JAEA-Research 2006-059



# SEFOR実験解析(Ⅱ)

-等温温度係数(CoreⅡ)及び出力係数-

Analyses of SEFOR Experiments

-Isothermal Temperature Coefficient (Core  ${\rm I\!I}$  ) and Power Coefficient-

羽様 平 沼田 一幸\*

Taira HAZAMA and Kazuyuki NUMATA\*

次世代原子カシステム研究開発部門 炉心性能評価グループ Reactor Physics Analysis and Evaluation Group Advanced Nuclear System Research and Development Directorate

September 2006 Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

### SEFOR 実験解析 (II) - 等温温度係数(Core II) 及び出力係数 -

#### 日本原子力研究開発機構

#### 次世代原子力システム研究開発部門 FBR システムユニット

#### 羽樣 平、 沼田一幸\*

(2006年7月19日受理)

ドップラー反応度に関する核設計基本データベースの整備として、高速実験炉 SEFOR (Southwest Experimental Fast Oxide Reactor)の Core II の等温温度係数、Core I 及び Core II の出力係数について実験データを整理し、解析評価した。

データの整理ではオリジナルのレポートに立ち戻り、ノミナル値及び誤差を整備した。特に出力係数については燃料温度測定データから整理し、最新の熱伝導度評価式を採用して燃料温度評価の見直しを図った。その結果、実験誤差を既報告の11%から8%に低減することができた。

解析はJUPITER実験の解析で整備された高速炉解析手法にJENDL-3.2を使用して実施した。 等温温度係数解析では、温度範囲 450K~678K の平均値について解析値は実験値を 9%過大 評価する結果となった。実験誤差(3%)や解析誤差(4%)を超える差異であり、連続エネル ギーモンテカルロ計算値や既存の実験値との比較でも差異を説明ことはできなかった。

出力係数の解析では、解析値は実験値と実験誤差の範囲で一致した。

整備した出力係数の実験データに基づき、ドップラー定数のベンチマーク実験データを整備した。整備したドップラー定数は既存のベンチマーク実験値と約4%異なる。差異は熱伝導度評価式の更新によるものであり、評価式の信頼性や結果の炉心依存性から判断して妥当なものと思われる。

本報告書は NESI(㈱が日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に関するものを含み、 機構が取りまとめたものである。

大洗研究開発センター(駐在): 〒311-0131 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

\* NESI(株)

#### JAEA-Research 2006-059

### Analyses of SEFOR Experiments - Isothermal Temperature Coefficient (Core II) and Power Coefficient -

#### Taira HAZAMA and Kazuyuki NUMATA\*

FBR System Engineering Unit Advanced Nuclear System Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received July 19, 2006)

The SEFOR (South-West Experimental Fast Oxide Reactor) Doppler reactivity experiments have been analyzed on the isothermal temperature coefficient measured in SEFOR Core II, and on the power coefficient measured in SEFOR Cores I and II.

For the analyses, nominal values and uncertainties of the experimental data were re-evaluated, starting from a review of raw data in the original experimental reports. In particular, the power coefficient data were thoroughly re-evaluated, including fuel temperature data and associated uncertainties. The latest data on fuel thermal conductivity correlation was employed in the evaluation. As a result, experimental uncertainty of the power coefficient was reduced from 11% of reported value to 8%.

The analyses were performed based on JENDL-3.2 with a fast reactor analysis method developed in the analysis of JUPITER experiment.

In the temperature coefficient analysis, the calculated value overestimates the experimental value by 9% on the coefficient averaged over a temperature range from 450K to 678K. The discrepancy exceeds sum of the experimental (3%) and analytical (4%) uncertainties. Investigations with a continuous energy Monte Carlo calculation or existing reported data can not solve the discrepancy.

In the power coefficient analysis, the calculated values agree with experimental values within an experimental uncertainty of 8%.

Benchmark data for the Doppler constants has been prepared based on the re-evaluated values of Doppler relativities. The resulting Doppler constants are different form existing benchmark data by about 4%. The change is mainly attributed to the update of fuel thermal conductivity correlation. The new values are more reasonable than the existing values in that C/E values do not depend on the core types.

Keywords: SEFOR, Isothermal Temperature Coefficient, Power Coefficient, Fuel Thermal Conductivity Correlation, JENDL-3.2

This work was partly performed by NESI inc. under contract with Japan Atomic Energy Agency.

\* NESI Incorporation

Ξ	次
	~~

1	緒	言	- 1
2	等	[温温度係数の実験	. 2
	2.1	Core IIの炉心概要	·· 2
	2.2	Core IIにおける等温温度係数の測定	. 9
3	、等	[温温度係数の解析	13
	3.1	基本方針	13
	3.2	膨張の評価方法	13
	3.3	核特性の解析方法 ····································	20
4	、等	F温温度係数の解析結果 ····································	22
	4.1	中性子スペクトル	22
	4.2	- C応度の解析結果 ····································	22
	4	.2.1 膨張反応度	22
	4	.2.2 ドップラー反応度	23
	4.3	等温温度係数の解析値と実験値の比較	23
5	等		25
-	5.1	膨張反応度とドップラー反応度を独立に評価する影響	25
	52		26
	5.3	連続エネルギーモンテカルロ計算との比較	27
	5.4	等温温度係数に対する核種毎の寄与の分析	29
	5	541 ドップラー反応度に対する核種毎の寄与	29
	5	.4.2 膨張反応度(密度減少成分)に対する核種毎の寄与	29
	55	Core Iの解析結果との比較	37
	5.6		41
6	9.0 出	力係数の実験	42
Ū	61	*************************************	42
	6.2	2011 - 2012 - 2	55
7	 出	カドップラー反応度の解析	59
	71	- 出力ドップラー反応度の評価式	59
	7	1.1 温度の空間依存性が無い場合のドップラー反応度	59
	7	112 温度の空間分布を考慮した場合のドップラー反応度	59
	72		61
	7	/21 燃料温度の評価式	61
	7	2.2.7 //////////////////////////////////	62
	7	2.2.2 区内のたいはのマジーン 2.2.3 欧料 袖落答ギャップコンダクタンス	62
	73	出力係数解析の流れ	64
	74	留行の詳細及び結果	66
	7	741 炉心計算	66
	. 7	····· メ さいチ 742 等温ドップラー反応度係数の計算	66
	. 7	(14.3)局所出力密度の計算	69
	7	····································	70
	7	**** /////////////////////////////////	75
	7	1.1.2 75511 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	76
	7	1.4.7 出力ドップラー反応度の計算	77
8	出	カドップラー反応度の誤差評価	79
0	8.1	解析上の近似や実験情報の推定に伴う誤差	79
	8	1.1 燃料の熱伝導度評価式や燃料密度の設定の影響	80

8.1.3 中性子束及び随伴中性子束への2次元拡散計算値の使用の妥当性	······ 86 ····· 86
	86
8.1.4 断面積評価温度点の選定の妥当性	
8.1.5 出力ドップラー反応度の評価式の妥当性	87
8.2 燃料温度測定データに起因する誤差	89
8.2.1 温度上昇データのばらつき	89
8.2.2 出力ドップラー反応度の誤差·······	90
8.3 GE解析値との比較	91
8.3.1 結晶結合(CB)効果の有無	91
8.3.2 等温ドップラー反応度係数評価式の差異	91
8.3.3 炉心内温度分布に適用する重み関数とInsulatorの取り扱いの差異	92
8.4 誤差評価のまとめ	93
8.5 出力ドップラー反応度のまとめ	95
9. ドップラー定数のベンチマークデータの作成	96
9.1 ドップラー定数の評価	96
9.2 解析方法	97
9.3 サンプル計算	98
9.4 既存ベンチマークデータとの比較	98
9.4.1 ドップラー定数の比較	98
9.4.2 補正係数の比較	99
9.4.3 解析モデルの比較	99
10. 結言	101

謝辞		
参考文	参考文献	
付録A	解析モデル作成に使用した文献値	105
付録B	評価温度点での原子個数密度	110
付録C	等温温度係数解析値の詳細	114
付録D	等温温度係数のGE解析結果	118
付録E	出力ドップラー反応度解析値の詳細	119
付録F	温度計算用プログラム dopcal.for	123
付録G	ドップラー定数のベンチマーク計算用サンプル入力	127

### Contents

1. Preface ·····	1
2. Experiments on isothermal temperature coefficient	2
2.1 Outline of Core II	2
2.2 Isothermal temperature coefficient measurement in Core II	9
3. Analysis of isothermal temperature coefficient	13
3.1 Basic methodology	13
3.2 Evaluation of expansion	13
3.3 Analysis of nuclear characteristics	20
4. Analysis result of isothermal temperature coefficient	22
4.1 Neutron spectra	22
4.2 Analysis result of reactivity	22
4.2.1 Expansion reactivity	22
4.2.2 Doppler reactivity	23
4.3 Comparison between analysis and experiment on isothermal temperature coefficient	23
5. Discussion on isothermal temperature coefficient analysis	25
5.1 Separate analysis of expansion and Doppler components	25
5.2 Comparison with GE evaluation	26
5.3 Comparison with a continuous energy Monte Carlo calculation	27
5.4 Nuclide-wise contribution	29
5.4.1 Doppler reactivity	29
5.4.2 Expansion reactivity (density component)	29
5.5 Comparison with Core I results	37
5.6 Summary of isothermal temperature coefficient evaluation	41
6. Experiments on power coefficient	42
6.1 Measurement of power Doppler reactivity	42
6.2 Measurement of fuel temperature	55
7. Analysis of power Doppler reactivity	59
7.1 Theory of power Doppler reactivity analysis	59
7.1.1 Power Doppler reactivity without temperature distribution	59
7.1.2 Power Doppler reactivity with temperature distribution	59
7.2 Fuel temperature analysis	61
7.2.1 Theory of fuel temperature analysis	61
7.2.2 Thermal parameter	62
7.2.3 Fuel-clad gap conductance	62
7.3 Calculation flow of power coefficient	64
7.4 Analysis methods and results	66
7.4.1 Core calculation	66
7.4.2 Isothermal Doppler coefficient	66
7.4.3 Local power density	69
7.4.4 Evaluation of fuel temperature data	70
7.4.5 Adjustment of fuel-clad gap conductance	75
7.4.6 Temperature distribution in the core	76
7.4.7 Power Doppler reactivity	77
8. Uncertainty analysis of power Doppler reactivity	79
8.1 Uncertainty due to approximation and guess	79
8.1.1 Thermal conductivity correlation and fuel density	80
8.1.2 Plutonium enrichment in IFA	85
8.1.3 Use of 2D diffusion calculation for neutron flux	86
8.1.4 Temperature dependence of cross section	86
8.1.5 Use of first order perturbation for power Doppler reactivity evaluation	87
8.2 Uncertainty due to temperature data	89
8.2.1 Deviation of temperature data	89
8.2.2 Associated uncertainty of power Doppler reactivity	90

8.3 Comparison with GE analysis9	1		
8.3.1 Crystalline binding effect	1		
8.3.2 Isothermal Doppler coefficient			
8.3.3 Weighting function and Insulator temperature 92			
8.4 Summary of uncertainty analysis	3		
8.5 Summary of power Doppler reactivity	5		
9. Benchmark data for Doppler constant	6		
9.1 Evaluation of Doppler constant			
9.2 Analysis method 97			
9.3 Sample calculation			
9.4 Comparison with existing data	8		
9.4.1 Doppler constant	8		
9.4.2 Correction factor 9	9		
9.4.3 Analysis model	9		
10. Conclusion 10	1		

Acknowledgements	102
References ·····	103
Appendix A. References used in the analysis model	105
Appendix B. Atomic number density used in the evaluation	110
Appendix C. Detailed analysis data on isothermal temperature coefficient	114
Appendix D. GE analysis on isothermal temperature coefficient	118
Appendix E. Detail results on power Doppler reactivity	119
Appendix F. Program for fuel temperature calculation	123
Appendix G. Sample input data for benchmark analysis of Doppler constant	127

# Table list

表 2.1.1	SEFOR炉心の概要
表 2.1.2	Core IIで構成された炉心一覧
表 2.2.1	350 からの温度上昇による反応度変化測定値(緩やかな温度上昇時)
表 2.2.2	温度係数評価結果(緩やかな温度上昇時の測定値より算出)
表 2.2.3	温度係数評価結果(一定温度での測定値より算出)
表 3.2.1	線膨張率評価結果
表 3.2.2	評価対象温度毎のRZモデルの領域サイズ
表 4.2.1	膨張反応度の解析結果
表 4.2.2	ドップラー反応度の解析結果
表 4.3.1	温度上昇による反応度変化の解析値と実験値の比較
表 4.3.2	温度上昇による反応度変化の解析値と実験値の比較(350 からの積算値)
表 4.3.3	等温温度係数の解析値と実験値の比較
表 5.1.1	膨張反応度とドップラー反応度を一括評価した場合の結果
表 5.2.1	等温温度係数のGE報告値との比較
表 5.2.2	膨張反応度係数及びドップラー反応度係数のGE報告値との比較
表 5.2.3	膨張反応度係数及びドップラー反応度係数のGE報告値との比較(補正後)
表 5.3.1	連続エネルギーモンテカルロ計算との比較
表 5.3.2	連続エネルギーモンテカルロ計算との比較(成分別)
表 5.3.3	連続エネルギーモンテカルロ計算との比較(成分別、均質セルモデル)
表 5.4.1	ドップラー反応度の核種毎の寄与
表 5.4.2	ドップラー反応度の領域毎の寄与
表 5.4.3	ドップラー反応度の核種・成分毎の寄与(領域1)
表 5.4.4	膨張反応度(密度減少成分)の核種毎の寄与
表 5.4.5	膨張反応度(密度減少成分)の領域毎の寄与
表 5.4.6	膨張反応度(密度減少成分)の核種・成分毎の寄与(領域1)
表 5.5.1	Core II-Cの等温温度係数解析結果まとめ
表 5.5.2	Core I-Eの等温温度係数解析結果まとめ
表 5.5.3	等温温度係数の炉心間の比較
表 5.5.4	ドップラー反応度(350 760)の炉心間の比較(領域1)
表 5.5.5	膨張反応度(密度減少成分、350 760)の炉心間の比較(領域1)
表 5.6.1	JENDL-3.3を使用した場合との等温温度係数の比較
表 6.1.1	出力係数の測定が実施された炉心
表 6.1.2	出力ドップラー反応度の測定結果(Core I)
表 6.1.3	出力ドップラー反応度の測定結果(Core II)
表 6.1.4	出力ドップラー反応度のデータ整理結果
表 6.2.1	温度上昇測定結果(Core I)その1
表 6.2.2	温度上昇測定結果(Core I)その2
表 6.2.3	温度上昇測定結果(Core I)その3

表	6.2.4	温度上昇測定結果(Core I)その4
表	6.2.5	温度上昇測定結果(Core II)その1
表	6.2.6	温度上昇測定結果(Core II)その2
表	6.2.7	温度上昇測定結果(Core II)その3
表	7.4.1	等温ドップラー反応度の最確値(Core I)
表	7.4.2	等温ドップラー反応度の最確値(Core II)
表	7.4.3	等温ドップラー反応度に対する領域毎の寄与
表	7.4.4	等温ドップラー反応度に対する核種・反応毎の寄与(領域1)
表	7.4.5	出力密度の解析結果の比較
表	7.4.6	温度計位置での出力密度の評価に追加考慮した補正値
表	7.4.7	出力ドップラー反応度の解析値
表	7.4.8	出力ドップラー反応度のC/E値
表	7.4.9	出力ドップラー反応度解析における温度評価結果
表	8.1.1	熱伝導度や燃料密度を変化させたときの全炉心ドップラー反応度のC/E値(Core I)
表	8.1.2	熱伝導度や燃料密度を変化させたときの全炉心ドップラー反応度のC/E値(Core II)
表	8.1.3	熱伝導度や燃料密度に起因するドップラー反応度の誤差
表	8.1.4	熱伝導度を変えたときの温度評価結果の比較(燃料密度比 0.926)
表	8.1.5	熱伝導度を変えたときの温度評価結果の比較(燃料密度比 0.970)
表	8.1.6	燃伝導度を変えたときの678Kからの温度上昇の
		基準値(井上評価式使用時)に対する比(燃料密度比 0.970)
表	8.1.7	燃料密度による678Kからの温度上昇の変化(密度比0.970 / 密度比0.926)
		(井上の熱伝導度評価式使用)
表	8.1.8	中性子束及び随伴中性子束に輸送計算値を使用する効果
表	8.1.9	中性子束及び随伴中性子束に3次元計算値を使用する効果
表	8.1.10	) 出力ドップラー反応度評価における基準温度の設定値
表	8.1.11	温度設定を可変とした場合の出力ドップラー反応度評価結果の変化
表	8.1.12	2 燃料温度分布を考慮しない場合とする場合の摂動計算結果
表	8.1.13	3 摂動計算手法間の摂動分子、分母の比(温度分布あり/なし)の比較
表	8.1.14	・出力ドップラー反応度計算における散乱と漏れの寄与
表	8.2.1	燃料中心温度上昇の測定誤差
表	8.2.2	燃料温度上昇の測定誤差に起因するドップラー反応度の誤差
表	8.3.1	結晶結合効果の有無によるC/E値の変化
表	8.3.2	ドップラー反応度係数評価式の差異による影響
表	8.3.3	C/E値に対する重み関数の差異の影響(インシュレータの温度変化あり)
表	8.3.4	C/E値に対する重み関数の差異の影響(インシュレータの温度変化なし)
表	8.4.1	出力ドップラー反応度の実験誤差のまとめ
表	8.4.2	出力ドップラー反応度の実験誤差に関するGE評価値との比較
表	8.5.1	出力ドップラー反応度の解析結果のまとめ
表	9.1.1	ドップラー定数のベンチマークデータ
表	9.2.1	ベンチマーク計算用の補正係数
表	9.3.1	サンプル計算結果(JENDL-3.2)

表 9.3.2	サンプル計算結果(JENDL-3.3)······
表 9.4.1	既存ベンチマークデータとのドップラー定数の比較
表 9.4.2	HEDLのドップラー定数を使用した場合とのC/E値の比較
表 9.4.3	既存ベンチマークデータとの補正係数の比較
表 9.4.4	既存ベンチマークデータを用いた場合とのC/E値の比較

# Figure list

义	2.1.1	SEFOR燃料棒 ·······
义	2.1.2	SEFOR燃料集合体 ····································
义	2.1.3	SEFOR炉心構成(Core I-E)
义	2.1.4	SEFOR炉心構成(Core II-C)
义	2.2.1	350 からの温度上昇による負の反応度変化
义	3.2.1	使用したRZ体系モデル
义	3.2.2	非均質セル計算モデル
义	3.2.3	Tri-Z体系での燃料集合体のメッシュ分割概念
义	4.1.1	中性子スペクトルの比較
义	5.4.1	ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与
义	5.4.2	ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(U-238)
义	5.4.3	ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Pu-239)
义	5.4.4	ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Fe)
义	5.4.5	温度上昇(350 760)によるU-238実効ミクロ捕獲断面積の変化
义	5.4.6	膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与
义	5.4.7	膨張反応度(密度減少成分)の成分·エネルギー毎の寄与(U-238)
义	5.4.8	膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与(Pu-239)
义	5.4.9	膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与(Na)
义	5.4.10	膨張反応度(密度減少成分)の散乱項のエネルギー毎の寄与
义	5.5.1	ドップラー反応度の炉心間の比較(U-238捕獲反応)
义	5.5.2	膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(U-238捕獲反応)
义	5.5.3	膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(Pu-239捕獲反応)
义	5.5.4	膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(Pu-239生成反応)
义	6.1.1	SEFOR炉心構成(Core I-I)
义	6.1.2	SEFOR炉心構成(Core I-J) ····································
义	6.1.3	SEFOR炉心構成(Core I-L) ····································
义	6.1.4	SEFOR炉心構成(Core I-M)
义	6.1.5	SEFOR炉心構成(Core II-C)(Fig.2.1.4の再掲)
义	6.1.6	SEFOR炉心構成(Core II-E) ····································
义	6.1.7	SEFOR炉心構成(Core II-F) ····································
义	6.1.8	Doppler effect data (Core I)

义	6.1.9	Doppler effect data (Core II)
义	7.3.1	燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの調整の流れ
义	7.3.2	出力ドップラー反応度解析の流れ
义	7.4.1	出力ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Core I)
义	7.4.2	出力ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Core II)
义	7.4.3	等温ドップラー反応度の温度の関数へのフィッティング結果
义	7.4.4	燃料棒内温度分布
义	7.4.5	燃料中心温度測定結果 (Core I)(その1)
义	7.4.6	燃料中心温度測定結果 (Core I)(その2)
义	7.4.7	燃料中心温度測定結果 (Core I)(その3)
义	7.4.8	燃料中心温度測定結果 (Core II)(その1)
义	7.4.9	燃料中心温度測定結果 (Core II)(その2) ····································
义	7.4.10	燃料中心温度上昇の局所出力密度の関数へのフィッティング結果
义	7.4.11	燃料 被覆管ギャップコンダクタンスのLPDの関数へのフィッティング結果
义	7.4.12	燃料棒平均温度の分布(径方向)
义	7.4.13	燃料棒平均温度の分布(軸方向)
义	8.1.1	熱伝導度評価式の比較(燃料の理論密度比 0.926)
义	8.1.2	熱伝導度評価式の比較(燃料の理論密度比 0.970)
义	8.1.3	ギャップコンダクタンスの比較(燃料の理論密度比 0.926)
义	8.1.4	ギャップコンダクタンスの比較(燃料の理論密度比 0.970)
义	8.1.5	ギャップコンダクタンスの比較(Pu富化度の設定による差異)
义	8.1.6	炉心内メッシュ点毎の燃料温度上昇
义	8.2.1	燃料温度上昇データのフィッティング式からのばらつき
义	9.1.1	ドップラー定数の温度依存性

# 記号表

温度単位の変換(Fahrenheit, F -> Kelvin, K)

$$T(K) = (T(^{\circ}F) - 32) \times \frac{5}{9} + 273.15$$

# 1. 緒言

高速炉の核特性解析精度の検証や向上を目的に核設計基本データベースの整備を進めている。ドッ プラー反応度についてはこれまでに JUPITER 臨界実験や FCA 臨界実験におけるサンプルドップラー 反応度のデータを整備してきた<sup>[1][2]</sup>。

サンプルドップラー反応度は臨界集合体の一部に挿入した試料を加熱昇温することで測定される。こ れに対し SEFOR 実験のドップラー反応度は炉心全体の温度や出力を上昇させて測定されるものであり、 動力炉におけるドップラー反応度の模擬性に優れている。また、サンプルドップラー反応度と比べて反応 度変化が大きい、温度変化以外の寄与が小さいなどドップラー反応度の解析精度を評価する上で好まし い特徴を有している。

SEFOR(Southwest Experimental Fast Oxide Reactor)は全炉心ドップラー反応度の測定を主要な目 的として米国で建造された Na 冷却 MOX 燃料型の高速実験炉である。General Atomic 社(アメリカ)や Karlsruhe 研究所(ドイツ)、EURATOM の共同プロジェクトとして 1969 年 ~ 1972 年にかけてドップラー反 応度を中心とした数多くの実験が実施され、詳細データが公開されている。<sup>[3]~[15]</sup>

SEFOR 実験で使用される炉心は中性子スペクトルによって大きく2種類(Core Iと Core II)に分類され、 各炉心において同様な測定が実施されている。ドップラー反応度に関する測定は3種類実施されている。

1つは冷却材温度の調整により炉心温度を均一に変化させたときの反応度の測定であり、等温温度係 数が得られる。2つ目は炉心内の Na 平均温度をほぼ一定にした状態で出力を変化させたときの反応度 の測定であり、出力係数が得られる。最後の1つは過渡状態での出力係数の測定であり、1ドル近傍の反 応度投入による出力の時間変化よりドップラー反応度を評価するものである。

実験データはプロジェクト参加機関により評価され、解析値と測定値が誤差の範囲で一致することが 報告されている。

日本では 1973 年に東芝によって Core I の等温温度係数の解析が実施され<sup>[16]</sup>、C/E 値 0.93~1.00 が得られている。また 2000 年に日立によって SEFOR 実験データが解析システムの精度検証や向上を 行う上で有用であるとの見通しが得られている<sup>[17]</sup>。

以上を受けて SEFOR 実験を核設計基データベースへ組み込むべく本格的に評価を開始することとした。その際、解析に必要なデータはすべてオリジナルの文献データを基に改めて整備し、解析手法についても検討の上、最適な手法を採用することとした。

第1報として Core I の等温温度係数についてデータ、解析方法、結果をまとめている<sup>[18]</sup>。

本報は第2報であり、Core IIの等温温度係数、Core I及びCore IIの出力係数ついて実験データ、 解析手法、及び解析結果をまとめている。

第2章から第5章は等温温度係数について、第6章から第9章は出力係数について述べる。

# 2. 等温温度係数の実験

SEFOR の炉心及び等温温度係数実験の概要については既報告書<sup>[18]</sup>に記載している。ここでは実験の理解に必要な最低限の情報、及び本報告の評価対象の炉心 Core II についての追加情報を述べる。 Core II の情報は主に GE のレポート(GEAP-13838<sup>[8]</sup>)より引用した。重要事項については容易に参照できるように出典のページ数を記載している。

#### 2.1 Core II の炉心概要

表 2.1.1 に SEFOR 炉心の概要を示す。SEFOR の燃料は、燃料ペレットの両端が皿状に加工されて いる点と図 2.1.1 に示すように燃料棒が上下2分割されている点が最大の特徴である。皿状加工には、 温度の高い燃料中心での膨張をくぼみで吸収する効果があり、2分割燃料には、燃料燃料下部の軸方 向膨張をギャップで吸収することによって、温度上昇時の炉心長の膨張を抑制する効果がある。ANL-87-42 p.15 では、膨張の寄与が皿状加工により1/10 に、燃料分割によりさらにその1/3 に低減すると報 告されている。これらの特徴により、ドップラー反応度のみの寄与を高精度で測定できるようになっている。 ただし、本特徴は出力上昇時に有効なものであり、等温温度係数の測定時には燃料の温度が均一で、 かつ燃料以外の膨張の寄与が大きいためほとんど効果がない。

Core I と Core II の違いは図 2.1.2 に示すように燃料集合体中心の支持棒が BeO からステンレス鋼に 変更されている点である。その結果、中性子スペクトルが硬化し、ドップラー反応度が低下する。中性子 スペクトルの比較は後述の図 4.1.1 で示す。

Core II には表 2.1.2 のように 6 種類の炉心(Core II-A~-F)が存在する。標準の燃料(Pu 富化度 20.4%)以外の rod(B<sub>4</sub>C rod や Guinea pig rod(Pu 富化度 27.2%)など)の位置や本数が異なる。

本章の解析対象である等温温度係数は Core II-C 炉心で測定されている。Core II-C の炉心構成を 既報告の Core I-E 炉心(Core I の等温温度係数の解析で評価対象とした炉心)と比較して図 2.1.3、図 2.1.4 に示す。Core II-C では IFA(Instrumented Fuel Assembly)が燃料棒の中心温度測定用に装荷さ れている。IFA は BeO 支持棒とそれを挟む 2 本の燃料棒から構成され、燃料棒の中心には温度測定用 の熱電対(W-Re)が埋め込まれている。IFA の詳細については 6.2 節で述べる。

項目	仕様
	炉型∶Na 冷却 MOX 燃料高速炉
種別	最高熱出力∶20MW
	反応度測定法:径方向反射体の位置(高さ)の変化よって評価
	等価直径∶87.9943cm
	炉心部高さ:92.869cm
	炉心体積:約 600 🕅
炉心部	集合体チャンネル数∶109 体
	(ただし、中心1体分には燃料は装荷されない)
	集合体ピッチ∶8.0264cm
	形状:六角形
<u># ^ 4</u>	燃料棒本数∶6 本
集合体	中心支持棒:SUS304(Core I 及び温度測定用では BeO)
	構造材∶SUS304
	特徴:軸方向2分割型
	全長:126.0435cm
	直径∶2.4689cm
/公不计/卒	燃料長:85.8838cm(燃料ミート部)
	被覆管:SUS316
	被覆管内径:2.2606cm
	特徴∶両端を皿形に加工
	材質∶MOX
	直径∶2.2224cm
	高さ:1.5874cm
燃料ペレット	密度:10.2g/cm <sup>3</sup> (理論密度比 0.926)
(GUINEA PIG rod の値は異なる	O/M 比:1.99
場合のみ()内に示す)	U-235/U:0.0022 (0.00289)
	Pu/(U+Pu) :0.204% (0.272)
	Pu-fissile/(U+Pu):0.187 (0.250)
	Pu-240/Pu:0.0824
	Pu-239/Pu:0.9107
	材質∶UO₂
	直径:2.2428cm
	高さ:0.9525cm
1/2/1/29	密度:10.2g/cm <sup>3</sup>
	O/M 比:2.01
	U-235/U:0.0022
反射体 <sup>(a)</sup>	材質∶Ni

(a)軸方向位置によって反応度を制御する。制御棒はない。

表 2.1.2. Core II で構成された炉心一覧

炉心名	炉心構成	主要測定項目	備考
	燃料棒∶617 本	臨界性	Core-I-Q で BeO を
	高富化度燃料棒∶2本	反射体較正	SUS に変更
Coro II A	SUS rod∶97 本	燃料棒等の反応度価値	燃料棒 15 本未装荷
Core II-A	温度測定用燃料棒∶12本	1	
	BeO rod∶6 本		
	B₄C rod∶7 本		
	燃料棒∶617 本	臨界性	燃料棒9本未装荷
	高富化度燃料棒∶2本	核分裂反応率	
	SUS rod∶97 本		
Core II-B	温度測定用燃料棒∶12 本		
	BeO rod∶6 本		
	B₄C rod∶7 本		
	箔設置燃料棒∶6本		
	燃料棒∶620 本	臨界性	燃料棒全数装荷
	高富化度燃料棒∶6本	反射体較正	等温温度係数、出力
	SUS rod:103 本	/	係数測定日
Core II-C	温度測定用燃料棒:12本	等温温度係数(350 ~760 )	1971/10/14
	BeO rod∶6 本	出力係数(0~10MW)	~ 1971/11/4
	B₄C rod∶9 本	冷却材温度係数(at 10MW)	
		燃料温度	
	燃料棒∶620 本	臨界性	燃料棒1本未装荷
	高富化度燃料棒:6本	特殊燃料棒(FRED)の較正	
	SUS rod:103 本		
	温度測定用燃料棒:12本		
	BeO rod∶6 本		
	B₄C rod∶8 本		
	燃料棒∶620 本	臨界性	燃料棒全数装荷
	高富化度燃料棒:6本	反射体較正	出力係数測定日
	SUS rod:103 本	出力係数(0~10MW)	1971/12/2~12/7
Core II-E	温度測定用燃料棒:12本	過渡測定(超臨界(即発未臨界))	
	BeO rod∶6 本	燃料温度	
	B₄C rod∶8 本		
	箔設置燃料棒:1本		
	燃料棒∶618 本	臨界性	燃料棒全数装荷
	高富化度燃料棒:6本	反射体較正	出力係数測定日
	SUS rod:103 本	出力係数(0~20MW)	1971/12/10~
Core II-F	温度測定用燃料棒∶15 本	過渡測定(即発超臨界)	
	BeO rod∶6 本	燃料温度	
	B₄C rod∶7 本		
	箔設置燃料棒∶1 本		



(Unit inch)

### 図 2.1.1. SEFOR 燃料棒



図 2.1.2. SEFOR 燃料集合体



図 2.1.3. SEFOR 炉心構成(Core I-E)



図 2.1.4. SEFOR 炉心構成(Core II-C)

2.2 Core || における等温温度係数の測定

データは炉心全体の温度を 350 (約 180 )から 760 (約 400 )まで徐々に(~10 /h)変化させた 際の反射体の位置情報として 15 分間隔で記録されている。加えて主要温度点(450、550、760)で は数時間一定温度に維持して測定されている。温度は炉心容器内側に取り付けられた熱電対(誤差 0.25)によって測定されている。

記録された反射体位置のデータは別途測定された反射体位置と反応度を関連づける較正データによって 350 の状態からの反応度変化として整理されている。350 ~ 600 で取得されたデータには 350 での較正データが、600 ~ 760 でのデータには 550 での較正データが使用されている。較正データは移動対象の反射体に応じて複数存在し、反射体の位置関係の類似性を基準に使い分けられている。反射体の可動域は 100cm であり、350 では 6 個が上限位置、2 個(#3 及び#8)が中間位置、残りの 2 個(#5 及び#10)が下限位置にある(反射体番号は図 2.1.4 を参照)。760 では 7 個が上限位置、2 個(#5,#8)が中間位置、1 個(#10)が下限位置にある。温度点間の反応度調整は主に#3 と#8 の反射体で行われている。

反射体位置から反応度を評価する際の誤差は 3%又は 1.6¢のいずれか大きい方が与えられている (GEAP-13702 p.3-17)。ここで 1.6¢は 760 でのデータの再現性から得られた値であり、3%は干渉効果を 考慮(干渉効果評価結果(GEAP-13588 p.41)の最大値 4%を部分的に考慮)した値である。いずれも Core I で評価されている。

表 2.2.1 ~ 表 2.2.3 及び図 2.2.1 に反応度測定結果を示す。ここで示すデータは GEAP-13838 の TABLE F-1(計 276 点)から再現性確認用に取得された温度下降時のデータを除いたもの(計 200 点) である。

温度係数は2種類の方法で評価した。表 2.2.2 ではデータを図 2.2.1 のように温度範囲約 100 ごとに 一次式にフィッティングすることによって、表 2.2.3 では数時間一定温度に維持して得られたデータ間の 差から評価した。双方の値は誤差の範囲で一致しており、いずれの方法でも温度係数を正確に評価でき ることが分かる。測定誤差(1)としては反応度測定の寄与(3%)のみを一律に考慮した。同じ温度点での データのばらつきは表 2.2.3 に示すように 1%以下と無視できる。異なる温度範囲間の誤差の相関は類似 性より 100%と設定した。

なお、Core I に関する既報告書<sup>[18]</sup>では反応度誤差を 4%としていたが、その値は上述のように誤差で はなく干渉効果の最大値であった。本報では Core I の結果も再掲しているが、そこでは誤差を 3%に修 正している。

