

JAERI-M
89-118

高温工学試験研究炉におけるウラン濃縮度
配分及び反応度調整材の最適設計

1989年9月

山下 清信・新藤 隆一・村田 勲
丸山 創・徳原 一美*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

高温工学試験研究炉におけるウラン濃縮度配分及び反応度調整材の最適設計

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

山下 清信・新藤 隆一・村田 勲

丸山 創・徳原 一実*

(1989年8月7日受理)

日本原子力研究所が開発を進めている高温工学試験研究炉(熱出力30MW)の原子炉出口冷却材温度の達成目標値は950℃と極めて高く、燃料の健全性を保持する必要性から燃料最高温度を極力低くすることが必要である。このため、ウラン濃縮度配分の調整による径方向出力分布及び軸方向温度分布の平坦化により、原子炉出口冷却材温度が950℃の条件下で燃料最高温度が制限値以下となる燃料配分を系統的に定めた。反応度調整材の諸元は、燃焼を通して余剰反応度が必要最小限となるように定め、制御棒の挿入により出力分布が歪まないようにした。本報は、この燃料最高温度低減のための系統的な燃料配分の設計手順及び設計結果について述べる。

Optimization of Uranium Isotope Distribution and Burnable Poison of
High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR)

Kiyonobu YAMASHITA, Ryuichi SHINDO
Isao MURATA, Soh MARUYAMA and Kazumi TOKUHARA*

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken
(Received August 7, 1989)

The optimization of uranium isotope distribution and burnable poison of the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) with the thermal power of 30MW has been done to achieve the reactor outlet coolant temperature of 950°C. The uranium isotope distribution is adjusted to obtain the optimal power distribution with which the fuel temperature is minimized. The burnable poison is used to reduce the excess reactivity so that the power distribution is not disturbed through the control rod inserted in core. The core of which the maximum fuel temperature is kept under the limited temperature has been constructed from this optimization. This report presents the optimization process of uranium isotope distribution and burnable poison and its result.

Keywords : HTGR, Nuclear Design, Nuclear Computer Code, DELIGHT,
CITATION, TWOTRAN, Burnable Poison, Fuel Loading Design, Fuel
Design, Core Design, Reactivity Control, LEU

* Fuji Electronic Co., Ltd.

目 次

1. 概 要	1
2. 炉心特性解析コード及びモデル	4
2.1 燃料格子特性計算及び反応度調整材格子特性計算	4
2.2 制御棒格子計算	5
2.3 炉心核特性計算	5
2.4 炉心熱流力計算	5
3. 燃料配分の最適化のための設計手順	17
4. 基本的なウラン濃縮度配分の決定	21
4.1 炉内平均ウラン濃縮度	21
4.2 径方向ウラン濃縮度配分の検討	22
4.3 軸方向ウラン濃縮度配分の検討	23
5. 反応度調整材の装荷	28
5.1 反応度収支計画	28
5.2 反応度調整材諸元の選定	30
6. ウラン濃縮度配分の微調整	38
7. 主要炉心特性	42
8. 結 論	51
謝 辞	51
参考文献	52
付録 A 炉停止余裕の簡便評価法	53
付録 B 反応度調整材諸元選定のための格子燃焼特性計算結果	55
付録 C ウラン濃縮度種類数の削減	66

Contents

1. Outline	1
2. Calculation code and model	4
2.1 Fuel cell-and burnable poison(BP) cell calculation	4
2.2 Control rod cell calculation	5
2.3 Reactor core calculation	5
2.4 Thermalhydraulic calculation	5
3. Fuel loading design method	17
4. Determination of fundamental uranium isotope distribution	21
4.1 Core average uranium enrichment	21
4.2 Radial uranium isotope distribution study	22
4.3 Axial uranium isotope distribution study	23
5. Burnable poison(BP) loading	28
5.1 Reactivity control plan	28
5.2 Determination of BP Specification	30
6. Fine adjustment of uranium isotope distribution	38
7. Main reactor characteristics	42
8. Conclusion	51
Acknowledgement	51
References	52
Appendix A Simple method for shutdown margin evaluation	53
Appendix B Cell calculation result for burnable poison design	55
Appendix C Reduction of number of uranium enrichments	66

1. 概 要

現在日本原子力研究所では、高温ガス炉の技術基盤の確立と高度化のための試験研究並びに、高温に関する先端的基礎研究を実施する目的で高温工学試験研究炉（HTTR:High Temperature Engineering Test Reactor）の開発を進めている。HTTRの主要諸元を表1.1に、原子炉の縦断面図を図1.1に示す。本原子炉には、燃料として被覆粒子燃料を、冷却材としてヘリウムを使用し、中性子の減速材として黒鉛を使用している。炉心内の流却材の流れは下向きである。定格運転時の原子炉出口冷却材温度は850℃であり、高温ガス炉の基盤技術の確立と高度化の研究の1つとして行う高温試験運転時の原子炉出口冷却材温度は950℃である。高温試験運転時における燃料最高温度が高い設計では、燃料からの核分裂生成物の放出量が増大したり、燃料体の健全性を損う恐れがある。このため、高温試験運転を行うには、ウラン濃縮度及び反応度調整材を調整して燃料配分の最適化を図り、燃料最高温度を低減する必要がある。そこで、高温ガス炉の燃料最高温度低減のための系統的な燃料配分の設計手法に基づき、軸方向と径方向のウラン濃縮度配分の調整を行い更に適切な諸元の反応度調整材（BP: Burnable Poison）の選定を行った。選定に当たっては、炉停止余裕が十分に確保されており、且つ燃料最高温度を十分に低くすることができることを確認した。本報では、この設計手法及び設計結果について報告する。

燃料最高温度低減の燃料配分の基本的な方針は、軸方向及び径方向ウラン濃縮度配分を調整することによって炉内の出力分布を調整し、反応度調整材を用いて余剰反応度を必要最小限に抑え、制御棒の炉心内への挿入度を極力小さくし軸方向出力分布の歪を極力小さくすることである。軸方向のウラン濃縮度配分の調整は炉心上部の出力を高くし炉心下部の出力を低くすることにより軸方向の温度分布を平坦化することを主眼としており、径方向のウラン濃縮度配分の調整は、各々のチャンネルの積分出力を平均化することにより各々のチャンネルの燃料最高温度をほぼ同じくすることを主眼としている。各々のチャンネルの積分出力の平均化は、径方向出力ピーキングを指標とし、この値を平均化するように行う。ウラン濃縮度配分は基本調整及び微調整の2段階から成る。まず、ウラン濃縮度配分及び反応度調整材（BP: Burnable poison）から定まる燃料配分の最適化過程に用いる燃料温度にはノミナル値を用いた。さらに、最終的に得られた最適な燃料配分については設計誤差を考慮したシステムテック燃料最高温度を求め、この値が制御値を越えていないことを確認することとした。本設計によって得られた基準炉心状態の炉停止余裕は11.3% $\Delta K/K$ であり、また、システムテック燃料最高温度は1490℃以下であり制限値の1495℃*を下まわっている。また、燃焼可能日数は660日である。

2章に燃料配分の設計に用いる炉心特性解析コードについて述べ、3章に燃料配分の最適化のための設計手順を示す。ウラン濃縮度配分の基本調整を4章に示し、BP諸元の選定方法について5章に示す。BP諸元の選定によりウラン濃縮度配分への影響を明らかにした後に行うウラン濃縮度配分の微調整の検討を6章に示す。7章では本設計より得られ

た最適燃料配分からなる炉心の主要炉心特性を示す。

表 1.1 高温工学試験研究炉の主要諸元

原子炉熱出力	30 MW
原子炉入口／出口冷却材温度	395 / 850 ~ 950 °C
1次系冷却材圧力	4 MPa
炉心有効高さ	2.9 m
炉心等価直径	2.3 m
出力密度	2.5 MW / m ³
燃料	二酸化ウラン・被覆粒子／黒鉛分散型
ウラン濃縮度	3 ~ 10 wt% (平均 6 wt%)
燃料体形式	ブロック型
原子炉圧力容器	鋼製 (2 1/4 Cr-1Mo 鋼)
主冷却回路数	1 ループ (中間熱交換器及び加圧水冷却器)

* 熱的制限値の 1495 °C は、燃料粒子被覆層の有意な破損及び著しい劣化を生じさせないこと及び運転時の異常な過渡変化時に燃料最高温度が 1600 °C を超えないようにすることから定めている。

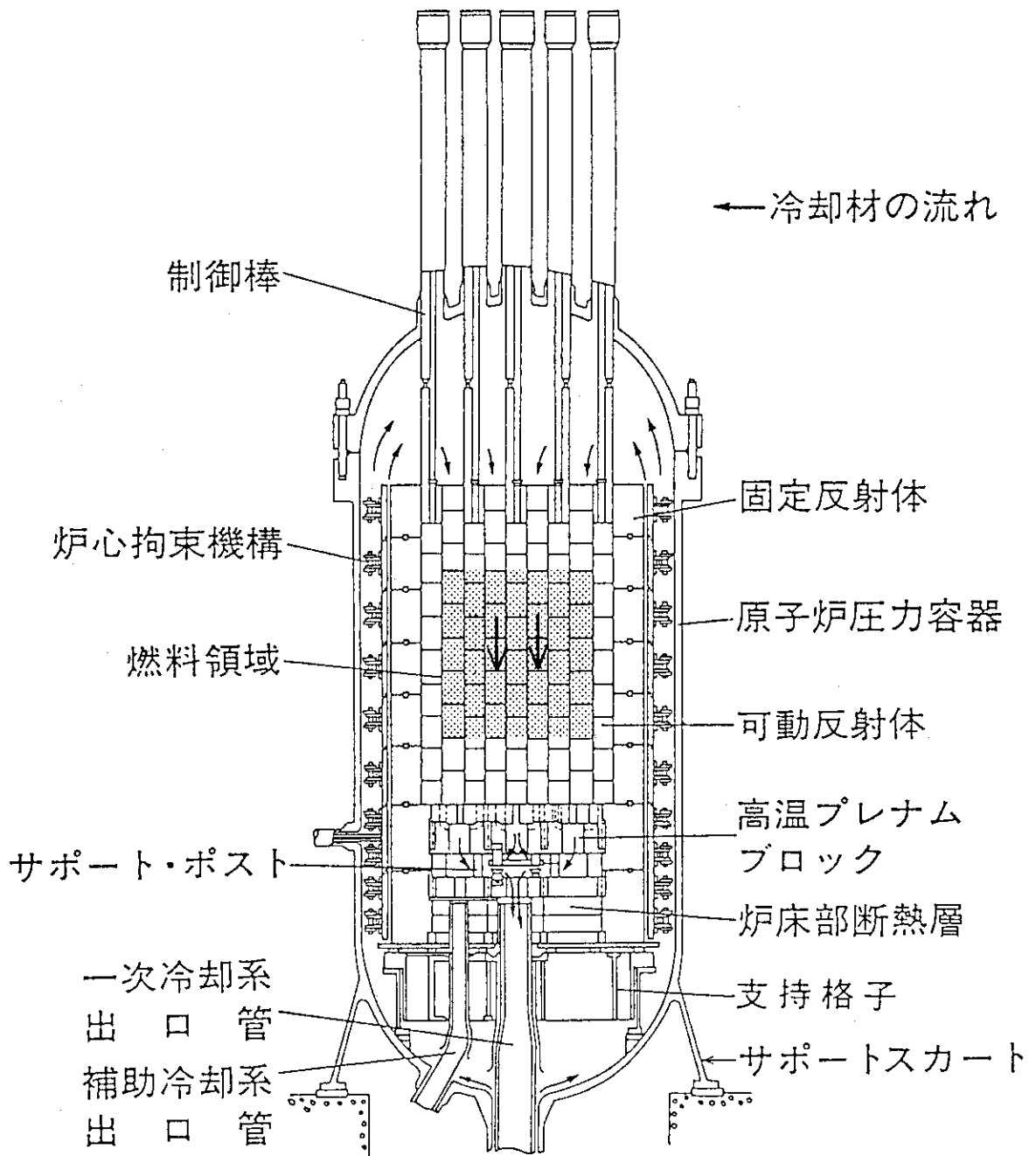


図 1.1 高温工学試験研究炉原子炉縦断面図

2. 炉心特性解析コード及びモデル

炉心特性解析は、核特性解析及び熱流力特性解析から成る。核特性解析に用いる計算コード及び計算フローを図 2.1 に示す。また、熱流力特性解析に用いる計算コード及び計算フローを図 2.2 に示す。

核特性解析における燃料格子特性計算及び B P 格子特性計算には、高温ガス炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6, 7,^(1, 2) 制御棒格子計算には、2次元中性子輸送計算コード TWOTRAN-2,⁽³⁾ 炉心特性計算には、中性子拡散計算コード CITATION⁽⁴⁾ 及び CITATION-1000 VP を使用する。燃料格子特性計算は、炉内の平均ウラン濃縮度の設定に、B P 格子特性計算は B P 棒の径及び濃度の最適諸元をサーベイするために行う計算である。また、これらの燃料格子特性計算及び B P 格子特性計算は制御棒格子計算及び炉心核特性計算に必要とする群定数の作成にも用いる。制御棒格子計算は制御棒案内カラム内に制御棒が挿入されている状態の中性子束分布を求め、この分布を用いてこの状態の平均群定数を作成する計算である。炉心核特性計算には、2次元円柱モデル (2D・RZ) 及び3次元三角柱メッシュモデル (3D・TRZ) を用いる。前者のモデルを炉内のウラン濃縮度配分の基本調整に使用し、後者のモデルを微調整に使用する。熱流力特性解析における燃料温度計算には円環状燃料の温度分布評価用コード TEMDIM^(5, 6) を使用し、炉内有効流量評価には FLOWNET⁽⁷⁾ を使用する。燃料格子特性計算、B P 格子特性計算、制御棒格子計算、炉心核特性計算及び熱流力特性計算に用いた計算コード及びモデルについて以下に述べる。

