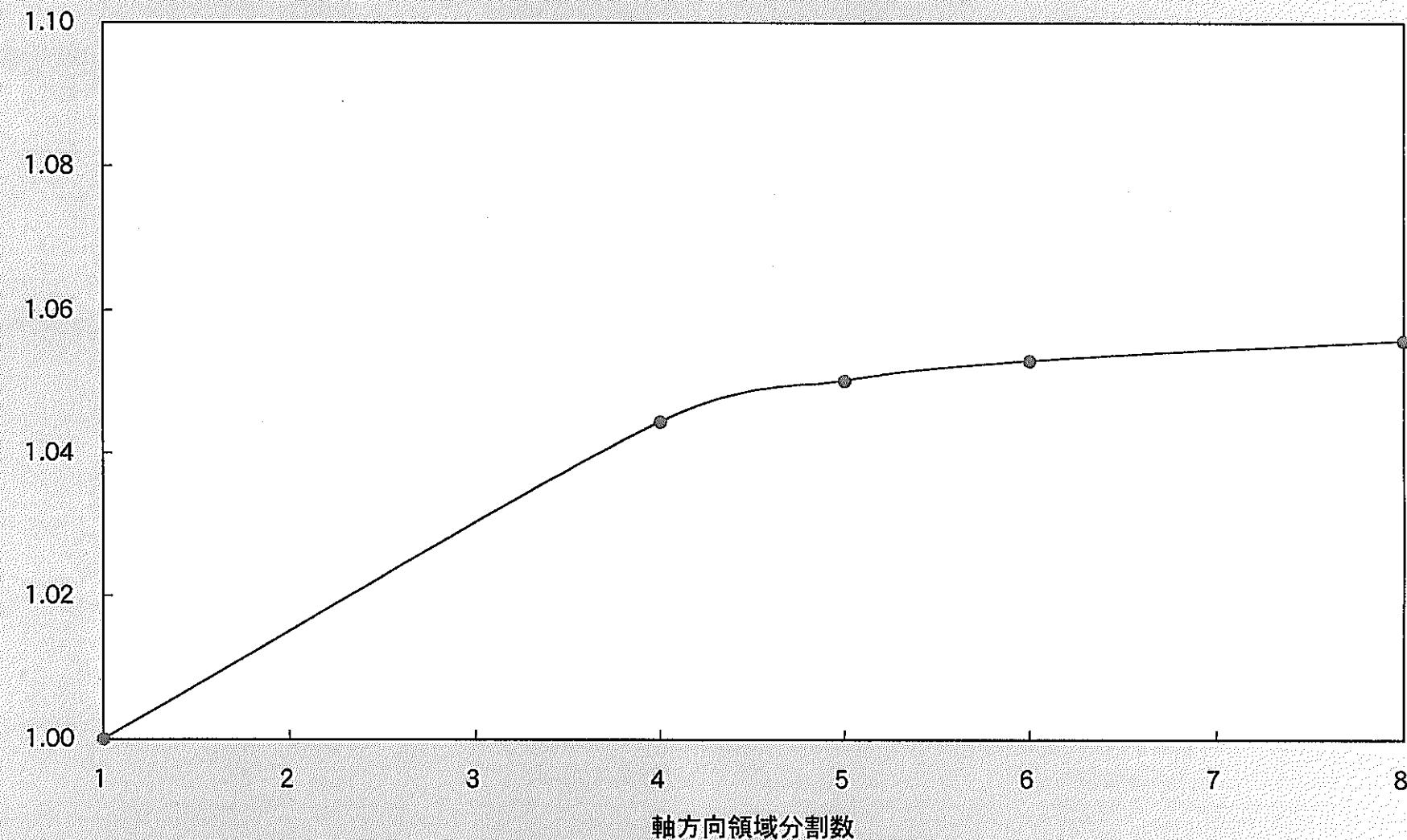


図1.2-1 炉心軸方向領域分割数と燃焼欠損反応度の関係