No.	T( )	Negative reactivity change (¢)	No.	T( )	Negative reactivity change (¢)	No.	T( )	Negative reactivity change (¢)	No.	T( )	Negative reactivity change (¢)
1	352	1.7	43	450	61.1	81	551	121.2	126	652	176.5
2	355	2.9	44	453	61.6	82	552	121.2	127	653	176.6
3	360	5.2	45	455	63.8	83	554	122.0	128	654	177.7
4	365	8.5	46	462	66.6	84	555	123.7	129	655	178.1
5	368	11.2	47	466	70.0	85	556	123.7	130	656	178.9
6	370	12.8	48	471	71.7	86	556	125.4	131	657	178.9
7	374	15.4	49	474	74.9	87	560	125.4	132	658	179.6
8	377	16.4	50	478	76.3	88	562	127.4	133	658	179.8
9	380	19.1	51	479	78.0	89	564	128.5	134	659	180.4
10	383	20.0	52	482	79.1	90	566	129.7	135	661	181.1
11	386	21.6	53	486	81.7	91	567	130.9	136	661	181.7
12	389	23.7	54	491	83.4	92	570	132.6	137	662	182.7
13	394	25.8	55	494	85.4	93	572	132.6	138	664	183.4
14	394	26.7	56	494	85.2	94	573	134.0	139	666	184.7
15	396	28.7	57	497	87.7	95	575	135.3	140	668	185.9
16	398	29.0	58	501	90.0	96	579	136.3	141	670	187.1
17	400	29.8	59	504	91.9	97	580	137.9	142	672	187.8
18	402	31.9	60	506	92.9	98	582	138.8	143	673	188.8
19	403	32.7	61	508	94.0	99	586	140.6	144	675	189.8
20	405	33.5	62	510	95.0	100	589	142.2	145	677	190.5
21	408	34.3	63	512	96.8	101	592	143.3	146	679	192.0
22	409	35.4	64	514	99.1	102	595	145.5	147	683	193.7
23	411	36.6	65	517	100.3	103	598	147.9	148	686	195.7
24	413	37.3	66	521	101.7	104	602	149.1	149	688	196.9
25	415	39.1	67	522	103.8	105	605	149.9	150	692	198.1
26	417	39.4	68	526	105.5	106	608	153.3	151	693	199.1
2/	418	40.5	69	528	105.4	107	611	154.7	152	695	200.0
28	419	41.1	70	529	106.8	108	614	155.9	153	597	201.3
29	421	42.7	71	532	100.0	109	610	157.7	104	700	202.0
21	423	43.2	72	 520	1109.9	110	621	109.1	100	702	203.7
22	424	44.5	73	520	110.9	112	622	161.0	150	704	200.4
22	420	44.9	74	539	113.1	112	625	101.0	157	700	207.1
3/	430	40.9	76	5/1	112.0	11/	627	162.5	150	710	200.5
35	430	48.2	70	5//	115.4	115	620	163.0	160	712	203.0
36	433	51.8	78	545	116.2	116	630	165.5	161	718	213.0
37	436	51.8	79	546	117.6	117	632	165.5	162	710	213.0
38	440	54.5	80	550	120.3	118	634	167.4	163	725	214.7
39	443	55.5	00	000	120.0	119	637	168.3	164	726	217.8
40	445	57.2				120	640	169.2	165	729	219.7
41	449	58.5				121	642	171.2	166	732	221.8
42	450	60.0				122	644	172.2	167	734	221.9
		00.0				123	644	172.4	168	738	224.1
						124	647	173.3	169	741	226.0
						125	649	175.4	170	743	226.5
									171	744	227.8
									172	746	229.0
									173	749	230.6
									174	750	230.6

表 2.2.1. 350 からの温度上昇による反応度変化測定値(緩やかな温度上昇時)

表 2.2.2.	温度係数評価結果(緩や	かな温度上昇時の測定値より算出	)
----------	-------------	-----------------	---

Temperature ()	450	550	650	760
Reactivty Coefficient	-0.594	-0.591	-0.547	-0.554
(¢/ ) <sup>*1</sup>	± 0.018	± 0.018	± 0.016	± 0.017
Depetivity $(d)^{*2}$	-59.4	-59.1	-54.7	-60.9
Reactivity (¢)	± 1.8	± 1.8	± 1.6	± 1.8
Reactivity change from	-59.4	-118.5	- 173.2	-234.1
350 (¢)	± 1.8	± 3.6	± 5.2	± 7.0

\*1: 図2.2.1のフィッティング結果。 誤差は反応度評価誤差(3%)

\*2:450 は350、他は隣接温度からの反応度変化

表 2.2.3.	温度係数評価結果(一定温度での測定値より算出)
	550 近傍

450 近傍

	~ ~ ~		
No.	Temperature (° F)	Negative reactivity change (¢)	Averaged values
1	450.00	58.9	
2	450.00	58.9	Temperature
3	449.00	58.3	( )
4	448.00	58.6	448.70
5	448.00	57.5	± 0.82
6	448.00	57.6	Popotivity (a)
7	448.00	57.6	Reactivity (¢)
8	448.00	57.3	58.2
9	449.00	58.5	± 0.6
10	449.00	58.7	

<u> </u>	四方		
No.	Temperature (° F)	Negative reactivity change (¢)	Averaged values
1	547.00	117.7	
2	547.00	118.2	Temperature
3	548.00	118.1	()
4	547.00	118.1	547.25
5	547.00	118.1	± 0.46
6	548.00	118.1	Popotivity (d)
7	547.00	118.1	Neactivity (¢)
8	547.00	118.1	118.1
			± 0.2

760 近傍

No.	Temperature (° F)	Negative reactivity change (¢)	Averaged values
1	755.00	233.8	
2	754.00	233.8	Temperature
3	755.00	233.4	( )
4	754.00	233.3	754.38
5	754.00	233.3	± 0.52
6	755.00	233.3	Poactivity (d)
7	754.00	233.3	Reactivity (¢)
8	754.00	232.0	233.3
			± 0.6

## 上記より算出した結果

Temperature ( )	450	550	760				
Reactivity change from	-59.0	-119.7	-236.5				
350 (¢) <sup>*1,*2</sup>	± 1.8	± 3.6	± 7.1				
Reactivity $(\phi)^{*3}$	-59.0	-60.8	-116.8				
	± 1.8	± 1.8	± 3.5				
Reactivty Coefficient	-0.590	-0.608	-0.556				
<b>(¢/</b> )	± 0.018	± 0.018	± 0.017				

\*1:温度係数を用いて当該温度のものに換算した値

\*2:誤差は反応度評価誤差(3%)

\*3:450 は350、他は隣接温度からの反応度変化



図 2.2.1. 350 からの温度上昇による負の反応度変化

# 3. 等温温度係数の解析

本章では等温温度係数の解析方法を述べる。Core I の場合と同じであるため、主要項目のみについて述べる。計算対象の炉心には当該測定の実施された Core II-C を使用した。反射体位置はすべて上限(全面反射体あり)とした。

3.1 基本方針

膨張反応度の評価にあたっては評価温度点毎にすべての膨張効果を一括考慮した体系モデル及び原子個数密度を作成し、基準温度(350)との実効増倍率の差から評価した。この方法は、膨張の 寄与を方向や要素ごとに個別に評価、積算するより厳密である。

ドップラー反応度の寄与は基準温度での体系モデルや原子個数密度を用い、セル計算で温度を変 更することによって評価した。

及び で得られた膨張反応度とドップラー反応度を加算し、基準温度からの反応度変化を算出し た。

基準計算は実験情報が明確である均質セル計算、RZ体系計算とした。非均質セルモデルは、情報の一部に不明確な箇所があるため、非均質セル計算の効果は補正値として考慮した。不明確な箇所は、Tightner Sleeve と Channel and Side Rods の集合体中の体積比であり、表 2.1.1 と図 2.1.2 から算出できる値と、附録 A の表 A.3(文献値)の間で以下のように異なる。

Tightner Sleeve の体積比: 0.0140(算出値)、0.0178(文献記載値)

Channel and Side Rods の体積比: 0.1083(算出値)、0.1133(文献記載値)

補正値には以下の効果を考慮した。

・輸送メッシュ効果:輸送計算の効果(無限メッシュ、無限 Sn 次数の効果を含めて評価)

- ・集合体非均質効果: 炉心集合体の非均質構造をセル計算で考慮する効果。
- ・炉心非均質効果: 炉心内に局在する B₄C rod 等の配置を考慮する効果(TriZ 体系モデルを使用)

・UF 効果:セル計算を 175 群(41keV 以下は超微細群(Ultra Fine))で実施することの効果。体系計 算はセル計算で得られる 175 群構造の断面積を用いて実施。

3.2 膨張の評価方法

作成した RZ 体系モデル及び均質原子個数密度をそれぞれ図 3.2.1 と付録 B に示す。膨張メカニズムは軸方向、径方向、Na の密度変化の3種類に区分し以下のように考慮した。

(1) 径方向の膨張による領域サイズの変更

炉心部の内側(Reg. 1~8,13,16,17)

全てステンレス鋼(SUS)の膨張に従うものとした。なお、非均質セルモデル(図 3.2.2)では燃料 等と被覆管の膨張率の違いにより被覆管内部のギャップも広がるが、ギャップはミート部と均質化 して扱い、構成要素すべてが SUS の膨張に従うものとした。

炉心部の外側

炉心部の外側は詳細構造や温度が不明であり、また SUS の膨張率を暫定的に炉心部以外に 適用した評価でその膨張効果は全膨張反応度の 1%程度と得られたので当該領域は膨張しないも のとした。加えて、炉心部の膨張分は Down comer-Inner vessel 領域で吸収するものとした。

(2)軸方向の膨張による領域サイズの変更

膨張率は炉心部(上下反射体を含む)で決定した。すなわち、中心チャンネルの場合、軸方向の 膨張は本来 SUS の膨張に従うが、解析時の領域設定を簡略にするため燃料領域に合わせた。 炉心部の両端(Na-steel と Na-grid 領域)は詳細構造や温度が不明であり、また SUS の膨張率を 用いた暫定評価でその膨張効果は全膨張反応度の 0.5%未満と得られたので膨張しないものとした。 ギャップ領域については図 2.1.1 で示したようにギャップ領域の上端が被覆管に固定されている

ため次式で算出した。

(ギャップ領域の膨張)
 = (ギャップ領域~下部反射体領域の被覆管の膨張)
 - (下部燃料の膨張) - (下部 Insulator の膨張) - (下部反射体の膨張)

なお、燃料棒と同じくギャップ領域を有する B<sub>4</sub>C rod については、燃料と膨張率が異なるため上式 で評価すると、ギャップ領域が燃料棒と異なる結果となり、解析時の領域設定が複雑になる。B<sub>4</sub>C の 膨張率は UO<sub>2</sub>の約半分であるが、炉心に装荷される B<sub>4</sub>C rod の本数が全 rod の 1%未満と少ないこ とを考慮し、B<sub>4</sub>C rod の膨張率は燃料と同じとした。

Tightner rod 中の BeO についても同様とした。これは GEAP-13695 TABLE A-1 に記載されてい る BeO の膨張率データ( $4.6 \times 10^{-6}$  <sup>-1</sup>)が今回使用した UO<sub>2</sub>の膨張率とほぼ等しいことによる。なお、 BeO rod は燃料棒や B<sub>4</sub>C rod と異なり2分割されていない(ギャップ部が無い)ため、膨張率を等し いと設定しても膨張後の全長に差異が生じる。しかしながら差異が現れるのは中性子インポータンス の小さい炉心両端部なので全長の差異は無視した。

(3) Na の膨張

Na は膨張しても体系外に排出されるだけなので、密度変化のみを考慮した。温度はすべての領域の Na で同一とした。

(4) 密度変化

Na 以外の物質については前述の領域サイズの変更に応じて、インベントリを保存するように密度 を設定した。Na の密度は温度に応じて決定した。

(5) 使用した膨張率データ

膨張率等は日立の報告書<sup>[17]</sup>でも使用された以下の評価式等を用いて算出した。

温度 T の単位は記載がない場合は()である。

燃料の線膨張率( -1):もんじゅ解析[27]で使用された次式

$$\alpha(PuO_2) = \left(1.114 \times 10^{-15} \times T^2 + 4.302 \times 10^{-9} \times T + 8.496 \times 10^{-6}\right) \times \beta$$
(3.2.1)

$$\alpha(UO_2) = (3.42 \times 10^{-13} \times T^2 + 5.162 \times 10^{-9} \times T + 7.107 \times 10^{-6}) \times \beta$$
(3.2.2)

$$\alpha(MOX) = \alpha(PuO_2) \times M_{PuO_2} + \alpha(UO_2) \times (1 - M_{PuO_2})$$
(3.2.3)

ここで

 $M_{PuO_{7}}$ : PuO<sub>2</sub>の重量 / MOX の重量

SUS の線膨張率(1):もんじゅ解析で使用されたオーステナイト系ステンレスに対する次式

$$\alpha(SUS) = (4.5929 \times 10^{-9} \times T^3 + 1.4541 \times 10^{-5} \times T^2 + 1.6999 \times 10^{-2} \times T + 14.8778) \times 10^{-6}$$
(3.2.5)

Naの密度(g/cm<sup>3</sup>):もんじゅ解析で使用された次式

$$\rho(Na) = 5.638 \times 10^{-12} \times T^3 + 1.4605 \times 10^{-8} \times T^2 + 2.2977 \times 10^{-4} \times T + 0.95001$$
(3.2.6)

Ni の線膨張率(<sup>-1</sup>):以下のデータ(理科年表(2000 年版))を内挿 13.4×10<sup>-6</sup> (273K)、15.3×10<sup>-6</sup> (500K)、16.8×10<sup>-6</sup> (800K) (3.2.7)

着目温度点での線膨張率を表 3.2.1 に、350、760 における領域サイズを表 3.2.2 に示す。原 子個数密度は付録 B に掲載している。

表 3.2.1. 線膨張率評価結果

**単位**(<sup>-1</sup>)

物母	温度( )					
初貝	350	450	550	650	700	760
U0 <sub>2</sub>	4.69E-06	4.86E-06	5.03E-06	5.21E-06	5.30E-06	5.40E-06
MOX	4.83E-06	5.00E-06	5.16E-06	5.33E-06	5.42E-06	5.52E-06
SUS(SUS304とSUS316)	9.70E-06	1.01E-05	1.04E-05	1.07E-05	1.08E-05	1.09E-05
Ni(反射体)	8.24E-06	8.51E-06	8.67E-06	8.82E-06	8.90E-06	8.99E-06

表 3.2.2. 評価対象温度毎の RZ モデルの領域サイズ 単位(cm)

(径方向)

R-region	価は夕	温度( )								
No.	过法口	350	450	550	650	760				
1	Central channel	4.22600	4.23017	4.23449	4.23895	4.24398				
2	CORE	39.89200	39.93139	39.97218	40.01422	40.06176				
3	Inner vessel	9.36800	9.32443	9.27932	9.23283	9.18025				
4	outer vessel	4.77700	4.77700	4.77700	4.77700	4.77700				
5	Reflector	15.29000	15.29000	15.29000	15.29000	15.29000				
6	SHIELD	13.48100	13.48100	13.48100	13.48100	13.48100				
	Total	87.034	87.034	87.034	87.034	87.034				

(軸方向)

Z-region	佰냆夕			温度( )		
No.	视线口	350	450	550	650	760
1	Na-steel	20.23900	20.23900	20.23900	20.23900	20.23900
2	REF(Upper)	10.10144	10.10990	10.11859	10.12744	10.13736
3	insulator	0.95356	0.95402	0.95449	0.95498	0.95553
4	CORE	33.53200	33.54848	33.56552	33.58314	33.60317
5	insulator	0.95356	0.95402	0.95449	0.95498	0.95553
6	GAP	3.27488	3.30661	3.33958	3.37357	3.41191
7	insulator	0.95356	0.95402	0.95449	0.95498	0.95553
8	CORE	37.77600	37.79456	37.81377	37.83361	37.85618
9	CORE(Lower)	14.66700	14.67421	14.68166	14.68937	14.69813
10	insulator	0.95356	0.95402	0.95449	0.95498	0.95553
11	REF(Lower)	10.10144	10.10990	10.11859	10.12744	10.13736
12	Na-GRID	30.74500	30.74500	30.74500	30.74500	30.74500
	Total	164.251	164.344	164.440	164.538	164.650

Z-region No.	dZ(cm)						
12	20.239	7 UPPER	15 Na STEEL			14 STEEL VOID	
11	10.10144	CENTRAL	8 REFLECTOR(UPPER)				
10	0.953561		16 INSULATOR				
9	33.532	6 MIDDLE	1 CORE				
8	0.953561	CENTRAL	16 INSULATOR	9 DOWN-			
7	3.274878	CHANNEL	3 GAP	COMER		11 RADIAL	12
6	0.953561		16 INSULATOR	INNER	VEOOEL	REFLECTOR	RADIAL
5	37.776	4 LOWER	1 CORE	VESSEL VOID	VESSEL		SHIELD
4	14.667	CENTRAL	2 CORE(LOWER)				
3	0.953561	CHANNEL	17 INSULATOR (LOWER)				
2	10.10144		5 REFLECTOR(LOWER)				
1	30.745		13 Na-GRID			14 STEEL VOID	
R-regio	on No.	1	2	3	4	5	6
dR (	cm)	4.226	39.892	9.368	4.777	15.290	13.481

図 3.2.1. 使用した RZ 体系モデル(領域サイズは 350 の値)



図 3.2.2. 非均質セル計算モデル(領域サイズは 350 の値) (上図:標準燃料セル及び GUINEA PIG rod セル用、下図:B₄C rod セル用)

\*Lower Core では中心領域の径が 1.01248 から 0.85361 になる \*Core I では燃料セルの中心領域が BeO となる。B<sub>4</sub>C rod は共通。



図 3.2.3. Tri-Z 体系での燃料集合体のメッシュ分割概念

# 3.3 核特性の解析方法

核特性解析方法、使用したコード等<sup>[20]</sup>の概要を以下に述べる。

- (1) 炉定数ライブラリー: JFS-3-J3.2R<sup>[19]</sup>
- (2) 格子計算コード: CASUP 燃料核種を含むセルには臨界バックリング、その他はゼロバックリングを適用 輸送断面積にはカレント重みを使用。 基準計算はすべて均質計算で実施。非均質補正値計算では燃料核種を含むセルのみ非均質計 算を実施。なお、均質計算の場合、従来は SLAROM を使用するが、本解析では CASUP を使用 した。(結果に有意な差異はない)。
- (3) 体系計算:
- 基準計算:拡散計算コード CITATION-FBR によるエネルギー70 群、2 次元 RZ 計算
- (4) 摂動計算: 拡散計算は PERKY 、輸送計算は SN-PERT
- (5) 実効遅発中性子割合:

Tuttle(1979)の yield, Saphier(1977)の遅発中性子スペクトルを使用。 温度は 350 で代表させ、 基 準計算値のみで評価。

(6) 補正計算:

輸送メッシュ効果

- ・輸送計算コード TWOTRAN-2 によるエネルギー70 群、2 次元 RZ 計算。
- ·メッシュ幅は 2.5cm/1メッシュ、Sn 分点は 8、格子計算は均質モデル。
- ·等方拡散係数(1/3 tr)を使用した拡散計算値との比によって評価。

メッシュ設定(メッシュ幅、Sn 分点)の効果の内訳(輸送効果とメッシュ効果)を把握するため、 拡散計算において径方向メッシュを 2.5cm から 1.0cm にした場合、輸送計算で S8 を S16 にし た場合で確認したところ、効果の比較的大きい膨張反応度の場合でもそれぞれ 0.5%未満、 0.3%未満であった。本体系ではメッシュ効果は無視できるほど小さく、上記輸送計算は無限メッ シュ相当の結果と見なすことができる。

集合体非均質効果

 ・セル内の非均質構造を等価のリング状にモデル化(図 3.2.2)した。非均質構造は 3.1 節 で 述べたように不明確であるため、ここでは付録 A 記載の体積比を正とし、図 2.1.2 において Channel(ラッパー管)と Tightner Sleeve の厚さを以下のように調整し、非均質モデルを作成し た。

Tightner Sleeve の厚み 0.060 -> 0.064 (inch)

Channel の厚み 0.035 -> 0.044 (inch)

·Benoist の非等方拡散係数<sup>[21]</sup>を使用。

- ・1つの集合体に異なる組成の燃料棒が含まれる場合(例えば図 2.1.3 での Guinea pig rod)、 燃料毎に集合体平均実効断面積を作成し、集合体内の燃料体積割合で XMIX コードを用い て混合した。
- ·拡散計算コード CITATION-FBR によるエネルギー70 群、2 次元 RZ 計算。
- ・基準計算値との比によって評価。

炉心非均質効果

- ·拡散計算コード CITATION-FBR によるエネルギー70 群、3 次元 TriZ 計算。
- ・格子計算は集合体非均質効果の場合と同様。

・局所的配置を考慮しない場合との比によって評価。

UF(Ultra Fine)効果

- ・SLAROM-UF<sup>[22]</sup>を使用し、基本炉定数 175 群 + 41keV<sup>1</sup>以下を超微細群とした格子計算を実施。
- ・セル計算モデルは非均質。拡散係数は等方(1/3 tr)。これは計算実施時に非等方拡散係数が使用できなかったためである。その後使用できるようになり確認したところ UF 効果の差異は両者で無視できるものであった。そのため、等方(1/3 tr)による評価値を見直さずに使用した。
   ・拡散計算コード CITATION-FBR によるエネルギー175 群、2 次元 RZ 計算。
- ·SLAROM-UF で JFS-70 群炉定数を用いた計算に対する比によって評価。

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>本解析時(2003年)の設定。現在の SLAROM-UF は 52.5keV。

# 4. 等温温度係数の解析結果

前章の手法で実施した解析結果を以下にまとめる。実効遅発中性子割合には基準計算で求めた 0.00330を使用している。

4.1 中性子スペクトル

解析対象の Core II-C 炉心(炉心体積約 600 兆)の炉心中心における中性子スペクトルを Core I-E 炉心及び高速実験炉「常陽」MK-I(同約 200 兆)や大型高速炉の模擬臨界実験体系である ZPPR-9(同約 5000 ポ)と比較して図 4.1.1 に示す。

Core II-C 炉心の中性子スペクトルは集合体中心の BeO rod が SUS rod に置換されたことにより Core I-E 炉心より硬くなり、ZPPR-9 と「常陽」MK-I の中間に位置している。



図 4.1.1. 中性子スペクトルの比較

4.2 反応度の解析結果

等温温度係数の実験値は、温度変化による反応度から算出されている。解析値においても、まず、温 度変化による反応度を評価した。

以下に反応度の膨張による寄与、ドップラー反応度による寄与、温度係数の解析結果を順に示す。

#### 4.2.1 膨張反応度

膨張反応度の最確計算値(基準計算値及び補正係数)を表 4.2.1 に示す。評価はすべて直接計算で 実施した。補正係数算出のための詳細データは附録 C に記載している。

解析値の誤差は統合炉定数の作成時の考え方<sup>[23]</sup>に倣い、各種補正効果の 50%を暫定値として算出 したものである。ただし、統合炉定数作成時や既報告書<sup>[18]</sup>では含めていない UF 効果の誤差も含めてい る。膨張反応度の誤差には線膨張率の誤差に起因する誤差 2.8%(既報告書<sup>[18]</sup> 付録 C)も関連するが、 核特性解析の誤差とは性質が異なるため分けて示している。 補正値の算出には輸送メッシュ効果については均質セルモデルを、集合体非均質効果については RZ体系モデルを用いた。参考として輸送メッシュ効果を推定した非均質セルモデルで、集合体非均質 効果を TriZ体系モデルで算出した結果も附録 C に示しているが、使用モデルへの依存性は無視できる。

補正値の中では輸送メッシュ効果が最も大きく、約 9%反応度を変化させる効果がある。中性子の漏れ に密接に関連するためである。

集合体非均質効果も約 5%と大きい。これは膨張反応度には燃料の密度減少が大きく寄与していることによる(5.4.2 項参照)。すなわち、集合体を非均質で扱うと中性子が燃料に効果的に吸収されるため、燃料の密度減少効果がより大きく現れたものと解釈できる。

	甘淮斗笞店		補正係数				解析語	吴差(¢)
温度変化	を午前昇値	輸送炒	集合体非	炉心非均	山口が甲	最確値(¢)	補正係数の	線膨張率の
	(\$)	シュ効果	均質効果	質効果	이 있木		みの寄与	誤差を含む
350 ->450	-37.8	0.910	1.047	1.003	1.000	-36.1	1.8	2.1
450 ->550	-39.0	0.916	1.041	1.002	1.004	-37.5	1.7	2.0
550 ->650	-40.2	0.910	1.046	1.003	1.002	-38.5	1.9	2.2
650 ->760	-45.3	0.918	1.041	1.003	1.004	-43.7	2.0	2.3

表 4.2.1. 膨張反応度の解析結果

4.2.2 ドップラー反応度

ドップラー反応度の基準計算値及び補正値の評価結果を表 4.2.2 に示す。膨張反応度とは異なり、評価は摂動計算で実施している。評価の詳細は付録 C に記載している。

補正値の中では集合体の非均質効果が最も大きく、反応度変化(絶対値)を約 6%大きくする効果があ る。5.4.1 項で示すようにドップラー反応度には燃料の寄与が支配的であるが、集合体を非均質で扱うと、 減速された中性子が効果的に燃料に吸収されるので、この結果は物理的に妥当なものである。

次いで効果が大きいのは UF 効果(約2%)で、断面積の共鳴構造を詳細に扱う効果が現れている。

温度変化	基準計算値 (¢)	基準計算値 輸送外 集合体非 炉心非均 (¢) シュ効果 均質効果 質効果 UF効果		最確値(¢)	解析誤差(¢)		
350 ->450	-27.2	1.000	均良効未 1.069	<u>員 201</u> 年 1.006	0.973	-28.4	1.1
450 ->550	-24.4	1.000	1.069	1.006	0.973	-25.5	1.0
550 ->650	-22.1	0.999	1.070	1.006	0.975	-23.2	0.9
650 ->760	-22.2	0.999	1.070	1.006	0.977	-23.3	0.9

表 4.2.2. ドップラー反応度の解析結果

4.3 等温温度係数の解析値と実験値の比較

前節の膨張反応度とドップラー反応度を合計し、実験値と比較して表 4.3.1 に示す。表 4.3.2 は温度 積算値、表 4.3.3 は温度係数に換算した結果である。

C/E 値は温度によらず 10%近い過大評価となっている。結果の検討は次章で述べる。

		解析値(¢)				宝騇皔美	解析記言	
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度 合計		実験値(¢)	C/E	天禄朱左 (%)	所+1/1 天 <del>左</del> (%)	
350 ->450	-36.1 ± 2.1	-28.4 ±1.1	-64.5 ± 2.3	-59.4 ± 1.8	1.09	3	4	
450 ->550	-37.5 ± 2.0	-25.5 ± 1.0	-63.0 ± 2.2	-59.1 ± 1.8	1.07	3	4	
550 ->650	-38.5 ± 2.2	-23.2 ±0.9	-61.7 ± 2.4	-54.7 ± 1.6	1.13	3	4	
650 ->760	-43.7 ± 2.3	-23.3 ±0.9	-67.0 ± 2.5	-60.9 ± 1.8	1.10	3	4	

表 4.3.1. 温度上昇による反応度変化の解析値と実験値の比較

表 4.3.2. 温度上昇による反応度変化の解析値と実験値の比較(350 からの積算値)(a)

		解析値(¢)				宇騇誤美	解析誤美
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	実験値(¢)	C/E	(%)	(%)
350 ->450	-36.1 ± 2.1	-28.4 ±1.1	-64.5 ± 2.3	-59.4 ± 1.8	1.09	3	4
350 ->550	-73.6 ± 4.1	-54.0 ± 2.0	-127.5 ± 4.6	-118.5 ± 3.6	1.08	3	4
350 ->650	-112.1 ± 6.3	-77.2 ± 2.9	-189.2 ± 7.0	-173.2 ± 5.2	1.09	3	4
350 ->760	-155.7 ±8.7	-100.5 ± 3.7	-256.2 ± 9.5	-234.1 ± 7.0	1.09	3	4

(a) 表 4.3.1 から算出。各温度範囲間の誤差の相関は類似性から 100%と見なした。

表 4.3.3. 等温温度係数の解析値と実験値の比較

		解析値(¢/ )			C/E <sup>⋽</sup>	宇驗誤美	解析誤美
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	実験値(¢/ )		(%)	(%)
350 ->450	-0.361 ± 0.021	-0.284 ±0.011	-0.645 ± 0.023	-0.594 ± 0.018	1.09	3	4
450 ->550	-0.375 ± 0.020	-0.255 ±0.010	$-0.630 \pm 0.022$	-0.591 ± 0.018	1.07	3	4
550 ->650	-0.385 ± 0.022	-0.232 ± 0.009	-0.617 ± 0.024	-0.547 ± 0.016	1.13	3	4
650 ->760	-0.397 <u>+</u> 0.021	-0.212 <u>+</u> 0.008	-0.609 <u>+</u> 0.023	-0.554 ± 0.017	1.10	3	4
350 ->760	-0.380 ± 0.021	$-0.245 \pm 0.009$	-0.625 ± 0.023	-0.571 ± 0.017	1.09	3	4

# 5. 等温温度係数の解析結果の検討

解析結果の妥当性や物理的寄与の詳細を確認するため以下の 5 点を検討した。順に各検討項目に ついて述べ最後に総括する。

膨張反応度とドップラー反応度を独立に評価する影響 等温温度係数の GE 解析値との比較 連続エネルギーモンテカルロ法による評価との比較 ドップラー反応度に対する核種毎の寄与の分析 Core I との比較

5.1 膨張反応度とドップラー反応度を独立に評価する影響

本解析では膨張反応度とドップラー反応度を分離して評価し、また、ドップラー反応度の評価においては 350 の体系モデルと原子個数密度を用いている。その妥当性を確認するために基準計算において膨張反応度とドップラー反応度を一括して考慮した計算(反応度評価はすべて直接計算)を行い、分離評価した場合と比較した(表 5.1.1)。

差異は最大 1.4%であり、直接計算に伴う評価のばらつきを考慮すると、ドップラー反応度を 350 の体 系モデルで分離評価する影響は無視できる。

	甘淮計管値		補正	E係数			分離評価に	公離討(市)
温度変化	至午前 异他	輸送メッ	集合体非	炉心非均		最確値(¢)	よる最確値	刀触計闸/
	(¢)	シュ効果	均質効果	質効果	UF幼果		(¢)	一括評1個
350 ->450	-65.1	0.949	1.051	1.005	0.988	-64.5	-64.5	1.000
450 ->550	-63.3	0.949	1.051	1.004	0.990	-62.7	-63.0	1.004
550 ->650	-61.9	0.936	1.051	1.005	0.991	-60.6	-61.7	1.017
650 ->760	-66.9	0.941	1.050	1.004	0.994	-66.0	-67.0	1.015
350 ->760	-257.2	0.944	1.051	1.004	0.991	-253.9	-256.2	1.009

表 5.1.1. 膨張反応度とドップラー反応度を一括評価した場合の結果
5.2 等温温度係数の GE 解析値との比較

次に等温温度係数について、今回の解析結果の最確値(表 4.3.3)を GE の報告値(以下、GEAP と記 す)と比較し、その妥当性を検討した。GEAP の結果は GEAP-13838 から抜粋したものであり、附録 D に 今回の結果と比較できる形で整理している。解析手法や核データが異なるため、本解析と GEAP の結果 は必ずしも一致すべきものではないが、Core I に関する既報告書<sup>[18]</sup>において両者の差異が説明可能で あったことから、本解析でも同様な比較を実施した。

等温温度係数およびその内訳(膨張反応度係数とドップラー反応度係数)の比較を表 5.2.1~2 に示 す。GEAP の評価は 350 ~760 ではなく 350 ~700 の平均値であるが、実験値の温度依存性(図 2.2.1)から判断して影響は無視できる。

表 5.2.1 より、本解析と GEAP の等温温度係数には 6%の差異があり、表 5.2.2 よりその差異はドップラ 一反応度係数(17%の差異)に起因することが分かる。

GEAP の結果は拡散計算ベースであり、セル計算も均質モデルで実施されている。そこで、本解析で 算出した輸送補正値(メッシュ補正値は無視できるため輸送・メッシュ補正値で代用)と集合体非均質効 果を GEAP の結果に適用し、表 5.2.3 に比較した。

ドップラー反応度係数の本評価との差異は低減しているが、依然として 11%残っている。これは GEAP では燃料以外の寄与を含めていないためである。後の 5.4.1 項で示すように構造材の寄与(主に Fe)は ドップラー反応度全体の約 12%を占める。

このように Core I の場合と同様、本解析についても GEAP との差異を説明できることが分かった。今回の解析には大きな問題はないものと判断できる。

表 5.2.1. 等温温度係数の GE 報告値との比較

泪度亦化	等温温度	系数 (¢/ )	GEAP/
<b></b>	本評価	GEAP-13838	本評価
350 ->760	-0.625	-0.586	0.94

表 5.2.2. 膨張反応度係数及びドップラー反応度係数の GE 報告値との比較

泪度亦化	膨張反応度	係数 (¢/ )	GEAP/	ドップラー反応	5度係数 (¢/ )	GEAP/
<b></b>	本評価	GEAP-13838	本評価	本評価	GEAP-13838	本評価
350 ->760	-0.380	-0.383	1.01	-0.245	-0.203	0.83

表 5.2.3. 膨張反応度係数及びドップラー反応度係数の GE 報告値との比較(補正後)<sup>(a)</sup> (GEAP の結果に本評価の補正値を適用)

泊度赤化	膨張反応度	<b>低数 (¢</b> / )	GEAP/	ドップラー反応	「度係数 (¢/ )	GEAP/
<b>冲反</b> 反化	本評価	GEAP-13838 <sup>*1</sup>	本評価	本評価	GEAP-13838 <sup>*1</sup>	本評価
350 ->760	-0.380	-0.365	0.96	-0.245	-0.217	0.89

(a) 表 4.3.2 の輸送メッシュ効果と集合体非均質効果を適用

5.3 連続エネルギーモンテカルロ計算との比較

本解析では基準計算値に様々な補正を独立に施すことによって最確値を評価している。また、非均質 セルの計算では集合体をリング状へモデル化している。

そこで得られた最確値の信頼性を確認するため、連続エネルギーモンテカルロコード MVP<sup>[24]</sup>を用いて 温度上昇による反応度変化(膨張反応度とドップラー反応度の和)と各成分の寄与を評価した。一般に モンテカルロコードは統計誤差等により微少な反応度変化の計算には適さないが、本解析における温度 変化(350 760)による反応度変化は約0.8%dk/kk と大きいため有意な評価が期待できる。

計算には集合体の非均質性を考慮した最も詳細なモデルを用いた。すなわち、図 2.2 に示した燃料 集合体の非均質構造を厳密にモデル化した。炉心部(Insulator を含む)以外は決定論的手法の場合と 同様に領域内を均質として扱った。

計算は以下の3ケースについて実施した。

断面積、原子個数密度、体系モデルの温度 350 断面積、原子個数密度、体系モデルの温度 760 断面積の温度は350、原子個数密度、体系モデルの温度は760

と から全反応度変化を、 と から膨張反応度を、 と からドップラー反応度を算出した。

ヒストリーは 300 万(20000(neutron/batch) × 170(generation)、20generation skip)とし、初期乱数を変 えて得られる 10 ケースの結果を統計処理し、平均値と誤差(各ケースの統計誤差 / ケース数-1 の平方 根)を求めた。1ケースの統計誤差(1)は0.030%である。

全反応度変化を表 5.3.1 に、膨張反応度とドップラー反応度の各成分についての結果を表 5.3.2 に、 それぞれ 4.3 節の結果と比較して示す。MVP の結果の誤差は 1 である。決定論的手法の結果の誤差 は表 4.3.2 において線膨張率の寄与を除いたものである。

全反応度とドップラー反応度の寄与については、決定論的手法はモンテカルロ計算結果と解析誤差 の範囲で一致しており、決定論的手法の結果が妥当であることが確認できる。

残る膨張反応度については解析誤差を若干超える差異(ノミナル値で 10%)がある。モンテカルロ計算 の誤差は一般に過小評価されるので 1 の差が有意な差とは言えないが、モンテカルロ計算と決定論的 手法では集合体のモデル化の詳細度が異なる(モンテカルロ計算は詳細モデル、決定論的手法は詳細 モデルをリング状に近似したモデル)ことが影響している可能性がある。