2.1 燃料格子特性計算及び反応度調整材格子特性計算

DELIGHT-6, 7 の計算フローを図 2.3 に示し、燃料格子特性計算及び B P 格子特性計算の速中性子群及び熱中性子群の群構造を各々表 2.1 及び表 2.2 に示す。速中性子群のエネルギーの上限は 10 MeV としており、速中性子領域と熱中性子領域の境界エネルギーは 2.38eV としている。中性子スペクトル計算は 111 群の多群で行い、燃料格子及び B R 格子の計算は 40 群の少数群で行う。この少数群の群定数を更に縮約し、炉心核特性計算に用いる縮約群の群定数を作成する。減速材である黒鉛による中性子散乱効果の計算には黒鉛の結晶構造を考慮したモデルを使用している。また、共鳴吸収計算には被覆燃料粒子と燃料要素によって生じる燃料の 2 重非均質効果を考慮して行っている。燃料格子の計算モデルを図 2.4 に示す。燃料格子の計算モデルは、燃料棒及び冷却材ヘリウムの周辺に 1 燃料棒当りの黒鉛ブロックの黒鉛 (等価黒鉛) を配置した円環状モデルである。B P 格子の計算モデルを図 2.5 に示す。B P 格子の計算モデルは、B P 棒の周辺に燃料格子特性計算より得られた均質化した燃料の群定数を配置した円環状モデルである。

2.2 制御棒格子計算

制御棒格子計算は、制御棒が制御棒案内ブロック内に挿入されている状態の中性子束分布を求め、この中性子束分布を重みとして制御棒挿入状態の黒鉛ブロック内の平均群定数を作成する計算である。この計算には、2次元中性子輸送計算コードTWO TRAN-2を用い、計算は S_4P_1 の条件で行っている。計算メッシュモデルを図2.6に示す。計算メッシュモデルは、制御棒の挿入状態が円対称でないことからXYメッシュモデルを使用し、各々の吸収体部の形状を多数の微小長方形で模擬している。モデルの吸収体部の外表面積は、制御棒の中性子吸収材の表面積とほぼ一致するようにしている。

2.3 炉心核特性計算

炉心核特性計算では、燃料格子特性計算、BP格子特性計算及び制御棒格子計算より得られた燃料体、反射体並びに制御棒の群定数及び炉心形状データを用いて、熱流計算に用いる炉内出力分布を求めると共に原子炉の炉停止余裕及び燃焼に伴う反応度変化の検討をも行う。燃料格子特性計算及びBP格子特性計算に用いる炉心内の燃料温度及び減速材温度を図2.7及び図2.8に示す。前者は、原子炉出口冷却材温度が850℃の定格運転状態に対応し、後者は、原子炉出口冷却材温度が950℃の高温試験運転状態に対応している。計算コードとしては、中性子拡散コードCITATION⁽⁴⁾及びこれをベクトル化したCITATION-1000VPを用いる。径方向及び軸方向の基本的なウラン濃縮度配分の決定には2次元RZモデルを用いる。ウラン濃縮度配分の微調整に用いる3次元三角柱メッシュの径方向断面図を図2.9に、また軸方向断面模式図を図2.10に示す。3次元三角柱メッシュモデルでは、1燃料体ブロックを径方向に6コの三角形に分割し軸方向に4コの三角柱に分割したメッシュモデルを用いている。

2.4 炉心熱流計算

炉心熱流計算は、図2.2に示すように炉内冷却材流量配分解析とその結果を用いる燃料温度解析から成る。

冷却材流量配分解析は、炉内流動解析コードFLOWNETにより、炉内の流路を等価な流路長、流路断面積、水力等価直径を有する1次元流路でモデル化し、さらに流路間を等価な熱伝導率、伝導距離等を有する伝熱路で結合した流路網モデルを用いて行う。

燃料温度解析は、流量配分解析により得られた冷却材流量及び核設計において得られた出力分布を入力として、燃料温度解析コードTEM DIMを用いて行う。計算では、炉心を複数の円筒形状チャンネルで代表し、その2次元温度分布、熱応力、熱変形量を与えられた境界条件のもとで燃料最高温度を算出する。

表 2.1 速中性子群・群構造 (1 / 2)

群			レザジー (下限)	エネルギー (下限, eV)	群			レザジー (下限)	エネルギー (下限, eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
1	1	1*	0.25	7.79×10^6	3	10	35	8.75	1.59×10^3
		2	0.50	6.07×10^6			36	9.00	1.23×10^3
		3	0.75	4.72×10^6			37	9.25	961
		4	1.00	3.68×10^6		11	38	9.50	748
		5	1.25	2.87×10^6			39	9.75	583
	2	6	1.50	2.23×10^6		12	40	10.00	454
		7	1.75	1.74×10^6			41	10.25	354
	3	8	2.00	1.35×10^6		13	42	10.50	275
		9	2.25	1.05×10^6			43	10.75	215
		10	2.50	8.21×10^5		14	44	11.00	167
		11	2.75	6.39×10^5			45	11.25	130
	4	12	3.00	4.98×10^5		15	46	11.50	101
		13	3.25	3.88×10^5			47	11.75	78.9
		14	3.50	3.02×10^5			48	12.00	61.4
		15	3.75	2.35×10^5			49	12.25	47.9
		16	4.00	1.83×10^5			50	12.50	37.3
2	5	17	4.25	1.43×10^5	16	51	12.75	29.0	
		18	4.50	1.11×10^5		52	13.00	22.6	
	6	19	4.75	8.65×10^4	17	53	13.25	17.6	
		20	5.00	6.74×10^4		54	13.50	13.7	
		21	5.25	5.25×10^4	18	55	13.75	10.68	
		22	5.50	4.09×10^4		56	14.00	8.32	
	7	23	5.75	3.18×10^4	19	57	14.25	6.48	
		24	6.00	2.48×10^4		58	14.50	5.04	
		25	6.25	1.93×10^4		59	14.75	3.93	
		26	6.50	1.50×10^4	20	60	15.00	3.06	
		27	6.75	1.17×10^4		61	15.25	2.38	
	8	28	7.00	9.12×10^3	62	62	15.50	1.86	
		29	7.25	7.10×10^3		63	15.75	1.44	
		30	7.50	5.53×10^3		64	16.00	1.125	
	9	31	7.75	4.31×10^3		65	16.25	0.876	
		32	8.00	3.36×10^3		66	16.50	0.683	
		33	8.25	2.61×10^3		67	16.75	0.532	
		34	8.50	2.04×10^3		68	17.00	0.414	

* 1群の上限エネルギーは 10^7 eVである。

- 1) 縮約群
- 2) 少数群
- 3) 多群

表 2.2 熱中性子群・群構造 (2 / 2)

群			エネルギー (上限, eV)	巾 (eV)	群			エネルギー (上限, eV)	巾 (eV)
1)	2)	3)			1)	2)	3)		
6	40	1	0.002	0.002	4	28	26	0.55	0.1
		2	0.004	0.002			27	27	0.65
	39	3	0.006	0.002		27	28	0.75	0.1
		4	0.008	0.002			29	29	0.85
	38	5	0.015	0.007		26	30	0.95	0.1
		6	0.025	0.01			31	31	0.99
	37	7	0.035	0.01		25	32	1.01	0.02
		8	0.045	0.01			33	33	1.03
	36	9	0.055	0.01		24	34	1.045	0.015
		10	0.065	0.01			35	35	1.055
	35	11	0.075	0.01		24	36	1.065	0.01
		12	0.085	0.01			37	37	1.08
	5	34	13	0.105		0.02	23	38	1.10
14			0.135	0.03	39	39		1.16	0.06
33		15	0.165	0.03	22	40	1.24	0.08	
		16	0.195	0.03		41	41	1.35	0.11
32		17	0.225	0.03	21	42	1.45	0.1	
		18	0.255	0.03		43	43	1.55	0.1
31		19	0.285	0.03	21	44	1.65	0.1	
		20	0.295	0.01		45	45	1.75	0.1
30		21	0.305	0.01	21	46	1.85	0.1	
		22	0.335	0.03		47	47	1.95	0.1
29		23	0.35	0.015	21	48	2.05	0.1	
		24	0.39	0.04		49	49	2.15	0.1
		25	0.45	0.06		50	2.38	0.23	