その確認として集合体を均質セルで扱った場合で同様に比較した(表 5.3.3)。両手法の結果はほぼ 一致している。

そこで追加検討として、決定論的手法計算において燃料集合体を 1 次元リングモデルではなく、2 次 元六角格子形状で扱う計算行い、その効果を評価した。その際、使用できる 2 次元モデルの制約上、中 心の BeO 棒領域は燃料棒と同じ形状で領域を分割し、Tightner Sleeve は BeO 棒近傍の冷却材と均質 化した。また、Side rod は 1 次元モデルの場合と同様にラッパー管に含めた。つまり燃料棒の形状だけ が厳密である。格子計算は SLAROM-UF(バージョン 060428)の 70 群計算で、炉心計算は 2 次元 RZ 拡散計算(非等方拡散係数使用)で実施した。その結果、2 次元モデル使用の効果は-0.5%と小さく、10% の差異を説明することはできなかった。

計算手法	<u>解析値(全</u> (%dk/kk')	:反応度) <sup>(a)</sup> (¢)	実験値(¢)	C/E	実験誤差(%)	解析誤差(%)
モンテカルロ法	-0.819 ± 0.011	-249 ± 3	224.1 . 7.0	1.06	2	1
決定論的手法	$-0.844 \pm 0.028$	-256 ±8	$-234.1 \pm 7.0$	1.09	3	3
(~):呉羊什志進す	の記差を今また	い店				

表 5.3.1. 連続エネルギーモンテカルロ計算との比較

(a)誤差は膨張率の誤差を含まない値

表 5.3.2. 連続エネルギーモンテカルロ計算との比較(成分別)

計留壬注	膨張反	[ <b>応度<sup>(a)</sup></b>	ドップラー反応度 <sup>(b)</sup>			
前异于広	(%dk/kk')	(¢)	(%dk/kk')	(¢)		
モンテカルロ法	-0.465 ± 0.013	-141 ±4	-0.354 ± 0.015	-107 ±4		
決定論的手法	-0.513 ± 0.025	-156 ±8	-0.331 ± 0.012	-100 ±4		
(a) 誤差は膨張率	図誤差を含まない	1値				

(b)モンテカルロ計算は760のモデルで、決定論的手法は350のモデルで評価

表 5.3.3. 連続エネルギーモンテカルロ計算との比較(成分別、均質セルモデル)

計算手法	膨張反	え応度	ドップラー反応度			
	(%dk/kk')	(¢)	(%dk/kk')	(¢)		
モンテカルロ法	-0.482 ± 0.018	-146 ±5	$-0.304 \pm 0.016$	-92 ±5		
決定論的手法	-0.481 ± 0.021	-146 ±6	-0.311 ± 0.006	-94 ±2		

5.4 等温温度係数に対する核種毎の寄与の分析

SEFOR 炉心の等温温度係数の膨張成分とドップラー成分、それぞれについて核種及び反応毎の寄 与を摂動計算によって分析した。評価には温度変化(350 760)についての基準計算値を使用した。 なお、膨張反応度のうち、サイズ膨張に伴う反応度変化は摂動計算による評価が困難であるため、密度 減少の寄与のみを対象とした。既報告書<sup>[18]</sup>で示したようにサイズ膨張の寄与は密度変化の寄与の 20%程 度と小さいため、密度変化に着目するだけでも膨張反応度の変化を概ね把握できる。

### 5.4.1 ドップラー反応度に対する核種毎の寄与

表 5.4.1 にドップラー反応度の核種毎の寄与を示す。ドップラー反応度に寄与する核種は 6 核種である。 そのうち U-238 が約 90%を占め、 続いて Fe が寄与している。

表 5.4.2 には領域毎の寄与を示す。領域番号は図 3.2.1 に対応している。これら 5 領域で反応度全体の 99%を占める。

表 5.4.3 には最も寄与の大きい領域 1 について核種・成分毎の寄与を示す。また、図 5.4.1~4 には 成分・エネルギー毎の寄与を全核種の合計値、及び寄与の大きい U-238, Pu-239, Fe について示す。

Yield 成分、Fission 成分は核分裂断面積の変化に伴い、それぞれ中性子の生成量、吸収量が変化 することによる反応度変化である。Capture 成分は捕獲断面積の変化に伴い、中性子の吸収量が変化 することによる反応度変化である。

Capture 成分には U-238, Pu-239, Fe が主に寄与し、Fission 成分と Yield 成分には Pu-239 が寄与 している。Pu-239 の寄与は負の効果(Capture 成分と Fission 成分)と正の効果(Yield 成分)が相殺する ため、合計では無視できるほど小さい。Fe については 1keV 付近の共鳴による寄与が支配的である。

図 5.4.5 にはドップラー反応度に寄与の大きい U-238 の捕獲反応について実効ミクロ断面積の温度 上昇による変化を示す。断面積は 6eV ~ 10keV で変化し、低エネルギーほど変化が大きいが、中性子ス ペクトル(図 4.1.1)との兼ね合いでドップラー反応度としては図 5.4.2 のように 1keV 付近で最大となる。

### 5.4.2 膨張反応度(密度減少成分)に対する核種毎の寄与

表 5.4.4 に膨張反応度(密度減少成分)に対する核種毎の寄与を示す。6 核種で反応度全体の 97% を占める。中でも Pu-239, U-238, Na の寄与が大きい。

表 5.4.5 には領域毎の寄与を示す。領域番号は図 3.1.1 に対応している。これら 7 領域で反応度全体の 97%を占める。

表 5.4.6 には最も寄与の大きい領域 1 について核種・成分毎の寄与を示す。また、 図 5.4.6~10 には 全核種の合計、及び寄与の大きい核種として U-238, Pu-239, Na のエネルギ - 毎の寄与を示す。

Capture 成分には U-238, Pu-239 が主に寄与し、Fission 成分と Yield 成分には Pu-239 とU-238 が 寄与している。Scattering 成分(散乱除去断面積の変化に関する成分)には U-238, Na が Leakage 成分 (中性子漏洩に関する成分)には Na が主に寄与している。

核種	U-238	Pu-239	Pu-240	Cr	Fe	Ni	合計
反応度(%dk/kk')	-0.277	0.004	-0.003	-0.005	-0.035	0.001	-0.315
合計値に対する 比(%)	87.7	-1.4	1.1	1.6	11.2	-0.2	100.0

表 5.4.1. ドップラー反応度の核種毎の寄与

表 5.4.2. ドップラー反応度の領域毎の寄与

領域No.	1	2	9	16	17	
名称	Core	Core (lower)	Inner vessel	Insulator	Insulator (lower)	合計
反応度(%dk/kk')	-0.254	-0.035	-0.006	-0.014	-0.003	-0.313

表 5.4.3. ドップラー反応度の核種 · 成分毎の寄与(領域 1) (単位: %dk/kk)

核種成分	U-238	Pu-239	Pu-240	Cr	Fe	Ni	Others	合計
CAPTURE	-0.235	-0.051	-0.003	-0.003	-0.024	-0.001	0.000	-0.317
FISSION	0.000	-0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.032
YIELD	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088
Others	0.006	-0.001	0.000	0.000	0.002	0.001	-0.001	0.007
合計	-0.229	0.004	-0.003	-0.003	-0.023	0.000	-0.001	-0.254

表 5.4.4. 膨張反応度(密度減少成分)の核種毎の寄与

核種	U-238	Pu-239	0	Na	B-10	Fe	合計
反応度(%dk/kk')	0.104	-0.567	-0.018	-0.167	0.009	0.006	-0.634
6核種合計値に 対する比(%)	- 16.3	89.5	2.9	26.4	- 1.5	-0.9	100.0

表 5.4.5. 膨張反応度(密度減少成分)の領域毎の寄与

領域No.	1	2	5	8	9	13	15	
名称	Core	Core (lower)	Reflector (lower)	Reflector (upper)	Inner vessel	Na Grid	Na Steel	合計
反応度(%dk/kk')	-0.452	-0.078	-0.015	-0.011	-0.065	-0.009	-0.011	-0.643

表 5.4.6. 膨張反応度(密度減少成分)の核種・成分毎の寄与(領域 1) (単位:%dk/kk)

核種 成分	U-238	Pu-239	0	Na	B-10	Fe	合計
CAPTURE	0.151	0.066	0.002	0.005	0.008	0.017	0.248
FISSION	0.037	0.248	0.000	0.000	0.000	0.000	0.285
YIELD	-0.096	-0.816	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.912
SCATTERING	0.029	0.003	0.018	0.038	0.000	0.023	0.110
LEAKAGE	-0.029	-0.007	-0.031	-0.072	0.000	-0.033	-0.172
合計	0.090	-0.505	-0.011	-0.029	0.008	0.007	-0.441





図 5.4.1. ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与

図 5.4.2. ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(U-238)



図 5.4.3. ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Pu-239)



図 5.4.4. ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Fe)



図 5.4.5. 温度上昇(350 760)による U-238 実効ミクロ捕獲断面積の変化 (上図:断面積、下図:変化)





図 5.4.6. 膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与

図 5.4.7. 膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与(U-238)



図 5.4.8. 膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与(Pu-239)



図 5.4.9 膨張反応度(密度減少成分)の成分・エネルギー毎の寄与(Na)



図 5.4.10 膨張反応度(密度減少成分)の散乱項のエネルギー毎の寄与

5.5 Core I の解析結果との比較

今回の解析結果を既報告書<sup>[18]</sup>の Core I-E 炉心のものと比較した。

Core II-C 炉心、Core I-E 炉心の等温温度係数をそれぞれ表 5.5.1,5.5.2 に、両炉心の結果の比を 表 5.5.3 に示す。

C/E 値は温度範囲によって多少のばらつきはあるが、共通して過大評価している。350 から 760 間の結果で比較するとほぼ一致して 10%弱の過大評価となっている。

次に、炉心間の各成分の差異に言及する。表 5.5.4~5 に最も寄与の大きい領域 1 に関するドップラ ー反応度と膨張反応度(密度減少成分)を示す。図 5.5.1~4 にはエネルギー毎の寄与を主要な核種・ 反応について示す。

表 5.5.3 で分かるようにドップラー反応度(絶対値)は Core II の方が約 20%小さい。これは中性子スペクトルが硬いためである。表 5.5.4 で見ると、Fe の寄与のみ Core II の方が大きくなっているが、これは燃料集合体中心の支持棒が BeO から SUS に置き換えられ、Fe の絶対量が約 20%増加したことによる。

膨張による負の反応度は Core II の方が約 7%大きい。これは中性子スペクトルの硬化によって重核や <sup>10</sup>B の捕獲反応による正の寄与(密度が薄くなり吸収が減少することによる寄与)が低下する一方、Pu-239 の Yield 成分の負の寄与が変化しないためである。Pu-239 の Yield 成分は 20keV を境にして炉心 間の差異がエネルギー領域間で相殺している(図 5.5.2)。

#### JAEA-Research 2006-059

		解析値(¢/ )					解析誤美	
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	実験値(¢/ )	C/E		(%)	
350 ->450	-0.361 ± 0.021	-0.284 ± 0.011	$-0.645 \pm 0.023$	-0.594 ± 0.018	1.09	3	4	
450 ->550	-0.375 ± 0.020	-0.255 ± 0.010	$-0.630 \pm 0.022$	-0.591 ± 0.018	1.07	3	4	
550 ->650	-0.385 ± 0.022	-0.232 ± 0.009	-0.617 ± 0.024	-0.547 ± 0.016	1.13	3	4	
650 ->760	-0.397 <u>+</u> 0.021	-0.212 <u>+</u> 0.008	-0.609 <u>+</u> 0.023	-0.554 ± 0.017	1.10	3	4	
350 ->760	-0.380 ± 0.021	$-0.245 \pm 0.009$	$-0.625 \pm 0.023$	-0.571 ± 0.017	1.09	3	4	

表 5.5.1. Core II-C の等温温度係数解析結果まとめ

表 5.5.2. Core I-E の等温温度係数解析結果まとめ <sup>a</sup>

		解析値(¢/ )				宝騇誤美	解析学学
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	実験値(¢/ )	C/E	(%)	(%)
350 ->450	-0.336 ± 0.021	-0.359 ± 0.012	-0.695 ± 0.024	-0.668 ± 0.020	1.04	3	3
450 ->550	$-0.352 \pm 0.020$	-0.323 ± 0.011	-0.675 ± 0.023	-0.644 ± 0.019	1.05	3	3
550 ->650	-0.359 ± 0.022	-0.294 <u>+</u> 0.010	-0.653 ± 0.024	-0.597 <u>+</u> 0.018	1.09	3	4
650 ->760	-0.368 ± 0.021	-0.268 ± 0.010	$-0.636 \pm 0.024$	-0.560 ± 0.017	1.14	3	4
350 ->760	-0.354 ± 0.021	-0.310 ± 0.011	-0.664 ± 0.024	-0.616 ± 0.018	1.08	3	4

a: 既報告の値から誤差を修正している。(2.2節参照)。

表 5.5.3. 等温温度係数の炉心間の比較

	解析値	の比 (Core II / Co	実験値の比	解析値の比(臆	『張/ドップラー]	
温度変化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	(Core II / Core I )	Core II-C	Core I-E
350 ->450	1.07	0.79	0.93	0.89	1.27	0.94
450 ->550	1.07	0.79	0.93	0.92	1.47	1.09
550 ->650	1.07	0.79	0.95	0.92	1.66	1.22
650 ->760	1.08	0.79	0.96	0.99	1.87	1.37
350 ->760	1.07	0.79	0.94	0.93	1.55	1.14

表 5.5.4. ドップラー反応度(350 760)の炉心間の比較(領域 1)

核種	U-238	Fe	Pu-239	Pu-239	Pu-239	Others	Total
成分	Capture	Capture	Capture	Fission	Yield	Others	Total
Core II-C [¢]	-0.235	-0.024	-0.051	-0.032	0.088	-0.007	-0.261
Core I-E [¢]	-0.306	-0.023	-0.080	-0.048	0.133	-0.008	-0.331
Core II-C / Core I-E	0.768	1.068	0.636	0.671	0.662	0.919	0.789
(Core II-C) - (Core I-E) [¢]	0.071	-0.002	0.029	0.016	-0.045	0.001	0.070

表 5.5.5. 膨張反応度(密度減少成分、350 760)の炉心間の比較(領域 1)

成分 成分	Pu-239 Capture	Pu-239 Fission	Pu-239 Yield	U-238 Capture	B-10 Capture	Others	Total
Core II-C [¢]	0.066	0.248	-0.816	0.151	0.008	-0.097	-0.441
Core I-E [¢]	0.076	0.251	-0.818	0.162	0.013	-0.096	-0.412
Core II-C / Core I-E	0.872	0.990	0.997	0.931	0.577	1.017	1.069
(Core II-C) - (Core I-E) [¢]	-0.010	-0.003	0.002	-0.011	-0.006	-0.002	-0.028



図 5.5.1 ドップラー反応度の炉心間の比較(U-238 捕獲反応)



図 5.5.2 膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(U-238 捕獲反応)



図 5.5.3 膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(Pu-239 捕獲反応)



図 5.5.4 膨張反応度(密度減少成分)の炉心間の比較(Pu-239 生成反応)

5.6 検討結果のまとめ

解析値は実験値を 10%近く過大評価しているが、既報告の Core I の結果や GE による解析値と整合 しており、また、解析手法の点からも問題点を確認することはできなかった。

後述する出力ドップラー反応度の場合と比較すると、ドップラー反応度に原因があるとは考えにくい。 本解析項目に特有の膨張反応度の解析に問題があるものと考えられる。

核データが原因である可能性もある。そこで、JENDL-3.3<sup>[31]</sup>に基づく 70 群炉定数を基準計算に使用 し、JDENL-3.2の結果と比較した(表 5.6.1)。比較は 350 ->760 の温度変化に対する等温温度係数に ついて実施した。

膨張反応度が 1%、ドップラー反応度が 3%、それぞれ絶対値が増加し、C/E 値は 1 から離れる結果となり、不一致の原因を見いだすことはできなかった。

今後、JUPITER 実験等他の実験解析データとの整合性を評価し、データの信頼性を検討する必要が ある。

Nuclear data	Calculation (cents/)			Experiment	C/F	Exp.	Cal.
	Expansion	Doppler	Total	(cents/)	U/E	error (%)	Error (%)
JENDL-3.2	-0.380	-0.245	-0.625	0.57	1.09	2	4
JENDL-3.3	-0.385	-0.254	-0.639	-0.57	1.12	3	4

表 5.6.1. JENDL-3.3 を使用した場合との等温温度係数の比較

## 6. 出力係数の実験

SEFOR の炉心及び実験の概要については Core I の等温温度係数に関する報告書<sup>[18]</sup>及び本報第2 章に記載しているため、ここでは本章の評価対象炉心及び実験についての追加情報を述べる。情報は 主に GEAP-13702<sup>[4]</sup>、GEAP-13838<sup>[8]</sup>から引用している。

6.1 出力ドップラー反応度の測定

出力係数は単位出力上昇あたりに印加される反応度であり、出力上昇時の反応度変化(以下、出力ド ップラー反応度)から評価される。出力ドップラー反応度は出力を OMW から最高 20MW まで変化させた ときの反射体位置の調整量を基に測定している。出力は冷却材の熱収支より算出し、冷却材の平均温度 は冷却材入口温度や流量を調整することによって約 760 に維持している。調整幅は、入口温度で 700 ~750()、出口温度で 760~800()、流量で 1500~5000(gpm)の範囲である。入口温度と流量のどちら か一方だけで温度を調整した場合の反応度評価結果のばらつきは 1%以内であり(GEAP-13838 p.3-5)、 他の誤差要因(例えば出力評価に起因する誤差 5%)と比べて無視できる。

厳密には調整後でも冷却材平均温度は 760 から約 20 の範囲内でばらついているため、以下の冷却材温度係数の簡易評価式を使用して 760 での値に補正している。

$$-\left[0.35 + \frac{0.19(1220)}{1220 + 65P}\right] \notin / \text{ at power level P in MW for Core I}$$
(6.1.1)  
$$-\left[0.38 + \frac{0.16(1220)}{1220 + 75P}\right] \notin / \text{ at power level P in MW for Core II}$$
(6.1.2)

第1項は膨張反応度の寄与、第2項はドップラー反応度の寄与である。第1項は本解析第 5.5 節の膨 張反応度係数とほぼ一致している。第2項については算出方法が不明なため妥当性を判断できない。そ こで、別途測定されている冷却材温度係数と比較した。その結果、

Corelについては

5MW での測定値 -0.52¢/ (GEAP-13702 p.3-25 より)

上式による評価 -0.50¢/

Core II については

10MW での測定値 -0.49¢/ (GEAP-13838 p.3-5 より)

上式による評価 -0.47¢/

と 5%以内で一致していることを確認した。この 5%の誤差は、ドップラー反応度に対して出力 5MW 以下で約 1%、それ以上の出力では 1%未満の差であり無視できる。これより上記簡易評価式で処理されたデータは妥当なものと判断し、以後 GEAP 記載値をそのまま使用することとした。

出力ドップラー反応度の測定は Core I では 5 種類(Core I-I、Core I-J、Core I-K、Core I-L、Core I-M)、Core II では 3 種類(Core II-C、Core II-E、Core II-F)の炉心で実施されている。各炉心構成を表 6.1.1 及び図 6.1.1~7(Core I-Kを除く)に示す。同じ炉心タイプ内でも燃料集合体の装荷量が異なるが、 これは後述する温度計付燃料の装荷位置やドップラーフィードバックに応じて過剰反応度を微調整して いるためであり、データは Core I と Core II のものに大別できる。

出力係数(単位出力あたりの出力ドップラー反応度)の測定値には Core I の 17MW 出力運転前後で 系統的な変化が確認されている(GEAP-13838 Appendix E)。これは高出力運転(燃料中心温度 2000K 以上)により燃料に中心孔や亀裂が生成され、燃料の熱伝導度や燃料 被覆管の熱伝達率が変化する ためとされている(GEAP-5468)。17MW 運転後は安定した測定値が得られており、その後実施された Core II との測定結果とも整合性を有していることが同報告書で示されている(なお、Core II でも同様な 問題(運転の過程で出力係数が変化する)が発生すると考えられるが、17MW 以上の運転は測定の最後 に実施されただけであるため問題が現れなかったものと考えられる)。本解析ではその報告に基づき、 1971 年 1 月 25 日の Core I-K 以降のデータを使用することとした。

出力ドップラー反応度は、出力上昇時の反応度変化から膨張反応度を差し引いて得られる。その際に 用いる膨張反応度には計算で求めた出力係数-0.50(¢/MW)が適用されている。妥当性の確認として、本 解析において 0W->20MW の膨張反応度係数を Core I-I(図 6.1.1)について以下の条件で評価した。

(計算条件)

セル計算:均質70群計算(燃料領域は炉心の下部、上部の2領域)

炉心計算:2次元 RZ 拡散計算

体系の温度:760 (冷却材の温度で代用)

燃料棒の軸膨張率 0.621%(GEAP-13598 p.A-2 記載の 0W->20W に対する値)

Insulator(劣化二酸化ウラン)の軸膨張率 0.95%(温度を 2000 (1200K)と仮定)

その結果、膨張反応度係数-0.57(¢/MW)と得られた。両計算結果には 14%の差異が存在するが、膨 張反応度の寄与は 20MW の場合で約 10¢であり、ドップラー反応度測定値 200¢の 5%にすぎない。その さらに 14%であるので両者の差異は 0.7%と無視できる。過去の解析値との比較の観点から、本解析では GE が使用した膨張反応度係数を膨張反応度成分の除去に使用することとした。

以上の考え方に基づき出力ドップラー反応度の測定値を整理し、各炉心タイプについて表 6.1.2 と 6.1.3、図 6.1.8 と 6.1.9 に示す。

図には全測定値を出力の3次式関数にフィッティングした結果も示している。各炉心タイプ内では系統的 な差異は現れておらず、同じ炉心のデータとして見なすことできる。フィッティング式から得られる微係数を用 いて測定値を5点の出力毎での値に変換した結果を表6.1.4に示す。誤差は変換後の測定データのば らつき(標準偏差)である。以後の解析値との比較では表6.1.4の値を使用している。

測定誤差としては、

・反射体位置による反応度評価に伴う誤差	3% (2.2 節より)
·出力評価に伴う誤差	5% (GEAP-13702 p.3-19)
(内訳)ほぼ同体系での8個のデータのばらつき	2%
	= 0/

冷却材のパラメータ(流量、密度、熱容量)と温度の誤差 5%

・出力係数のばらつきに起因する誤差 5% (GEAP-13702 p.6-11、ばらつき(10%)の1/2) が報告されている。

出力係数のばらつきに起因する誤差は実験の再現性を考慮したものであるが、その要因は他の誤差 と重なるため、ばらつきの 1/2 を誤差としている。その根拠となるデータが文献からは確認できなかったた め、本報では出力毎に求めた表 6.1.4 の値(0% ~ 3%)を使用する。

炉心名	炉心構成	主要測定項目	備考
Core I-I	燃料棒∶625 本 温度測定用燃料棒∶4 本 高富化度燃料棒∶7 本 BeO	臨界性 等温温度係数(350 ~760 ) <b>出力係数(0~10MW)</b>	集合体全数装荷 出力係数測定日 1970/6/30
	rod∶108 本 B₄C rod∶12 本	過渡測定(超臨界(即発未臨界)) 燃料温度	~ 1970/8/17
Core I-J	燃料棒∶625 本 温度測定用燃料棒∶4 本 高富化度燃料棒∶7 本 BeO rod∶108 本 B₄C rod∶11 本	臨界性 <b>出力係数(0~17MW)</b> 過渡測定(超臨界(即発未臨界)) 燃料温度	Core I-I の B4C rod 1本を SUS rod に変 更(1970/8/21) 出力係数測定日 1970/8/23
	SUS rod:1本		~ 1970/9/6
Core I-K	燃料棒∶626 本 温度測定用燃料棒∶4 本 高富化度燃料棒∶7 本 BeO rod∶108 本 B₄C rod∶11 本	臨界性 <b>出力係数(0~20MW)(Core I-J で 実施した可能性あり)</b> 過渡測定(超臨界(即発未臨界)) 燃料温度	Core I-J の SUS rod を燃料棒に変更 出力係数測定日 1971/1/25 ~1971/2/2
Core I-L	燃料棒∶618 本 温度測定用燃料棒∶12 本 高富化度燃料棒∶7 本 BeO rod∶108 本 B₄C rod∶11 本	臨界性 出力係数(0~9MW) 過渡測定(超臨界(即発未臨界、即 発超臨界)) 燃料温度	Core I-K に IFA を4 体追加 出力係数測定日 1971/8/12~8/14
Core I-M	燃料棒∶618 本 温度測定用燃料棒∶12 本 高富化度燃料棒∶7 本 BeO rod∶108 本 B₄C rod∶10 本 SUS rod∶1 本	臨界性 <b>出力係数(0~8MW)</b> 過渡測定(即発超臨界) 燃料温度	Core I-LのB4C rod 1本をSUS rod に変 更 出力係数測定日 1971/8/16~8/30
Core II-C	燃料棒:620本 温度測定用燃料棒:12本 高富化度燃料棒:6本 SUS rod:103本 BeO rod:6本 B₄C rod:9本	臨界性 等温温度係数(350 ~760) <b>出力係数(0~10MW)</b> 冷却材温度係数(at 10MW) 燃料温度	燃料棒全数装荷 等温温度係数、出力 係数測定日 1971/10/14 ~1971/11/4
Core II-E	燃料棒:620本 温度測定用燃料棒:12本 高富化度燃料棒:6本 SUS rod:103本 BeO rod:6本 B₄C rod:8本 箔設置燃料棒:1本	臨界性 <b>出力係数(0~10MW)</b> 過渡測定(超臨界(即発未臨界)) 燃料温度	燃料棒全数装荷 出力係数測定日 1971/12/2~12/7
Core II-F	燃料棒:618本 温度測定用燃料棒:15本 高富化度燃料棒:6本 SUS rod:103本 BeO rod:6本 B₄C rod:7本 箔設置燃料棒:1本	臨界性 <b>出力係数(0~20MW)</b> 過渡測定(即発超臨界) 燃料温度	燃料棒全数装荷 出力係数測定日 1971/12/10~

表 6.1.1. 出力係数の測定が実施された炉心

Exportment data		Reactivity		
	Power(MW)	ъ*1	After <sup>*2</sup> reactivity	Doppler effect
and core name	, <i>,</i> ,	Data reported	correction	(¢)
	5.1	-66.2	-67.7	-65.2
	10.1	-117.6	-120.3	-115.3
	14.7	-156.0	-159.6	-152.2
	15.6	-162.8	-166.5	-158.7
	15.7	-164.2	-168.0	-160.1
	17.7	-178.4	-182.5	-173.7
	18.7	-184.6	-188.8	-179.5
	5.2	-68.0	-69.6	-67.0
1971/1/25-2/2	10.0	-118.7	-121.4	-116.4
(Core I-K)	14.8	-158.1	- 161 . 7	-154.3
	18.0	-181.2	- 185.4	-176.4
	19.8	-191.7	-196.1	-186.2
	19.6	-194.0	-198.5	-188.7
	19.6	-194.4	-198.9	-189.1
	19.6	-193.8	-198.3	-188.5
	19.6	-193.8	-198.3	-188.5
	10.1	-122.3	- 125.1	-120.1
	15.1	-163.1	- 166 . 9	-159.3
	1.96	-28.0	-28.6	-27.7
	3.94	-54.2	-55.4	-53.5
1971/8/12-8/14	4.99	-67.9	-69.5	-67.0
(Core 1-1)	7.03	-90.8	-92.9	-89.4
	9.01	-111.6	-114.2	-109.7
	1.30	-18.5	-18.9	-18.3
	2.06	-30.9	-31.6	-30.6
	2.08	-31.0	-31.7	-30.7
	2.14	-29.4	-30.1	-29.0
1971/8/17-8/30	5.22	-69.3	-70.9	-68.3
(Core I-M)	5.23	-69.9	-71.5	-68.9
	8.09	-99.0	-101.3	-97.2
	7.98	-98.1	-100.4	-96.4
	7.96	-97.5	-99.7	-95.8

表 6.1.2. 出力ドップラー反応度の測定結果(Core I)

\*1: GEAP-13702 p.3-23、又はGEAP-13837 p.C-8より \*2: Correction factor for in the inhour equation, 1/0.9775 is applied as explained in GEAP-13837 p.F-1

\*3: axial expansion reactivity (-0.5¢/MW) is removed (GEAP-13702 p.3-23)

Experiment date		Reactivity change	Doppler effect
and core name	Power (IVIV)	reported( $\phi$ ) <sup>*1</sup>	$(\phi)^{*2}$
	1.99	-23.3	-22.305
	3.86	-42.3	-40.37
	4.88	-51.8	-49.36
971/11/1-11/4	4.87	-51.9	-49.465
(Core II-C)	5.96	-61.9	-58.92
	7.84	-77.3	-73.38
	9.58	-91.6	-86.81
	9.46	-89.8	-85.07
	2.14	-23.2	-22.13
	1.88	-22.1	-21.16
	5	-53	-50.5
1971/12/3-12/7	5.05	-53.7	-51.175
(Core II-E)	5.18	-54.4	-51.81
	10.12	-92.9	-87.84
	9.94	-92.3	-87.33
	10.02	-92.5	-87.49
	2	-22.3	-21.3
	2.07	-23.6	-22.565
	5.26	-54	-51.37
	4.85	-50.7	-48.275
	5.27	-53.1	-50.465
	7.89	-77.5	-73.555
	2.11	-23.8	-22.745
1971/12/11-12/20	5.26	-54.5	-51.87
(Core II - F)	8.25	-80.6	-76.475
	4.93	-51.4	-48.935
	10.21	-95.1	-89.995
	11.9	-106.4	-100.45
	14	-121.1	-114.1
	14.88	-126	-118.56
	16.13	-133.4	-125.335
	17.66	-142.3	-133.47
	19.25	-151.1	-141,475

表 6.1.3. 出力ドップラー反応度の測定結果(Core II)

\*1: GEAP-13838 p.3-6より \*2: Axial expansion reactivity (-0.5 ¢ /MW) is removed

Power	Doppler effect (¢)						
(MW)	Core I	Core II					
2	-28.58 ±1.10	-21.72 ±0.65					
5	-66.12 ±1.50	-50.04 ±0.84					
10	-116.61 ±1.75	-88.63 ±0.97					
15	-155.69 ±1.71	-119.44 ±0.38					
20	-190.08 ±1.56	-145.51 ±0.29					

表 6.1.4. 出力ドップラー反応度のデータ整理結果



炉心部寸法 等価直径 約 88cm 高さ 約 93cm

図 6.1.1. SEFOR 炉心構成(Core I-I)



図 6.1.2. SEFOR 炉心構成(Core I-J)



図 6.1.3. SEFOR 炉心構成(Core I-L)



図 6.1.4. SEFOR 炉心構成(Core I-M)



図 6.1.5. SEFOR 炉心構成(Core II-C)(図 2.1.4 の再掲)



図 6.1.6. SEFOR 炉心構成(Core II-E)



図 6.1.7. SEFOR 炉心構成(Core II-F)







図 6.1.9. Doppler effect data (Core II)

6.2 燃料中心温度の測定

出力上昇によるドップラー反応度の解析では燃料温度の評価が必要である。燃料温度の評価においては燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの評価が重要かつ難しい点であり、SEFOR 実験ではそのため に燃料中心温度が測定されている。

測定は温度測定用の燃料集合体 IFA(Instrumented Fuel Assembly)によって実施されている。IFA は 燃料支持棒(BeO)と支持棒を挟む 2 本の燃料棒から構成されている<sup>[9]</sup>。IFA が装荷されるチャンネルに は標準の燃料棒も4 本装荷され、合計の燃料棒本数は他の集合体と同じである。

IFA を構成する燃料棒は標準燃料棒の2分割型ではなく3分割型である。各燃料棒の中心にはW-Re 熱電対(Thermo-Couple、以下 T/C)が燃料棒(ギャップを含めて全長約 36inch)の軸方向中心から 上方に2.25inch(下部熱電対)と15.50inch(上部熱電対)離れた位置に埋め込まれている。

T/C は直径 0.005inch 又は 0.010inch のワイヤであり、それぞれ直径 0.064inch 又は 0.140inch の隔 離材(主に BeO)で保護されている。上部熱電対は3分割の最上部領域(第 1 セグメント)にあり、燃料上 部から燃料中心に沿ってワイヤが挿入されている。下部熱電対は第 2 セグメントにあり、ワイヤは第1セグ メント領域では被覆管内壁に沿って挿入され、ギャップ部で曲げられた後、第2セグメントの燃料中心に 挿入されている。IFA の詳細構造については GEAP-5615<sup>[9]</sup>の Fig.2-3 に示されているが、不鮮明なため 本報では割愛する。

IFA には図 6.1.6 に示すようにその装荷位置によって通し番号が付けられている。各 IFA について、 炉心中心方向側の上部と下部、外方向側の上部と下部の計 4 点に T/C があり、順に通し番号が付けら れている。例えば、IFA-1 の中心方向側上部の T/C が T/C #1、下部が T/C #2、IFA-6 の外方向側の 下部の T/C が T/C #24 となる。ただし、一部はダミーであり、測定に使用されていない。

温度測定結果を表 6.2.1~7 に示す。データは冷却材温度 760 からの上昇分として報告されている。 マスクを掛けた T/C(Thermo-Couple、熱電対)の結果は明らかに異常(出力に対する変化が単調増加に なっていない、あるいは他のデータと著しく異なるなど)であるため以後の評価対象から外している。なお、 第7章で述べるが、本報告における燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの評価ではデータをさらに選 別して使用している。

Experiment date	Power		Thermo-couple No.					
and core name	(MW)	T/C #1	T/C #2	T/C #4	T/C #20			
	5.1	365	310	599	864			
	5.2	258	313	641	860			
	10.0	572	655	1301	1559			
	10.1	764	655	1243	1579			
	10.1	536	657	1456	1660			
	14.7	1194	1008	1845	2099			
	14.8	871	1015	1717	2080			
1071/1/05 0/0	15.1	736	1013	2023	2196			
19/1/1/29-2/2	15.6	1255	1078	1952	2186			
(CORE I-K)	15.7	1270	1097	1977	2201			
	17.7	1479	1253	2167	2363			
	18.0	1304	1268	1715	2373			
	18.7	1599	1307	2218	2451			
	19.6	1587	1307	2797	2092			
	19.6	1397	1286	2656	2151			
	19.6	13 <mark>67</mark>	1285	2577	2152			
	19.6	1206	1277	2487	2182			

表 6.2.1. 温度上昇測定結果(Core I)その 1

出典 GEAP-13702 p.2-11

(Unit)

表 6.2.2. 温度上昇測定結果(Core I) その 2

Experiment date		Thermo-couple No.							
and core name	(MW)	T/C #1	T/C #2	T/C #3	T/C #4	T/C #5	T/C #6	T/C #7	
4074/0/40 0/44	1.19	107	217	-	-	120	180	102	
19/1/0/12-0/14	1.22	123	231	106	264	125	198	101	
(CORE I-L)	1.96	193	372	-	399	191	312	164	
	1.99	212	395	-	-	211	339	177	
	2.12	205	386	-	-	192	314	170	
1071/0/17 0/20	5.17	489	885	-	984	501	910	447	
19/1/0/1/-0/30 (CODE I M)	5.24	484	881	-	978	513	854	446	
(CORE I-M)	7.99	-	1279	592	1410	819	1334	746	
	8.05	-	1283	184	-	804	1371	754	
	8.08	-	1279	845	-	833	1362	754	
出曲 GEAP-13702 p 2-11 (Unit )									