- 1) 縮約群
- 2) 少数群
- 3) 多群

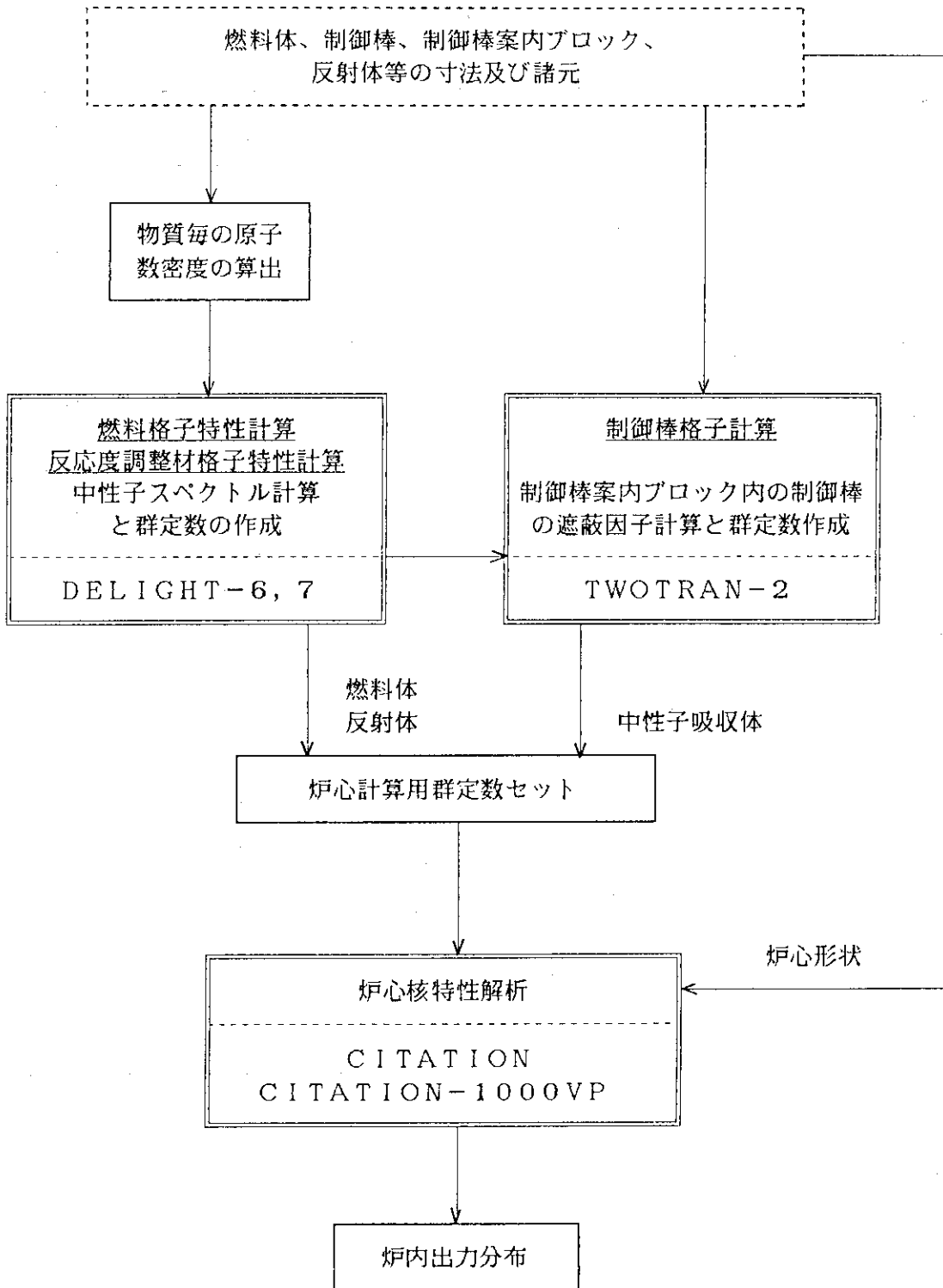


図 2.1 炉心核特性解析手順

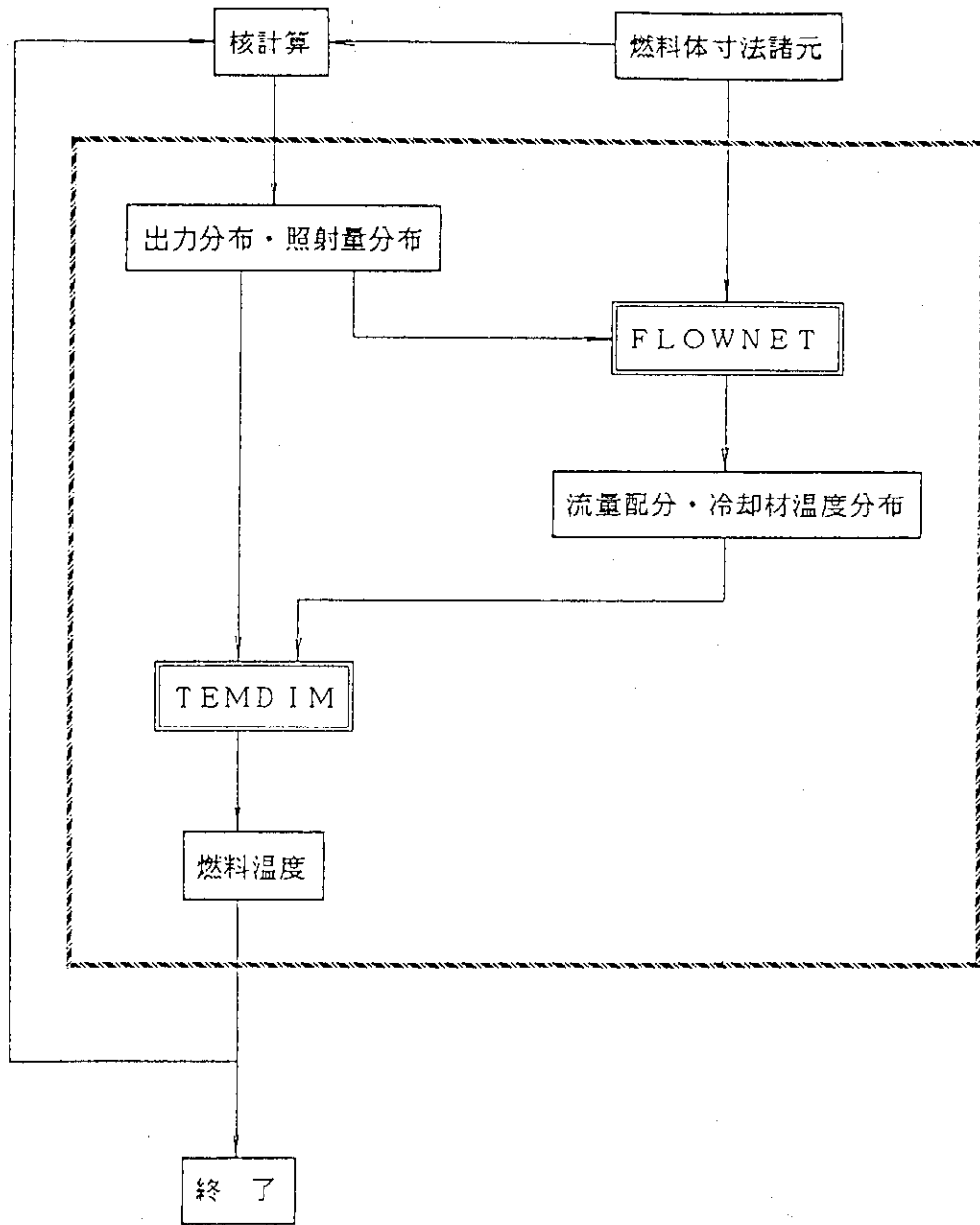


図 2.2 炉心熱流計算手順

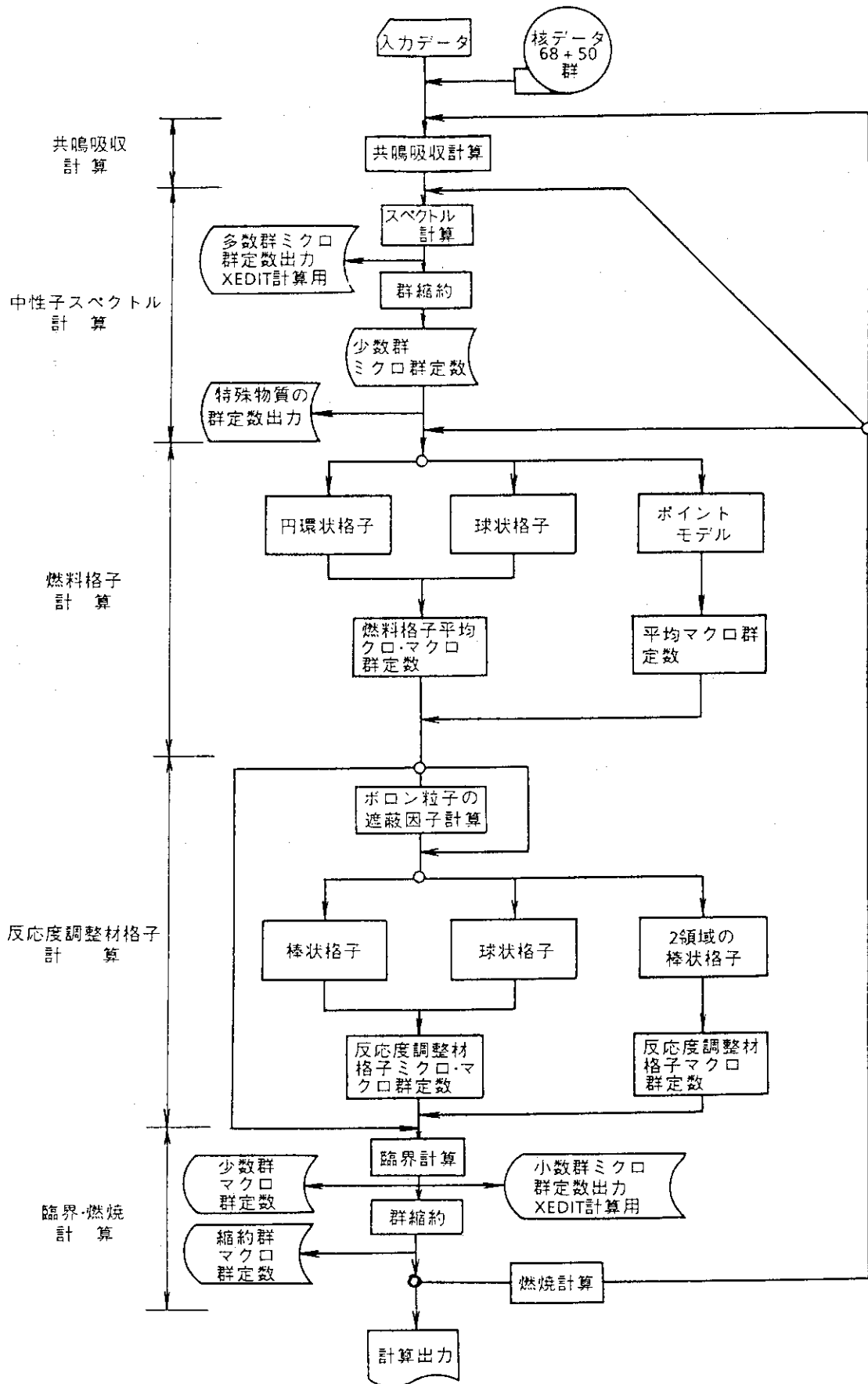


図 2.3 DELIGHT-6,7 の計算フロー

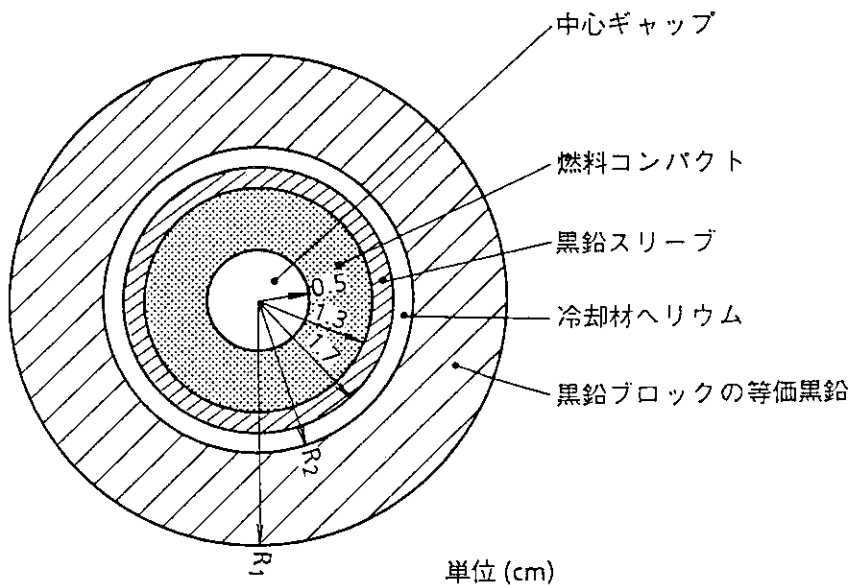


図 2.4 燃料格子特性計算モデル
 燃料棒本数が33ピンの場合 $R_1 = 3.41 \text{ cm}$, $R_2 = 2.0941 \text{ cm}$
 " 31ピン " $R_1 = 3.5183 \text{ cm}$, $R_2 = 2.0970 \text{ cm}$

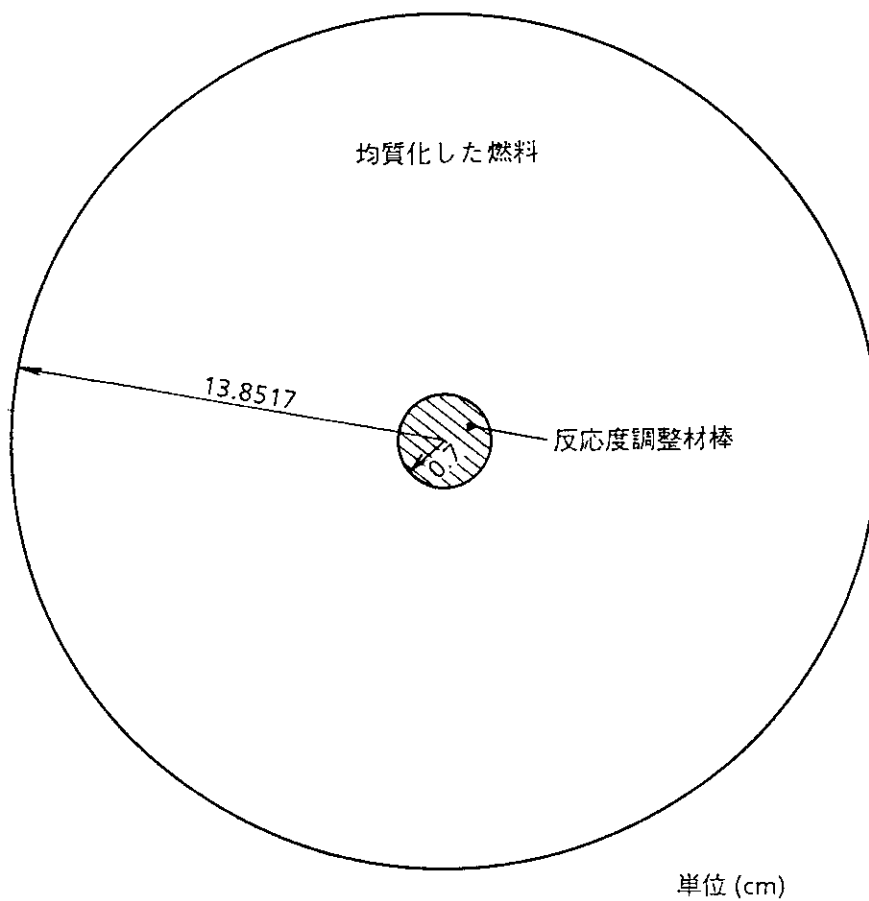


図 2.5 B P 格子特性計算モデル
 (燃料体中2本装荷されている場合)

上部 可動 反射体	$T_m = 700 \text{ } ^\circ\text{K}$		
	$T_f = 1023 \text{ } ^\circ\text{K}$ $T_m = 800 \text{ } ^\circ\text{K}$		
炉 心	$T_f = 1023 \text{ } ^\circ\text{K}$ $T_m = 900 \text{ } ^\circ\text{K}$	$T_m = 800 \text{ } ^\circ\text{K}$	$T_m = 800 \text{ } ^\circ\text{K}$
	$T_f = 1323 \text{ } ^\circ\text{K}$ $T_m = 1000 \text{ } ^\circ\text{K}$		
	$T_f = 1373 \text{ } ^\circ\text{K}$ $T_m = 1100 \text{ } ^\circ\text{K}$	$T_m = 1000 \text{ } ^\circ\text{K}$	$T_m = 900 \text{ } ^\circ\text{K}$
下部 可動 反射体	$T_m = 1200 \text{ } ^\circ\text{K}$		
炉 心		側 部 可 動 反 射 体	固 定 反 射 体

炉 心 中 心

・ T_f = 燃料温度, ・ T_m : 減速材温度

図 2.7 炉心核特性計算用炉心温度 (850°C)

上部 可動 反射体	$T_m = 700 \text{ K}$		
炉心	$T_f = 1083 \text{ K}$ $T_m = 800 \text{ K}$		
	$T_f = 1303 \text{ K}$ $T_m = 900 \text{ K}$	$T_m =$	$T_m =$
	$T_f = 1443 \text{ K}$ $T_m = 1100 \text{ K}$	900 K	800 K
	$T_f = 1443 \text{ K}$ $T_m = 1200 \text{ K}$	$T_m =$	$T_m =$
下部 可動 反射体	$T_m = 1300 \text{ K}$	1100 K	900 K
	炉心	側部 可動 反射体	固定 反射体

炉心中心

・ T_f = 燃料温度, ・ T_m : 減速材温度

図 2.8 炉心核特性計算用炉心温度 (950°C)

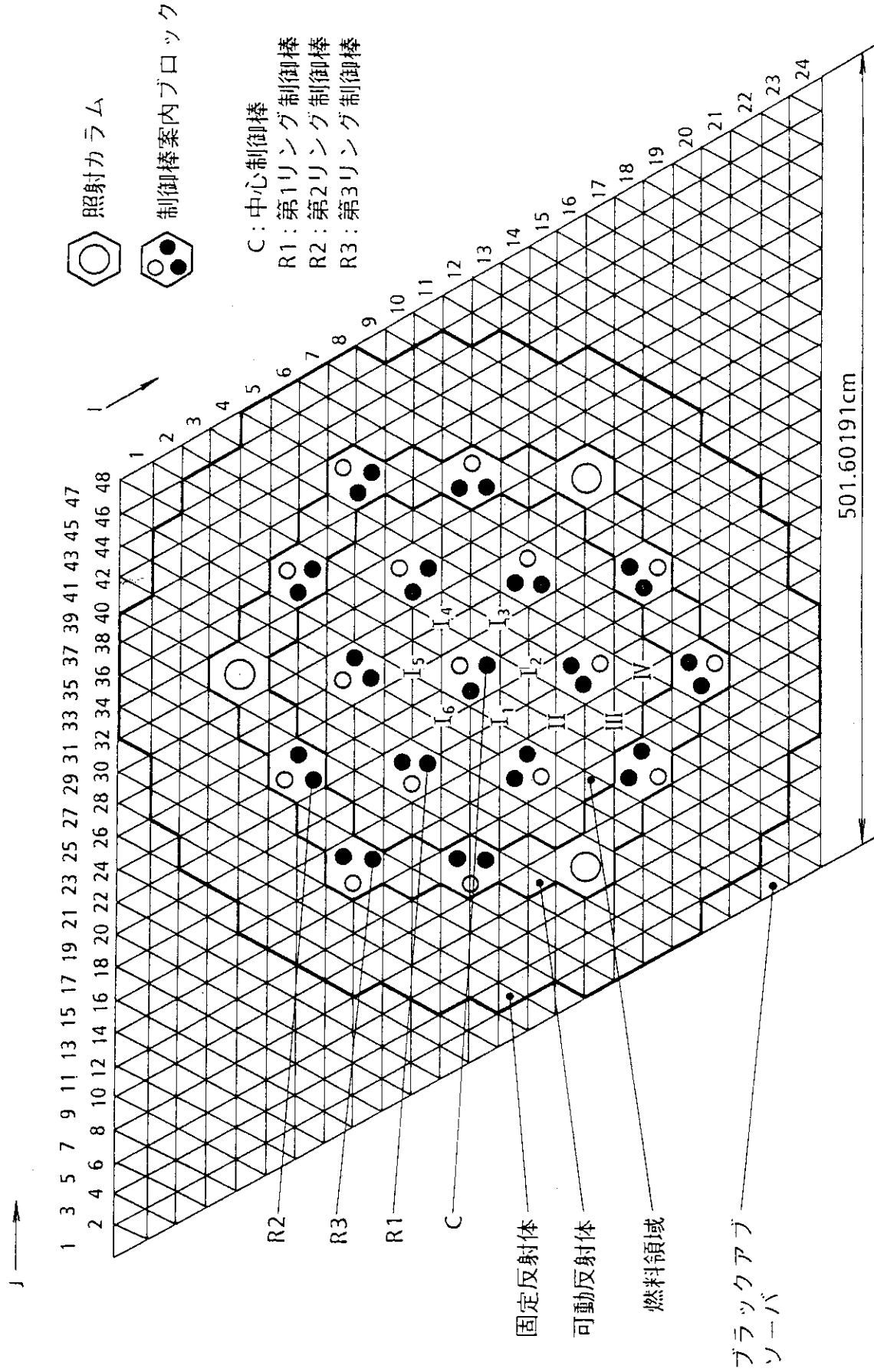


図 2.9 全炉心径方向メッシュモデル

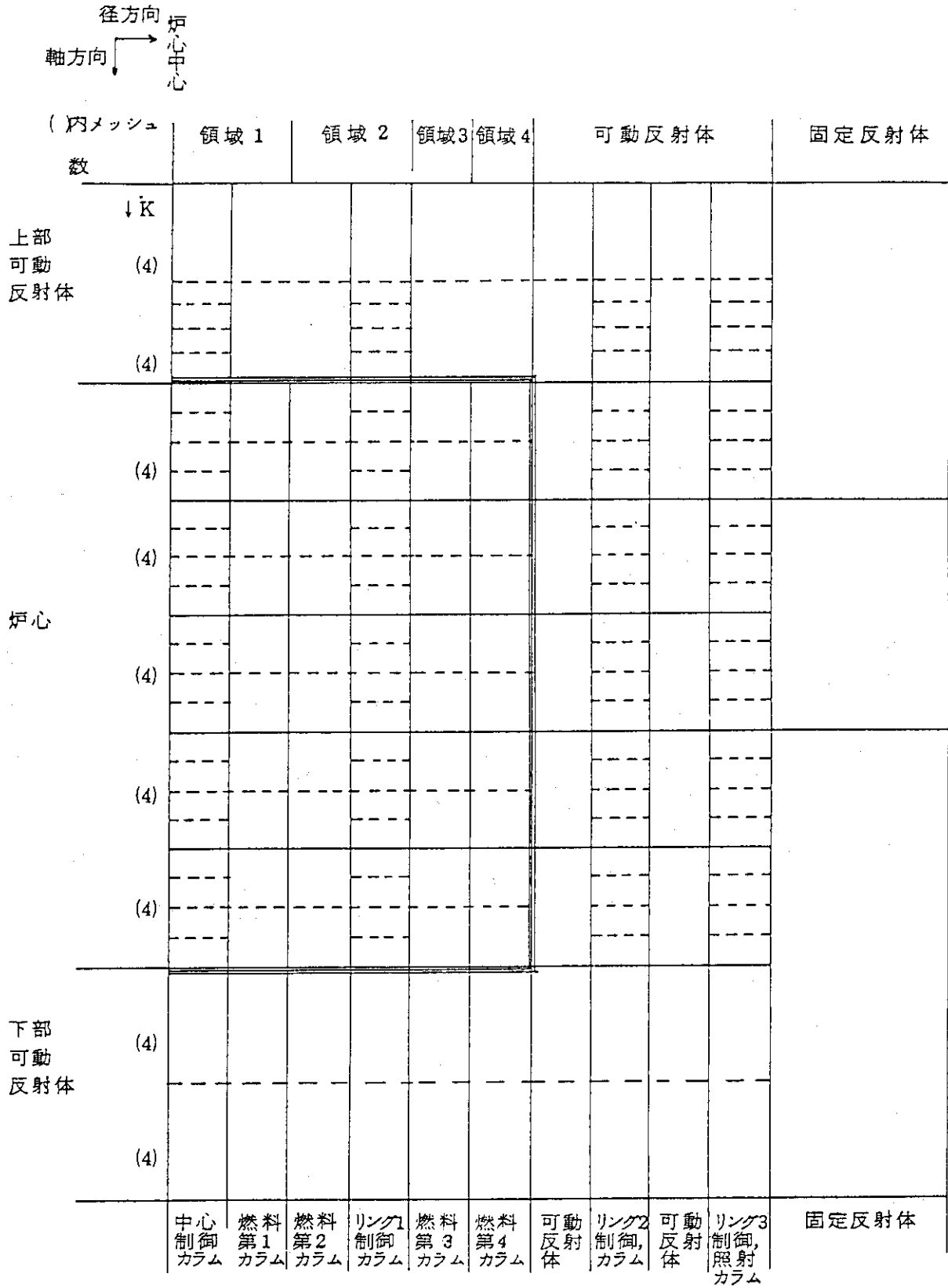


図 2.10 炉心モデル軸断面模式図 (CITATION, 3D-T・Z)

3. 燃料配分の最適化のための設計手順

炉心設計では、炉心寸法、熱出力、原子炉出口冷却材温度、燃料形状、燃焼日数及び炉心平均燃焼度等の原子炉の利用目的から定まる前提条件を満足し、且つ核特性、熱流力特性及び機械特性に関する安全性が確保される必要がある。燃料配分の最適化のための設計では、これらの特性から炉心設計と直接関係する特性として、制御棒系による低温停止が可能であること及び燃料最高温度を制限値以下に保持し更に極力低くすることを設計における主な要求として選んだ。これらの要求を満たすため炉内平均ウラン濃縮度、ウラン濃縮度配分の調整及び適切なB P諸元の選定等に関する燃料配分の最適化の設計手順を図3.1に示す。この燃料配分の設計手順では、燃焼日数は平均ウラン濃縮度の調整で、出力分布はウラン濃縮度配分の調整で、原子炉の過剰反応度調整は適切なB P諸元の選定により行うことにしている。設計手順の各々の設計ステップの内容を以下に述べる。

○ステップ1

前提条件にある燃焼日数或いは炉心平均燃焼度を満たすよう炉内平均ウラン濃縮度を燃料格子特性計算結果より定める。

○ステップ2及び3

炉内平均ウラン濃縮度を一定に保ち径方向及び軸方向のウラン濃縮度配分を定める。この場合、径方向には中心から外周に向ってウラン濃縮度を高くし径方向出力ピーキングが平坦になるように、また軸方向には炉心上部から下部に向ってウラン濃縮度を低くし軸方向燃料温度分布が平坦になるように炉内のウラン濃縮度配分を最初に仮設定する。そのウラン濃縮度配分を仮設定した炉心を仮設定ケースとする。この仮設定ケースをベースに、径方向出力ピーキングを更に平坦化するよう径方向ウラン濃縮度配分を調整し、また、軸方向燃料温度分布を更に平坦化するよう軸方向ウラン濃縮度配分を調整する。このステップ2及び3において、基本的なウラン濃縮度配分の決定を行う。

○ステップ4

仮設定した炉心内平均ウラン濃縮度及びウラン濃縮度配分比に基づいて、炉心の余剰反応度が過大になるのを防ぐと同時に燃焼期間を通して必要過剰反応度が確保されるようにB P諸元の選定を行う。B P諸元の最適化はB P棒の外径寸法及び天然ボロン濃度について行う。

○ステップ5

ステップ2,3で仮設定したウラン濃縮度配分及びステップ4から得られたB P諸元に基づいて炉内燃料配分を定める。

○ステップ6

ステップ5で定めた燃料配分に基づく炉心が十分に原子炉停止可能な炉心であるかを確認し、所定の炉停止余裕が得られない場合には炉内平均濃縮度を低減して調節する。

○ステップ7及び8

熱流計算を含めた炉心特性計算を行い、燃料最高温度が制限値内に納っていることを確認する。燃料最高温度の低減が更に可能であればウラン濃縮度配分の微調整を行う。

○ステップ9

経済性の観点から、炉内ウラン濃縮度配分を見なおし、燃料最高温度及び原子炉停止余裕の悪化をまねかない範囲で濃縮度種類数の低減化を行う。

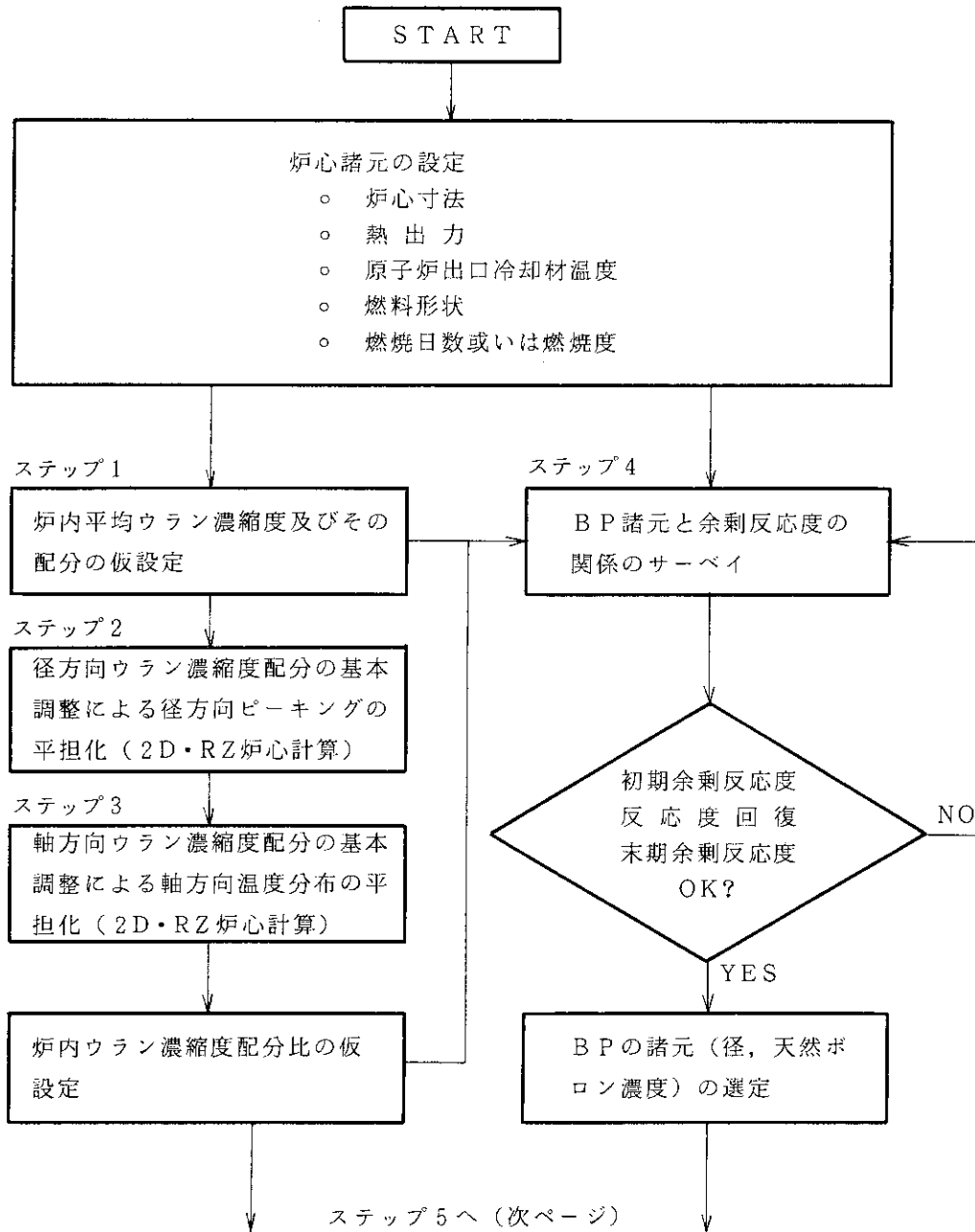


図 3.1 燃料配分の最適化の設計手順 (1 / 2)