出典 GEAP-13702 p.2-11

表 6.2.3. 温度上昇測定結果(Core I) その 3

Experiment date	Power		Thermo-couple No.								
and core name	(MW)	T/C #8	T/C #9	T/C #10	T/C #11	T/C #12	T/C #13	T/C #14			
1071/0/12 0/11	1.19	68	80	149	93	148	101	159			
19/1/0/12-0/14	1.22	785	86	157	96	154	109	169			
(CORE I-L)	1.96	289	139	260	156	263	168	278			
	1.99	660	154	286	170	275	189	301			
	2.12	405	143	269	157	267	183	287			
1071/0/17 0/20	5.17	367	378	735	416	695	468	723			
(CORE I-M)	5.24	716	375	729	413	683	468	756			
	7.99	1335	581	79	620	1003	706	908			
	8.05	1350	591	160	636	1057	754	1157			
	8.08	1212	584	78	623	1026	742	1001			

(Unit)

## JAEA-Research 2006-059

Experiment date	Power		Thermo-couple No.							
and core name	(MW)	T/C #15	T/C #16	T/C #17	T/C #20	T/C #21	T/C #22	T/C #23		
1071/0/10 0/11	1.19	86	151	29	218	66	97	55		
19/1/0/12-0/14	1.22	94	163	28	235	66	99	51		
(CORE I-L)	1.96	154	264	35	353	100	153	74		
	1.99	169	288	46	380	112	166	86		
	2.12	156	277	41	369	98	158	80		
1071/0/17 0/20	5.17	414	713	88	890	254	416	196		
(CORE I-M)	5.24	417	719	88	882	256	410	214		
	7.99	647	1024	131	1259	441	736	412		
	8.05	668	1090	144	1365	444	742	403		
	8.08	645	1052	151	1347	446	738	422		

# 表 6.2.4. 温度上昇測定結果(Core I) その 4

(Unit)

表 6.2.5. 温度上昇測定結果(Core II) その 1

Experiment date	Power(		Thermo-couple No.								
and core name	MW)	T/C #1	T/C #2	T/C #3	T/C #4	T/C #5	T/C #6	T/C #7			
	1.88	15	361	36	21	192	285	180			
	2.14	127	379	24	16	181	299	221			
	5	245	873	96	-	488	792	517			
1971/12/3-12/7	5.05	193	878	33	-	497	799	520			
(CORE II-E)	5.18	187	886	9	-	486	807	589			
	9.94	412	1550	239	-	1016	1671	1198			
	10.02	320	1538	389	-	1021	1650	1170			
	10.12	453	1548	225	-	1019	1669	1200			
	2	-	386	-	-	195	300	191			
	2.07	-	386	-	-	174	306	215			
	4.85	-	876	-	-	477	769	528			
	4.93	-	906	-	-	481	806	617			
	5.26	-	900	-	-	515	828	566			
	7.89	-	1346	-	-	807	1350	898			
1971/12/11-12/20	8.25	-	1356	-	-	801	1368	917			
(CORE II-F)	10.21	-	1621	-	-	1090	1737	1399			
	11.9	191	1801	-	-	1262	1982	1479			
	14	171	2032	-	-	1503	2336	1899			
	14.88	195	2112	-	-	1593	2463	2018			
	16.13	273	2244	-	-	1746	2655	2106			
	17.66	684	2390	-	-	1884	2841	2226			
	19.25	2516	2569	-	-	1997	3073	2442			

出典 GEAP-13838 p.3-29

(Unit )

Experiment date	Power(			Ther	mo-couple	No.		
and core name	MW)	T/C #8	T/C #9	T/C #11	T/C #12	T/C #13	T/C #14	T/C #15
	1.88	-	161	157	253	21	141	130
	2.14	-	178	169	264	30	150	136
	5	-	497	425	680	48	379	331
1971/12/3-12/7	5.05	-	436	430	689	61	384	333
(CORE II-E)	5.18	-	442	438	696	69	380	339
	9.94	305	893	882	1441	111	748	665
	10.02	239	885	871	1434	101	727	649
	10.12	335	890	883	1439	104	771	705
	2	-	171	168	275	9	136	129
	2.07	-	211	206	313	16	153	130
	4.85	-	426	422	685	37	335	301
	4.93	-	453	444	722	91	363	311
	5.26	-	457	455	738	65	367	331
	7.89	-	729	723	1191	47	575	506
1971/12/11-12/20	8.25	-	735	729	1205	50	576	499
(CORE II-F)	10.21	503	959	942	1540	238	749	649
	11.9	1263	1097	1080	1764	210	781	731
	14	1814	1300	1272	1918	247	616	866
	14.88	2121	1373	1344	1878	264	604	915
	16.13	2377	1496	1469	2241	385	627	991
	17.66	2960	1645	1619	2385	311	<mark>6</mark> 91	1122
	19.25	3881	1789	1723	2677	321	886	1252

表 6.2.6. 温度上昇測定結果(Core II) その 2

(Unit)

表 6.2.7.	温度上昇測定結果(Core II)	その3
----------	-------------------	-----

Experiment date	Power(		Thermo-couple No.							
and core name	MW)	T/C #16	T/C #18	T/C #20	T/C #21	T/C #22	T/C #23			
	1.88	203			117	7	103			
	2.14	211			122	8	107			
	5	520	32	114	296	19	272			
1971/12/3-12/7	5.05	525	96	128	299	19	275			
(CORE II-E)	5.18	523	11	126	302	20	273			
	9.94	990	48	677	591	38	639			
	10.02	956	94	701	589	38	635			
	10.12	1044	56	690	591	38	641			
	2	189			128	8	111			
	2.07	192			134	8	116			
	4.85	462	43	43	320	18	287			
	4.93	484	12	12	361	19	342			
	5.26	511	93	83	345	20	308			
	7.89	757	472	472	546	30	539			
1971/12/11-12/20	8.25	758	499	499	554	31	553			
(CORE II-F)	10.21	980	546	546	712	39	803			
. ,	11.9	1100	700	700	818	45	975			
	14	1366	810	810	973	53	1299			
	14.88	1333	816	816	1029	56	1400			
	16.13	1425	712	712	1120	61	1646			
	17.66	1251	685	685	1227	67	2093			
	19.25	1526	257	257	1343	73	2701			

(Unit)

## 7. 出力ドップラー反応度の解析

6.1 節で整理した出力ドップラー反応度の測定データには温度上昇に伴う膨張の寄与が除去されている。そのため、解析はドップラー成分のみを評価対象とすればよい。

7.1 出力ドップラー反応度の評価式

ドップラー反応度の測定では冷却材平均温度は一定であるが、燃料温度は場所によって大きく異なり、 分布を考慮する必要がある。

以下にドップラー反応度の評価方法を述べる。

評価は GEAP-13598 p.3-45 で採用している方法に倣い、温度の空間分布が無い場合のドップラー反応度 D.iso に温度の空間分布を反映することによって実施した。

7.1.1 温度の空間依存性が無い場合のドップラー反応度

温度の空間依存性が無い場合、燃料温度 T に対するドップラー反応度係数 d <sub>D,iso</sub> / dT は一般に次式で表すことができる。

$$\frac{d\rho_{D,iso}(T)}{dT} = \frac{\alpha_{D,iso}}{T^x}$$
(7.1.1)

ここで、  $D_{iso}$ , x は温度依存性のない定数である。x は 1.0 近傍の値をとる。 これより温度変化( $T_0$   $T_1$ )に対するドップラー反応度が次式のように得られる。

$$\rho_{D,iso}(T_0 \to T_1) = \int_{T_0}^{T_1} \frac{\alpha_{D,iso}}{T^x} dT$$
(7.1.2)

$$= \alpha_{D,iso} \left( T_1^{1-x} - T_0^{1-x} \right) / (1-x) \quad (x \neq 1.0)$$
 (7.1.3)

$$= \alpha_{D,iso} \left( \ln T_1 - \ln T_0 \right) \quad (x = 1.0) \tag{7.1.4}$$

7.1.2 温度の空間分布を考慮した場合のドップラー反応度

(7.1.2)式に温度の空間分布を考慮する。簡単のために断面積の変化として吸収断面積のみを考えると、出力が  $P_0(\sim 0W)$  から  $P_1$ に変化したときのドップラー反応度  $_D$ は1次摂動論に基づき

$$\rho_{D}(P_{0} \to P_{1}) = \frac{\sum_{g} \int \left\{ \Delta \Sigma_{a,g}(r, T_{0} \to T_{1}) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}{\operatorname{BmSB}}$$
(7.1.5)

 $\Delta \Sigma_{a,s}(r,T_0 \rightarrow T_1)$ : 位置rで温度が $T_0$ から $T_1$ に変化したときのマクロ吸収断面積の変化

、 <sup>\*</sup>:出力 P₀における中性子束と随伴中性子束

と表すことができる。 出力  $P_0$ では温度は炉心内で均 $-(T_0)$ である。 変数 r は位置を、 添え字 g はエネル ギー群を示す。

ここで、断面積の温度依存性がエネルギー群に依存しないと仮定する。すなわち、x=1.0の場合を例に挙げると、(7.1.4)式より断面積変化の温度依存性は、位置 r で温度が To から T1 に変化するとき、

$$\Delta \Sigma_{a,g}(r, T_0 \to T_1) = C_{a,g}(r) \cdot \left[ \ln T_1(r) - \ln T_0 \right]$$
(7.1.6)

と表す。ここで C<sub>a,g</sub>は(7.1.4)式の <sub>D,iso</sub> に比例する量で温度に依存しないものとする。

このとき、(7.1.5)式は

$$\rho_{D}(P_{0} \rightarrow P_{1}) = \frac{\int \left\{ \left[ \ln T_{1}(r) - \ln T_{0} \right] \cdot \sum_{g} C_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}{\operatorname{B} \mathfrak{M} \mathfrak{H} \mathfrak{B}}$$

$$(7.1.7)$$

となる。

温度の空間分布が無い場合、(7.1.7)式は(7.1.4)式と等しくなるので、

$$\alpha_{D,iso} = \frac{\int \left\{ \sum_{g} C_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}{\text{BMSB}}$$
(7.1.8)

の関係が成り立つ。これより (7.1.7)式は

$$\rho_{D}(P_{0} \rightarrow P_{1}) = \alpha_{D,iso} \frac{\int \left\{ \left[ \ln T_{1}(r) - \ln T_{0} \right] \cdot \sum_{g} C_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}{\int \left\{ \sum_{g} C_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}$$

$$(7.1.9)$$

となる。適当な温度変化に対する断面積の変化 a,g(r)を用いると、

$$\rho_{D}(P_{0} \rightarrow P_{1}) = \alpha_{D,iso} \frac{\int \left\{ \left[ \ln T_{1}(r) - \ln T_{0} \right] \cdot \sum_{g} \Delta \Sigma_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}{\int \left\{ \sum_{g} \Delta \Sigma_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right\} dr}$$
(7.1.10)

となる。

(7.1.10)式に、 <sub>D,iso</sub>の最確値、温度上昇による断面積変化、摂動前の中性子束及び随伴中性子束、 及び位置 r での温度情報を代入すれば、温度の空間分布を考慮したドップラー反応度が得られる。

吸収断面積以外に生成断面積の寄与も含め、(7.1.3)式に対応した x 1 の場合も考慮すると、出力が P<sub>0</sub>から P に上昇した時に加わるドップラー反応度 <sub>D</sub> は次式(7.1.11)のように得られる。ここで、散乱断面 積の寄与については次章で示すように約 0.5%と小さいため無視し、 <sub>D,iso</sub>の評価時にのみ含めている。

$$\rho_{D}(P) = C_{D} \cdot \frac{\int \left\{ \Delta T(r) \left( \left[ \sum_{g} \Delta \Sigma_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right] - \frac{1}{k_{eff}} \left[ \sum_{g} \chi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right] \left[ \sum_{g'} \Delta v \Sigma_{f,g'}(r) \cdot \phi_{g'}(r) \right] \right] \right\} dr}{\int \left\{ \left[ \sum_{g} \Delta \Sigma_{a,g}(r) \cdot \phi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right] - \frac{1}{k_{eff}} \left[ \sum_{g} \chi_{g}(r) \cdot \phi_{g}^{*}(r) \right] \left[ \sum_{g'} \Delta v \Sigma_{f,g'}(r) \cdot \phi_{g'}(r) \right] \right\} dr} \right\} dr$$

$$(7.1.11)$$

ここで

 $\Delta T(r): 位置rにおける出力P(0温度678K)時点からの燃料温度上昇$ 

$$=\overline{T(r)^{1-x}} - T_0^{1-x} \quad (for \ x \neq 1), \quad =\overline{\ln T(r)} - \ln T_0 \quad (for \ x = 1)$$
$$C_D = \frac{\alpha_{D,iso}}{1-x} \quad (for \ x \neq 1), \quad = \alpha_{D,iso} \quad (for \ x = 1)$$

k<sub>eff</sub>:摂動前の実効増倍率

。:エネルギーg 群の核分裂中性子スペクトル

<sub>a,g</sub>, <sub>f,g</sub>: 任意の温度変化に対するエネルギーg 群の吸収断面積、生成断面積の変化である。

## 7.2 燃料温度の評価方法

7.2.1 燃料温度の評価式

(7.1.11)式で必要な位置 r における燃料温度の評価方法について述べる。

燃料棒内の温度は、燃料棒をN個のメッシュ領域に分割し、次式により評価した。

$$T_{f,i} = T_{Na} + \Delta T_{c-c} + \Delta T_{c} + \Delta T_{f-c} + \sum_{j=i}^{N} \Delta T_{f,j}$$
(7.2.1)

ここで、

T<sub>f,i</sub>:i 番目のメッシュ領域内側境界での温度(T<sub>f,1</sub>=燃料中心温度)

T<sub>Na</sub>:冷却材平均温度

T<sub>c-c</sub>: 被覆管 - 冷却材間での温度変化

T。∶被覆管での温度変化

T<sub>f-c</sub>:燃料 被覆管間での温度変化

T<sub>fi</sub>:i 番目のメッシュ領域での温度変化

である。T<sub>Na</sub>には実験条件の 677.6K (760)を使用し、その他の項については出力密度 Q(W/cm<sup>3</sup>)から 以下のように評価した<sup>[25]</sup>。出力密度は燃料棒中で一定と近似した。

(1) 被覆管 - 冷却材間での温度変化(T<sub>c-c</sub>)

被覆管 - 冷却材間熱伝達率  $h_{c-c}(W/cm^2K)$ 、被覆管表面での熱流束  $Q_c$ "( $W/cm^2$ )を用いて次式で評価した。

$$\Delta T_{c-c} = \frac{Q_c''}{h_{c-c}}$$
(7.2.2)

ここで、Q<sub>c</sub>"は出力密度 Q(W/cm<sup>3</sup>)及び被覆管の外径 R<sub>cout</sub>(cm)より次式で求めた。

$$Q_c'' = \frac{Q}{2\pi R_{cout}}$$
(7.2.3)

(2) 被覆管での温度変化(T<sub>c</sub>)

被覆管熱伝導度 k<sub>c</sub>(W/cmK)、出力密度 Q(W/cm<sup>3</sup>)、被覆管の内径 R<sub>cin</sub> (cm)及び外径 R<sub>cout</sub>(cm)を用 いて次式で評価した。

$$\Delta T_c = \frac{Q \cdot R_{cin}^2}{2k_c} \ln \frac{R_{cout}}{R_{cin}}$$
(7.2.4)

(3) 燃料 被覆管間での温度変化(T<sub>f-c</sub>)

燃料 被覆管ギャップコンダクタンス h<sub>f-c</sub>(W/cm<sup>2</sup>K)、燃料表面での熱流束 Q<sub>f</sub>"(W/cm<sup>2</sup>)を用いて次式 で評価した。

$$\Delta T_{f-c} = \frac{Q_f''}{h_{f-c}}$$
(7.2.5)

ここで、Q<sub>cf</sub>"は出力密度 Q(W/cm<sup>3</sup>)及び燃料棒の外径 R<sub>fout</sub>(cm)より次式で求めた。

- 61 -
$$Q_f'' = \frac{Q \cdot R_{fout}}{2} \tag{7.2.6}$$

(4) 燃料棒内での温度変化

燃料棒内の i 番目のメッシュ領域での温度変化は、燃料の熱伝導度 k<sub>f</sub>(W/cmK)、出力密度 Q(W/cm<sup>3</sup>)用いて次式で評価した。

$$\Delta T_{f,i} = -\frac{Q\left(R_i^2 - R_{i-1}^2\right)}{2\overline{k_{f,i}}}$$
(7.2.7)

ここで、

R<sub>i</sub>:i 番目のメッシュ領域の外側境界(R<sub>0</sub>=0cm、R<sub>N</sub>=R<sub>fout</sub>)

$$\frac{1}{k_{f,i}} = \frac{\int_{T_{f,i}}^{T_{f,i+1}} k_f(T) dT}{\Delta T_{f,i}} \qquad (メッシュ平均熱伝導度)$$
(7.2.8)

である。  $k_{f,i}$  は温度に依存するため、反復計算により収束値を求めた。1メッシュの領域幅は約0.2mm(メ ッシュ数50)、収束精度(相対値)は温度について10<sup>-3</sup>、平均熱伝導度について10<sup>-3</sup>と設定した。

以上を基に作成した燃料温度評価用プログラムを付録 F に示す。

7.2.2 使用した熱的パラメータ 前項の評価式中の熱的パラメータには以下を使用した。

- (1) 被覆管 冷却材間熱伝達率 h<sub>c-c</sub>: 2.84(W/cm<sup>2</sup>·K) (GE 使用値。HEDL-TME 73-42<sup>[10]</sup>より)
- (2) 被覆管熱伝導度 k<sub>c</sub>:0.187(W/cm·) (次式<sup>[26]</sup>で被覆管推定温度 699.8K(800)の値を使用)

$$k_c(T) = 0.132 + 1.3 \times 10^{-4} \cdot T$$
 (「もんじゅ」設置許可申請書<sup>[27]</sup>で使用) (7.2.9)

- (3) 燃料 被覆管間ギャップコンダクタン h<sub>f-c</sub>:温度測定データを再現するように調整(次項参照)
- (4) 燃料の熱伝導度 kf: 井上(1999)の評価式<sup>[28]</sup>

$$k_{f}(T) = \left[1 - 2.5 \times (1 - D)\right] \\ \times \left[\frac{0.01}{\left[0.06059 + 0.2754 \times \sqrt{(2 - O/M)} + 2.011 \times 10^{-4} T_{K}\right]} + \frac{4.715 \times 10^{7}}{T_{K}^{2}} \exp\left(-\frac{16361}{T_{K}}\right)\right]$$
(7.2.10)

理論密度比 D には、0.926 を、酸素金属比 O/M には 1.99 を使用した(表 2.1.1 より)。

#### 7.2.3 燃料 被覆管ギャップコンダクタンス

燃料 被覆管ギャップコンダクタンス h<sub>f-c</sub> は燃料と被覆管のギャップ間隔だけでなく、燃料の亀裂の状態にも依存するため、理論的に決定することは困難である。SEFOR では出力運転時の燃料中心温度が 測定されており、GE の解析では燃料温度測定値を再現するように h<sub>f-c</sub>を決定している。本評価でも同様 に燃料温度測定値を再現するように h<sub>f-c</sub>を算出した。

使用した測定データは 6.2 節で選別したものである。ただし、7.3 節で述べるように出力密度を用いた 検討の結果、不自然なデータが存在することが示唆されたため、さらにデータを絞り込んだ後に使用した。

燃料の密度(理論密度に対する比)については標準燃料の理論密度比 0.926 ではなく、0.937(温度 測定用燃料棒の設計値 GEAP-10010-25<sup>[12]</sup> p.7 参照)を使用した。 Pu 富化度についても同じく標準燃料の 20.4%ではなく、IFA の装荷位置によって 17.6% ~ 20.4%の範囲 で異なる。しかしながら、すべての IFA について Pu 富加度の情報を確認できなかったため、Pu 富加度 が既知の IFA については推定値を使用することとした。この妥当性については 8.1.2 項で言及する。

## 7.3 出力係数解析の流れ

出力係数の解析の流れ(ギャップコンダクタンスの調整および出力ドップラー反応度の解析)をそれぞれ図 7.3.1、図 7.3.2 に示す。詳細及び評価結果は次節に述べる。



図 7.3.1. 燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの調整の流れ



図 7.3.2. 出力ドップラー反応度解析の流れ

番号を付した項目についての補足説明を以下に述べる。

出力分布より温度測定点での出力密度を求めた。炉心計算で得られる値は TriZ メッシュ平均値に 相当するため、メッシュ領域中の燃料棒占有率で除して実際の燃料形状に即した出力密度に変換 した。軸方向の出力密度はメッシュ領域内で一定と近似した。

燃料棒中心温度の測定データは複数の炉出力、位置について得られている。の出力密度に対し、 温度データをプロットし、明らかに他のデータと異なるものを排除した。選定した温度データを2次式 フィッティングし、温度と出力密度の関係式を求めた。

熱伝導方程式を解き、 のフィッティング式から求まる燃料棒中心温度を再現するように、燃料 被 覆管ギャップコンダクタンス(h<sub>f-c</sub>)を調整した。得られた h<sub>f-c</sub>を 2 次式にフィッティングし、出力密度に ついての関数として得た。

炉心計算により、複数温度点でのドップラー反応度と炉心内の出力分布を評価した。

ドップラー反応度には輸送メッシュ補正値などを考慮した最確値を、出力分布には 2 次元拡散計算 値を使用した。

複数温度点でのドップラー反応度を式(7.1.2)にフィッティングし、等温ドップラー反応度係数のパラメ ータ <sub>D.iso</sub> 及び x を求めた。

炉心内の各メッシュ点について と同様の手順で出力密度を求め、 で得た h<sub>f-c</sub>を用いて熱伝導方 程式を解き、燃料棒内の温度分布を求めた。温度分布は燃料棒内で平均し、各メッシュ領域内に含 まれる燃料棒の平均温度に換算した。平均操作には(7.1.11)式が保存されるように指数平均(x 1 の場合)または対数平均(x=1の場合)を用いた。

(7.1.11)式に、各メッシュ点についての燃料平均温度、中性子束、随伴中性子束、断面積変化を代入し、最終目的量である全炉心ドップラー反応度を評価した。

## 7.4 解析の詳細及び結果

- 7.4.1 炉心計算
  - 3.1 節で述べた等温温度係数の場合と同様に実施した。相異点や留意点を以下に述べる。

膨張反応度を考慮しない。6.1 節で述べたように膨張反応度の寄与は実験値の段階で除去されて いるためである。

燃料ペレット(insulator を含む)のみの温度変化を考慮した。同じく 6.1 節で述べたように冷却材の 温度が一定と見なせるように調整及び補正が施されているためである。なお、被覆管についてはそ の温度が最大出力の 20MW 時でも 800K 程度と燃料棒の温度に比べて無視できるので、冷却材と 同じ 760 (678K)とした。

格子計算を均質モデルで実施する場合は燃料核種のみの温度を変化させるため、その機能を有する SLAROM を使用した。(3.1 節では CASUP を使用)。

体系モデルと原子個数密度にはゼロ出力時(760)のものを使用した。

(表 3.2.1、 図 3.2.1、 附録 B 参照)

Core I については Core I-I 炉心、Core II については Core II-C 炉心の体系モデルを用いて評価 した。6.1 節で述べたように同じ炉心タイプ内での差異がドップラー反応度に与える影響は無視でき る。

燃料ペレットの温度は、678K~1278K(760~1840)の範囲で 100K 間隔の 7 点について計算した。 燃料棒の平均温度が最大出力 20MW 時で約 1278K と暫定解析で得られたことによる。

### 7.4.2 等温ドップラー反応度係数の計算

7 点の温度点において計算した等温ドップラー反応度(基準計算値及び補正値)を2種類の炉心に ついてそれぞれ表 7.4.1 および表 7.4.2 に示す。評価はすべて厳密摂動計算で実施した。補正値の 詳細データは附録 E に記載している。解析値の誤差は4章の等温温度係数の場合と同様、各種補正 係数による補正幅の 50%を暫定値として算出したものである。

等温温度係数の場合(5.4 節)と同様に、ドップラー反応度に対する領域毎の寄与を分析した。結果 を表 7.4.3 に示す。等温温度係数のドップラー成分とは、温度変化が燃料核種のみに限定している点 が異なる。

評価は温度を 678K から 978K に上昇させた場合の基準計算で実施した。領域番号及び名称は図 3.1.1 に対応している。Insulator 領域の合計値はドップラー反応度全体の約 6%を占めている。実際の 炉心では Insulator 領域での温度上昇は炉心領域に比べて無視できると考えられるが、寄与はゼロで はないので、本評価では Insulator 領域にも炉心領域と同じ温度を設定している。この簡略化の影響に ついては、8.3.3 項で後述するが無視できる。

表 7.4.3 で寄与の支配的な領域 1 について核種・成分毎の寄与を表 7.4.4 に、また、図 7.4.1~2 に はそのエネルギー毎の寄与を U-238 と Pu-239 について示す。

Capture 成分には U-238, Pu-239 が主に寄与し、Fission 成分と Yield 成分には Pu-239 が寄与し ている。Pu-239 については負の効果(Capture 成分と Fission 成分)と正の効果(Yield 成分)が相殺す るため合計するとその寄与は無視できるほど小さい。

等温ドップラー反応度の温度積算値を(7.1.3)式にフィッティングした結果を図 7.4.3 に示す。これより 等温ドップラー反応度係数のパラメータとして式(7.4.1-2)を得た。パラメータの誤差はフィッティング誤 差(1)であり、反応度解析値の誤差は考慮していない。補正係数の類似性から判断すると温度点間 で 100%近い相関があるものと考えられ、解析誤差を考慮する場合は、等温ドップラー反応度係数に対 して同じ値(相対誤差)を適用すればよい。

	甘淮斗笞店		補正	係数		目顶店	温度積	算値
温度変化	奉华計算恒 (%dk/kk')	輸送メッシュ 効果	集合体非 均質効果	炉心非均 質効果	UF効果	取唯间 (%dk/kk')	ノミナル値 (%dk/kk')	解析誤差 (%)
678K->778K	-0.1184	0.991	1.070	1.000	1.012	-0.1271	-0.1271	3.5
778K->878K	-0.1038	0.992	1.072	1.000	1.010	-0.1115	-0.2386	3.6
878K->978K	-0.0922	0.991	1.073	1.000	1.009	-0.0990	-0.3376	3.7
978K->1078K	-0.0829	0.992	1.075	1.001	1.008	-0.0891	-0.4268	3.8
1078K->1178K	-0.0752	0.992	1.077	1.001	1.008	-0.0809	-0.5077	3.9
1178K->1278K	-0.0687	0.992	1.078	1.001	1.007	-0.0740	-0.5817	3.9

表 7.4.1. 等温ドップラー反応度の最確値(Core I)

表 7.4.2. 等温ドップラー反応度の最確値(Core II)

记应去化	甘淮斗笞店		補正	係数		旦攻估	温度積	算値
温度変化	鏊华訂算値 (%dk/kk')	輸送メッシュ 効果	集合体非 均質効果	炉心非均 質効果	UF効果	取唯恒 (%dk/kk')	ノミナル値 (%dk/kk')	解析誤差 (%)
678K->778K	-0.0912	0.994	1.069	1.007	1.012	-0.0989	-0.0989	3.5
778K->878K	-0.0797	0.994	1.070	1.008	1.011	-0.0864	-0.1853	3.5
878K->978K	-0.0707	0.995	1.071	1.007	1.009	-0.0766	-0.2618	3.6
978K->1078K	-0.0634	0.995	1.072	1.008	1.007	-0.0687	-0.3305	3.6
1078K->1178K	-0.0574	0.995	1.073	1.007	1.006	-0.0621	-0.3926	3.7
1178K->1278K	-0.0525	0.995	1.074	1.007	1.012	-0.0571	-0.4498	3.7

表 7.4.3. 等温ドップラー反応度に対する領域毎の寄与

	反応度又け今計	領域番号及び名称							
炉心名  位に	<u> 次心反くは口前</u> 値に対すて安日	1 Coro	2. Core	16 Insulator	17. Insulator	Total			
	順に対する可う	1. Core	(lower)		(lower)				
Corol	反応度(%dk/kk')	-0.265	-0.034	-0.016	-0.003	-0.318			
Cole I	寄与(%)	83.5	10.7	4.9	0.9	100			
Coroll	反応度(%dk/kk')	-0.201	-0.029	-0.012	-0.003	-0.245			
Core II	寄与(%)	82.2	11.9	4.9	1.1	100			

表 7.4.4. 等温ドップラー反応度に対する核種・反応毎の寄与(領域 1)

炉心名	核	U-238	Pu-239	Pu-240	Total
	CAPTURE	-0.273	-0.058	-0.003	-0.334
Core I	FISSION	0.000	-0.038	0.000	-0.038
	YIELD	0.000	0.105	0.000	0.105
	合計	-0.273	0.009	-0.003	-0.267
	CAPTURE	-0.207	-0.041	-0.002	-0.259
Coroll	FISSION	0.000	-0.028	0.000	-0.029
Core II	YIELD	0.000	0.076	0.000	0.079
	合計	-0.207	0.008	-0.002	-0.202

単位(%dk/kk')



図 7.4.1. 出力ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Core I)



図 7.4.2. 出力ドップラー反応度の成分・エネルギー毎の寄与(Core II)



図 7.4.3. 等温ドップラー反応度の温度の関数へのフィッティング結果

$$\frac{d\rho_{D,iso}(T)}{dT} = \frac{\alpha_{D,iso}}{T^x}$$

 $\alpha_{D,iso} = -0.0114 \pm 0.0001, \quad x = 1.031 \pm 0.001 \text{ for Core I}$  (7.4.1)

 $\alpha_{D_{int}} = -0.0103 \pm 0.0001, \quad x = 1.055 \pm 0.002 \quad \text{for Core II}$  (7.4.2)

7.4.3 局所出力密度の計算

炉心計算で得られる出力密度は集合体のセル計算を基にした集合体平均値である。実際には出力が 発生するのは燃料棒だけであるので集合体平均値を燃料集合体中の燃料棒占有率で除して燃料棒内 での局所出力密度(LPD)に換算した。その際、集合体構成要素の寸法には760の値を使用した。

温度測定点での LPD は、3 次元 TriZ 拡散計算で求めた炉心内出力分布より評価した。

得られた LPD を GEAP レポートに記載されているものと比較して表 7.4.5 に示す。両者の比はおおむ ね良好であるが、一部に著しい差異(表中で網掛け表示した箇所)が存在する。差異のある T/C #17 と #21 はともに炉心の最外周部に装荷された IFA の炉心中心側に位置している。妥当性を判断するため、 T/C #21 と同じ IFA-6 に属し、かつ同じ高さに位置する T/C #23 と比較した。両 T/C での LPD には大 きな差異は現れないと考えられるが、GEAP では約 40%の差異がある。本評価の方が信頼できるものと考 えられる。なお、GEAP では炉心の最外周部の温度測定データは解析の信頼性を考慮してギャップコン ダクタンスの調整に使用していない。

温度測定用燃料棒には SEFOR の標準燃料と比べていくつかの差異が存在する。差異は、理論密度 比や Pu 富加度の差異(GEAP-10010-25 p.7 参照)、及び温度計挿入により燃料が除去される点であり、 それぞれ密度補正、Pu 富加度補正、Hole 補正として表 7.4.5 の LPD に考慮した(表 7.4.6)。

このうち径方向中間部に装荷された IFA-3 及び-4 の Pu 富加度補正は、Pu 富加度が確認できなかったため、周辺部に装荷された IFA-5 と同じと見なした。その妥当性は 8.1.2 項で確認する。

Hole 補正値は燃料棒内での温度変化(図 7.4.4)から温度計半径分での温度変化の全温度変化に対 する割合で評価した。出力密度の設定による補正値の変化は 0.5%未満であり、次項で述べるように出力 密度 80W/cm<sup>3</sup> 未満のデータを最終的に使用するため、補正値には代表点として 40W/cm<sup>3</sup> での値を使 用した。 7.4.4 温度測定データの選定

以上のように評価した LPD に対して温度測定データをプロットした結果を図 7.4.5~9 に示す。6.2 節 において明らかに異常なデータは排除していたが、データ間のばらつきが依然として大きく存在しており、 データをさらに排除すべきことが分かる。

そこで他のデータと異なる、あるいは出力に対して単調増加でない等、異常な振る舞いを示すデータ を含む T/C については該当する T/C のデータすべてを除去することとした。その際、燃料温度に与える 影響が大きい LPD の小さい点でのデータについて特に厳しく判断した。

結果として使用した T/C は、Core I については T/C #1,#5,#6,#11,#12,#13,#15,#16,#21(計 97 点)、 Core II については T/C #5,#6,#9,#11,#12(計 110 点)である(総計 207 点)。

選定した Core I 及び Core II の温度測定データをまとめ、80W/cm<sup>3</sup>未満の出力密度に対するデータ (計 195 点)を切片 0 の 2 次式にフィッティングし(図 7.4.10)、(7.4.3)式を得た。80W/cm<sup>3</sup>未満の情報を 使用したのはそれ以上の出力密度のデータは数が少なく、統計的に信頼性に欠けるためである。

 $T(K)=0.03477 \times LPD(W/cm^{3})^{2}+11.08237 \times LPD(W/cm^{3})$  (7.4.3)

## JAEA-Research 2006-059

			Core I			Core II	
I FA	T/C #	Relative LI	$PD(W/cm^3)$	Ratio	Relative LI	$PD(W/cm^3)$	Ratio
		JAEA	GEAP <sup>*1</sup>	(JAEA/GEAP)	JAEA	GEAP <sup>*2</sup>	(JAEA/GEAP)
	1	1	1	1.00	1	1	1.00
IEA 1	2	1.63	1.67	0.97	1.32	1.67	0.79
II'A-1	3	0.98	0.98	1.00	1.65	0.98	1.68
	4	1.61	1.63	0.99	1.31	1.63	0.80
	5	1.00	1	1.00	1.00	1	1.00
IFA-2	6	1.63	1.67	0.97	1.65	1.67	0.99
II'A-2	7	0.97	0.98	0.99	0.97	0.98	0.99
	8	1.61	1.63	0.99	1.61	1.63	0.99
	9	0.84	0.84	1.00	0.83	0.84	0.98
IFA-3	10	1.40	1.40	1.00	-	-	-
11 A-5	11	0.77	0.76	1.01	0.75	0.76	0.99
	12	1.28	1.27	1.01	1.25	1.27	0.99
	13	0.84	0.84	1.00	0.82	0.84	0.97
IFA-4	14	1.40	1.40	1.00	1.36	1.40	0.97
11 77 -	15	0.77	0.76	1.01	0.75	0.76	0.98
	16	1.29	1.27	1.01	1.25	1.27	0.98
	17	0.54	0.76	0.72	-	-	-
IFA-5	18	0.92	0.89	1.04	0.91	0.89	1.02
1171-5	19	-	-	-	-	-	-
	20	0.86	0.77	1.12	0.85	0.77	1.10
	21	0.54	0.77	0.71	0.54	0.76	0.71
IFA-6	22	0.92	0.89	1.04	0.90	0.89	1.01
	23	0.51	0.46	1.12	0.51	0.46	1.10