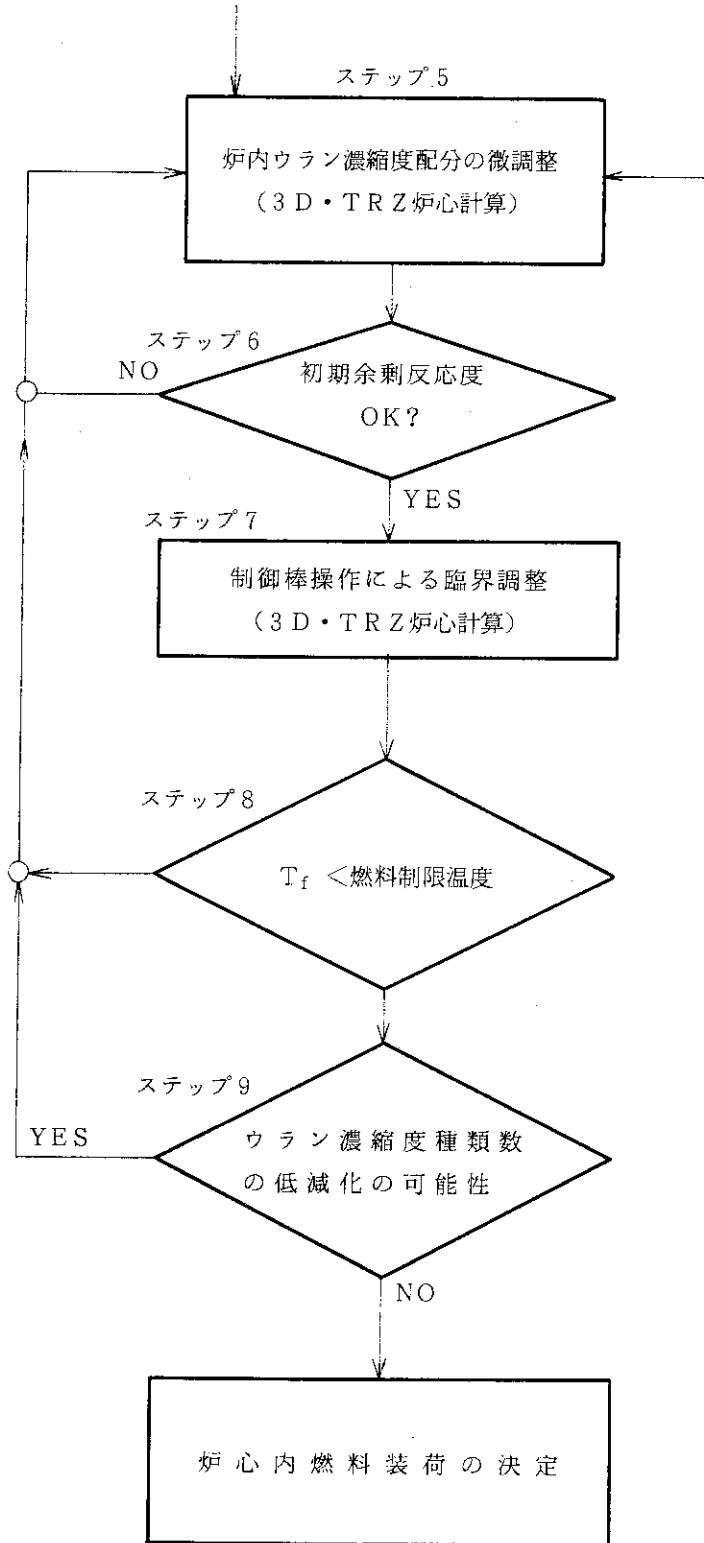


図 3.1 燃料装荷の最適化の設計手順 (2 / 2)

4. 基本的なウラン濃縮度配分の決定

所定の原子炉平均燃焼度或いは燃焼日数を満たすよう、燃料格子特性計算より適切な炉心平均ウラン濃縮度の概略値を求める。次に、炉心平均ウラン濃縮度を維持し、燃料最高温度を低くできる炉内出力分布を得るため径方向には炉心外周部が、軸方向では炉心上部がウラン濃縮度が高い燃料配分を仮設定する。更に、この仮設定の燃料配分を基に、径方向或いは軸方向のウラン濃縮度配分比を変えた炉心を設定し、それらの炉心について炉心核計算を行い、炉内ウラン濃縮度配分の基本調整を行う。BPによる出力分布への効果を考慮するため、とりあえず従来の設計例を考慮して天然ボロン濃度が2.5 wt %及び3.5 wt %のBPを各々1, 4, 5段及び2, 3段の燃料体内に装荷することとした。基本調整は、炉内のウラン濃縮度配分を極端に変更しない限り、以下に示すような出力密度がウラン濃縮度eにほぼ比例する関係を用いて行う。

$$P = \alpha N \sigma_f \bar{\phi} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$N = e \rho A / 235 \quad \dots\dots\dots(2)$$

上記の関係より下記の出力密度と濃縮度が比例関係に有ることが得られる。

$$P = Ce \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{但し } C = \frac{\alpha \sigma_f \bar{\phi} \rho A}{235} \quad \dots\dots\dots(4)$$

- P : 出力密度 (W/cm³)
- α : 1回の核分裂で発生する熱量 (J/コ)
- σ_f : ミクロ核分裂断面積 (barn)
- $\bar{\phi}$: 中性子束 (コ/cm²・sec)
- N : ウラン235の原子数密度 (コ/(barn・cm))
- e : ウラン濃縮度
- ρ : ウラン密度 (g/cm³)
- A : アボガトロ数 (個/mol)

径方向の基本的なウラン濃縮度配分の決定は、出力密度と比例関係にある径方向出力ピーキングを指標として行い、軸方向の基本的なウラン濃縮度配分決定は、軸方向燃料温度分布を指標としておこなう。HTTRの設計で行った炉内平均ウラン濃縮度の求め方を4.1節に示し、径方向及び軸方向のウラン濃縮度配分比の基本調整を各々4.2節及び4.3節に示す。

4.1 炉内平均ウラン濃縮度

燃料体内のウラン原子数に対する炭素原子数の比をNc/Nuと表わし、低濃縮ウランを

用いる燃料では、この比が約300程度であることがウラン燃料の有効利用の観点から望しいとされている⁽⁸⁾。このため、本検討では、1燃料体ブロック当りの燃料棒本数が33ピン及び31ピンの燃料体のNc/Nu比は各々305及び329としている。燃料コンパクト内の被覆燃料粒子充填率及び被覆燃料粒子の燃料核の直径は、双方の燃料で同じく、各々30V/o及び600μmである。Nc/Nuの設定後は、所期の燃焼度或いは燃焼日数の達成条件に基づいて必要な炉内平均ウラン濃縮度の仮設定を行う。燃料格子特性計算より得られた実効増倍率とウラン濃縮度及び燃焼日数の関係を図4.1に示す。この図を用いて、燃焼の末期に必要な余剰反応度（運転余裕等）及び予想される末期BP残存による実効増倍率の低下分を考慮した場合の燃焼日数とウラン濃縮度の関係を求める。これより得られた燃焼日数（燃焼度を含む）及びウラン濃縮度の関係を図4.2に示す。この図より、HTTRの燃焼日数を660日としていることから炉内平均ウラン濃縮度は5.5から6wt%程度であることがわかる。次節で述べる仮設定ケースの燃料配分では、炉内平均ウラン濃縮度は5.9wt%とする。

4.2 径方向ウラン濃縮度配分の検討

仮設定ケース及び径方向ウラン濃縮度配分を変化させたR1ケース及びR2ケースの径方向出力ピーキング $P_1 \cdot P_2$ 、燃料最高温度、実効増倍率 K_{eff} 等を表4.1に示す。軸方向のウラン濃縮度配分比は、上部燃料体から1.44、1.00、1.00、0.78、及び0.78の一定値を用いている P_1 及び P_2 、炉心の径方向出力分布を特徴づける量であり、各々のチャンネル出力の軸方向積分値に基づいて次式により計算する。

$$P_1 = \frac{\text{対象とするカラム内チャンネルの軸方向積分出力の平均値}}{\text{全チャンネルの軸方向積分出力の平均値}}$$

$$P_2 = \frac{\text{対象とするカラム内チャンネルの軸方向積分出力の最大値}}{\text{対象とするカラム内チャンネルの軸方向積分出力の平均値}}$$

径方向ピーキング $P_1 \cdot P_2$ は、これらの積で各カラムの最高出力チャンネルのピーキングを表している。仮設定ケースの燃料装荷法では、径方向出力ピーキングの平坦化を念頭において、径方向5カラムを3種類のウラン濃縮度領域に分割し各々の配分比を中心から0.75、0.85及び1.12とした。この燃料配分におけるカラム1, 2, 3及び4の径方向ピーキングは1.044, 1.076, 1.144, 及び1.087であり、その平均値は1.099である。また、平均値に対する最大値の比は1.04(1.144/1.099)である。そこで、径方向のウラン濃縮度領域数を3種に保持し径方向ピーキングが高いカラム3及び4のウラン濃縮度配分比を1.12から1.11に、また、径方向ピーキングが低いカラム1のそれを0.75から0.78にしたのがR1の装荷ケースである。仮設定ケースとR1のカラム3のウラン濃縮度配分比の比が0.991(1.11/1.12)であるのに対して径方向ピーキングの比は0.988(1.13/1.144)である、これら2個の比がほぼ同じであることから、炉内のウラン濃縮度配分を極端に変化しない限

り、ウラン濃縮度は径方向ピーキングに比例していることがわかる。R 1では径方向ウラン濃縮度領域数を3種としカラム3及び4を同じウラン濃縮度配分比にしているため、中性子束が低い炉心外周部のカラム4の径方向ピーキングが最も低くなっている。そこで、径方向ウラン濃縮度領域数を4領域にして、更に径方向出力ピーキングの平坦化を図ったのがR 2のウラン濃縮度配分である。この配分法では仮設定ケースに比べ、カラム3のウラン濃縮度比を低くし、カラム2及び4のウラン濃縮度比を高くして径方向ピーキングの平坦化を行っている。この燃料装荷法のカラム1, 2, 3及び4の径方向出力ピーキングは各々1.047, 1.094, 1.123及び1.107であり、その平均値は1.099である。R 2の燃料配分における平均値に対する最大値の比は1.02であり、これは仮設定ケースのウラン濃縮度配分のものよりも0.02低く、径方向ピーキングがより平坦化されていることがわかる。また、燃料最高温度は、この平坦化によって23℃低くなっている。径方向出力ピーキングの最大値は、燃焼に伴い炉心中心部へ移動することを考慮して、径方向ピーキングが炉心中心部で低いR 2の径方向ウラン濃縮度配分比を基本的な調整の最終値とし、微調整を行う場合のベースとした。

4.3 軸方向ウラン濃縮度配分の検討

仮設定ケース及び軸方向ウラン濃縮度配分を変化させたZ 1, Z 2, Z 3及びZ 4について得られた実効増倍率、燃料最高温度等を表4.2に示す。径方向ウラン濃縮度配分はすべてのケースに対して仮設定ケースのものと同じものを使用した。基本的な軸方向ウラン濃縮度配分の決定の過程で代表的ケースである仮設定ケース、Z 2, Z 4のウラン濃縮度配分法を選び、これらの配分法に対して得られた軸方向出力分布と温度分布を図4.3及び図4.4に示す。仮設定ケースの軸方向のウラン濃縮度配分比は、1段目が1.44, 2及び3段目が1.00, 4及び5段目が0.78で合計3種のウラン濃縮度領域から成り立っている。図4.3に示すように、仮設定ケースの燃料配分では3段目に燃料最高温度が発生している。この温度を低くするため、2段目のウラン濃縮度配分を0.02高め1.02とし、3段目のウラン濃縮度配分を0.02低くし0.98としたのがZ 2である。同じ考え方で、2段目のウラン濃縮度配分を0.1高め1.1とし3段目のウラン濃縮度配分を0.1低くし0.9とし軸方向ウラン濃縮度種類数を4種にしたのがZ 4である。図4.4より、Z 4の燃料最高温度が5段目に発生するようになり3段目から5段目の燃料温度分布がきわめて平坦化されていることがわかる。1, 2段目の燃料温度の平坦化は、炉心上部から制御棒が挿入されるので困難である。原子炉出口冷却材温度を950℃とした場合、Z 4の燃料最高温度は仮設定ケースのものより17℃改善されている。したがって、燃料最高温度が最も低くなるZ 4の軸方向ウラン濃縮度配分比を基本調整の最終値とし、微調整を行なう場合のベースとする。

表 4.1 ウラン濃縮度配分の径方向基本調整

ケース	燃料配分		実効増倍率 k _{eff}	径方向出力 (P ₁ , P ₂) ピーキング				燃料最高温度 T _f (°C)	レイノルズ数 R _e	炉心部 圧損 ΔP (kg/cm ²)	炉心有 効流量 W (%)	備 考
	ウラン濃縮度 (wt%)	径方向濃縮度比		コラム1	2	3	4					
仮設定ケース			0.9996	0.975	1.028	1.021	0.956	1328	2504	0.051	85.1	出口ガス温度 T ₀ = 950°C
			0.9999	1.012	1.032	1.007	0.941	1313	2526	0.051	85.1	T ₀ = 950°C 径方向3領域
			0.9995	0.977	1.045	1.003	0.973	1305	—	—	85.1	T ₀ = 950°C 径方向4領域

注) 各ケースの平均ウラン濃縮度は5.9 wt%である。
 注) 中心、第1リング、第2リングの全制御棒は燃料領域上端から1燃料ブロック長さまで挿入されており、第3リングの制御棒は全挿状態とした。燃焼日数は0日である。
 * () 内数値は仮設定ケースに対する増減比を示す。
 ** — 上のピーキングがBU = 200 ~ 300日の間に最大となることが推定される。