表 7.4.5. 出力密度の解析結果の比較<sup>[8],[13]</sup>

\*1: GEAP-13837 p.E-9より \*2: GEAP-13838 p.3-27より

					燃料家田		Pu富加度	夏補正	Hole補正		
	IFA	١	T/C	#	<sup>然和出皮</sup> 補正值 <sup>*1</sup>	Pu富	雪加度(%)	補正值 <sup>*2</sup>	温度: 半径	計の <sup>*3</sup> (cm)	補正值 <sup>*4</sup>
				1			18.1	0.8873			
	IFA-	.1		2			17.6	0.8627	0.05	8128	0 9949
	11 7 1-	1		3			18.8	0.9216	0.00	5120	0.7747
				4			18.8	0.9216			
				5			18.1	0.8873			
	IFA-	2		6			17.6	0.8627	01	778	0 9762
		-		7			18.8	0.9216	0.1	,,,,	0.5702
				8			18.8	0.9216			
	IFA-	.3		9 10 11 12	1.012		20 4 <sup>*5</sup>	1 000	0.1	778	0.9762
	IFA-	4		13 14 15 16		2	20.4	1.000	0.08	3128	0.9949
	IFA-	.5		17 18 19 20			20.4	1.000	0.08	3128	0.9949
	IFA-	6		21 22 23					0.1	778	0.9762
	*1:理論密度比の比(標準燃料:0.926、IFA用燃料:0.937) *2:標準燃料のPu富加度20.4%との比 *3:温度計周りの隔離材を含む *4:出力密度40W/cm <sup>3</sup> 時の温度計領域での温度降下の全温度降下に対する割合 *5:推定値										
2	2500	<b></b>			 I	ſ			3		
		-			I I		LP	PD 40W/c	m°	1	
$\overline{\mathbf{a}}$							—— LF	PD 80W/c	2m3		
¥ ۲	2000							D 160W	cm <sup>3</sup>		
ure rise	500			         							d baly.
nperati	000										
Ter	500										
	0				1						
	0.	0	0.	2	0.4	0.	6 0	.8 1	.0	1.2	1.4
				Dis	stance f	rom	tuel r	od cent	er (c	m)	
					図 7.4.4.	燃料	斗棒内温	度分布			

表 7.4.6. 温度計位置での出力密度の評価に追加考慮した補正値















図 7.4.8. 燃料中心温度測定結果(Core II)(その 1)



図 7.4.9. 燃料中心温度測定結果(Core II)(その 2)



図 7.4.10. 燃料中心温度上昇の局所出力密度の関数へのフィッティング結果

### 7.4.5 燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの調整

前項で得られた燃料中心温度の LPD に対する関係式を用いて、燃料 被覆管ギャップコンダクタンス(h<sub>f-c</sub>)を調整した。

調整は 0~80(W/cm<sup>3</sup>)の LPD について 1(W/cm<sup>3</sup>)刻みに熱伝導方程式を数値的に解き、冷却材の 温度が 760 になるような h<sub>f-c</sub>を求めることによって実施した。

得られた h<sub>f-c</sub>を LPD(W/cm<sup>3</sup>)に関する 2 次式に図 7.4.11 のようにフィッティング することによって、出力 密度の関数として次式(7.4.4)を得た。





図 7.4.11. 燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの LPD の関数へのフィッティング結果

7.4.6 全炉心温度分布の計算

2 次元 RZ 計算の各メッシュ点について、出力分布から「7.4.3 項 局所出力密度の計算」で述べた方法で燃料棒の出力密度を求め、「7.4.5 項 燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの調整」で得た h<sub>f-c</sub>を用いて熱伝導方程式を数値解析で解き、燃料棒内の温度分布を求めた。出力密度及び軸方向の温度分布はメッシュ領域内で一定としている。

得られた温度分布を燃料棒内で径方向に平均し、各メッシュ領域内の燃料平均温度を求めた。その際、平均操作は(7.1.11)式中の T<sup>1-x</sup>(x=1 の場合は InT)を保存するように行い、燃料のみの温度を評価 対象としている(燃料以外の温度は 678K で固定している)。

燃料平均温度(冷却材温度 678K からの温度上昇分)の径方向及び軸方向の分布を図 7.4.12~7.4.13 に示す。分布は炉心内で温度が最高となるメッシュ点を通るラインについて出力 5MW,10MW,20MW の結果を示している。軸方向の位置は炉心モデル(図 3.1)の下端からの距離で示している。



(径方向位置:中心から8cm)

7.4.7 出力ドップラー反応度の計算

2 次元 RZ 計算の各メッシュ点について、「7.4.2 項 等温ドップラー反応度係数の計算」、「7.4.6 項 全炉心温度分布の計算」でそれぞれ求めた等温ドップラー反応度係数と燃料平均温度を(7.1.11)式に代 入し、出力ドップラー反応度を算出した。中性子束と随伴中性子束には集合体非均質効果のみを考慮し た拡散計算で得られたものを、断面積変化は温度 678K と 1278K の値から評価した。それらの妥当性は 8.1節で検討する。

その他考慮すべき効果に Crystalline binding effect (結晶結合の効果: CB 効果) がある。これは、原子 間の振動により、見かけ上の温度よりも原子核の温度が高くなる効果である。CB 効果を考慮した温度 T<sub>CB</sub>(K)は文献[14]に基づき、考慮しない温度 T(K)から次式によって算出した。

$$T_{CB} = T \times (1.0 + 3110.0 / T^2)$$
 (7.3.5)

式(7.3.5)から類推できるが、CB効果は温度が低いほど顕著に現れるため、出力上昇による温度変化 を小さくする方向に寄与する。変化を低減する効果は低出力ほど大きい。

以上の手順により求めた出力ドップラー反応度の解析値、C/E 値を表 7.4.7、7.4.8 に示す。また、炉 心内温度に関する主要パラメータの評価結果を Core I について表 7.4.9 に示す。ここで rod 平均温度 は前述のように指数形を保存するようにメッシュ点毎に平均している。炉心平均温度はメッシュ点の温度 を単純に体積平均したものである。なお、Core II の温度評価結果もほぼ同じ(0.1%以内で一致)である。 誤差評価や解析結果の検討については次章で述べる。

Power (MW)										
2	5	10	15	20						
-31.55	-70.47	-119.70	-158.87	-192.25						
-23.80	-53.15	-90.19	-119.47	-144.32						
* $\beta_{eff}$ =0.00327 (Core I), 0.00330 (Core II) (Unit ¢)										
	2 -31.55 -23.80 pre I), 0.003	2 5 -31.55 -70.47 -23.80 -53.15 pre I), 0.00330 (Core II) 4% (Core I) 3% (Core	Power (MW)           2         5         10           -31.55         -70.47         -119.70           -23.80         -53.15         -90.19           ore I), 0.00330 (Core II)	Power (MW)           2         5         10         15           -31.55         -70.47         -119.70         -158.87           -23.80         -53.15         -90.19         -119.47           ore I), 0.00330 (Core II)         (葉 7.417.42.41)						

表747 出力ドップラー反応度の解析値

\*解析誤差 一律 4% (Core I), 3% (Core II) (表 7.4.1,7.4.2 より)

Core type	Power (MW)									
	2	5	10	15	20					
Core I	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01					
Core II	1.10	1.06	1.02	1.00	0.99					

表 7.4.8. 出力ドップラー反応度の C/E 値

表 7.4.9. 出力ドップラー反応度解析における温度評価結果

Power(MW)	2	5	10	15	20
LPD最大値(W/cm³)	16.0	40.1	80.2	120.2	160.3
rod内ピーク温度最大値(K)	887.0	1223.9	1850.8	2477.9	2969.8
rod平均温度最大値(K)	807.5	984.5	1247.2	1505.9	1754.5
炉心平均温度(K)	749.3	852.1	1007.3	1152.5	1294.6

# 8. 出力ドップラー反応度の誤差評価

解析で導入した種々の近似や推定に伴う誤差、燃料温度測定データに起因する誤差を評価した。また、GE による解析値(GEAP-13838<sup>[8]</sup> 3.1 節、以下、GE 解析値)との比較を行い、本評価の妥当性を検討した。

8.1 解析上の近似や実験情報の推定に伴う誤差

解析で導入した種々の近似や推定に伴う誤差として以下を検討した。

燃料の熱伝導度評価式や燃料密度の設定の影響

異なる熱伝導度評価式を使用した場合や高出力運転による燃料密度の増加を想定した場合の評価結果の変化を検討した。

中間部の IFA の Pu 富化度に対する推定の妥当性

7.2.3 項で仮定した Pu 富化度の妥当性を検討した。

中性子束及び随伴中性子束への2次元拡散計算値の使用の妥当性

中性子束及び随伴中性子束に輸送計算値あるいは3次元 TriZ 体系モデルによる計算値を使用した場合の効果を検討した。

断面積評価温度点の選定の妥当性

(7.1.6)式で 7.4.7 項において、断面積評価の温度点を固定していたことの影響を検討した。 全炉心ドップラー反応度の評価式の妥当性

(7.1.11)式では1次摂動理論に基づいており、また、散乱や漏洩による寄与を無視している。その妥当性を検討した。

8.1.1 燃料の熱伝導度評価式や燃料密度の設定の影響

異なる熱伝導度評価式を使用した場合や高出力運転による燃料密度の増加を想定した場合の評価 結果の差異を検討した。

燃料 被覆管ギャップコンダクタンス(h<sub>f-c</sub>)についてはそれぞれの場合について同一の LPD データを 用いて再評価した。

8.1.1.1 比較対象の熱伝導度評価式及び燃料密度

燃料の熱伝導度評価式として以下の2種類を比較に用いた。CASE A は GE 解析で使用された評価 式であり、GE 解析との比較によって本解析手法の妥当性を確認するという観点から採り上げた。CASE B は「もんじゅ」設置許可申請書で使用された評価式である。

燃料の理論密度比 D については、高出力運転後の空孔生成等を考慮して基準値の 0.926 から 0.970(HEDL-TME 73-42<sup>[10]</sup> p.A-5 より)に増加させた場合を評価した。その時の変化から密度設定に起因する誤差を求めた。

CASE A: Baily&Schmidt の評価式 (GE 解析値で使用)

$$k_f(T) = 0.011 + \int [(0.4848 - 0.4465 \times D) \times T]$$
 (> 873.15K) Bailly の式 (8.1.1)

$$k_f(T) = (0.05304 - 3.255 \times 10^{-5} \times T) \times F(D)$$
 (873.15K) Schmidt の式 (8.1.2)

F(D)は、上記 2 式を 600 で結合させるための調整因子(GE 報告書には記載されていないため、本評価で算出)。D は燃料の理論密度比。

$$F(D) = 417.27 \times D^3 - 1141.98 \times D^2 + 1046.01 \times D - 319.68$$
(8.1.3)

CASE B: Hilbert の評価式<sup>[15]</sup> (「もんじゅ」設置許可申請書で使用)

$$k_{f}(T) = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1 - D)}{(O / M - 1.90)}\right] \times T} + 7.214 \times 10^{-13} \times T^{3}$$
(8.1.4)

図 8.1.1 及び 8.1.2 に井上の評価式を含めた 3 種類の熱伝導評価式を、2 種類の燃料密度について 比較した。燃料温度範囲は温度評価結果(表 7.4.9)を参考に 678K ~ 3000K とした。

#### 8.1.1.2 燃料 被覆管ギャップコンダクタンスの比較

燃料 被覆管ギャップコンダクタンス(h<sub>f-c</sub>)をケース毎に調整し、比較した。その際、温度と LPD の関係 式にはすべてのケースで同一の(7.4.3)式を使用し、燃料密度変更時には温度測定用燃料棒の理論密 度比も 0.937 から 0.970 に増加するものとした。

熱伝導方程式を解く際の燃料棒の形状には中心空孔の存在等は考慮していない。上式(8.1.1~4)明 らかなように燃料密度が増加すると熱伝導度は増大する。その結果、燃料中心温度は低くなる。一方、中 心空孔を考慮しない(つまり中心まで密度が増加した燃料が存在すると設定する)場合、逆に中心温度 を大きく評価する。燃料密度の増加(0.927 0.970 の 4%)から概算すると、空孔の径は燃料棒半径 (0.9cm)の 2%(約 0.2cm)となる。この 0.2cm での温度上昇は図 7.4.4 から見積もると、出力に大きく依存 せず全温度変化の約 3%である。空孔内での温度変化はないものと見なすと、中心空孔の存在を考慮し ない場合は温度をその分過大評価することになる。しかしながら、ドップラー反応度の評価では温度を径 方向で平均して使用するため、その過大評価が全炉心ドップラー反応度に与える影響は無視できる。

得られた h<sub>f-c</sub>を図 8.1.3 及び 8.1.4 に示す。理論密度比 0.926 で Baily&Schmidt の熱伝導度評価式を 使用したケースは、GEAP-13838 p.E-4 記載の LPD(W/cm<sup>3</sup>)と h<sub>f-c</sub>の関係式 (GEAP-13838 と表示)

$$h_{f_{-c}}(W/cm^2 \cdot K) = 1.30716 \times 10^{-5} \cdot LPD^2 + 1.0935 \times 10^{-3} \cdot LPD + 0.126$$
 (8.1.5)

と熱伝導度評価式、密度が共通である。被覆管 - 冷却材間熱伝達率はすべてのケースで共通である。

図 8.1.3 より、LPD が 20~60(W/cm<sup>3</sup>)の範囲では井上と Hilbert の評価式で得られた h<sub>f-c</sub> はほぼ等し いことが分かる。当該範囲の LPD に対する燃料棒平均温度がおよそ 900K~1100K(表 7.4.8 参照)であ り、その温度範囲では両者の熱伝導度はほぼ等しいためである。一方、同範囲について Baily&Schmidt の評価式を用いた場合の h<sub>f-c</sub> は、井上、あるいは Hilbert の評価式を使用した場合と比べて 30%程度小 さい。

図 8.1.3 において Baily&Schmidt の評価式を使用した場合と GEAP-13838 の報告値は良く一致して いる。図 8.1.4 では両者に差異があるが、(8.1.5)式の燃料密度比が異なるためである。本解析とGE の解 析値間では温度測定結果のデータの選定や LPD の評価方法については全く独立した評価に基づいて いる。にも関わらず同じ熱伝導度評価式を使用して類似した結果が得られたことは、本解析における燃 料の温度評価全般について大きな誤りがないことを示している。

#### 8.1.1.3 ドップラー反応度の比較

次に、同様な比較をドップラー反応度について実施した。評価結果を表 8.1.1 及び 8.1.2 に示す。熱 伝導方程式を解く際に使用する h<sub>t-c</sub>はそれぞれのケース毎に評価したものを使用している。

Hilbert と井上の熱伝導度評価式間の差異はパラメータ(炉心、燃料密度、出力)の組み合わせすべてについて 2%以内に収まっている。熱伝導度評価式の差異は h<sub>f-c</sub>を調整することによってほぼ相殺されていると考えられる。一方、Baily&Schmidt の熱伝導評価式を使用した場合は、それらに対して 5~10%の 差異が確認できる。

3 種類の熱伝導度評価式間の比較から、比較的新しい2 種類の評価式(Hilbert、井上)が信頼できる ものと考えられ、評価式の選定に起因する誤差には2 種類の評価式(Hilbert、井上)間の差異を適用す ることとした。同様に、燃料密度の設定に起因する誤差についても Hilbert、井上の評価式それぞれで密 度比 0.926->0.970 間の差異を求め、大きい方を適用することとした。得られた誤差の評価結果を表 8.1.3 に示す。

Thermal	Ratio to theoretical	Power (MW)				
Conductivity	fuel density	2	5	10	15	20
Baily & Schmidt	0.926	1.179	1.123	1.076	1.062	1.046
	0.970	1.183	1.132	1.090	1.071	1.047
Hilbert	0.926	1.116	1.048	1.020	1.026	1.021
	0.970	1.089	1.025	0.996	0.999	0.994
T	0.926	1.104	1.066	1.027	1.020	1.011
moue	0.970	1.082	1.048	1.017	1.011	0.998

表 8.1.1. 熱伝導度や燃料密度を変化させたときの全炉心ドップラー反応度の C/E 値(Core I)

## 表 8.1.2. 熱伝導度や燃料密度を変化させたときの全炉心ドップラー反応度の C/E 値(Core II)

Thermal	Ratio to theoretical	Power (MW)					
Conductivity	fuel density	2	5	10	15	20	
Baily & Schmidt	0.926	1.170	1.120	1.067	1.041	1.026	
	0.970	1.175	1.128	1.080	1.051	1.028	
Hilbert	0.926	1.109	1.045	1.011	1.005	1.001	
	0.970	1.082	1.022	0.987	0.979	0.975	
T	0.926	1.096	1.062	1.018	1.000	0.992	
moue	0.970	1.074	1.044	1.008	0.992	0.980	

## 表 8.1.3. 熱伝導度や燃料密度に起因するドップラー反応度の誤差

Daramatar	Power (MW)							
Falameter	2	5	10	15	20			
Thermal Conductivity	1	2	2	1	1			
Fuel density	2	2	2	3	3			

Unit (%)

以上の結果をより詳細に検討するため、各ケースでの燃料温度評価結果を比較した。(表 8.1.4 及び 8.1.5)。結果は Core I に関するものであるが、Core II の場合もほぼ同じである。

燃料密度比には h<sub>f-c</sub>の調整時と温度評価時の燃料密度設定が等しい、密度比 0.970 を使用した。冷却材温度 678K からの温度上昇について基準値(井上の熱伝導度を使用した場合)に対する比を表 8.1.6 に示す。

Rod 内ピーク温度の最大値は出力 10MW まではいずれの熱伝導度を使用した場合でもほぼ等しい 結果が得られている。これは h<sub>f-c</sub>の調整を 80W/cm<sup>3</sup>(表 7.4.9 で 10MW 時の LPD 最大値に相当)の LPD について実施しているため当然の結果である。

Rod 平均温度の最大値でみると、10MW 以下でも数%の差異が現れている。これは温度を合わせた中 心以外の温度が評価式によって異なるためである。その差異は 678K からの温度上昇についてみると、 顕著になり、特に、Baily&Schmidt の熱伝導を使用した場合は、5~10%の差異となる。

表 8.1.7 には、燃料密度比による温度評価結果の変化を井上の熱伝導度評価式について示している。 結果は温度上昇の比(密度比 0.970) / (密度比 0.926)で表している。h<sub>f-c</sub>が調整されている低出力にお いても比が1より低くなっているが、すでに言及しているように温度測定用の燃料の密度比 0.937 が標準 燃料の密度比 0.926より濃いためである。熱伝導度は密度比 0.926 の方が大きいため、密度比 0.926 の 熱伝導度で調整した h<sub>f-c</sub>を用いると中心温度を高く評価する。

	Power(MW)	2	5	10	15	20
熱伝導度の種類	LPD最大値 (W/cm <sup>3</sup> )	16.0	40.1	80.2	120.2	160.3
Baily & Schmidt	rod内ピーク <sup>注</sup>	887.7	1230.5	1859.3	2518.0	3165.4
Hilbert		884.1	1217.3	1824.0	2407.7	2901.5
Inoue	反取入但(N)	887.3	1224.9	1853.4	2480.6	2971.8
Baily & Schmidt	rod亚均泪度	816.3	1004.5	1281.7	1544.0	1803.2
Hilbert		806.9	979.0	1255.0	1522.6	1774.0
Inoue	取入但(N)	807.8	985.4	1249.3	1508.6	1757.2
Baily & Schmidt	柏心亚均泪度	754.8	863.5	1028.7	1181.4	1328.1
Hilbert		750.7	849.5	1004.5	1155.6	1303.5
Inoue	(1)	749.5	852.5	1008.3	1154.2	1296.7

表 8.1.4. 熱伝導度を変えたときの温度評価結果の比較(燃料密度比 0.926)

表 8.1.5 熱伝導度を変えたときの温度評価結果の比較(燃料密度比 0.970)

	Power(MW)	2	5	10	15	20
熱伝導度の種類	LPD最大値 (₩/ cm <sup>3</sup> )	16.0	40.1	80.2	120.2	160.3
Baily & Schmidt	rod内ピーク氾	873.3	1189.7	1764.3	2358.9	2924.6
Hilbert		873.8	1188.7	1763.8	2332.0	2825.9
Inoue	反取入但(1)	874.5	1189.0	1766.9	2350.1	2821.4
Baily & Schmidt	rod可方记用	817.0	1008.9	1290.8	1542.3	1776.9
Hilbert		803.7	971.0	1234.7	1490.0	1732.1
Inoue	取八但(N)	804.9	980.9	1243.9	1490.7	1721.5
Baily & Schmidt	柏心亚构泪度	755.2	864.9	1033.9	1188.1	1331.7
Hilbert		748.8	845.3	995.0	1139.6	1280.9
Inoue	(//)	748.0	849.0	1004.2	1148.7	1286.7

表 8.1.6. 燃伝導度を変えたときの 678K からの温度上昇の

基準値(井上評価式使用時	)に対する比(	燃料密度比	0.970)

熱伝導度の種類	Power(MW)	2	5	10	15	20
Baily & Schmidt	rod内ピーク温	0.99	1.00	1.00	1.01	1.05
Hilbert	度上昇最大値	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
Baily & Schmidt	rod平均温度上	1.10	1.09	1.08	1.06	1.05
Hilbert	昇最大値	0.99	0.97	0.98	1.00	1.01
Baily & Schmidt	炉心平均温度上	1.10	1.09	1.09	1.08	1.07
Hilbert	昇	1.01	0.98	0.97	0.98	0.99

表 8.1.7. 燃料密度による 678K からの温度上昇の変化(密度比 0.970 / 密度比 0.926) (井上の熱伝導度評価式使用)

			- /		
Power(MW)	2	5	10	15	20
rod内ピーク温度上昇最大値	0.94	0.93	0.93	0.93	0.93
rod平均温度上昇最大值	0.98	0.99	0.99	0.98	0.97
炉心平均温度上昇	0.98	0.98	0.99	0.99	0.98



図 8.1.1. 熱伝導度評価式の比較(燃料の理論密度比 0.926)



図 8.1.2. 熱伝導度評価式の比較(燃料の理論密度比 0.970)



図 8.1.3. ギャップコンダクタンスの比較(燃料の理論密度比 0.926)



図 8.1.4. ギャップコンダクタンスの比較(燃料の理論密度比 0.970)

8.1.2 中間部の IFA の Pu 富化度に対する推定の妥当性

表 7.4.6 では、 炉心中間部に装荷された IFA-3 および-4 の Pu 富化度を周辺部に装荷された IFA-5 と同じと推定している。 可能性としては IFA-5 ではなく、 中心部(IFA-1)と同じとした場合も考えられる。 そ こで両者の結果を比較し、 推定の妥当性を検討した。

図 8.1.5 に IFA-3 および 4 の Pu 富化度に IFA-1 又は IFA-5 の値を適用した場合の h<sub>f-c</sub>を GE 報告 値と比較して示す。いずれのケースも燃料の熱伝導度には Baily & Schmidt の評価式を使用している。 IFA-5 を適用した場合は GE 報告値に近い結果が得られているが、IFA-1 を適用した場合には差異が 生じている。GEAP-13838 の結果は十分な情報が反映されたものと考えられるため、炉心中間部の IFA の Pu 富加度には IFA-5 の値を適用することが妥当であると判断できる。



図 8.1.5. ギャップコンダクタンスの比較(Pu 富化度の設定による差異)

8.1.3 中性子束及び随伴中性子束への2次元拡散計算値の使用の妥当性

7.4.7 項では、出力ドップラー反応度の算出に使用する中性子束及び随伴中性子束として 2 次元 RZ 拡散計算値を使用していた。その妥当性を検討するため、輸送計算値あるいは 3 次元 TriZ 体系モデル による計算値を使用し、それらの効果を評価した。評価は Core I について実施した。

表 8.1.8 に輸送計算値と拡散計算値それぞれを使用した場合を比較した。なお、等方拡散係数を使用しているため、同じ拡散計算値であっても表 7.4.8 とは異なっている。

表 8.1.9 には 3 次元 TriZ 計算値と 2 次元 RZ 計算値それぞれを使用した場合の結果を比較した。3 次元計算の効果だけに着目するため、3 次元 TriZ 計算値には炉心内の非均質効果は考慮していない。

輸送計算及び3次元計算の効果はいずれも 1%以内であり、互いに相殺している。効果の積としては 1%未満であり無視できる。

表 8.1.8. 中性子束及び随伴中性子束に輸送計算値を使用する効果

Power(MW)	2	5	10	15	20
輸送計算	1.11	1.07	1.03	1.02	1.02
拡散計算	1.11	1.08	1.04	1.04	1.03
輸送 / 拡散	0.995	0.994	0.990	0.990	0.990

表 8.1.9. 中性子束及び随伴中性子束に3次元計算値を使用する効果

Power(MW)	2	5	10	15	20
3次元計算値	1.11	1.07	1.03	1.02	1.01
2次元計算値	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
3次元 / 2次元	1.005	1.004	1.004	1.003	1.003

8.1.4 断面積評価温度点の選定の妥当性

7.4.7 項では、温度による断面積変化として 678K と 1278K での差を使用した。(7.1.6)式で断面積変化を ln(T<sub>1</sub>/T<sub>0</sub>)で除した量は温度に依存しないと仮定しているためであり、その妥当性を確認した。

影響を最小限に抑えたケースとして、1278Kの代わりにドップラー反応度評価時の炉心平均温度の近い値を使用し、1278Kに固定した場合との出力ドップラー反応度の差異を確認した。評価は Core I について実施した。

温度の設定値 T<sub>1</sub>を表 8.1.10 に、得られたドップラー反応度評価結果を表 8.1.11 に示す。T<sub>1</sub>を可変 にした場合と 1278K に固定した場合のドップラー反応度の差は温度設定の差が最も大きい 2MW の場 合でも 0.3%であり、1287 に固定しても問題ないことが確認できる。

表 8.1.10. 出力ドップラー反応度評価における基準温度の設定値

Power(MW)	2	5	10	15	20
炉心平均温度(K)	749.51	852.50	1008.32	1154.18	1296.67
T₁設定値(K)	778.59	878.59	978.59	1178.59	1278.59

表 8.1.11. 温度設定を可変とした場合の出力ドップラー反応度評価結果の変化

Power(MW)	2	5	10	15	20
温度可変	1.11	1.07	1.03	1.02	1.01
温度固定(1278K)	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
可変 / 固定	1.003	1.002	1.002	1.000	1.000

8.1.5 出力ドップラー反応度の評価式の妥当性

出力ドップラー反応度の評価に使用した (7.1.11)式は、温度分布がある場合、ない場合の反応度評 価式の比をとり、かつ一次摂動論では両者の分母が等しいことを利用している。また、散乱や漏れの寄与 を考慮していない。

まず、一次摂動論の使用の妥当性を確認するため、温度分布がある場合、ない場合の2ケースについて厳密摂動計算でドップラー反応度を評価し、一次摂動計算の場合と比較した。摂動計算には PERKYコードを使用した。

評価は Core I の 0MW から 20MW への出力上昇によるドップラー反応度について実施した。

温度分布がない場合は、燃料温度は一律に摂動前 678K、摂動後 1278K とした。

温度分布がある場合は、温度分布がない時(678K)の計算で得た出力分布よりメッシュ点毎に炉心内 温度分布を求め、その分布に応じて摂動後の温度分布を設定した。図 8.1.6 にメッシュ点における温度 設定値を示す。評価を簡略化するために、温度は四捨五入して 100K 単位で設定している。

/	メッシュNo.	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	16
メッシュ		0.004	4 044	44 044	40.40	40.50	00.40	05 00	07.04	00 40	24 47	22.25	25 40	20.04	20 42	20.00	44 47
No.	Z境界(cm)	3.001	4.244	11.814	10.10	19.56	22.40	25.02	27.34	29.48	31.47	33.35	35.12	30.81	38.43	39.98	41.47
13	31.332	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	33.917	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	300	300	300	300	300
15	36.502	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	300	300	300	300
16	39.086	600	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	300	300	300
17	41.671	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	400	300
18	44.256	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	400
19	46.841	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400
20	49.426	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400
21	52.011	800	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400
22	54.596	900	800	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400
23	57.18	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	500	500
24	59.765	900	900	800	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	500
25	62.35	900	900	900	800	800	800	700	700	600	600	600	500	500	500	500	500
26	64.935	1000	900	900	800	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500
27	65.891	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
28	69.302	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	70.258	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
30	72.782	1000	1000	900	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500
31	75.306	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	500	500
32	77.829	1000	1000	1000	900	900	800	800	800	700	700	600	600	600	600	500	500
33	80.353	1100	1000	1000	900	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	500
34	82.877	1100	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	600
35	85.4	1100	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	600
36	87.924	1100	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	600
37	90.448	1100	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	600
38	92.972	1100	1000	1000	900	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	500
39	95.495	1000	1000	1000	900	900	800	800	800	700	700	600	600	600	600	500	500
40	98.019	1000	1000	1000	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	600	500	500
41	100.543	1000	1000	900	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500
42	103.067	1000	900	900	900	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500
43	105.59	900	900	900	800	800	800	700	700	600	600	600	500	500	500	500	500
44	108.114	900	900	800	800	800	700	700	600	600	600	600	500	500	500	500	500
45	110.564	800	800	800	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400
46	113.014	800	800	700	700	700	600	600	600	600	500	500	500	400	400	400	400
47	115.463	800	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400
48	117.913	700	700	700	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	400
49	120.363	700	600	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	400	300	300
50	122.812	600	600	600	600	500	500	500	500	400	400	400	400	300	300	300	300
51	123.768	100	100	100	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0

## 図 8.1.6. 炉心内メッシュ点毎の燃料温度上昇 (ゼロは非燃料領域を示す)

(単位 K)

燃料温度分布がない場合、ある場合それぞれについて、一次及び厳密摂動計算により評価した摂動 分子、分母を表 8.1.12 に示す。

燃料温度	摂動計算の		摂動分子に対する成分別の寄与(1/cm <sup>3</sup> ・s)								
分布	種類	Yield	Fission	Capture	Scattering	Leakage	Total	$(1/cm^3 \cdot s)$			
t>   .	一次摂動	2.76E-10	-1.02E-10	-9.79E-10	6.62E-12	1.03E-11	-7.88E-10	1.31E-07			
<i>'</i> 40	厳密摂動	2.60E-10	-9.56E-11	-9.40E-10	6.25E-12	1.03E-11	-7.59E-10	1.31E-07			
ᅕᄓ	一次摂動	2.99E-10	-1.11E-10	-1.06E-09	7.55E-12	1.08E-11	-8.56E-10	1.31E-07			
0,00	厳密摂動	2.80E-10	-1.03E-10	-1.01E-09	7.07E-12	1.06E-11	-8.19E-10	1.30E-07			

表 8.1.12. 燃料温度分布を考慮しない場合とする場合の摂動計算結果

上表の値より摂動分子(Total)と摂動分母について比(温度分布あり/なし)を算出し、一次摂動と厳 密摂動間で表 8.1.13 に比較した。温度分布を考慮する効果は、摂動の種類によらず同程度に現れてお り、一次摂動計算に基づく(7.1.11)式を使用してもその誤差は無視できると言える。

表 8.1.13. 摂動計算手法間の摂動分子、分母の比(温度分布あり/なし)の比較

		摂動分子		摂動分母				
摂動計算の	温度分布なし	温度分布あり	分布あり/	温度分布なし	温度分布あり	分布あり /		
種類	$(1/cm^3 \cdot s)$	$(1/cm^3 \cdot s)$	なし	$(1/cm^3 \cdot s)$	(1/cm <sup>3</sup> ⋅ s)	なし		
一次摂動	-7.88E-10	-8.56E-10	1.09	1.31E-07	1.31E-07	1.00		
厳密摂動	-7.59E-10	-8.19E-10	1.08	1.31E-07	1.30E-07	1.00		

次に、摂動分子における散乱、漏れの寄与を温度分布あり、なしそれぞれの場合について表 8.1.14 に示す。評価には一次摂動計算結果を使用した。散乱と漏れによる反応度の全反応度に対する比率は 温度分布の有無によらず、ほぼ一致しており、(7.1.11)式において散乱と漏れの寄与は分子分母で相殺 されることが分かる。

温度分布	散乱と漏れの寄与	反応度Total	散乱と漏れの寄与/反応度Total
	$(1/cm^{3} \cdot s)$	$(1/cm^{3} \cdot s)$	(絶対値)[%]
なし	1.69E-11	-7.88E-10	2.15
あり	1.83E-11	-8.56E-10	2.14

表 8.1.14. 出力ドップラー反応度計算における散乱と漏れの寄与

8.2 燃料温度測定データに起因する誤差

7.2.3 項で述べたように本解析では、燃料 被覆管ギャップコンダクタンス(h<sub>f-c</sub>)を燃料中心温度の測定 値を再現するように調整している。そのため中心温度の誤差は温度測定値のばらつきそのものである。 温度測定データのばらつきに起因するドップラー反応度の誤差を評価した。

8.2.1 温度上昇データのばらつき

7.4 節ではゼロ出力時(678K)からの温度上昇データを局所出力密度(LPD)の関数として 2 次式にフィ ッティングしている(図 7.4.10)。データのばらつきを、フィッティング式と測定データの差(相対値)で表す と図 8.2.1 となる。



フィッティング式との差は 10W/cm<sup>3</sup>以下の LPD で大きく、最大で 40%に達している。

図 8.2.1. 燃料温度上昇データのフィッティング式からのばらつき

燃料温度の評価上重要となる LPD の範囲は炉出力によって異なる。例えば 20MW 時には最大出力 密度が 160W/cm<sup>3</sup>(平均は 90 W/cm<sup>3</sup>)であり、10W/cm<sup>3</sup>以下のデータは全炉心ドップラー反応度にほと んど寄与しない。

そこで図 8.2.1 において 10W/cm<sup>3</sup>の前後で区分して誤差を設定することとした。誤差は図 8.2.1 の相 対誤差を二乗和平方根により平均した。測定データのない 80~160 (W/cm<sup>3</sup>)については 80W/cm<sup>3</sup>での 値で代用した。結果を以下に示す。

中心温度上昇の測定誤差 22% (LPD < 10 W/cm<sup>3</sup>) 7% (LPD > 10 W/cm<sup>3</sup>)

炉出力毎の誤差は LPD の最大値(表 7.4.8)に対する上記範囲の比率に応じて次式のように混合して 評価した。

$$\delta T = \frac{22\% \times 10 + 7\% \times (80 - 10) + 5\% \times (LPD_{max}(W/cm^3) - 80)}{LPD_{max}(W/cm^3)}$$
(8.2.1)

一般に温度が高い領域では中性子インポータンスが高く、全炉心ドップラー反応度への寄与が大きいため、単純割合で平均した本評価は保守的なものとなる。

以上のように評価した燃料中心温度上昇の測定誤差を表 8.2.1 に示す。

表 8.2.1. 燃料中心温度上昇の測定誤差

Daramatar	Power (MW)						
Farameter	2	5	10	15	20		
LPD <sub>max</sub> (W/cm <sup>3</sup> )	16.0	40.1	80.2	120.2	160.3		
Uncertainty in Temperature rise data (%)	16	11	9	8	8		