表 4.2 ウラン濃縮度分布の軸方向基本調整

ケース	燃料 ウラン濃縮度 (wt%)	配 方 向 濃 縮 度 比	制御棒挿入度 (段数) C, R1, R2, R3	実効増倍率 k _{eff}	燃料最高温度 T _f (°C)	レイノルズ数 R _e	炉心部圧損 ΔP (kg/cd)	炉心有効流量 W (%)	備 考
仮設定ケース	1	6.4 7.6 9.5	0.5, 0.5, 0.5, 0**	1.0250	1300	2480	0.053	84.8	出口ガス温度 T _g = 950 °C
	2	4.4 5.3 6.6	1, 1, 1, 0	0.9996	1201	3276	0.070	85.2	T _g = 850 °C
	3	3.5 4.1 5.2	0, 0, 0, 0	1.0793	—	—	—	—	—
	4	6.5 7.8 9.8	1.48 (+4%)*	0.5, 0.5, 0.5, 0**	1.0218	2475	0.053	84.8	T _g = 950 °C 軸方向3領域
	5	4.3 5.1 6.5	0.98 (-2%)*	—	—	—	—	—	—
Z1	1	6.4 7.6 9.5	0.5, 0.5, 0.5, 0*	1.0243	1296	2475	0.053	84.8	T _g = 950 °C 軸方向4領域
	2	4.5 5.4 6.7	—	—	—	—	—	—	—
	3	4.3 5.1 6.5	—	—	—	—	—	—	—
	4	3.5 4.1 5.2	0.78	—	—	—	—	—	—
	5	6.4 7.6 9.5	1.44	—	—	—	—	—	—
Z2	1	7.3 8.6 10.8	0.5, 0.5, 0.5, 0**	1.0103	1300	2485	0.053	84.8	T _g = 950 °C 軸方向3領域
	2	4.0 4.7 5.9	1, 1, 1, 0	0.9829	1202	3284	0.069	85.2	T _g = 850 °C 軸方向3領域
	3	3.5 4.1 5.2	0, 0, 0, 0	1.0802	1288	3196	0.076	84.3	—
	4	6.4 7.6 9.5	1.64 (+20%)*	0.5, 0.5, 0.5, 0**	1.0193	2495	0.054	84.7	T _g = 950 °C 軸方向4領域
	5	4.9 5.8 7.3	0.9 (-10%)*	—	—	—	—	—	—
Z3	1	6.4 7.6 9.5	1, 1, 1, 0	0.9891	1183	3302	0.070	85.2	T _g = 850 °C 軸方向4領域
	2	4.0 4.7 5.9	0, 0, 0, 0	1.0805	1209	3210	0.076	84.4	—
	3	3.5 4.1 5.2	—	—	—	—	—	—	—
	4	6.4 7.6 9.5	1.44	—	—	—	—	—	—
	5	4.9 5.8 7.3	1.1 (+10%)*	—	—	—	—	—	—
Z4	1	6.4 7.6 9.5	0.5, 0.5, 0.5, 0**	1.0193	1283	2495	0.054	84.7	T _g = 950 °C 軸方向4領域
	2	4.9 5.8 7.3	1, 1, 1, 0	0.9891	1183	3302	0.070	85.2	T _g = 850 °C 軸方向4領域
	3	4.0 4.7 5.9	0, 0, 0, 0	1.0805	1209	3210	0.076	84.4	—
	4	3.5 4.1 5.2	0.78	—	—	—	—	—	—
	5	6.4 7.6 9.5	1.44	—	—	—	—	—	—

(注) 各ケースの平均ウラン濃縮度は5.9 wt%である。

* () 内数値は仮設定ケースに対する増減比

** 原子炉冷却出口温度を950 °Cとする運転は、燃焼中期で制御棒が初期に比べ、0.5段程度引き抜かれることを仮定している。

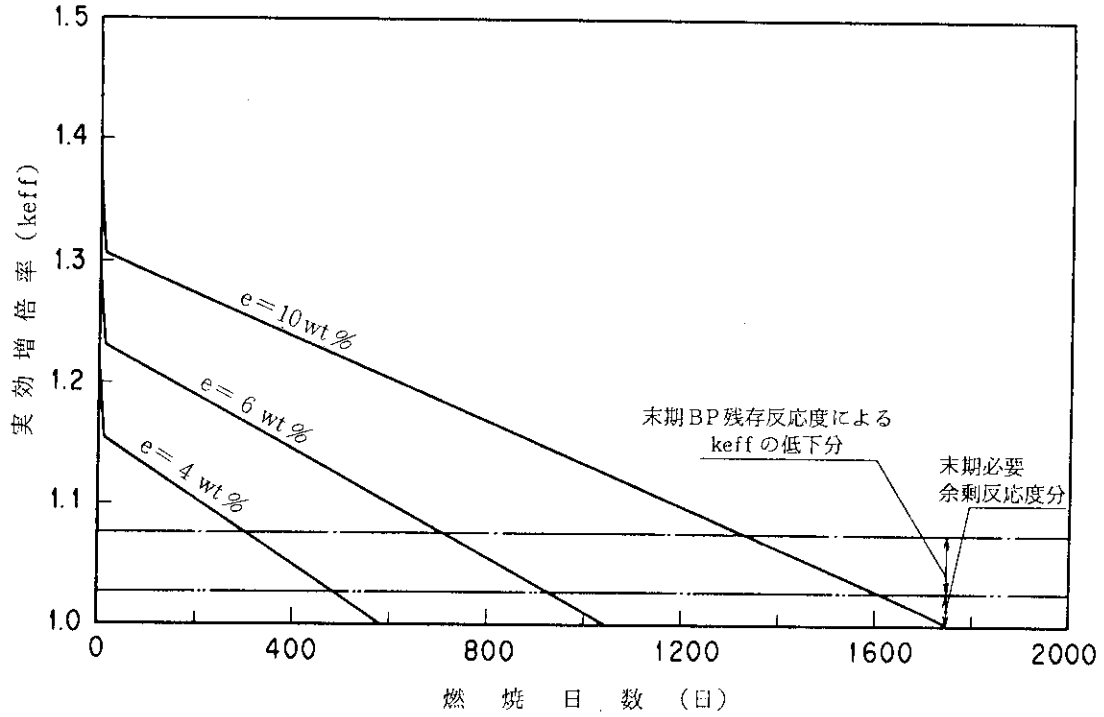


図 4.1 実効増倍率とウラン濃縮度及び燃焼日数の関係

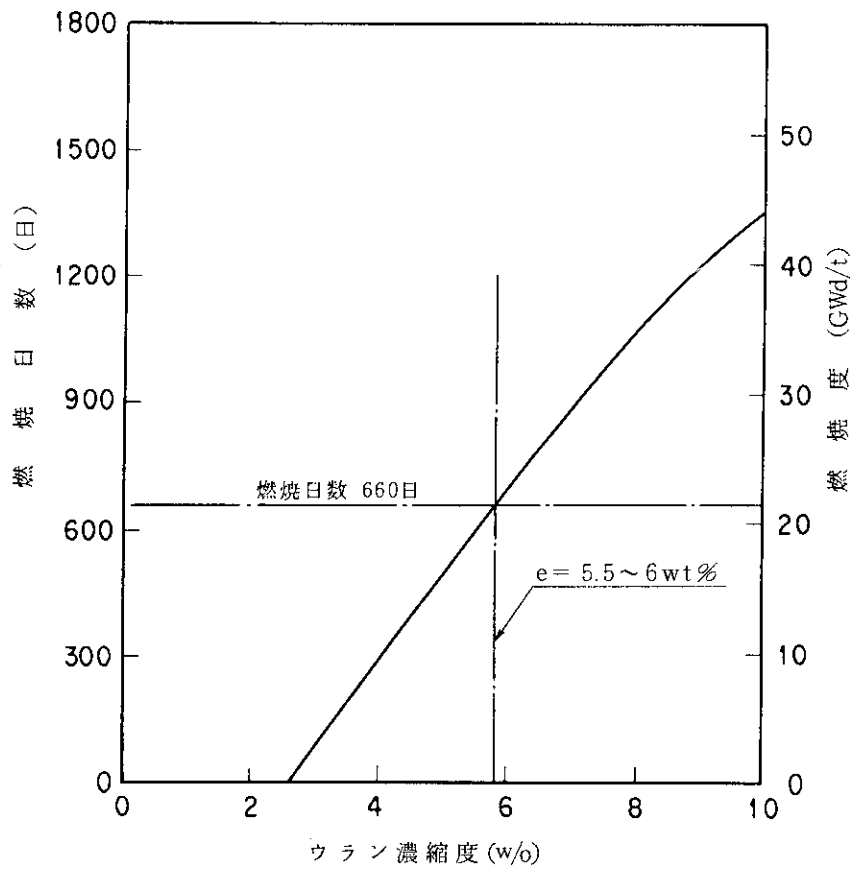


図 4.2 ウラン濃縮度と燃焼日数の関係

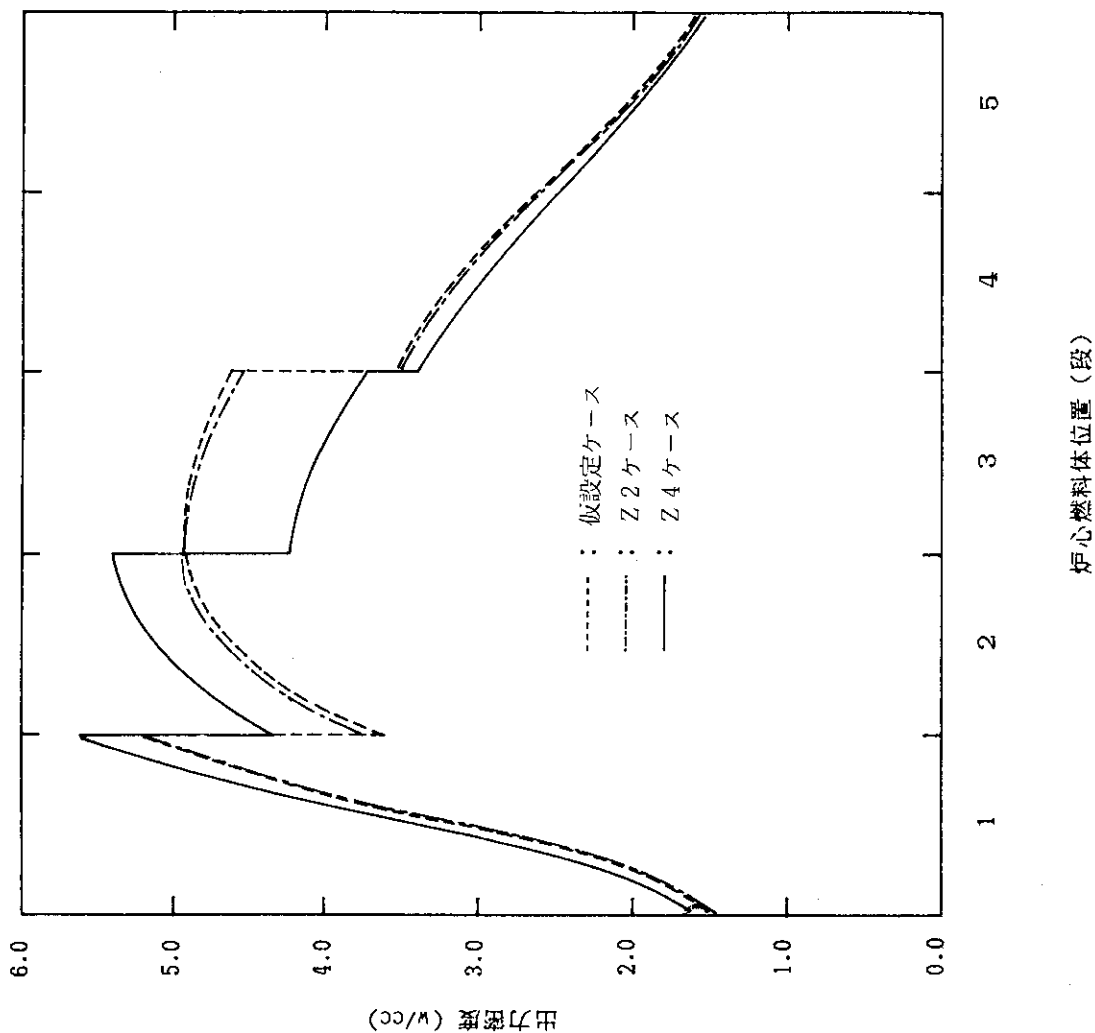


図 4.3 軸方向出力分布 ($T_0 = 950^\circ\text{C}$, 制御棒挿入度 (0.5, 0.5, 0.5, 0))

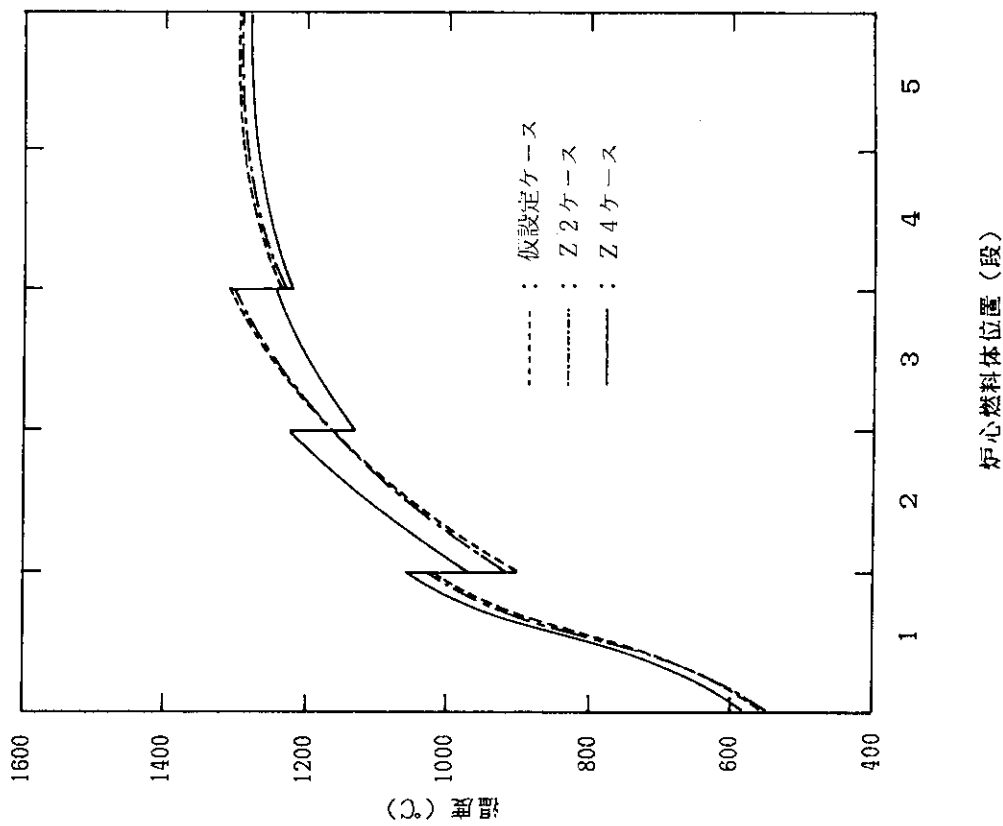


図 4.4 軸方向温度分布 ($T_0 = 950^\circ\text{C}$, 制御棒挿入度 (0.5, 0.5, 0.5, 0))

5. 反応度調整材の装荷

燃料のみを装荷した炉心では初期余剰反応度が高くなり、制御棒のみによる反応度補償が困難となる。そこで反応度調整材（B P）を燃料体内に装荷し、初期余剰反応度を抑制する。B Pの装荷量が多すぎる場合には、初期余剰反応度を抑制できる反面、燃焼末期にB Pの残存による反応度（B P残存反応度）の低下が生じるため燃焼日数が減少する。また、B Pの装荷量が少なすぎる場合には、初期余剰反応度の殆んどを制御棒で抑制する必要が生じ、このため制御棒の挿入度が深くなり軸方向出力分布を乱すため結果として燃料温度が高くなる。そこで、初期余剰反応度を十分に抑制でき、燃焼末期のB P残存反応度となるべく少なく、更に燃焼中期の炉心反応度の回復が小さい適切なB P諸元を求める必要がある。5.1節に炉心の初期余剰反応度及び末期余剰反応度等の反応度収支計画を示し、5.2節に、この反応度収支計画を満足するB P諸元の設定方法を示す。

5.1 反応度収支計画

所期の原子炉性能を満足するよう反応度収支計画を行い、この計画を満足するようにB Pによる反応度調整を行う。反応度収支計画は主に所期の原子炉性能を満足するために必要な所要反応度と原子炉の停止に必要な制御棒の補償可能反応度から定まる。所要反応度は、温度効果、キセノン（Xe）とサマリウム（Sm）の効果及び燃焼効果による反応度の低下分を補償するために必要な反応度に更に運転余裕を加えたものであり、運転初期の低温クリーン状態において必要とする余剰反応度である。所要反応度を構成する各々の反応度の内訳を以下に示す。

温度効果	約 7 % Δ K
Xe, Smの効果	約 3 % Δ K
燃焼効果	約 4 % Δ K
運転余裕	約 0.3 % Δ K

燃焼効果には燃焼による反応度低下分として約2% Δ Kの他に中性子吸収効果の有る照射試料の負の反応度補償分として約2% Δ Kを考慮している。すなわち、所要反応度は約14.3% Δ Kであり、初期低温状態での実効増倍率は約1.143以上ある必要がある。また、初期高温状態での実効増倍率は、温度効果分を除いたもので約1.073以上ある必要がある。所要反応度を構成する各々の反応度に基づいて高温状態の初期必要余剰反応度及び末期必要余剰反応度は以下に示すように定められる。

(1)初期必要余剰反応度

初期必要余剰反応度は所定の期間運転する上で必要な反応度であり、本設計におけるこの値はXe, Smの効果、燃焼効果及び運転余裕を加えた約7.3% Δ Kとなる。尚、初期余剰反応度は、原子炉が十分な炉停止余裕を持って制御棒で停止可能でなければならない

いことから約14% ΔK 以下にすることとした（付録A参照）。

(2)末期必要余剰反応度

末期必要余剰反応度は、燃焼末期に運転を行う上で必要な反応度であり、本設計におけるこの値は、運転余裕と照射試料の吸収効果を加えた約2.3% ΔK としている。尚、末期余剰反応度も同様に、原子炉の炉停止の観点から初期余剰反応度は約14% ΔK 以下となるようにしなければならない。

BPを装荷することによって上記の反応度収支計画より求められた初期必要余剰反応度及び末期必要余剰反応度を満足する燃焼曲線とBPを装荷しない燃料のみによる燃焼曲線の概略的な関係を図5.1に示す。曲線①が、BPを装荷することによって初期必要余剰反応度及び末期必要余剰反応度を満足している燃焼曲線に相当する。曲線②及び③は曲線①の基本となる燃焼曲線であり、BPを装荷せずに燃料のみを燃焼させた場合の燃焼曲線である。曲線②は末期BP残存反応度を必要としないと仮定した場合の理想的な燃焼曲線であり、曲線③は実際に発生する末期BP残存反応度を考慮した場合の現実的な燃焼曲線である。図に示す燃焼必要反応度とXe, Sm反応度、初期BP補償必要反応度、初期BP過剰反応度及び末期BP残存反応度の内容の説明及びそれらの値の設定方法を以下に示す。

(3)燃焼必要反応度とXe, Sm反応度

燃焼必要反応度は、BPを装荷しない燃料を燃焼させた場合に所定の燃焼日数或いは燃焼度を獲得するために必要な反応度である。図4.1に示す燃料格子特性計算結果より、燃焼日数を660日とすればウラン濃縮度が6wt%の場合燃焼必要反応度とXe, Smの反応度の和は約19.9% ΔK である。

(4)初期BP補償必要反応度

初期BP補償必要反応度は、燃料のみを炉心に装荷した場合に発生する初期余剰反応度をBPの装荷により初期必要余剰反応度までに抑制するために必要な反応度である。この値は、燃焼必要反応度、Xe, Sm反応度と末期必要余剰反応度の和から初期必要反応度を差し引くことより得られ、本設計では約15% ΔK とする。

(5)初期BP過剰反応度

燃料の初期余剰反応度をBPで補償する場合、このBPによる全補償反応度から初期BP必要補償反応度を差し引いた補償過剰分を初期BP過剰反応度とする。この初期BP過剰反応度は、末期BP残存反応度と同じくするように設定する。

(6)末期BP残存反応度

燃焼末期においてBPが完全に燃焼することが望ましいが、実際にはBPが残存する。このBPの残存によって低下する反応度を、末期BP残存反応度と言う。本設計では、この値が5% ΔK 以下となるようにする。

初期必要余剰反応度及び末期必要余剰反応度を満足する炉心を構成するには、初期BP補償必要反応度が約15% ΔK で初期BP過剰反応度及び末期BP残存反応度がほぼ同じ値となり、それらの値が5% ΔK 以下となるBPの諸元を選定する必要がある。このBPの諸元を炉心内に装荷することにより所期の原子炉特性を満足することが可能である。次節において、この条件を満たすBP諸元を選定方法を示す。

5.2 反応度調整材諸元の選定

初期必要余剰反応度，末期必要余剰反応度，燃焼必要反応度とXe, Sm 反応度及び初期B P 補償必要反応度の目安値を前節で示した。これらの反応度が目安値から大きくずれることなく，末期B P 残存反応度と初期B P 過剰反応度が同じ値となり，またこれらの値が $5\% \Delta K$ を越えないように適切なB P 諸元を定める。B P のボロン濃度及び外径をパラメータとした場合の初期B P 過剰反応度 a，末期B P 残存反応度 b 及びB P 反応度回復 c の関係を表 5.1 に示す。これらの反応度を求めるために行った燃料格子特性計算及びB P 格子特性計算の計算結果を付録B に示す。軸方向のB P 種類数は2種以下にするため，燃焼度が比較的高くなる軸方向燃料領域2及び3段で同じ諸元のB P を用いることとし，燃焼度が低い4及び5段でも同じ諸元のB P を用いることとする。1段目には，長期にわたり制御棒が挿入されるため，B P の装荷量は少量でよいので4,5段のB P 諸元と同じものを用いることとする。また径方向燃料領域のB P 種類数は，B P 装荷法の複雑化を防ぐことと径方向燃焼度分布がほぼ一様であることから1種類とする。軸方向燃料領域2及び3段の平均ウラン濃縮度及び平均燃焼度の目安値である $5.9 \text{ w} / \%$ 及び $25 \text{ GWd} / \text{t}$ に対するB P 諸元と初期B P 過剰反応度及び末期B P 残存反応度の関係を図 5.2 に示す。軸方向燃料領域4及び5段の平均ウラン濃縮度及び平均燃焼度の目安値である $4.6 \text{ w} / \%$ 及び燃焼度 $16 \text{ GWd} / \text{t}$ に対するB P 諸元と初期B P 過剰反応度及び末期B P 残存反応度の関係を図 5.3 に示す。これらの図より，B P 棒径が小さい場合には，末期B P 残存反応度が初期B P 過剰反応度より大きくなり，B P 棒径が大きい場合には，逆に末期B P 残存反応度が初期B P 過剰反応度より小さくなることがわかる。同図に初期B P 過剰反応度と末期B P 残存反応度の曲線が交差する点が各々の反応度が同じ値を取るB P 諸元の最適点である。このB P 諸元最適点を示す曲線とB P 反応度回復特性の関係を図 5.4 及び図 5.5 に示す。これらのB P 諸元最適点を示す曲線より，初期B P，過剰反応度と末期B P 残存反応度が同時に $5.0\% \Delta K$ 以下となるB P 棒外径の範囲は約1.3 cm 以上である。またB P 反応度回復はB P 棒径が大きいほど大きくなる。このB P 反応度回復を極力小さくすることを考慮して，B P 棒径は1.4 cm と定めた。B P 濃度は2及び3段に対して2.5 wt%と定め，1，4及び5段に対して2.0 wt%と定めた。本検討より定めたB P 装荷法及び4章での基本調整より得られたケースの炉内濃縮度配分を用いて2次元円筒炉心モデルを用いて燃焼特性計算を行った結果を図 5.6 に示す。この計算より得られた初期必要余剰反応度，末期必要余剰反応度，燃焼必要反応度とXe, Sm 反応度，初期B P 補償必要反応度，初期B P 過剰反応度，末期B P 残存反応度の計算結果と前節で定めたこれらの反応度の目標値の比較を表 5.2 に示す。この表に示す比較より計算値は目標値を十分に達成しており反応度収支計画が満されていることがわかる。

表 5.1 B P 特 性

領 域	BP濃度W (wt%)	BP径φ (cm)	初期BP過剩反応度 a (%Δk)	末期BP残存反応度 b (%Δk)	BP反応度回復 c (%Δk)
第 2,3 段 **平均濃縮度 = 5.9 (wt%) 平均燃焼度 = 25 (GWD/T)	0.5	0.5	- 13.5	0.0	0.
		1.5	- 6.5	0.4	0.4
		2.5	3.6	1.4	2.6
	1.5	0.5	- 12.0	0	-
		1.5	1.0	2.3	-
		2.5	15.4	8.3	-
	2.0	0.5	- 11.3	0.1	-
		1.5	3.6	3.5	-
		2.5	18.8	11.3	-
	2.5	0.5	- 10.6	0.2	0
		1.5	5.8	4.6	0.8
		2.5	21.3	13.9	3.0
	3.5	0.5	- 9.5	0.4	-
		1.5	8.7	7.2	-
		2.5	24.6	18.1	-
	4.5	0.5	- 8.5	0.8	0
		1.5	10.4	9.8	0.9
		2.5	26.4	21.0	-
第 4,5 段 **平均濃縮度 = 4.6 (wt%) 平均燃焼度 = 16 (GWD/T)	0.5	0.5	- 13.4	0	0.2
		1.5	- 5.4	0.6	1.9
		2.5	5.4	2.3	7.0
	1.5	0.5	- 11.7	0.2	-
		1.5	3.2	3.2	-
		2.5	17.6	10.5	-
	2.0	0.5	- 10.8	0.3	-
		1.5	6.0	4.5	-
		2.5	21.0	13.2	-
	2.5	0.5	- 10.0	0.4	0.8
		1.5	8.0	5.8	5.1
		2.5	23.5	15.6	11.3
	3.5	0.5	- 9.0	0.6	-
		1.5	10.8	8.4	-
		2.5	26.8	19.5	-
	4.5	0.5	- 7.7	1.0	0.9
		1.5	12.2	10.9	5.9
		2.5	28.4	23.0	-

表 5.2 各反応度の目安値と計算結果の比較
(定格出力運転状態)

反 応 度	目 標 値	計 算 結 果
初期必要余剰反応度	$\geq 7.4 \% \Delta K$	7.6 $\% \Delta K$
初期最大余剰反応度	$\leq 1.4 \% \Delta K$	7.6 $\% \Delta K$
末期必要余剰反応度	$\geq 2.5 \% \Delta K$	2.6 $\% \Delta K$
初期BP過剰反応度	$\leq 5 \% \Delta K$	4.6 $\% \Delta K$
末期BP残存反応度	$\leq 5 \% \Delta K$	4.5 $\% \Delta K$