なお、上記 LPD に対し、燃料 被覆管での温度変化は、中心温度上昇に対して低出力側から順に 23, 16, 8, 5, 3 [%]である。10MW 以上の場合は、燃料 被覆管での温度変化より誤差の方が大きく、物 理的に不自然であるが、7.4.4 項で温度測定データを主観的に選定していることを考慮して表 8.2.1 の 誤差をそのまま採用することとする。

8.2.2 出力ドップラー反応度の誤差

表 8.2.1 の誤差を全炉心ドップラー反応度の誤差に換算する。

ドップラー反応度と燃料温度変化 $(T_0 - >T_1)$ 間の誤差の関係は、等温ドップラー反応度の式(7.1.4)を用いると次式で表される。

$$\frac{\Delta \rho_D}{\rho_D} = \frac{1}{\ln \frac{T_1}{T_0}} \left( \frac{\Delta T_1}{T_1} \right)$$
(8.2.2)

表 8.2.1 の誤差は燃料中心温度 $(T_c)$ と冷却材温度 $(T_0)$ の差に対するものであるので、次式で燃料温 度 $(T_1)$ の誤差に換算した。ここで  $T_1$  は表 7.4.8 で示した炉心平均値を使用した。

$$\Delta T_1 = (T_1 - T_0) \cdot \frac{\Delta T_c}{T_c - T_0}$$

$$(8.2.3)$$

得られた出力ドップラー反応度の誤差を表 8.2.2 に示す。

Doromator	Power (MW)						
1 arameter	2	5	10	15	20		
$T_1$ (K)	749.3	852.1	1007.3	1152.5	1294.6		
$\Delta T_{1}/T_{1}$ (%)	1.6	2.2	2.9	3.4	3.8		
$l/\ln(T_1/T_0)$	9.9	2.7	1.4	1.1	0.9		
$\Delta  ho_{_D}/ ho_{_D}$ (%)	16	6	4	4	4		

表 8.2.2. 燃料温度上昇の測定誤差に起因するドップラー反応度の誤差

8.3 GE 解析値との比較

GE 解析と本解析との間には温度評価手法以外に主なものとして以下の3点の違いがある。評価の参考として各項目について全炉心ドップラー反応度解析結果に与える影響を定量的に評価した。評価は本解析で採用した手法において着目項目のみを変更することによって実施した。

結晶結合(CB)効果の有無

GE 解析値では考慮していない CB 効果(7.4.7 項参照)の影響について検討した。

等温ドップラー反応度係数評価式の差異

GE 解析値では等温ドップラー反応度係数が温度に反比例するもの、つまり(7.1.1)式で x=1 としており、その影響を確認した。

炉心内温度分布に使用する重み関数と Insulator の取り扱いの差異

GE 解析値では炉心内温度分布に使用する重み関数として出力2乗値を使用しており、その影響を確認した。評価は Insulator 領域の温度変化を考慮する場合としない場合(GE 解析値に相当)の2種類について実施した。

8.3.1 結晶結合(CB)効果の有無

CB 効果の有無によるドップラー反応度の C/E 値を表 8.3.1 に比較する。CB 効果は 7.4.7 項で述べ たように出力上昇による温度変化を抑制する効果があるが、その C/E 値に与える影響は影響が最も大き くなる 2MW においても 1%程度である。

表 8.3.1. 結晶結合効果の有無による C/E 値の変化

Power(MW)	2	5	10	15	20
CBなし	1.12	1.08	1.04	1.03	1.02
CBあり	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
なし / あり	0.988	0.990	0.991	0.992	0.993

8.3.2 等温ドップラー反応度係数評価式の差異

GE の解析では、 (7.1.1)式において、x=1 と近似している。 温度は 700K と 1400K が使用されている (GEAP-13598 p.3-55)。

x=1 と近似する影響を把握するため、近似した場合のドップラー反応度の C/E 値を今回の解析結果と 比較した。

$$\alpha_{D,iso} = \frac{\rho(700K \to 1400K)}{\ln(1400/700)}$$
(8.3.1)

その際、 は、(7.4.1)又は(7.4.2)式に上記温度を代入して算出した。得られた α<sub>D,iso</sub> を以下に示 す。

 $\alpha_{D,iso} = -2.799(\$)$  for Core I, -2.179(\$) for Core II (8.3.2)

 $\alpha_{D,so}$ を(7.1.11)式に適用し、Core I、Core II それぞれに対するドップラー反応度を評価した。結果を 表 8.3.2 に示す。

x=1 と近似する影響はほぼ 1%以下である。Core II の 15MW 以上では 2%現れているが、Core II の x の値(1.06)が Core I の値(1.03)に比べ、 1 からのずれが大きいためと考えられる。

Core type	Power(MW)	2	5	10	15	20
Coro I	X=1	1.10	1.06	1.02	1.02	1.01
Core I	X≠1	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
Coro II	X=1	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
Core II	X≠1	1.10	1.06	1.02	1.00	0.99

表 8.3.2. ドップラー反応度係数評価式の差異による影響

8.3.3 炉心内温度分布に適用する重み関数と Insulator の取り扱いの差異

本解析で使用した (7.1.11)式では、中性子束、随伴中性子束、及び断面積変化の積(厳密重み)を 温度分布の重みに使用している。一方、GE 解析値では(8.3.3)式のように近似的に出力の 2 乗(P<sup>2</sup> 重 み)を重みに使用している。その影響は GEAP-13598<sup>[6]</sup> 3.5.3 項で評価されており、ドップラー反応度の 変化は 2%より小さいと見積もられている。

$$\rho_D(P) = C_D \cdot \frac{\int \{\Delta T(r)P^2(r)\} dr}{\int P^2(r)dr}$$
(8.3.3)

インシュレータの温度変化の扱いにも差異がある。GE 解析値ではインシュレータの温度変化を考慮していない。一方、本解析では温度が燃料と同様に変化するものと見なしている。実際はインシュレータの 温度は冷却材に近いため、温度変化を考慮しない方が良い近似である。

以上の差異の分析として、重み関数とインシュレータの扱いをそれぞれ変更して影響を評価した。評価は Core I について実施した。

表 8.3.3 及び 8.3.4 にはインシュレータの温度変化を考慮した場合、考慮しない場合それぞれについて、重み関数の差によるドップラー反応度の C/E 値を比較している。

表 8.3.3. C/E 値に対する重み関数の差異の影響(インシュレータの温度変化あり)

Power(MW)	2	5	10	15	20
簡易 ( P <sup>2</sup> ) 重み	1.19	1.15	1.10	1.09	1.08
厳密重み	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01
簡易 / 厳密	1.08	1.08	1.07	1.07	1.07

表 8.3.4. C/E 値に対する重み関数の差異の影響(インシュレータの温度変化なし)

Power(MW)	2	5	10	15	20
簡易 ( P <sup>2</sup> ) 重み	1.13	1.09	1.04	1.03	1.02
厳密重み	1.11	1.07	1.03	1.02	1.01
簡易 / 厳密	1.02	1.02	1.01	1.01	1.01

インシュレータの温度変化を考慮する場合は、P<sup>2</sup>重みでは 8%近く過大評価となるが、インシュレータの 温度変化を考慮しない場合は P<sup>2</sup>重みの影響は GEAP-13598 での評価と同じく 2%以内である。

厳密重み使用の場合はインシュレータの温度変化の取り扱いは影響しない。これは、(7.1.11)式の右辺の C<sub>D</sub>と分母でインシュレータ部の寄与が相殺されるためである。一方、(8.3.3)式では分母の出力にはインシュレータの寄与がほとんど現れないため、C<sub>D</sub>への寄与のみが残る。つまり、厳密重みを使用すればインシュレータの扱いはどちらでも良いと言える。

8.4 誤差評価のまとめ

8.1~8.3節で述べた誤差の検討結果と値を以下にまとめる。

燃料の熱伝導度評価式に起因する誤差

比較的新しい2種類の評価式(Hilbert、井上)による差異から評価した。

出力に応じて 1~2(%)の誤差を見込む必要がある。

燃料密度に起因する誤差

高出力運転による密度変化を考慮した場合(密度比 0.926->0.970)の変化から評価した。

出力に応じて2~3(%)の誤差を見込む必要がある。

- 中間部の IFA の Pu 富化度に起因する誤差
- 推定値は妥当であり、誤差を見込む必要はない。

中性子束分布に対する輸送効果、3次元効果に起因する誤差

輸送計算及び3次元計算の効果はいずれも 1%以内であり、互いに相殺し、効果の積としては 1% 未満で無視できる。

断面積評価温度の設定に起因する誤差

誤差は 0.3%未満で無視できる。

全炉心ドップラー反応度算出時の1次摂動論の使用に起因する誤差

誤差は1%未満で無視できる。

インシュレータの温度変化の扱い

温度分布の空間積分時の重みに出力の二乗を使用すると 6%の差異を生じるが、厳密な重み(中 性子束、随伴中性子束、断面積変化)の積を使用すれば差異は 1%未満と無視できる。

燃料温度測定データのばらつきに起因する誤差

出力に応じて4~16(%)の誤差を見込む必要がある。

以上より、誤差としては熱伝導度評価式、燃料密度、及び燃料温度測定データのばらつきに起因する ものを考慮する。このうち、熱伝導度評価式の選定に起因する誤差は、解析上の誤差ではあるが、核特 性の解析誤差ではない。本データの整備目的は核特性解析精度の向上であるため、核特性解析に関 する誤差以外はすべて実験誤差として計上する。また、出力密度の解析に起因する誤差については、温 度測定データのばらつきに含まれるものと見なす。

実験誤差としては上記以外に、6.1 節で述べた反応度評価(3%)及び出力評価の誤差(5%)、出力係数 データの統計誤差(1 又は 0%)があり、整理すると表 8.4.1 となる。誤差は2乗和平方根で合計している。

データのばらつきによる誤差以外は系統誤差である。炉心間の相関は以下のように設定した。

反応度評価誤差については評価方法は共通であるが反射体の位置が炉心間で異なるため、相関を 0.5 とした。温度測定データに起因する誤差については、燃料の状態を依存し、燃料の状態は両炉心で 同じではない(燃料が異なる)ため、相関は 0.5 とした。その他については炉心間でメカニズムが共通で あり、相関は 1.0 とした。以上より、誤差合計値の相関を次式で算出すると、0.8 となる。

$$C_{I-II} = \frac{\sum_{i} \delta x_{i,I} \delta x_{i,I} C_{i,I-II}}{\sqrt{\sum_{i} \delta x_{i,I}^{2}} \sqrt{\sum_{i} \delta x_{i,I}^{2}}} (\delta x_{i,I}; 要因iの誤差(IIは炉心名)、 C_{i,I-II}; 要因iの誤差の炉心間の相関係数) (8.4.1)$$

なお、得られた誤差評価結果は本報告に先行して報告した値<sup>[29]</sup>(誤差合計で 6~9%)とは異なっているが、誤差評価の考え方をより論理的なものに見直したためであり、今後は本結果の採用を推奨する。

Source	Power (MW)					Correlation
Source	2	5	10	15	20	between cores
Thermal Conductivity	1	2	2	1	1	1.0
Fuel density	2	2	2	3	3	1.0
Fuel temperature data	16	6	4	4	4	0.5
Reactivity evaluation	3			0.5		
Power evaluation	5			1.0		
Statistical deviation of Doppler	1	ſ	ſ	1	1	0
reactivity data (Core I)	4	2	2	1	1	0
Statistical deviation of Doppler	2	r	1	0	0	0
reactivity data (Core II)	5	2	1	0	0	0
Sum (Core I) <sup>(a)</sup>	18	9	8	8	8	0.8
Sum (Core II) <sup>(a)</sup>	17	9	8	8	8	0.8

表 8.4.1. 出力ドップラー反応度の実験誤差のまとめ

Unit (%)

上記結果を GE の誤差評価結果(GEAP-13838 p.3-14)と比較して表 8.4.2 に示す。温度評価に関す る誤差に差異があるが、算出根拠は確認できなかったため、ここでは差異を示すにとどめる。

Source	GE <sup>(a)</sup>	Present		
Thermal Conductivity	<b>o o</b> (b)	1		
Fuel temperature data	0.0	4		
Fuel density	2.3	3		
Reactivity evaluation	3.1	3		
Power evaluation	5 <sup>(c)</sup>	5		
Statistical deviation of Doppler		1		
reactivity data	-	I		
Sum	11	8		

表 8.4.2. 出力ドップラー反応度の実験誤差に関する GE 評価値との比較

(a) Reported values are for  $1.3\sigma$ , thus converted to  $1\sigma$  values.

(b) Sum of fuel thermal model (8.5%) and local power density (2.3%).

(c) Reported value 5% for  $1.3\sigma$  should be for  $1\sigma$  based on GEAP-13702 p.3-19.

# 8.5 出力ドップラー反応度のまとめ

出力ドップラー反応度の評価結果を表 8.5.1 にまとめる。C/E 値は出力が低くなるほど過大評価になっているが、実験誤差の範囲であり、有意ではない。

Corotamo	Itom	Power (MW)						
Core type	Item	2	5	10	15	20		
	Calculation <sup>(a)</sup> [¢]	-31.5	-70.5	-119.7	-158.9	-192.2		
Core I	Experiment [¢]	-28.6	-66.1	-116.6	-155.7	-190.1		
	C/E	1.10	1.07	1.03	1.02	1.01		
	Calculation [¢]	-23.8	-53.2	-90.2	-119.5	-144.3		
Core II	Experiment [¢]	-21.7	-50.0	-88.6	-119.4	-145.5		
	C/E	1.10	1.06	1.02	1.00	0.99		
Uncertainty <sup>(c)</sup>	Calculation <sup>(b)</sup> [%]			4				
Uncertainty	Experiment <sup>(c)</sup> [%]	18	9	8	8	8		

表 8.5.1. 出力ドップラー反応度の解析結果のまとめ

(a)  $\beta_{eff}$ =0.00327 (Core I), 0.00330 (Core II)

(b) Excluding error in  $\beta_{\text{eff}}$ 

(c) Common to both cores with correlation of 0.8.

# 9. ドップラー定数のベンチマークデータの作成

出力ドップラー反応度の解析値を得るためには核特性解析に加えて熱特性の解析が必要であり、核 特性解析システム単独では利用が困難である。

SEFOR 実験のベンチマークデータ<sup>[11][30]</sup>では、ドップラー定数(式 7.1.1 で x=1 とした場合の  $\alpha_{D,iso}$ )を 評価対象にしている。

そこで、本評価においても出力ドップラー反応度の解析結果からベンチマーク計算用のドップラー定数 *α<sub>Bench</sub>* を作成することとした。既存ベンチマークデータと同様に出力は 20MW に上昇したときの値を使用した。

なお、等温温度係数の場合は、核特性解析のみで解析できる。解析モデルは表 3.2.2 と図 3.2.1、原 子個数密度は付録 B、補正係数は 4.2 節に記載している。

9.1 ドップラー定数の評価

x=1 の場合、出力ドップラー反応度はドップラー定数  $\alpha_{D,iso}$  に比例する。そのため適当な  $\alpha_{D,iso}$  を (7.1.11)式に適用して全炉心ドップラー反応度の C/E を算出し、E/C を乗じれば  $\alpha_{Bench}$  が得られる。  $\alpha_{D,iso}$  の暫定値にはここでは GE の解析値<sup>[11]</sup>を使用した。 $\alpha_{Bench}$  の評価結果を表 9.1.1 に示す。

(7.1.11)式における  $\alpha_{D,so}$  以外のパラメータ(中性子束など)は出力ドップラー反応度の解析 (表 7.4.7)の場合とほぼ同じである。例外は x=1 とした点とインシュレータ部の温度は変化し ない(断面積変化は燃料領域のみで考慮した)点である。

誤差には表 8.5.1 の 20MW の実験誤差 8%を適用した。

Item	Core I	Core II				
$lpha_{\scriptscriptstyle D,iso}$ <sup>(a)</sup> (\$) (GE result)	2.548	1.935				
C/E	0.9752	0.9513				
$lpha_{\scriptscriptstyle Bench}$ (\$) <sup>(b)</sup>	2.61 ± 0.21	2.03 ± 0.16				

表 9.1.1 ドップラー定数のベンチマークデータ

(a)  $\alpha_{D iso}$  (\$) =0.0079 and 0.0060, for Core I and II, respectively.

 $\beta_{eff} = 0.0031$ 

(b) Correlation coefficient of uncertainties between cores is 0.8.

 $\alpha_{Disc}$ は次式で算出する。

$$\alpha_{D,iso} = \frac{\rho(0W \to 20MW)}{\ln(\overline{T_{20MW}} / 678)}$$
(9.1.1)

ここで $\overline{T_{20MW}}$ は 20MW での燃料温度の炉心平均値であり、上式を満たすように表 8.5.1 の (実験値)と $\alpha_{Bench}$ から算出すると、各炉心で 1403K、1389K となる。

α<sub>D,iso</sub> はその定義から温度に依存しない量である。実際に今回の評価でα<sub>D,iso</sub>の基準計算値につ いて温度 T を変えて評価したところ、100K の差によるα<sub>D,iso</sub>の変化は 0.2%であった(図 9.1.1)。 そこで、既存ベンチマークデータの設定と同様に 760 から 2000 (678K から 1366K)を 20MW への 出力上昇による温度変化に設定した。



図 9.1.1. ドップラー定数の温度依存性

9.2 解析方法

ベンチマークデータの解析方法を以下に述べる。

- (1) 使用解析モデル及び原子個数密度
- (2) 解析手順

2 種類の燃料温度(678Kと1366K)で実効増倍率を算出し、

$$\alpha_{D,iso} = \frac{\rho(678K \to 1366K)}{\ln(1366/678)}$$
(8.3.2)

よリドップラー定数を求める。その際、温度を変化させるのは Insulator 領域以外の燃料核種のみとする。

(3) 補正係数

炉定数に JFS-3 の 70 群炉定数を使用し、炉心計算に拡散計算を使用した場合に最確値を得るための補正係数を表 9.2.1 に示す。補正値は、等温ドップラー反応度の評価結果(表 7.4.1、7.4.2)に対応した結果をインシュレータの温度を変更せずに再評価し、678K->1278K の温度変化に対して算出したものである。

Source	Core I	Core II			
Transport and mesh	0.9915	0.9959			
Cell heterogeneity	1.078	1.075			
Core heterogeneity	1.000	1.008			
Ultra Fine group	1.013	1.010			
Total	1.083	1.090			

表 9.2.1. ベンチマーク計算用の補正係数
集合体非均質効果は、燃料集合体を非均質モデルで扱う効果である。上記補正値を使用しない場合 は、図 3.2.2、付録 B(表 B.4)を使用する(Core I,II で共通)。ただし、それらは 350 での値であるので、 760 の値に換算する必要がある。

炉心非均質効果は、炉心内の集合体装荷パターンを反映する効果である。上記補正値を使用しない 場合は、図 6.1.1 (Core I)、図 6.1.5 (Core II)を基に非均質性を考慮する。

UF 効果は、格子計算を超微細群(Ultra Fine)で実施する効果で、JFS70 群炉定数を使用する場合に 対するものである。

9.3 サンプル計算

JENDL-3.2 及び-3.3 に基づく JFS 炉定数を使用してサンプル計算を実施した。入力データの例を 付録 G に、結果を表 9.3.1 及び 9.3.2 に示す。

Core I	Core II
2.460	1 960
-2.400	- 1.000
-2.66	-2.03
-2.61 ± 0.21	$-2.03 \pm 0.16$
1.02	1.00
	Core I -2.460 -2.66 -2.61 ± 0.21 1.02

表 9.3.1. サンプル計算結果(JENDL-3.2)

(a)  $\beta_{eff}=0.00328$  (Core I), 0.00330 (Core II)

Source	Core I	Core II
Base calculation <sup>(a)</sup> (\$)	0.514	1.001
(Homo cell,RZ diffusion)	-2.314	- 1.901
Corrected calculation \$)	-2.72	-2.07
Benchmark data (\$)	-2.61 ± 0.21	-2.03 ± 0.16
C/E	1.04	1.02

表 9.3.2. サンプル計算結果(JENDL-3.3)

(a)  $\beta_{eff}$ =0.00328 (Core I), 0.00330 (Core II)

#### 9.4 既存ベンチマークデータとの比較

作成したベンチマークデータを既存ベンチマークデータ[11]と比較検討した。

#### 9.4.1 ドップラー定数の比較

表 9.4.1 には *α*<sub>Bench</sub> を既存のベンチマークデータと比較する。今回の評価結果は GE や HEDL の 結果と 4%程度の差異がある。既存ベンチマークデータでは HEDL の結果を GE の結果より信頼で きるとしている。

Core type	GE <sup>(a)</sup>	HEDL <sup>(b)</sup>	Present	Present/GE	Present/HEDL
Core I	2.55	2.74	2.61	1.03	0.953
Core II	1.94	1.95	2.03	1.05	1.04

表 9.4.1. 既存ベンチマークデータとのドップラー定数の比較

(a)  $\alpha_{D,iso}$  (dk/k) =0.0079 and 0.0060, for Core I and II, respectively, and =0.0031. (b) Transient test results GE との差異は熱伝導度評価式によるものと考えられる。すなわち、表 8.1.1 や 8.1.2 で 20MW で の値を熱伝導度評価式間(GE で使用した Baily & Schmidt の評価式と今回使用した井上の評価 式)で比較すると、Baily & Schmidt の評価式を用いた場合の C/E 値が約 4%大きく(つまり E/C バイ アス値は 4%小さく)、差異が説明できる。その他の要因としては評価手法やギャップコンダクタンスの 差異があるが、8.3 節や図 8.1.3 で確認したようにそれらの影響は無視できる、

次に、結果の妥当性を検討するため、HEDL の値と C/E 値を比較した。計算値には JENDL-3.2 の結 果を使用した。結果を表 9.4.2 に示す。

HEDL の値を使用した場合は炉心間の C/E 値に 7%の差異が生じている。炉心部の中性子スペクトルの差により Core II のドップラー定数は、Core I より約 20%小さいが、図 7.4.1 と 7.4.2 で見たように反応度をエネルギー毎で分布を見ても全体的に反応度が低下しているだけであり、解析精度に差異を生じるとは考えにくい。実験誤差は 8%であるが、炉心間の誤差の相関 0.8 を考慮すると 4%以上の差異は有意であり、今回の評価の方が信頼できると考えられる。

Benchmark data	Core I	Core II
HEDL evaluation	0.97	1.04
Present evaluation	1.02	1.00

表 9.4.2. HEDL のドップラー定数を使用した場合との C/E 値の比較

9.4.2 補正係数の比較

表 9.4.3 には最確計算値算出用の補正係数を比較した。補正係数はともに拡散計算値に対して与えられている。

既存ベンチマークデータでは、補正係数はドップラー定数(反応度単位)に対する絶対値として炉心 共通値で与えられているため、基準計算値を用いて補正係数(比の形)に換算している。補正係数の合 計はほぼ一致しており、最確値評価結果に影響するものではないと分かる。もっとも Core II の場合は、 補正係数合計で 1.103 となり、今回算出したものに対して 1%程度大きくなる。

Source	Present evaluation	Reference[11]
Transport and mesh	0.9915	1.005
Cell heterogeneity	1.078	1.062
Core heterogeneity	1.000	1.017
Ultra Fine group	1.013	1.011
Core expansion <sup>(b)</sup>	0.992	0.985
Total	1.083	1.080

表 9.4.3. 既存ベンチマークデータとの補正係数の比較<sup>(a)</sup> (例:Core I)

(a)補正値の分類は両者で異なるため、項目毎の比較は目安程度である。

(b)本評価では解析モデルに考慮されているため、Total には含めていない。

#### 9.4.3 解析モデルの比較

表 9.4.4 は解析モデルおよび補正係数に既存ベンチマークデータを使用した場合との比較である。 新旧ベンチマークデータ間で Core I では 1%以内で一致しているが、Core II では 4%の差異がある。 炉心部について原子個数密度を比較したところ、U-238 の密度が Core I では 0.1%以内で一致していた が、Core II では既存ベンチマークの方が 1.1%大きいことが分かった。ドップラー反応度は U-238 で決定 されるため、この点と補正係数の差が Core II における差異の主な原因と推定できる。

U-238 密度の差は評価対象の炉心構成に起因すると考えられるため、本評価での対象炉心を Core II-C ではなく Core II-F に変更して比較したが、差異が 0.8%に縮小しただけであった。既存ベンチマー クでの密度算出経緯は確認できないため、これ以上の検討は行わない。

補正係数を含め、データの根拠が明確な今回の評価の方が信頼できると考えられる。

表 9.4.4. 既存ベンチマークデータを用いた場合との C/E 値の比較(a)

Benchmark model	Core I	Core II
Reference[11]	1.03	1.04
Present evaluation	1.02	1.00

(a) 実験値には今回の評価を使用

## 10. 結言

ドップラー反応度に関する核設計基本データベースの整備として、高速実験炉 SEFOR(Southwest Experimental Fast Oxide Reactor)の Core II の等温温度係数、Core I 及び Core II の出力係数につい て実験データを整理し、解析評価した。

データの整理ではオリジナルのレポートに立ち戻りノミナル値及び誤差を整備した。特に、出力係数については燃料温度測定データから整理し、最新の熱伝導度評価式を採用して燃料温度評価の見直しを図った。その結果、実験誤差を既報告の11%から8%に低減することができた。

JENDL-3.2を使用した解析により以下の結果が得られた。

等温温度係数の解析では、解析値は実験値を 9%過大評価する結果となった。実験誤差(3%)や解析 誤差暫定値(4%)を超えるものである。Core Iの場合とほぼ同じ結果であり、GE による実験値や連続エネ ルギーモンテカルロ計算値との比較でも差異を説明することはできなかった。核データに JENDL-3.3 を 使用しても改善の見込みは得られなかった。今後、JUPITER 実験等他の実験解析データとの整合性を 評価し、データの信頼性を検討する必要がある。

出力係数の解析では、20MW 時でのデータでは炉心によらず、解析値は実験値と 1%以内で一致した。 低出力では差異が大きくなるが、実験誤差の範囲で一致している。

整備した出力係数の実験データに基づき、ドップラー定数のベンチマーク実験データを整備した。整備したドップラー定数は既存のベンチマーク実験値と約4%異なる結果となった。差異は熱伝導度評価式の更新によるものである。炉心間のC/E値は、既存データの7%から2%に低減しており、炉心間の差異を考慮すると妥当なものと思われる。

# 謝辞

本研究を遂行するに当たり、日立製作所の三田敏男氏及び花木洋氏には SEFOR 解析の経験者とし て貴重な情報、助言を頂きました。 炉心燃料設計 Gr の永沼正行氏には膨張率データについて情報を 頂きました。 核燃料工学 Gr の井上賢紀氏には本報で鍵となる熱伝導度評価式の情報を教えていただき ました。 この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 石川眞、佐藤若英、杉野和輝、他: 核設計基本データベースの整備() JUPITER 実験解析結 果の集大成、PNC TN9410 97-099 (1997 年 11 月).
- [2] 横山賢治,石川眞、大井川宏之、他: 核設計基本データベースの整備() FCA XVII-1 実験解 析 - (平成9年度共同研究報告書)、JNC TY9400 98-001 (1998 年 10 月).
- [3] L.D.Noble, et al. :"Result of SEFOR Zero Power Experimetnts", GEAP-13588, General Electric Co. (March 1970).
- [4] L.D.Noble, et al. :"SEFOR Core I Test Results to 20MW", GEAP-13702, General Electric Co. (March 1971).
- [5] D.D.Freeman, et al. :"SEFOR Experimental Results and Applications to LMFBR s", GEAP-13929, General Electric Co. (January 1973).
- [6] R.A.Meyer, et al. :"Design and Analysis of SEFOR Core I", GEAP-13598, General Electric Co. (June 1970).
- [7] H.G.Bogensberger, et al. :"Analysis SEFOR Experiments", KFK 2095, Kernforschungszentrum Karlsruhe (May 1973).
- [8] L. D. Noble, et al. : "Experimental program results in SEFOR Core II", GEAP-13838 (1972).
- [9] E. R. Craig : "SEFOR instrumented fuel assembly design and development", GEAP-5615 (1968).
- [10] R.A.Harris :"Analysis of the Doppler Constants of Cores I and II of SEFOR", HEDL-TME 73-42, Hanford Engineering Development Laboratory (May 1973).
- [11] A.T.D. Butland : "Analysis of the SEFOR I and II Doppler experiments and their use in assessing the accuracy of calculated fast reactor Doppler effects", AEEW-R986 (1975).
- [12] G.R.Pflasterer, et al. :"Southwest Experimental Fast Oxide Reactor Development Program twenty-fifth quarterly report -", GEAP-10010-25, General Electric Co. (May-July 1970).
- [13] L. D. Noble, et al. : "SEFOR Core I Transients", GEAP-13837 (1972).
- [14] A. T. D. Butland : "A note on crystalline binding in uranium dioxide and its effect on the Doppler broadning of uranium resonances", *Ann. Nucl. Energy*, 1,575 (1974).
- [15] R. F. Hilbert, et al. :"Evaluation of material property correlations used in LIFE-II", GEAP-13967 (1973).
- [16] M.Haneda, et al.: "Analysis of Doppler Experiments (2) (SEFOR)", PNC TJ201 73-03T (1973).
- [17] 花木洋,三田敏夫:実証炉設計用統合炉定数の整備(その1) <ZPPR-2,3、SEFOR 実験解析及 び炉定数調整>, JNC TJ9124 97-002 (1997 年 3 月).
- [18] 羽様平、沼田一幸: SEFOR 実験解析 等温温度係数 、 JNC TN9400 2003-023
- [19] 千葉豪、羽様平、石川眞: "高速炉用炉定数セット JFS-3-J3.2 の改訂",日本原子力学会誌, 1[4], 335(2002).
- [20] 石川眞、斉藤正幸、佐藤若英、他:核設計基本データベースの整備() 核特性解析コードシス テムの整備 - 、PNC TN9440 94-004(1994 年 3 月).
- [21] P.Benoist : "Streaming Effects and Collision Probabilities in Lattices", *Nucl. Sci. and Eng.* 34, P.285 (1968).
- [22] 羽様平、千葉豪、佐藤若英、他: SLAROM-UF:高速炉用超微細群格子計算コード、 JNC TN9520 2004-001 (2004 年 3 月).
- [23] 羽様平、千葉豪、沼田一幸、他: 高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成、 JNC TN9400 2002-064 (2002 年 11 月).

- [24] 森貴正、中川正幸: MVP/GMVP 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送 計算モンテカルロコード, JAERI-Data/Code 94-007 (1994 年 8 月).
- [25] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton 著、成田正邦、藤田文行訳「原子炉の理論と解析(下)」、現代 工学社(1981).
- [26] Mechanical and Physical Properties of the Austenites Chronium-Nickel Stainless Steels at Elevated Temperature, International Nickel Company (1963).
- [27]「高速増殖炉もんじゅ発電所 原子炉設置許可申請書」、動力炉・核燃料開発事業団 (1980).
- [28] M. Inoue : "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuel for Fast Reactors", *J. Nucl. Mater.* **282**, 186 (2000).
- [29] T. Hazama and J.Tommasi :"Re-Evaluation of SEFOR Doppler Experiments and Analyses with JNC and ERANOS systems", ID 95348, PHYSOR2004 proceeding on CD-ROM, American Nuclear Society (2004).
- [30] B.A.Hutchins, et al. :"SEFOR Doppler Benchmark, Core I", Fast Reactor Benchmark No.14, ENDF-202 (BNL 19302) (1974).
- [31] K. Shibata, et al. : "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3:JENDL-3.3", *J. Nucl. Sci. Technol.*, 39, No.11, 1125 (2002).

# 付録 A 解析モデル作成に使用した文献値

SEFOR 実験の解析に必要な物質組成や密度の情報をまとめた。

各図表は互いに関連しており、組み合わせて使用することによって RZ 体系モデルの各領域に対する温度 350 での均質原子個数密度が得られるようになっている。

主に GEAP-13588 からの抜粋であるが、GEAP-13588 に記載されていない一部の情報は他の報告書から引用して補っている。

図 A.1 RZ 体系解析モデル

- 表 A.1 RZ モデル各領域中の構成要素の体積比
- 表 A.2 構成要素中の物質の体積比
- 表 A.3 燃料集合体中の構成要素の体積比
- 表 A.4 RZ モデルに対する物質の密度
- 表 A.5 その他文献からの情報



図 A.1 RZ 体系解析モデル

#### 表 A.1 RZ モデル各領域中の構成要素の体積比

#### Volume Fraction by Region

Composition	1	2	3	4	5	6	7	8
Fuel	0.4316	0.4316	-	-	-	-	-	-
U0 <sub>2</sub>	-	-	0.1619	-	0.0373	-	-	0.0373
SS-316	0.0953	0.1056	0.0953	-	0.0962	-	-	0.0944
SS-304	0.1311	0.1311	0.1962	0.3056	0.1215	0.1177	0.1812	0.1383
Inconel	-	-	0.0133	-	-	-	-	-
Be0	0.0574	0.0408	0.0574	_	0.0035	_	_	0.0049
Sodium	0.2846	0.2846	0.2846	0.6944	0.2908	0.6944	0.6944	0.2871
Ni(Fuel Rod)	-	-	-	-	0.3943	-	_	0.3943
Ni(Tightener Rod)	-	-	-	-	0.0330	-	-	0.0294
Void	-	0.0063	0.1913	-	0.0236	0.1879	0.1244	0.0145

#### Volume Fraction by Region

9	10	11	12	13	14	15
-	-	-	-	-	-	-
0.2855	0.1563	0.0338	0.12	0.244	0.150	0.325
0.0202	-	-	-	-	-	-
0.6203	-	-	-	0.706	-	0.565
-	-	0.8078	-	-	-	-
0.0740	0.6461	0.1227	0.36	-	0.850	0.110
-	0.1976	0.0357	0.13	-	-	~
-	-	-	0.39	0.050	-	-
	9 	9 10  0.2855 0.1563 0.6202 - 0.6203 -  0.0740 0.6461 - 0.1976 	9         10         11           -         -         -           0.2855         0.1563         0.0338           0.6202         -         -           0.6203         -         -           -         -         0.8078           0.0740         0.6461         0.1227           -         0.1976         0.0357	9         10         11         12           -         -         -         -         -           0.2855         0.1563         0.0338         0.12           0.6202         -         -         -           0.6203         -         -         -           -         -         0.8078         -           0.0740         0.6461         0.1227         0.36           -         0.1976         0.0357         0.13           -         -         -         0.39	$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	9         10         11         12         13         14           -

## Reprinted from GEAP-13588

#### 表 A.2 構成要素中の物質の体積比

Material	Material Volume Fractions in the Core Region of the Reactor						
	Fuel <sup>(1)</sup> and Guines Pig <sup>(1)</sup> Rod	Tightene Upper Portion of Core	r Rods <sup>(4)</sup> Lower Porti of Core	Core Poison on <u>Rod</u>	Stainless Steel_Rod	U02 <sup>Rod</sup>	
Fuel <sup>(1)</sup>	0.8384 <sup>(2)</sup>	-	-	-	-	-	
υο,	-	-	-	-	-	0.8384	
Cladding (SS-316)	0.1616	0.1745	0.3229 <sup>(3)</sup>	0.1616	0.1616	0.1616	
Be0	-	0.8255	0.5868	-	-	-	
SS-304(in Steel Rod)	-	-	-	0.4982	0.8103	-	
Void	-	-	0.0903	-	0,0281	-	
Central Shaft(SS-304) inside Poison Rod	-	-	-	0.3402	1	B₄C の割î	合

(1) (Pu-239 + Pu-241)/(U + Pu) = 0.187 for standard fuel rods, Pu-240/Pu = 0.0824(0.250 for guinea pig rods)

(2) Exclusive of gap regions where the fuel is replaced by a smeared composition of 37.5% UO<sub>2</sub>, 3.1% incomel, 15.1% SS-304, and 44.3% void.

(3) Includes additional SS-316 inside the cladding. /// •. .. . . . . . . . ..

Material	Material	Volume Fr	actions in	the Axial	Reflector Re	gions of the	Reactor
	Fuel <sup>(1)</sup> and Guinea <u>Pig</u> (1) Rods	<u>Tightene</u> Upper <u>Reflector</u>	<u>r Rod</u> Lower <u>Reflector</u>	<u>Core Poi</u> Upper Reflector	son Rod Lower Reflector	Stainless Steel Rod	UO <sub>2</sub> Rod
U0 <sub>2</sub>	0.0725	-	-	-	-		0.0725
Ni	0.7659	0.4223	0.4730	0.8128	0.7897	~	0.7659
SS-316	0.1616	0.1609	0.1873	0.1616	0.1616	0,1616	0.1616
Beû	-	0.0710	0.0507	-	-	-	-
Void	-	0.3458	0.2890	-	0.0487	0.0281	-
Central Shaft(SS-304) inside Poison Rod	-	-	-	0.0256	-	~	-
SS-304 (in Steel Rod)	-	-	-	-	-	0.8103	-

(1)  $(Pu-239 + Fu-241)/(U + Fu) = \begin{cases} 0.187 \text{ for standard fuel rods} \\ 0.250 \text{ for guinea pig rods} \end{cases}$ , Pu-240/Pu = 0.0824

Reprinted from GEAP-13588

Uer	1 Volume Fraction	
Standard Core	Unit Cell	Gap Region
Unit Cell	in lower	in Core
	portion of Core	
0.4316	0.4316	0.1619
0.0574	0.0408	0.0574
0.0832	0.0832	0.0832
0.0121	0.0224*	0.0121
0.0178	0.0178	0.0178
0.1133	0.1133	0.1784**
0.2846	0.2846	0.2846
-	-	0.0133
_	0.0063	0.1913
	Standard Core Unit Cell 0.4316 0.0574 0.0832 0.0121 0.0178 0.1133 0.2846 -	Standard Core         Unit Cell           Unit Cell         in lower           portion of Core           0.4316         0.4316           0.0574         0.0408           0.0832         0.0832           0.0121         0.0224*           0.1133         0.1133           0.2846         0.2846

#### 表 A.3 燃料集合体中の構成要素の体積比

\* Includes extra cladding around BeO

\*\* Includes extra SS-304 in the gap portion of six fuel rods.

Material	Density* (g/cc)
<pre>Fuel - Pu - U Oxide Oxygen/metal = 1.99 (Pu-239 + Pu-241)/(Pu+U) = 0.1870 Pu-240/Pu = 0.0824 U-235/U = 0.0022</pre>	9.587
Uranium in insulator pellets and special UC, rod (Oxygen/metal = 2.01)	9.786
Stainless Steel 316 and 304	7.961
Inconel	8.288
BeO	2.731
Na	0.9131
B <sub>4</sub> C in special poison core rod B-10/B = 0.199	1.415
B <sub>4</sub> C in radial shield	1.600
Ni in radial reflector	8.833
Ni in axial reflector	8.433
Al-Mg (96% Al, 4% Mg)	2,669

\*Some of these densities are "smeared" to include void regions and should be used only with the volume fractions indicated in Tables I-1 through I-3.

Reprinted from GEAP-13588

表 A.5 その他文献からの情報

1. Pu fissile の内訳 Pu-239/Pu = 0.9107 (HEDL TME 72-78 TABLE I より算出)
2. 高富化度燃料棒 (GUINEA PIG ROD) のウラン濃縮度 U-235/U = 0.0289 (東芝レポート J201 73-03 TABLE 2.3.1 より算出)
3. INCONEL の組成 (HEDL TME 72-78 TABLE I より算出) CR:Fe:Ni:Mo = 0.158:0.072:0.766:0.003 (重量比)
4. SUS-304の組成 (ステンレス鋼便覧第3版より) CR:Fe:Ni = 0.18:0.74:0.08 (重量比)
5. SUS-316 の組成 (ステンレス鋼便覧第3版より。 端数は Fe に含める。) CR:Fe:Ni = 0.180:0.675:0.120:0.025 (重量比)

# 付録 B 評価温度点での原子個数密度

例として以下の均質原子個数密度を示す。他の温度点での原子個数密度は、表 3.2.1 の燃料、 SUSの線膨張率、Na密度の(3.2.6)式から算出できる。

均質格子計算用原子個数密度

- 表 B.1 Core I-I、760 (出力係数評価用)
- 表 B.2 Core II-C、350 (等温温度係数評価用)
- 表 B.3 Core II-C、760 (等温温度係数、出力係数評価用)

非均質格子計算用原子個数密度

表 B.4 Core 共通、350 非均質セル計算用原子個数密度

# 表 B.1 760 での均質原子個数密度(Core I-I) (単位:atom/barn-cm)

拉插		領域番号									
们以作里	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
U-235	1.57277E-05	1.57277E-05									
U-238	7.11079E-03	7.11079E-03									
Pu-239	1.66895E-03	1.66895E-03									
Pu-240	1.51003E-04	1.51003E-04									
Pu-241	1.26110E-05	1.26110E-05									
0	2.15640E-02	2.04837E-02	3.73538E-03								
Be9	3.73538E-03	2.65511E-03	3.73538E-03								
Na	6.40337E-03	6.40337E-03	6.40337E-03	1.56237E-02	6.55606E-03	1.56237E-02	1.56237E-02	6.46494E-03	1.39565E-02		
Cr	3.75447E-03	3.92325E-03	5.73577E-03	5.00773E-03	3.53790E-03	1.92870E-03	2.96924E-03	3.82292E-03	5.12554E-03		
Fe	1.38462E-02	1.44355E-02	2.03454E-02	1.91684E-02	1.30171E-02	7.38261E-03	1.13656E-02	1.41136E-02	1.85600E-02		
Ni	1.78568E-03	1.88536E-03	3.80915E-03	1.97170E-03	4.16858E-02	7.59387E-04	1.16908E-03	4.14579E-02	3.23241E-03		
Мо	1.17549E-04	1.30254E-04	1.20829E-04		1.17562E-04			1.16334E-04	3.20315E-06		
Mg											
AI											
B-10	4.83677E-05	4.83677E-05									
B-11	1.94686E-04	1.94686E-04									
С	6.07634E-05	6.07634E-05									

拉钰		領域番号										
们又们里	10	11	12	13	14	15	16	17				
U-235							2.04927E-05	2.04927E-05				
U-238							9.29435E-03	9.29435E-03				
Pu-239												
Pu-240												
Pu-241												
0							2.24582E-02	2.13780E-02				
Be9							3.73538E-03	2.65511E-03				
Na				1.58847E-02		1.27122E-02	6.40337E-03	6.40337E-03				
Cr	2.58777E-03	5.58996E-04	1.98677E-03	4.01533E-03	2.48950E-03	5.34829E-03	3.70992E-03	3.87870E-03				
Fe	9.90537E-03	2.13971E-03	7.60489E-03	1.53698E-02	9.52922E-03	2.04720E-02	1.36756E-02	1.42649E-02				
Ni	1.01888E-03	7.31735E-02	7.82251E-04	1.58096E-03	9.80191E-04	2.10579E-03	1.76814E-03	1.86782E-03				
Мо							1.17549E-04	1.30254E-04				
Mg	5.21431E-04	9.41031E-05	3.43046E-04									
AI	1.12729E-02	2.03444E-03	7.41640E-03									
B-10			5.40038E-03	6.88169E-04								
B-11			2.17372E-02	2.76997E-03								
С			6.78439E-03	8.64535E-04								

表 B.2	350	での均質原子個数密度(Core II-C)	(単位∶atom/barn-cm)
		領域番号	

拉番	領域番号									
们又们里	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
U-235	1.59404E-05	1.59404E-05								
U-238	7.21027E-03	7.21027E-03								
Pu-239	1.69115E-03	1.69115E-03								
Pu-240	1.53012E-04	1.53012E-04								
Pu-241	1.27788E-05	1.27788E-05								
0	1.82852E-02	1.82245E-02	2.09724E-04							
Be9	2.09724E-04	1.49072E-04	2.09724E-04							
Na	6.80722E-03	6.80722E-03	6.80722E-03	1.66090E-02	6.96954E-03	1.66090E-02	1.66090E-02	6.87267E-03	1.48367E-02	
Cr	4.67158E-03	4.59105E-03	6.73003E-03	5.07194E-03	3.58326E-03	1.95343E-03	3.00731E-03	3.87193E-03	5.04471E-03	
Fe	1.73499E-02	1.69842E-02	2.41306E-02	1.94142E-02	1.31840E-02	7.47726E-03	1.15113E-02	1.42946E-02	1.82673E-02	
Ni	2.15072E-03	2.15266E-03	4.22051E-03	1.99698E-03	4.21921E-02	7.69123E-04	1.18407E-03	4.19615E-02	3.18143E-03	
Mo	1.19056E-04	1.31924E-04	1.22378E-04		1.19070E-04			1.17825E-04	3.15263E-06	
Mg										
AI										
B-10	3.66609E-05	3.66609E-05								
B-11	1.47565E-04	1.47565E-04								
С	4.60564E-05	4.60564E-05								

拉钰	領域番号									
权性	10	11	12	13	14	15	16	17		
U-235							2.07102E-05	2.07102E-05		
U-238							9.39303E-03	9.39303E-03		
Pu-239										
Pu-240										
Pu-241										
0							1.91313E-02	1.90707E-02		
Be9							2.09724E-04	1.49072E-04		
Na				1.68865E-02		1.35140E-02	6.80722E-03	6.80722E-03		
Cr	2.59406E-03	5.60967E-04	1.99160E-03	4.04958E-03	2.48950E-03	5.39391E-03	4.67820E-03	4.84914E-03		
Fe	9.92945E-03	2.14725E-03	7.62338E-03	1.55009E-02	9.52922E-03	2.06466E-02	1.73753E-02	1.79721E-02		
Ni	1.02136E-03	7.34314E-02	7.84153E-04	1.59444E-03	9.80191E-04	2.12375E-03	2.15332E-03	2.25428E-03		
Mo							1.19056E-04	1.31924E-04		
Mg	5.22698E-04	9.44348E-05	3.43880E-04							
AI	1.13003E-02	2.04161E-03	7.43443E-03							
B-10			5.41350E-03	6.94039E-04						
B-11			2.17900E-02	2.79359E-03						
С			6.80089E-03	8.71908E-04						

表 B.3	760	での均質原子個数密度(Core II-C)	(単位∶atom/barn-cm)

抜話	領域									
1久1里	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
U-235	1.57721E-05	1.57721E-05								
U-238	7.13415E-03	7.13415E-03								
Pu-239	1.67330E-03	1.67330E-03								
Pu-240	1.51397E-04	1.51397E-04								
Pu-241	1.26438E-05	1.26438E-05								
0	1.80922E-02	1.80321E-02	2.07521E-04							
Be9	2.07521E-04	1.47506E-04	2.07521E-04							
Na	6.40337E-03	6.40337E-03	6.40337E-03	1.56237E-02	6.55606E-03	1.56237E-02	1.56237E-02	6.46494E-03	1.39565E-02	
Cr	4.61244E-03	4.53293E-03	6.64484E-03	5.00773E-03	3.53790E-03	1.92870E-03	2.96924E-03	3.82292E-03	5.12554E-03	
Fe	1.71303E-02	1.67692E-02	2.38251E-02	1.91684E-02	1.30171E-02	7.38261E-03	1.13656E-02	1.41136E-02	1.85600E-02	
Ni	2.12349E-03	2.12541E-03	4.16708E-03	1.97170E-03	4.16858E-02	7.59387E-04	1.16908E-03	4.14579E-02	3.23241E-03	
Mo	1.17549E-04	1.30254E-04	1.20829E-04		1.17562E-04			1.16334E-04	3.20315E-06	
Mg										
AI										
B-10	3.62758E-05	3.62758E-05								
B-11	1.46015E-04	1.46015E-04								
С	4.55726E-05	4.55726E-05								

++ 17	領域番号										
核裡	10	11	12	13	14	15	16	17			
U-235							2.04927E-05	2.04927E-05			
U-238							9.29435E-03	9.29435E-03			
Pu-239											
Pu-240											
Pu-241											
0							1.89304E-02	1.88703E-02			
Be9							2.07521E-04	1.47506E-04			
Na				1.58847E-02		1.27122E-02	6.40337E-03	6.40337E-03			
Cr	2.58777E-03	5.58996E-04	1.98677E-03	4.01533E-03	2.48950E-03	5.34829E-03	4.61898E-03	4.78776E-03			
Fe	9.90537E-03	2.13971E-03	7.60489E-03	1.53698E-02	9.52922E-03	2.04720E-02	1.71553E-02	1.77446E-02			
Ni	1.01888E-03	7.31735E-02	7.82251E-04	1.58096E-03	9.80191E-04	2.10579E-03	2.12606E-03	2.22575E-03			
Mo							1.17549E-04	1.30254E-04			
Mg	5.21431E-04	9.41031E-05	3.43046E-04								
AI	1.12729E-02	2.03444E-03	7.41640E-03								
B-10			5.40038E-03	6.88169E-04							
B-11			2.17372E-02	2.76997E-03							
С			6.78439E-03	8.64535E-04							

\*領域 1, 2, 3, 16, 17 以外は Core –I と共通である。

表 B.4	350	での非均質原子個数密度	(単位:atom/barn-cm)
-------	-----	-------------	-------------------

	Material									
Nuclide	Central rod (SUS-304)	BeO rod	Other SUS-304	Cladding (SUS-316)	Inconel					
0		6.57672E-02								
Be9		6.57672E-02								
Na										
Cr	1.60404E-02		1.65966E-02	1.65966E-02	1.51666E-02					
Fe	6.13989E-02		6.35281E-02	5.79480E-02	6.43501E-03					
Ni	6.31559E-03		6.53460E-03	9.80191E-03	6.51389E-02					
Мо				1.24928E-03	1.56071E-04					

	Material									
Nuclide	Al-Mg	B4C	B4C	Ne	Ni	Ni				
		(shield)	(rod)	Ina	(in assembly)	(radial ref.)				
Na				2.39185E-02						
Mg	2.64523E-03									
Al	5.71879E-02									
Ni					8.65254E-02	9.06296E-02				
B-10		1.38808E-02	1.22758E-02							
B-11		5.58719E-02	4.94117E-02							
С		1.74382E-02	1.54219E-02							

	Material						
Nuclide	Fuel	Fuel	Inculator				
	(standard)	(Guinea pig)	Insulator				
U-235	3.74420E-05	4.49015E-05	4.79848E-05				
U-238	1.69817E-02	1.55024E-02	2.17633E-02				
Pu-239	3.96719E-03	5.30227E-03					
Pu-240	3.58943E-04	4.79739E-04					
Pu-241	2.99771E-05	4.00653E-05					
0-16	4.25367E-02	4.25250E-02	4.38406E-02				

## 付録 C 等温温度係数解析値の詳細<sup>1</sup>

#### C.1 膨張反応度

表 C.1.1. 膨張反応度の解析結果(基準計算値)

温度( )	Keff	温度変化	反応度変化(dk/kk')	反応度変化(¢)				
350	1.00157	-	-	-				
450	1.00033	350 ->450	-0.00124	-37.8				
550	0.99904	450 ->550	-0.00129	-39.0				
650	0.99772	550 ->650	-0.00133	-40.2				
760	0.99623	650 ->760	-0.00149	-45.3				
-	-	350 ->760	-0.00535	-162.4				

表 C.1.2. 膨張反応度の解析結果(輸送メッシュ効果、均質セル計算)

泪 庄 ( )	Keff		泪 亩 赤 化	反応度変化(¢)		輸送メッシュ
<b>温</b> 浸( )	拡散計算 <sup>*1</sup>	輸送計算	温度发化	拡散計算 <sup>*1</sup>	輸送計算	効果
350	1.00160	1.01397	-	-	-	-
450	1.00037	1.01282	350 ->450	-37.2	-33.9	0.910
550	0.99910	1.01163	450 ->550	-38.4	-35.2	0.916
650	0.99780	1.01042	550 ->650	-39.5	-35.9	0.910
760	0.99634	1.00905	650 ->760	-44.6	-40.9	0.918
-	-	-	350 ->760	-159.7	-145.9	0.914

\*1: 拡散係数を trから評価するため丸め誤差により基準計算値と異なる。

表 C.1.3.	膨張反応	をの解析結果	:(輸送メッシ	∕ュ効果、	非均質セル	∕計算)	(参考)
----------	------	--------	---------	-------	-------	------	------

□ 一 一 一 ( )	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		輸送メッシュ
<u> 温皮()</u>	拡散計算	輸送計算	温皮交化	拡散計算	輸送計算	効果
350	1.01226	1.02477	-	-	-	-
450	1.01097	1.02356	350 ->450	-38.4	-35.0	0.912
550	1.00964	1.02233	450 ->550	-39.4	-35.9	0.910
650	1.00827	1.02105	550 ->650	-40.8	-37.1	0.911
760	1.00674	1.01961	650 ->760	-45.7	-41.9	0.916
-	-	-	350 ->760	-164.3	-149.9	0.912

□ 一 日 由 ( )	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		集合体非均質
温度()	セル均質	セル非均質	温皮交化	セル均質	セル非均質	効果
350	1.00157	1.00891	-	-	-	-
450	1.00033	1.00759	350 ->450	-37.8	-39.6	1.047
550	0.99904	1.00623	450 ->550	-39.0	-40.6	1.041
650	0.99772	1.00483	550 ->650	-40.2	-42.1	1.046
760	0.99623	1.00326	650 ->760	-45.3	-47.2	1.041
-	-	-	350 ->760	-162.4	-169.5	1.044

表 C.1.3. 膨張反応度の解析結果(集合体非均質効果、RZ計算)

表 C.1.4. 膨張反応度の解析結果(集合体非均質効果、TriZ 計算)(参考)

□ <b>府()</b>	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		集合体非均質
温度()	セル均質	セル非均質	加皮女化	セル均質	セル非均質	効果
350	0.99567	1.00369	-	-	-	-
450	0.99445	1.00238	350 ->450	-37.5	-39.4	1.050
550	0.99318	1.00104	450 ->550	-38.8	-40.5	1.044
650	0.99189	0.99966	550 ->650	-39.8	-41.8	1.050
760	0.99043	0.99812	650 ->760	-45.1	-47.0	1.043
-	-	-	350 ->760	-161.2	-168.7	1.047

<sup>1</sup>基準計算値と集合体非均質効果以外は Gap 領域、Insulator 領域を Core I-I と同じデータを使用。

□ <b>府()</b>	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		炉心非均質
温度()	炉心均質	炉心非均質	温皮支化	炉心均質	炉心非均質	効果
350	1.00369	1.00552	-	-	-	-
450	1.00238	1.00421	350 ->450	-39.4	-39.5	1.003
550	1.00104	1.00286	450 ->550	-40.5	-40.6	1.002
650	0.99966	1.00147	550 ->650	-41.8	-41.9	1.003
760	0.99812	0.99991	650 ->760	-47.0	-47.2	1.003
_	-	-	350 ->760	-168.7	-169.2	1.003

表 C.1.5. 膨張反応度の評価結果(炉心非均質効果)

11日 ()	k	Keff		反応度		
<u> 温反</u> ()	70g	175g+超微細群	<b>冲反交</b> 化	70g	175g+超微細群	
350	1.01251	1.01379	-	-	-	-
450	1.01122	1.01249	350 ->450	-38.4	-38.4	1.000
550	1.00989	1.01116	450 ->550	-39.4	-39.5	1.004
650	1.00853	1.00979	550 ->650	-40.7	-40.8	1.002
760	1.00700	1.00825	650 ->760	-45.7	-45.9	1.004
-	-	-	350 ->760	-164.2	-164.6	1.003

## 表 C.1.6. 膨張反応度の評価結果(UF 効果)

# C.2 ドップラー反応度

	12 0.2.	<u>   トップノー</u>	区心反の計画	山和木(至午日	1 异但)	
□ 庄 ( )	Koff	泪 亩 赤 化	反応度変化	七(dk/kk')	反応度変化(¢)	
温皮()	NG11	温皮女心	直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動
350	1.00157	-	-	-	-	-
450	1.00067	350 ->450	-0.00090	-0.00090	-27.2	-27.2
550	0.99987	450 ->550	-0.00080	-0.00080	-24.4	-24.4
650	0.99914	550 ->650	-0.00073	-0.00073	-22.1	-22.1
760	0.99841	650 ->760	-0.00073	-0.00073	-22.2	-22.2
-	-	350 ->760	-0.00316	-0.00316	-95.9	-95.9

表 C.2.1. ドップラー反応度の評価結果(基準計算値)

表 C.2.2. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果、直接計算)(参考)

□ 庄 ( )	Keff		泪由赤ル	反応度変化(¢)		輸送メッシュ
<u> 温反</u> ( )	拡散計算	輸送計算	<b></b>	拡散計算	輸送計算	効果
350	1.00160	1.01395	-	-	-	-
450	1.00067	1.01300	350 ->450	-27.9	-28.0	1.002
550	0.99984	1.01216	450 ->550	-25.1	-25.0	0.993
650	0.99910	1.01140	550 ->650	-22.7	-22.6	0.992
760	0.99835	1.01062	650 ->760	-22.8	-23.0	1.011
-	-	-	350 ->760	-98.6	-98.5	0.999

表 C.2.3. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果、摂動計算)

温度変化反応度変化(dk/kk')反応度変化(e)輸送メッシュ350 ->450-0.00092-0.00092-27.9輸送計算効果350 ->550-0.00083-0.00083-25.1-25.11.000550 ->650-0.00075-0.00075-22.7-22.70.999650 ->760-0.00075-0.00075-22.8-22.80.999350 ->760-0.00325-0.00325-98.5-98.51.000	P									
加皮女化拡散計算輸送計算拡散計算輸送計算効果350 ->450-0.00092-0.00092-27.9-27.91.000450 ->550-0.00083-0.00083-25.1-25.11.000550 ->650-0.00075-0.00075-22.7-22.70.999650 ->760-0.00075-0.00075-22.8-22.80.999350 ->760-0.00325-0.00325-98.5-98.51.000	泪度亦化	反応度変化	匕(dk/kk')	反応度	反応度変化(¢)					
350 ->450         -0.00092         -0.00092         -27.9         -27.9         1.000           450 ->550         -0.00083         -0.00083         -25.1         -25.1         1.000           550 ->650         -0.00075         -0.00075         -22.7         -22.7         0.999           650 ->760         -0.00075         -0.00075         -22.8         -22.8         0.999           350 ->760         -0.00325         -0.00325         -98.5         -98.5         1.000	温反交化	拡散計算	輸送計算	拡散計算	輸送計算	効果				
450 ->550         -0.00083         -0.00083         -25.1         -25.1         1.000           550 ->650         -0.00075         -0.00075         -22.7         -22.7         0.999           650 ->760         -0.00075         -0.00075         -22.8         -22.8         0.999           350 ->760         -0.00325         -0.00325         -98.5         -98.5         1.000	350 ->450	-0.00092	-0.00092	-27.9	-27.9	1.000				
550         ->650         -0.00075         -0.00075         -22.7         -22.7         0.999           650         ->760         -0.00075         -0.00075         -22.8         -22.8         0.999           350         ->760         -0.00325         -0.00325         -98.5         -98.5         1.000	450 ->550	-0.00083	-0.00083	-25.1	-25.1	1.000				
650         ->760         -0.00075         -0.00075         -22.8         -22.8         0.999           350         ->760         -0.00325         -0.00325         -98.5         -98.5         1.000	550 ->650	-0.00075	-0.00075	-22.7	-22.7	0.999				
350 ->760 -0.00325 -0.00325 -98.5 -98.5 1.000	650 ->760	-0.00075	-0.00075	-22.8	-22.8	0.999				
	350 ->760	-0.00325	-0.00325	-98.5	-98.5	1.000				

+ ~						- <b></b>
- <del></del> (`	· ^ /	ドミフラ	=业1曲35甲(	モーホコ	计句图页	
18 0	7.Z. <del>4</del> .	トラフノ		*		

10日 ()	Koff	Koff 泪度亦化		反応度変化(¢)		集合体非均質効果	
…」 反( )			直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動	
350	1.00899	-	-	-	-	-	
450	1.00802	350 ->450	-29.0	-29.1	1.069	1.069	
550	1.00715	450 ->550	-26.1	-26.1	1.070	1.069	
650	1.00636	550 ->650	-23.7	-23.7	1.071	1.070	
760	1.00556	650 ->760	-23.7	-23.7	1.070	1.070	
-	-	350 ->760	-102.5	-102.6	1.070	1.070	

表 C.2.5. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、直接計算)(参考)

12日 ()	Keff		泪度亦少	反応度変化(¢)		炉心非均筫
温度()	領域均質	領域非均質	加反文化	領域均質	領域非均質	効果
350	1.00377	1.00558	-	-	-	-
450	1.00279	1.00459	350 ->450	-29.5	-29.6	1.006
550	1.00192	1.00371	450 ->550	-26.5	-26.6	1.005
650	1.00112	1.00291	550 ->650	-24.0	-24.2	1.007
760	1.00033	1.00210	650 ->760	-24.1	-24.2	1.006
-	-	-	350 ->760	-104.0	-104.6	1.006

表 C.2.6. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、摂動計算)

泪由赤ル	反応度変化	匕(dk/kk')	反応度	炉心非均筫			
<u> </u>	領域均質	領域非均質	領域均質	領域非均質	効果		
350 ->450	-0.00097	-0.00098	-29.5	-29.6	1.006		
450 ->550	-0.00087	-0.00088	-26.5	-26.6	1.006		
550 ->650	-0.00079	-0.00080	-24.0	-24.1	1.006		
650 ->760	-0.00079	-0.00080	-24.1	-24.2	1.006		
350 ->760	-0.00343	-0.00345	-104.0	-104.6	1.006		

12日 ()	Keff		泪度亦少	反応度変化(¢)		IIF动里			
<u> 温度</u> ( )	70g	175g+超微細群	<b>加反</b> 反化	70g	175g+超微細群				
350	1.01254	1.01382	-	-	-	-			
450	1.01155	1.01286	350 ->450	-29.4	-28.5	0.972			
550	1.01066	1.01199	450 ->550	-26.3	-25.6	0.974			
650	1.00986	1.01121	550 ->650	-23.9	-23.3	0.975			
760	1.00906	1.01042	650 ->760	-24.0	-23.4	0.976			
-	-	-	350 ->760	-103.5	-100.8	0.974			

表 C.2.7. ドップラー反応度の評価結果(UF 効果、直接計算)(参考)

表 C.2.8. ドップラー反応度の評価結果(UF 効果、摂動計算)

泪由亦化	反応度変化	匕(dk/kk')	反応度	変化(¢)	
温反交化	70g	175g+超微細群	70g	175g+超微細群	
350 ->450	-0.00097	-0.00094	-29.3	-28.5	0.973
450 ->550	-0.00087	-0.00084	-26.3	-25.6	0.973
550 ->650	-0.00079	-0.00077	-23.9	-23.3	0.975
650 ->760	-0.00079	-0.00077	-24.0	-23.4	0.977
350 ->760	-0.00341	-0.00332	-103.5	-100.8	0.974

## 付録 D 等温温度係数の GE 解析結果

GEAP-13838(Table 2-25)では膨張反応度係数が表 D.1 のように評価されている。温度係数は 350 から700 に上昇させたときの反応度変化から算出されたもの(GEAP-13598 Table 3-17より)で あり、温度によらない一定値である。

寄与の種類	備考	温度係	数(¢/ )			
	燃料	-0.009				
	被覆管	-0.072				
軸方向膨張	BeO	-	-0.093			
	構造材	-0.013				
	B <sub>4</sub> C	0.001				
径方向膨張	構造材膨張に伴う全要素の膨張	-0.143	-0.143			
No宓庄词小	炉心、ブランケット	-0.076	0 1 4 7			
Na台反减少	INNER VESSEL	-0.071	-0.147			
	合計					

表 D.1 GEAP-13588 の膨張反応度係数解析結果

被覆管の軸方向膨張効果には2分割燃料の上部が上方向に移動する効果が含まれており、その 寄与が支配的である。

ドップラー反応度係数については 300K から 1400K への温度上昇時の評価より求められた Tdk/dT=-0.0063 が使用されている(T は絶対温度)。U-238 の寄与(-0.0061)と Core I の結果を基に 推定された Pu-240 の寄与(-0.0002)の和によるものである。実効遅発中性子割合は 0.0031 が使用 されている。

以上のデータより本文表 4.4.5 に対応する結果が下表 D.2 のように得られる。

泪度亦化		解析值 (¢/ )	実験値	C/E				
加反交化	膨張反応度	ドップラー反応度	合計	(¢/ )	07E			
350 ->450	-0.383	-0.237	-0.620	-0.594	1.04			
450 ->550	-0.383	-0.212	-0.595	-0.591	1.01			
550 ->650	-0.383	-0.192	-0.575	-0.547	1.05			
650 ->760	-0.383	-0.175	-0.558	-0.554	1.01			
350 ->760	-0.383	-0.203	-0.586	-0.571	1.03			

表 D.2 GEAP-13838 解析データに基づく等温温度係数評価結果

# 付録 E 出力ドップラー反応度解析値の詳細

### E.1 Core I-I

表 E.1.1. ドップラー反応度の評価結果(基準計算値) (Core I-I)

泪府 (K)	Koff	Koff 温度峦化		反応度変化(dk/kk')		変化(¢)
温皮(N)	Kerr	温皮支化	直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動
678	0.99627	-	-	-	-	-
778	0.99509	678K->778K	-0.0012	-0.0012	-36.2	-36.2
878	0.99407	778K->878K	-0.0010	-0.0010	-31.7	-31.7
978	0.99316	878K->978K	-0.0009	-0.0009	-28.2	-28.2
1078	0.99234	978K->1078K	-0.0008	-0.0008	-25.3	-25.3
1178	0.99160	1078K->1178K	-0.0008	-0.0008	-23.0	-23.0
1278	0.99093	1178K->1278K	-0.0007	-0.0007	-21.0	-21.0

表 E.1.2. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果、直接計算)(Core I-I)

□ 府 ( K )	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		輸送メッシュ
温皮(下)	拡散計算	輸送計算	温皮交化	拡散計算	輸送計算	効果
678	1.00698	1.02114	-	-	-	-
778	1.00570	1.01985	678K->778K	-38.6	-38.0	0.985
878	1.00458	1.01870	778K->878K	-33.9	-33.7	0.995
978	1.00359	1.01768	878K->978K	-30.1	-30.1	0.997
1078	1.00269	1.01679	978K->1078K	-27.1	-26.4	0.974
1178	1.00188	1.01595	1078K->1178K	-24.7	-24.9	1.009
1278	1.00114	1.01519	1178K->1278K	-22.5	-22.3	0.988

表 E.1.3. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果	摂動計算)(	Core I-I)
---------------------------------	--------	-----------

泪度亦化	反応度変化	匕(dk/kk')	反応度	変化(¢)	輸送メッシュ
温皮女化	拡散計算	輸送計算	拡散計算	輸送計算	効果
678K->778K	-0.00126	-0.00125	-38.6	-38.3	0.991
778K->878K	-0.00111	-0.00110	-33.9	-33.6	0.992
878K->978K	-0.00099	-0.00098	-30.1	-29.9	0.991
978K->1078K	-0.00089	-0.00088	-27.1	-26.9	0.992
1078K->1178K	-0.00081	-0.00080	-24.7	-24.4	0.992
1178K->1278K	-0.00074	-0.00073	-22.6	-22.4	0.992

表 E.1.4. ドップラー反応度の評価結果(集合体非均質効果)(Core I-I)

温度(K) Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		集合体非均質効果	
温皮 ( N )	Nerr	温皮交化	直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動
678	1.00421	-	-	-	-	-
778	1.00293	678K->778K	-38.7	-38.7	1.070	1.070
878	1.00181	778K->878K	-34.0	-34.0	1.072	1.072
978	1.00082	878K->978K	-30.2	-30.2	1.074	1.073
1078	0.99993	978K->1078K	-27.2	-27.2	1.075	1.075
1178	0.99912	1078K->1178K	-24.7	-24.7	1.077	1.077
1278	0.99838	1178K->1278K	-22.6	-22.6	1.078	1.078

□ 府(K)	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		炉心非均質効
温皮(下)	領域均質	領域非均質	温皮支化	領域均質	領域非均質	果
678	0.99836	0.99691	-	-	-	-
778	0.99710	0.99566	678K->778K	-38.6	-38.7	1.001
878	0.99600	0.99456	778K->878K	-33.9	-33.9	1.000
978	0.99502	0.99358	878K->978K	-30.2	-30.2	1.001
1078	0.99414	0.99270	978K->1078K	-57.4	-57.4	1.001
1178	0.99335	0.99191	1078K->1178K	-51.9	-51.9	1.000
1278	0.99262	0.9911799	1178K->1278K	-154.6	-154.7	1.001

表 E.1.5. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、直接計算)(Core I-I)

## 表 E.1.6. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、摂動計算)(Core I-I)

泪度亦化	反応度変化	匕(dk/kk')	反応度	炉心非均質効	
加反交化	領域均質	領域非均質	領域均質	領域非均質	果
678K->778K	-0.00127	-0.00127	-38.7	-38.7	1.000
778K->878K	-0.00111	-0.00111	-33.9	-33.9	1.000
878K->978K	-0.00099	-0.00099	-30.2	-30.2	1.000
978K->1078K	-0.00089	-0.00089	-27.2	-27.2	1.001
1078K->1178K	-0.00081	-0.00081	-24.7	-24.7	1.001
1178K->1278K	-0.00074	-0.00074	-22.6	-22.6	1.001

# 表 E.1.7. ドップラー反応度の評価結果(UF 効果、直接計算)(Core I-I)

□ ( K )	Keff		但由本化	反応度変化(¢)		次世代炉定数
/////////////////////////////////////	70g	175g+超微細群	温皮交化	70g	175g+超微細群	効果
678	1.00781	1.00965	-	-	-	-
778	1.00653	1.00835	678K->778K	-38.6	-39.0	1.011
878	1.00542	1.00722	778K->878K	-33.8	-34.1	1.011
978	1.00442	1.00621	878K->978K	-30.1	-30.3	1.009
1078	1.00353	1.00531	978K->1078K	-57.2	-57.6	1.008
1178	1.00272	1.00449	1078K->1178K	-51.7	-52.1	1.008
1278	1.00198	1.00374	1178K->1278K	-154.1	-155.6	1.010

表 E.1.8.	ドップラー	・反応度の評価結果(UF	効果、摂動計算)(Core I-I)
----------	-------	--------------	--------------------

但由亦化	反応度変化	七(dk/kk')	反応度	次世代炉定数	
温皮文化	70g	175g+超微細群	70g	175g+超微細群	効果
678K->778K	-0.00126	-0.00128	-38.5	-39.0	1.012
778K->878K	-0.00111	-0.00112	-33.8	-34.2	1.010
878K->978K	-0.00098	-0.00099	-30.1	-30.4	1.009
978K->1078K	-0.00089	-0.00089	-27.1	-27.3	1.008
1078K->1178K	-0.00080	-0.00081	-24.6	-24.8	1.008
1178K->1278K	-0.00074	-0.00074	-22.5	-22.7	1.007

#### E.2 Core II-C<sup>1</sup>

	夜 E.Z.1.「ツノノー 反応度の計画結果(基件計算値)(Cole II-C)								
迴度(K)	Koff	泪度亦化	反応度変化(dk/kk')		反応度変化(¢)				
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□	Nerr	<u> </u>	直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動			
678	0.99313	-	-	-	-	-			
778	0.99224	678K->778K	-0.0009	-0.0009	-27.7	-27.7			
878	0.99145	778K->878K	-0.0008	-0.0008	-24.2	-24.2			
978	0.99076	878K->978K	-0.0007	-0.0007	-21.4	-21.4			
1078	0.99014	978K->1078K	-0.0006	-0.0006	-19.2	-19.2			
1178	0.98957	1078K->1178K	-0.0006	-0.0006	-17.4	-17.4			
1278	0.98906	1178K->1278K	-0.0005	-0.0005	-15.9	-15.9			

表 E.2.2. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果、直接計算)(Core II-C)

□ 一 一 ( K )	Ke	ff	泪度亦化	反応度変化(¢)		輸送メッシュ
温皮(『)	拡散計算	輸送計算	温皮女化	拡散計算	輸送計算	効果
678	1.00333	1.01613	-	-	-	-
778	1.00234	1.01511	678K->778K	-30.0	-30.0	1.000
878	1.00148	1.01422	778K->878K	-26.1	-26.4	1.010
978	1.00071	1.01344	878K->978K	-23.3	-23.1	0.992
1078	1.00002	1.01274	978K->1078K	-44.1	-43.6	0.987
1178	0.99939	1.01210	1078K->1178K	-39.8	-39.5	0.992
1278	0.99882	1.01152	1178K->1278K	-119.2	-118.9	0.998

表 E.2.3. ドップラー反応度の評価結果(輸送メッシュ効果、摂動計算)(Core II-C)

泪度亦化	反応度変化	七(dk/kk')	反応度	輸送メッシュ	
加皮女化	拡散計算	輸送計算	拡散計算	輸送計算	効果
678K->778K	-0.00099	-0.00098	-30.0	-29.8	0.994
778K->878K	-0.00086	-0.00086	-26.2	-26.0	0.994
878K->978K	-0.00077	-0.00076	-23.3	-23.2	0.995
978K->1078K	-0.00069	-0.00068	-20.9	-20.8	0.995
1078K->1178K	-0.00062	-0.00062	-18.9	-18.8	0.995
1178K->1278K	-0.00057	-0.00057	-17.3	-17.2	0.995

表 E.2.4. ドップラー反応度の評価結果(集合体非均質効果)(Core II-C)

温度(K) Keff	Koff	泪度亦化	反応度変化(¢)		集合体非均質効果	
温皮(N)	Nerr	<u> </u>	直接計算	厳密摂動	直接計算	厳密摂動
678	0.99991	-	-	-	-	-
778	0.99893	678K->778K	-29.6	-29.6	1.070	1.069
878	0.99808	778K->878K	-25.9	-25.9	1.071	1.070
978	0.99733	878K->978K	-23.0	-23.0	1.071	1.071
1078	0.99665	978K->1078K	-20.6	-20.6	1.072	1.072
1178	0.99604	1078K->1178K	-18.7	-18.7	1.074	1.073
1278	0.99548	1178K->1278K	-17.1	-17.1	1.073	1.074

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>基準計算値と集合体非均質効果以外は Gap 領域、Insulator 領域を Core I-I と同じデータを使用。

泪府 ( K )	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		炉心非均質
温皮(N)	領域均質	領域非均質	<u> </u>	領域均質	領域非均質	効果
678	0.99475	0.99651	-	-	-	-
778	0.99377	0.99552	678K->778K	-30.0	-30.2	1.007
878	0.99292	0.99466	778K->878K	-26.2	-26.5	1.009
978	0.99216	0.99390	878K->978K	-23.3	-23.5	1.006
1078	0.99148	0.99321	978K->1078K	-44.2	-44.6	1.007
1178	0.99087	0.99259	1078K->1178K	-39.9	-40.2	1.008
1278	0.99031	0.9920215	1178K->1278K	-119.5	-120.4	1.008

表 E.2.5. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、直接計算)(Core II-C)

表 E.2.6. ドップラー反応度の評価結果(炉心非均質効果、摂動計算)(Core II-C)

泪度亦化	反応度変伯	七(dk/kk')	反応度	炉心非均質	
<u> </u>	領域均質	領域非均質	領域均質	領域非均質	効果
678K->778K	-0.00099	-0.00100	-30.0	-30.2	1.007
778K->878K	-0.00086	-0.00087	-26.2	-26.5	1.008
878K->978K	-0.00077	-0.00077	-23.3	-23.5	1.007
978K->1078K	-0.00069	-0.00069	-20.9	-21.1	1.008
1078K->1178K	-0.00063	-0.00063	-19.0	-19.1	1.007
1178K->1278K	-0.00057	-0.00058	-17.3	-17.5	1.007

表 E.2.7. ドップラー反応度の評価結果(UF 効果、直接計算)(Core II-C)

温度(K)	Keff		泪度亦化	反応度変化(¢)		次世代炉定
	70g	175g+超微細群	温皮女化	70g	175g+超微細群	数効果
678	1.00359	1.00493	-	-	-	-
778	1.00260	1.00392	678K->778K	-29.9	-30.3	1.011
878	1.00173	1.00304	778K->878K	-26.2	-26.5	1.010
978	1.00096	1.00227	878K->978K	-23.2	-23.4	1.009
1078	1.00027	1.00157	978K->1078K	-44.1	-44.4	1.008
1178	0.99965	1.00094	1078K->1178K	-39.8	-40.0	1.006
1278	0.99908	1.00037	1178K->1278K	-119.1	-120.1	1.009

表 E.2.8. ドップラー反応度の評価結果(UF 効果、摂動計算)(Core II-C)

泪度亦化	反応度変化(dk/kk')		反応度	次世代炉定	
温皮文化	70g	175g+超微細群	70g	175g+超微細群	数効果
678K->778K	-0.00099	-0.00100	-29.9	-30.3	1.012
778K->878K	-0.00086	-0.00087	-26.2	-26.4	1.011
878K->978K	-0.00077	-0.00077	-23.2	-23.4	1.009
978K->1078K	-0.00069	-0.00069	-20.9	-21.0	1.007
1078K->1178K	-0.00062	-0.00063	-18.9	-19.0	1.006
1178K->1278K	-0.00057	-0.00058	-17.3	-17.5	1.012

# 付録 F 温度計算用プログラム dopcal.for (温度計算部分の抜粋)

メッシュ点での出力密度から燃料棒内の温度分布及び平均温度を計算する。

С С CALCULATE AVERAGE FUEL TEMPERATURE FORM POWER DISTRIBUTION С parameter (NMR= 54) REAL\*8 vol(NMR),KC,HSC,HFC,FTEMP(NMR),RT(NMR) 1,TEMP,PI,FCOND,TSUM1,TSUM2,VOLSUM,TCFC,TCNA 2 ,sumt,avft,tdif,tdif1,tempc1,tempc2,DENS,tempj,tkdif1 common /ft/ FTEMP,RT,DENS,IK,IH common /ite/ kimx,iimx common /dop/ alpha,xm,rou1(10),rou2(10),beta,tkeff,crstl С C RF:Radius of FUEL ROD (cm) at 760F RF0=1.1113 RF=RF0\*(1+(9.33079e-6\*404.4444-3.77757e-4)) C RCin:Inner Radius of CLAD (cm) at 800F RCin=1.1303 RCin=RCin\*(1.0+7.1928e-3) C RCout:Outer Radius of CLAD (cm) at 800F RCout=1.2319 RCout=RCout\*(1.0+7.1928e-3) C KC: Thermal conductivity of CLAD (from MONJU at 800F) KC=0.187 C HSC:Clad-Coolant conductance (HEDL-TME 73-42) HSC=2.84C TFNA:Coolant temperature (in Fahrenheit) TFNA=760 C TCNA:Coolant temperature (in Centigrade) CALL FTOC(TFNA,TCNA) C PAI constant: PI=ATAN(1.0)\*4 C ITMAX:Maximum iteration number for TEMP ITMAX=100000 C KTMAX:Maximum iteration number for KF KTMAX=100000 C EPST: EPS for Temperature iteration EPST=0.001 C NF:Number of Fuel ROD in assembly NF=6 C AF: Area of Fuel Rod (cm2) AF=PI\*RF\*\*2 C AFA: Area of Fuel ASSEMBLY (cm2) r=4.24398 at 760F AFA=PI\*4.24398\*\*2 C Q3:effective Power density (W/cm3) Q3=Q3\*AFA/(NF\*AF) C Q1:Linear power density (W/cm/rod) Q1=Q3\*AF C Q2:surface heat (W/rod) Q2=Q1/(2\*PI\*RF) С C CALCULATE TEMPERATURE at Fuel center С c (NMR-4):# of mesh division for a fuel rod rt(1)=0 DR=RF/(NMR-4) DO J=1,NMR-4 RT(J+1)=RT(J)+DRvol(j)=PI\*((RT(j+1))\*\*2-RT(j)\*\*2) ENDDO RT(NMR-2)=RCin RT(NMR-1)=RCout RT(NMR)=RCout+0.1 С for no power IF (Q3.lt.1e-9) then DO J=1,NMR FTEMP(J)=TCNA ENDDO goto 400 endif C C temperature at clad outer surface

```
FTEMP(NMR-1)=TCNA+Q1/(2*PI*RCout)/HSC
C temperature at clad inner surface
      FTEMP(NMR-2)=FTEMP(NMR-1)+Q3*RF**2/(2*KC)*ALOG(RCout/RCin)
c get power density dependent heat conductance between fuel and clad
CALL CALHFC(Q3,HFC,IK,IH)
C temperature at fuel surface
      FTEMP(NMR-3)=FTEMP(NMR-2)+Q2/HFC
C average fuel conductivity iteration Start
      TEMP=FTEMP(NMR-3)
      CALL CALKF(TEMP,FCOND,DENS,IK)
      FTEMP(1)=TEMP+Q3/(4*FCOND)*RF**2
      tdif1=0
      tempc1=0
      tempc2=0
      DO I=1,ITMAX
        CALL CALKF(FTEMP(1),FCOND,DENS,IK)
        DO J=1,NMR-4
         tkdif1=0
         tempj=0
         FTEMP(J+1)=FTEMP(1)-Q3/(4*FCOND)*RT(J+1)**2
         DO K=1,KTMAX
          CALL AVKF(FTEMP,FCOND,J,DENS,IK)
          FTEMP(J+1)=FTEMP(1)-Q3/(4*FCOND)*RT(J+1)**2
          tdif=FTEMP(J+1)-tempj
          IF (ABS(tdif) .LT. EPST/100) GOTO 200
          IF (tkdif1*tdif.lt.0) FTEMP(J+1)=(FTEMP(J+1)+tempj)/2
                 tempj=FTEMP(J+1)
          tkdif1=tdif
         ENDDO
         write(*,*) 'KF not converged ! Type any number.'
read(*,*) dum
       IF (K.gt.KIMX) KIMX=K
ENDDO
  200
C convergion criteria
       tdif=FTEMP(NMR-3)-temp
        IF (ABS(tdif) .LT. EPST) GOTO 300
        IF (Lle.10) then
        FTEMP(1)=TEMP+Q3/(4*FCOND)*RF**2
        else
        if (tdif1*tdif.gt.0) then
         if(tdif.lt.0)
     1
             ftemp(1)=max(tempc1,ftemp(1))+abs(tempc1-ftemp(1))
          if(tdif.gt.0)
     1
             ftemp(1)=min(tempc1,ftemp(1))-abs(tempc1-ftemp(1))
         else
         ftemp(1)=(tempc1+ftemp(1))/2
         endif
        endif
        tdif1=tdif
       tempc1=tempc2
        tempc2=ftemp(1)
        if (i.gt.50) then
         if (i.eq.51) EPST=EPST*10
         write(*,*) 'I ftemp(nmr-3) temp EPS',I,FTEMP(NMR-3),TEMP,EPST
        endif
           ENDDO
      write(*,*) 'Temperature not converged ! Type any number.'
write(*,*) 'K TCNA TMEP',K,TCNA,TEMP
      read(*,*) dum
      return
  300 IF (I.gt.IIMX) IIMX=I
С
С
   CALCULATE AVERAGE FUEL TEMPERATURE
С
  400 TSUM1=0
      TSUM2=0
      VOLSUM=0
      DO J=1,NMR-4
        TSUM1=TSUM1+(273.15+(FTEMP(J)+FTEMP(J+1))/2)*VOL(J)
        IF (abs(1-xm).gt.1e-9) THEN
         TSUM2=TSUM2+((273.15+(FTEMP(J)+FTEMP(J+1))/2)**(1-xm))*VOL(J)
        ELSE
        TSUM2=TSUM2+DLOG(273.15+(FTEMP(J)+FTEMP(J+1))/2)*VOL(J)
        END IF
        VOLSUM=VOLSUM+VOL(J)
      ENDDO
```

```
c simple volume averaged
      TAVE1=TSUM1/VOLSUM
c exact averaged
      IF (abs(1-xm).gt.1e-9) THEN
      TAVE2=EXP( DLOG(TSUM2/VOLSUM) /(1-xm))
      ELSE
      TAVE2=EXP(TSUM2/VOLSUM)
      END IF
С
      RETURN
      END
C
C*** SUBROUTINE FUELK **********
С
      SUBROUTINE CALKF(TMPRT,FCOND,DENS,IK)
С
C
     CALCULATE HEAT CONDUCTANCE OF MOX FUEL (W/cm·C)
С
      FOR TEMPERETURE (Centigrade)
С
      real*8 TMPRT,FCOND,OBARM,DENS
С
      OBARM=1.99
С
С
     based on INOUE 1998
с
      IF (IK/10.eq.1) then
      FCOND=0.01*(1-2.5*(1-DENS))*
      (1/(0.06059+0.2754*sqrt(2-OBARM)+2.011e-4*(TMPRT+273.15))
     1
     2
        +4.715e9/(TMPRT+273.15)**2*exp(-16361/(TMPRT+273.15)))
     ENDIF
С
С
     based on GEAP-13967 (used in MONJU)
C
      IF (IK/10.eq.2) then
      FCOND=0.01169+1/(0.06717+0.02226*(1-DENS)/(OBARM-1.90))
          /TMPRT+7.214E-13*TMPRT**3
     1
      ENDIF
С
С
     based on Baily (1967)
С
      IF (IK/10.eq.3) then
C use Schmit <= 1100F and Bailly > 1100F
     const > 3000F
С
      IF (TMPRT.LE. 600.0) THEN
C Factor:correction to take into account Density change
C from value equation used in HEDL-TME 73-42 with Density 0.92
Factor=2106.45347*DENS**4-7668.13705*DENS**3
             +10492.38019*DENS**2\text{-}6392.08219*DENS+1463.0031
     1
        FCOND=(0.05304-3.255E-5*TMPRT)*Factor
       ELSE
       FCOND=0.011+1.0/(0.4848-0.4465*DENS)/TMPRT
      ENDIF
      IF (TMPRT.GT. 1650.0)
     с
            FCOND=0.011+1.0/(0.4848-0.4465*DENS)/1650
      ENDIF
С
      RETURN
      END
C
C*** SUBROUTINE FCLADK ***********
С
      SUBROUTINE CALHFC(Q,HFC,IK,IH)
С
С
     CALCULATE HEAT CONDUCTANCE FOR FUEL-TO-CLAD INTERFACE (W/cm2/C)
С
      FOR AVERAGE LOCAL POWER DENSITY (W/cc)
С
      REAL*8 HFC
С
c from CORE I and II data < 80W/cc hole effect included
С
   Kf based on INOUE 1998
С
      IF (IK/10.eq.1) then
c d=0.937 middle=IFA-1
      IF (IK-IK/10*10.eq.1)
     c HFC=2.4551e-5*dble(Q)**2+8.1439e-4*dble(Q)+1.2020e-1
```

```
c d=0.970 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.2)
     c HFC=1.5877e-5*dble(Q)**2+1.0064e-3*dble(Q)+1.4326e-1
c d=0.937 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.3)
     c HFC=3.6660e-5*dble(Q)**2+8.1517e-4*dble(Q)+1.6023e-1
      ENDIF
С
   Kf based on GEAP-13967
С
      IF (IK/10.eq.2) then
c d=0.937 middle=IFA-1
       IF (IK-IK/10*10.eq.1)
     c HFC=2.5990e-6*dble(Q)**2+2.4721e-3*dble(Q)+9.5891e-2
c d=0.970 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.2)
     c HFC=6.5073e-6*dble(Q)**2+2.7448e-3*dble(Q)+1.1869e-1
c d=0.937 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.3)
     c HFC=5.2506e-6*dble(Q)**2+3.3097e-3*dble(Q)+1.1968e-1
      ENDIF
С
С
     Kf based on Baily
C
      IF (IK/10.ge.3) then
c d=0.937 middle=IFA-1
       IF (IK-IK/10*10.eq.1)
     c HFC=1.3156e-5*dble(Q)**2+9.0552e-4*dble(Q)+9.4108e-2
c d=0.970 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.2)
c HFC=7.4497e-6*dble(Q)**2+7.0717e-4*dble(Q)+1.0014e-1
c d=0.937 middle=IFA-5
       IF (IK-IK/10*10.eq.3)
     c HFC=1.6988e-5*dble(Q)**2+9.9878e-4*dble(Q)+1.1739e-1
      ENDIF
с
      IF (IH.eq.1)
c Reported GEAP-13837 Eq.(1)
     c HFC=0.073962+9.9378e-4*dble(Q)+15.7284E-6*dble(Q)**2
c Reported GEAP-13837 Eq.(2)
      IF (IH.eq.2)
     c HFC=0.126+10.935E-4*dble(Q)+13.0716E-6*dble(Q)**2
с
      RETURN
      END
C
C*** SUBROUTINE FTOC ***********
С
      SUBROUTINE FTOC(T1,T2)
С
     COMVERT T1(FARLENHEIT) TO T2(CENTIGRADE)
С
С
      real*8 T2
c
      T2=dble((T1-32)*5.0/9.0)
С
      RETURN
      END
```

## 付録 G ドップラー定数のベンチマーク計算用サンプル入力

#### (1) SLAROM 入力データ (例:Core I)

```
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F (678K) REGION 1(CORE)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
  1.0
 925 1.57277E-05
 928 7.11079E-03
 949 1.66895E-03
 940 1.51003E-04
 941 1.26110E-05
  8 2.15640E-02
  4 3.73538E-03
  11 6.40337E-03
 24 3.75447E-03
 26 1.38462E-02
 28 1.78568E-03
 42 1.17549E-04
 105 4.83677E-05
 115 1.94686E-04
   6 6.07634E-05
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REG001
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 2(CORE LOW)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  15
  1.0
 925 1.57277E-05
 928 7.11079E-03
 949 1.66895E-03
 940 1.51003E-04
 941 1.26110E-05
  8 2.04837E-02
  4 2.65511E-03
  11 6.40337E-03
 24 3.92325E-03
 26 1.44355E-02
 28 1.88536E-03
 42 1.30254E-04
 105 4.83677E-05
 115 1.94686E-04
  6 6.07634E-05
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
678.0\ 678.0\ 678.0\ 678.0\ 678.0
REG002
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 3 (GAP)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   7
  1.0
  8 3.73538E-03
  4 3.73538E-03
  11 6.40337E-03
 24 5.73577E-03
 26 2.03454E-02
 28 3.80915E-03
  42 1.20829E-04
REG003
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 4 (LOWER CENTRAL CH)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  4
  1.0
  11 1.56237E-02
  24 5.00773E-03
 26 1.91684E-02
```

```
28 1.97170E-03
REG004
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 5 (AXIAL UP REF.)
  100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  5
  1.0
 11 6.55606E-03
 24 3.53790E-03
 26 1.30171E-02
 28 4.16858E-02
 42 1.17562E-04
REG005
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 6 (MID. CENTRAL CH)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  4
  1.0
 11 1.56237E-02
 24 1.92870E-03
 26 7.38261E-03
 28 7.59387E-04
REG006
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 7 (UPPER CENTRAL CH)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  4
  1.0
 11 1.56237E-02
 24 2.96924E-03
 26 1.13656E-02
 28 1.16908E-03
REG007
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 8 (AXIAL LOW REF.)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  5
  1.0
 11 6.46494E-03
 24 3.82292E-03
 26 1.41136E-02
 28 4.14579E-02
 42 1.16334E-04
REG008
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 9 (INNER VESSEL)
  100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  5
  1.0
  11 1.39565E-02
 24 5.12554E-03
 26 1.85600E-02
 28 3.23241E-03
 42 3.20315E-06
REG009
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 10(OUTER VESSEL)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  5
  1.0
 24 2.58777E-03
 26 9.90537E-03
 28 1.01888E-03
  12 5.21431E-04
 13 1.12729E-02
REG010
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 11(RADIAL REF.)
  100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  5
```

```
1.0
  24 5.58996E-04
 26 2.13971E-03
 28 7.31735E-02
  12 9.41031E-05
  13 2.03444E-03
REG011
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 12(RADIAL SHIELD)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  8
  1.0
 24 1.98677E-03
 26 7.60489E-03
 28 7.82251E-04
  12 3.43046E-04
 13 7.41640E-03
 105 5.40038E-03
 115 2.17372E-02
  6 6.78439E-03
REG012
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 13(NA GRID)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   7
  1.0
  11 1.58847E-02
  24 4.01533E-03
 26 1.53698E-02
 28 1.58096E-03
 105 6.88169E-04
 115 2.76997E-03
  6 8.64535E-04
REG013
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 14(STEEL VOID)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  3
  1.0
 24 2.48950E-03
 26 9.52922E-03
  28 9.80191E-04
REG014
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 15(NA STEEL)
   1\ 0\ 0\ -1\ 0\ 0 \quad 1\ -1\ 0 \quad 0\ 0 \quad 0 \quad 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  4
  1.0
 11 1.27122E-02
 24 5.34829E-03
  26 2.04720E-02
  28 2.10579E-03
REG015
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 16(INSULATOR CENTER)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
  9
  1.0
 925 2.04927E-05
 928 9.29435E-03
  8 2.24582E-02
  4 3.73538E-03
  11 6.40337E-03
  24 3.70992E-03
 26 1.36756E-02
 28 1.76814E-03
 42 1.17549E-04
REG016
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 17(INSULATOR)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
```

```
9
   1.0
 925 2.04927E-05
 928 9.29435E-03
  8 2.13780E-02
  4 2.65511E-03
  11 6.40337E-03
  24 3.87870E-03
  26 1.42649E-02
  28 1.86782E-03
  42 1.30254E-04
REG017
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=2000F(1366K) REGION 1(CORE)
 1 0 0 -1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57277E-05
 928 7.11079E-03
 949 1.66895E-03
 940 1.51003E-04
 941 1.26110E-05
   8 2.15640E-02
   4 3.73538E-03
  11 6.40337E-03
  24 3.75447E-03
  26 1.38462E-02
  28 1.78568E-03
  42 1.17549E-04
 105 4.83677E-05
 115 1.94686E-04
   6 6.07634E-05
1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REGH01
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP2000F(1366K) REGION 2(CORE LOW)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57277E-05
 928 7.11079E-03
 949 1.66895E-03
 940 1.51003E-04
 941 1.26110E-05
  8 2.04837E-02
  4 2.65511E-03
  11 6.40337E-03
  24 3.92325E-03
  26 1.44355E-02
  28 1.88536E-03
  42 1.30254E-04
 105 4.83677E-05
 115 1.94686E-04
   6 6.07634E-05
1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REGH02
PREP
SEFOR CORE-II BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 1(CORE)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57721E-05
 928 7.13415E-03
 949 1.67330E-03
 940 1.51397E-04
 941 1.26438E-05
   8 1.80922E-02
   4 2.07521E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.61244E-03
  26 1.71303E-02
  28 2.12349E-03
```

```
42 1.17549E-04
 105 3.62758E-05
 115 1.46015E-04
   64.55726E-05
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REG201
PREP
SEFOR CORE-II BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 2(CORE LOW)
 1 0 0 -1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57721E-05
 928 7.13415E-03
 949 1.67330E-03
 940 1.51397E-04
 941 1.26438E-05
   8 1.80321E-02
   4 1.47506E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.53293E-03
  26 1.67692E-02
  28 2.12541E-03
  42 1.30254E-04
 105 3.62758E-05
 115 1.46015E-04
   64.55726E-05
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REG202
PREP
SEFOR CORE-II BENCHMARK MODEL TEMP=2000F(1366K) REGION 1(CORE)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57721E-05
 928 7.13415E-03
 949 1.67330E-03
 940 1.51397E-04
 941 1.26438E-05
  8 1.80922E-02
  4 2.07521E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.61244E-03
  26 1.71303E-02
  28 2.12349E-03
  42 1.17549E-04
 105 3.62758E-05
 115 1.46015E-04
   64.55726E-05
1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
 678.0\ 678.0\ 678.0\ 678.0\ 678.0
REG2H1
PREP
SEFOR CORE-II BENCHMARK MODEL TEMP=2000F(1366K) REGION 2(CORE LOW)
   100-100 1-10 00 0 70
 11678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   15
   1.0
 925 1.57721E-05
 928 7.13415E-03
 949 1.67330E-03
 940 1.51397E-04
 941 1.26438E-05
   8 1.80321E-02
   4 1.47506E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.53293E-03
  26 1.67692E-02
 28 2.12541E-03
  42 1.30254E-04
 105 3.62758E-05
 115 1.46015E-04
   64.55726E-05
1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 1366.0 678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
```

```
678.0 678.0 678.0 678.0 678.0
REG2H2
PREP
SEFOR CORE-II BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 3 (GAP) corrected
1 0 0 -1 0 0 1 -1 0 0 0 0 70
678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   1.0
   8 2.07521E-04
   4 2.07521E-04
  11 6.40337E-03
  24 6.64484E-03
  26 2.38251E-02
  28 4.16708E-03
  42 1.20829E-04
REG203
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 16(INSULATOR CENTER)
   100-100 1-10 00 0 70
 678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   9
   1.0
 925 2.04927E-05
 928 9.29435E-03
   8 1.89304E-02
   4 2.07521E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.61898E-03
  26 1.71553E-02
  28 2.12606E-03
  42 1.17549E-04
REG216
PREP
SEFOR CORE-I BENCHMARK MODEL TEMP=760F(678K) REGION 17(INSULATOR)
100-100 1-10 00 070
678.0 0.00000E+00 0.00000E+00
   9
   1.0
 925 2.04927E-05
 928 9.29435E-03
   8 1.88703E-02
   4 1.47506E-04
  11 6.40337E-03
  24 4.78776E-03
  26 1.77446E-02
  28 2.22575E-03
  42 1.30254E-04
REG217
```

#### JAEA-Research 2006-059

# (2) CITATION 入力データ (例:Core I) (温度 678K 用。1366K 用には燃料領域の断面積を変更する。)
表1. SI 基本単位

甘木县	SI 基本単位				
<b></b> 本 平 里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	S			
電 流	アンペア	А			
熱力学温度	ケルビン	K			
物質量	モル	mol			
光 度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位	を用いて表されるSI組立単位	の例
組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面 積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	ロ 法 メ ー ト ル	m <sup>3</sup>
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波数	毎 メ ー ト ル	m-1
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	$A/m^2$
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mol/m^3$
輝度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈 折 牽	(数の) 1	1

表 5. SI 接頭語										
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号					
$10^{24}$	日 夕	Y Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d					
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с					
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m					
$10^{15}$	ペリ	P P	$10^{-6}$	マイクロ	μ					
$10^{12}$	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n					
$10^{9}$	ギュ	f G	$10^{-12}$	ピ コ	р					
$10^{6}$	メガ	/ M	$10^{-15}$	フェムト	f					
$10^{3}$	キロ	ı k	$10^{-18}$	アト	а					
$10^{2}$	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	Z					
10 <sup>1</sup>	デオ	da da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	v					

\_

## 表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

	SI 粗立単位							
組立量			他のSI単位による	SI基本単位による				
	名称	記号	表し方	表し方				
平 面 角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$				
立 体 角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	$\operatorname{sr}^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$				
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>				
力	ニュートン	N		$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2}$				
压力, 応力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$				
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$				
工率,放射東	ワット	W	J/s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$				
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A				
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$				
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$				
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$				
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$				
磁東	ウェーバ	Wb	V · s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
磁東密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$				
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K				
光味	ルーメン	1 m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{cd} = \mathbf{cd}$				
照良	ルクス	1x	$1 \text{m/m}^2$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-4} \cdot \mathbf{cd} = \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{cd}$				
(放射性核種の) 放射龍	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>				
吸収線量,質量エネル	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$				
キー分子, カーマ		í í	0.00					
一級重当重, 同辺線重当			T /1	2 -2				
重, 方回性線重当重, 值 人線量当量 組織總量当	シーベルト	Sv	J/kg	m"•s"				
/ / / 生 二 生,和 和 和 那 王								

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4.単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

和立書					Т	SI 組立単位					
	አ	보 꼬, 별	٢			3	名称			記号	SI 基本単位による表し方
粘				B	モバ	パス	力	ル	秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力の	モ	-	×	ンコ	=		. > >	メート	N	N • m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表	面		張	1	] =	ュート	ン毎	メート	ル	N/m	kg • s <sup>-2</sup>
角		速		B	モラ	ジラ	r '	毎	秒	rad/s	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-1} = \mathbf{s}^{-1}$
角	加		速	B	モラ	ジア	ン毎	平方	秒	$rad/s^{2}$	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{s}^{-2} = \mathbf{s}^{-2}$
熱流	密度	,	放射	照月	モワ	ット毎	平方	メート	N	$W/m^2$	kg • s <sup>-3</sup>
熱容	量,	エン	1 1	1 ピー	- 2	ジュール	毎	ケルビ	2	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量素	各量	(比	熱容	量)	12	シュール	毎キ	ログラ	4	$\mathbf{I}(\mathbf{h}_{\mathbf{a}}, \mathbf{k})$	$-2$ $-2$ $\nu^{-1}$
質量	т.	~ ŀ	D	ť -	- 毎	ケルビ	ン			J/ (Kg · K)	m · s · k
質量	I	ネ	N	ギー			缶キ	ロガラ	ĸ	I/kg	$m^2 + n^{-2} + V^{-1}$
(比	I :	ネル	・ギ	- )	ľ	1 10	ht -/	-//	-	JING	m · s · k
赦	伝		湔	5	* ワ	ット毎	メー	トル毎	5	W/(m • K)	$m = k \sigma = \sigma^{-3} = K^{-1}$
7743	14A			-	N	ビン				"/ (m K/	m - kg - S - k
休穑	I	ネ	N	# -	12	シュール	毎立	方メー	ŀ	I/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot ka \cdot s^{-2}$
FF 104				÷	N			121		J7 m	ш ку з
電	界	Ø	強	5	ドボ	ルト	毎メ	- ト	N	V/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} \cdot \mathbf{A}^{-1}$
体	穑		雷	花	トク	ーロン	毎立	方メー	ŀ	$C/m^3$	m <sup>-3</sup> • c • A
	10				· n					07 11	11 3 A
雷	気		変	6	17	ーロン	毎平	方メー	ŀ	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> • s • A
			~		JL.						-3 -1 4 2
誘		電		2		アラト	「毎)	x — ト	ル	F/m	$\mathbf{m}^{3} \cdot \mathbf{kg}^{1} \cdot \mathbf{s}^{3} \cdot \mathbf{A}^{2}$
透		ANS.		24		ンリー	- 毎 )	x — ト	N	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^2 \cdot \mathbf{A}^2$
モル	T	ネ	N	+ -	-12		N	毎モ	N	J/mol	m <sup>*</sup> •kg•s <sup>*</sup> •mol <sup>-1</sup>
モル	エン	1	L L		2	ュール	毎モ	ル毎ケ	ル	J/(mol • K)	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{k} \mathbf{g} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{m} \mathbf{g} \mathbf{g}^{-1}$
+ 177 AL 64	N (	熱	谷		E E	~	- L				
照射病	) 重5	X 禄	及び	γ禄)	2		田牛	277	A	C/kg	kg ' · s · A
败	42	称	重	2			1	毎	权	Gy/s	m • s
<i>I</i> X	羽		强	B	12	ット毎	ステ	727	-	W/sr	m··m··kg·s´=m··kg·s'
放	射		輝	B	リクした	ット毎	半方	メート	N	$W/(m^2 \cdot sr)$	$\mathbf{m}^2 \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$

## 表6.国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	•	$1^{\circ} = (\pi / 180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル	1, L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1Np=1
ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$

	表7. 国際単位糸と併用されこれに属さない単位で									
SI単位で表される数値が実験的に得られるもの										
		名称	;		記号	SI 単位であらわされる数値				
電	子	ボ	N	ŀ	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J				

統一	-原子	質量	単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天	文	単	位	ua	lua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

	併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
海		里		1 海里=1852m				
1	ッ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s				
7	-	N	а	$1 a=1 dam^2 = 10^2 m^2$				
$\sim$	クター	N	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$				
15	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa				
オン	グストロ・	- 4	Å	1 Å=0. 1nm=10 <sup>-10</sup> m				
13	-	ン	b	$1 b=100 fm^2=10^{-28}m^2$				

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

	Ko, MILLATHE DECOMPTINE									
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値						
I	N	グ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J						
ダ	イ	$\sim$	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N						
ポ	T	ズ	Р	1 P=1 dyn ⋅ s/cm²=0.1Pa ⋅ s						
ス	トーク	ス	St	1 St $=1 \text{ cm}^2/\text{s}=10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$						
ガ	ウ	ス	G	1 G 10 <sup>-4</sup> T						
л	ルステッ	F	0e	$1 \text{ Oe} (1000/4 \pi) \text{A/m}$						
7	クスウェ	N	Mx	1 Mx 10 <sup>-8</sup> Wb						
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb } = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$						
ホ		F	ph	$1 \text{ ph}=10^{4} \text{lx}$						
ガ		ル	Gal	1 Gal =1cm/ $s^2$ =10 <sup>-2</sup> m/ $s^2$						

	表10. 国際単位に属さないその他の単位の例								
	4	名称		記号	SI 単位であらわされる数値				
+	ユ	y	1	Ci	1 Ci=3. $7 \times 10^{10}$ Bq				
$\boldsymbol{\nu}$	$\sim$	トゲ	~	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$				
ラ			F	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy				
$\boldsymbol{\nu}$			4	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv				
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm				
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$				
2	ヤン	スキ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$				
7	x	N	111		$1 \text{ fermi=1 } \text{fm}=10^{-15} \text{m}$				
*-	ートル	系カラッ	/ ŀ		1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg				
F			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa				
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa				
力		y	-	cal					
3	7	17	~		$1 \text{ u} = 1 \text{ um} = 10^{-6} \text{ m}$				