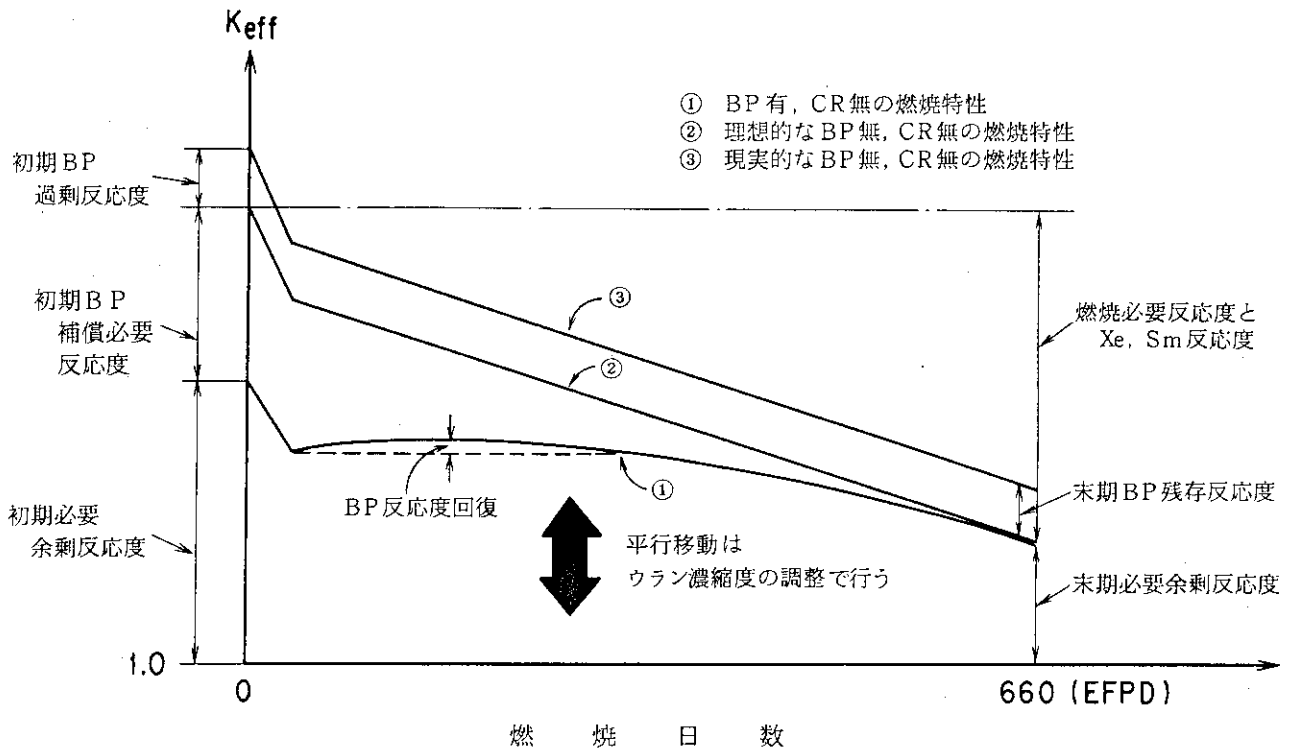


図 5.1 反応度収支計画と燃焼特性の関係

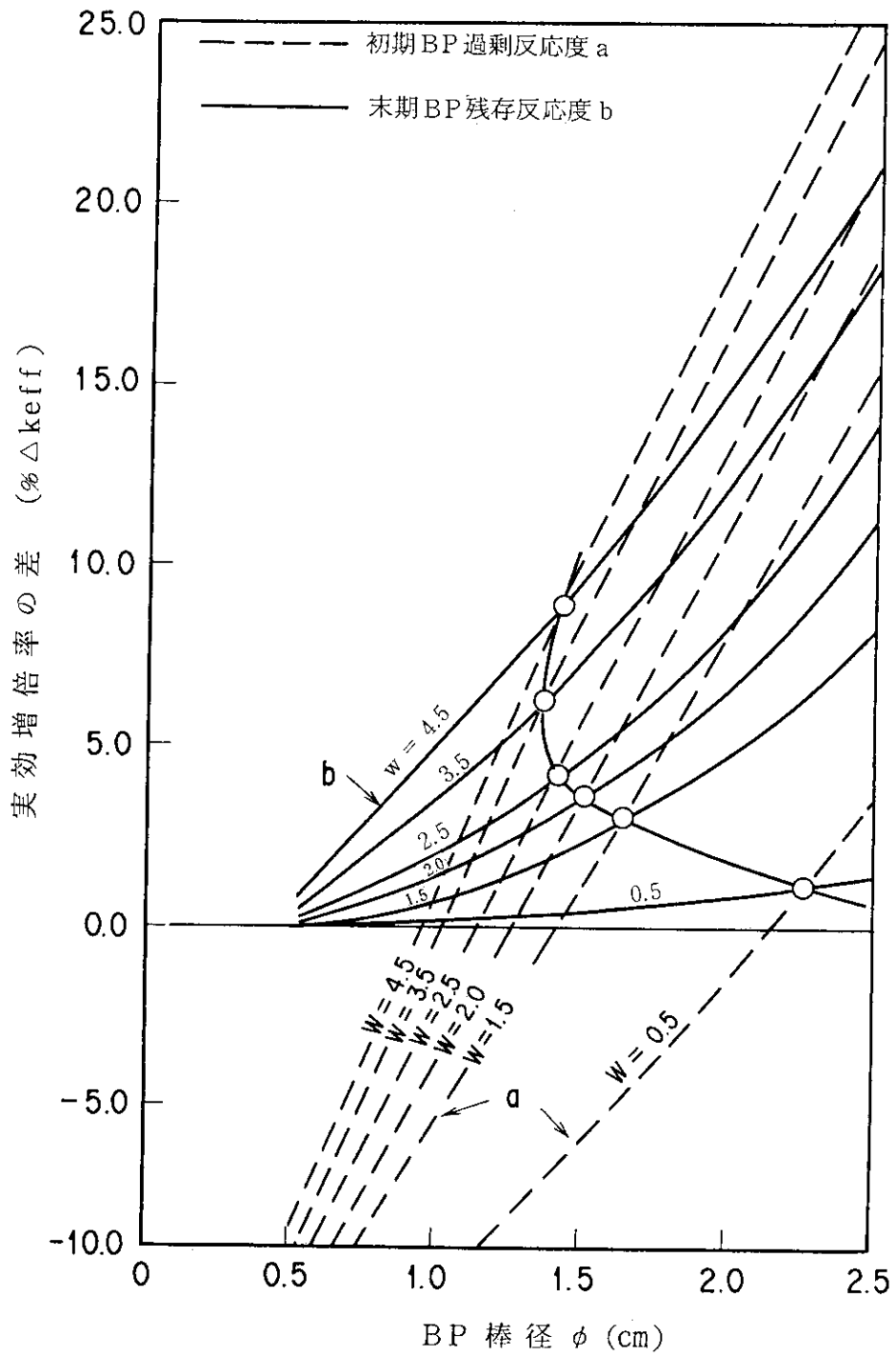


図 5.2 BP 棒径及び濃度 W を変化させた場合の初期 BP 過剰反応度 a 及び末期 BP 残存反応度 b の変化 (ウラン濃縮度は 5.9 wt%, 燃焼度は 25 GWd/t, 2, 3 段の燃料段数を対象)

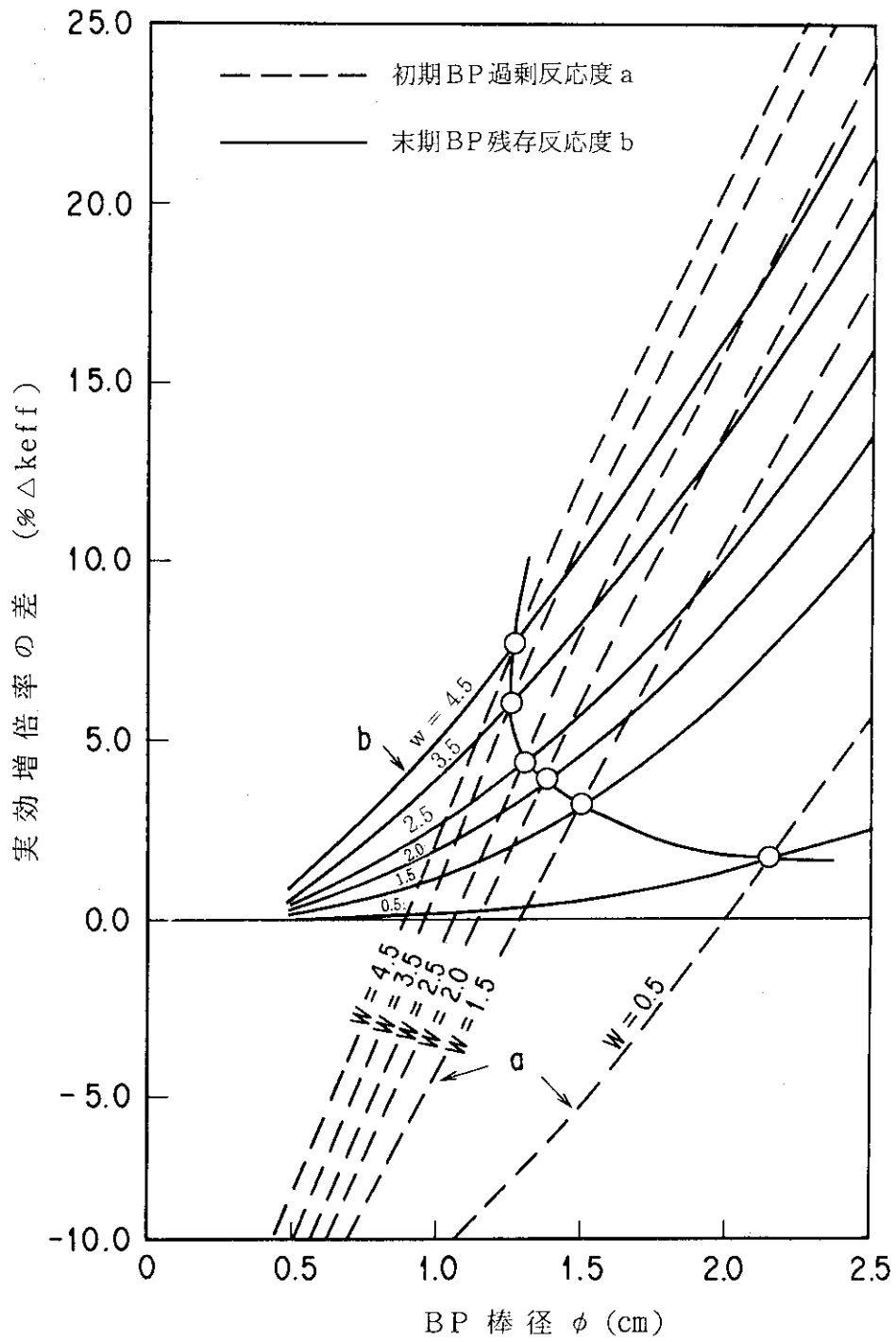


図 5.3 BP 棒径及び濃度 W を変化させた場合の初期 BP 過剰分 a 及び末期 BP 残存 b の変化 (ウラン濃縮度は 4.6 wt%, 燃焼度は 16 GWd/t, 1, 4 及び 5 段の燃料段数を対象)

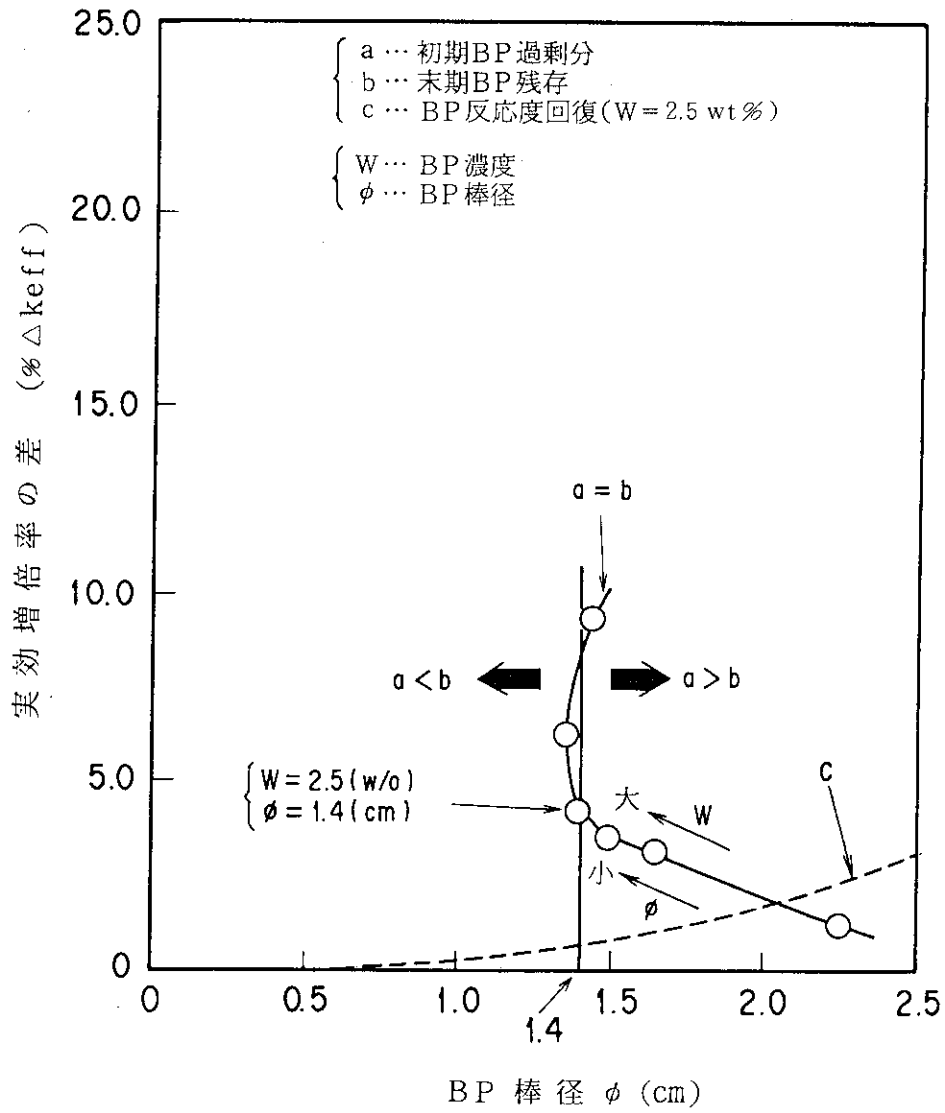


図 5.4 B P 棒 諸 元 の 最 適 化

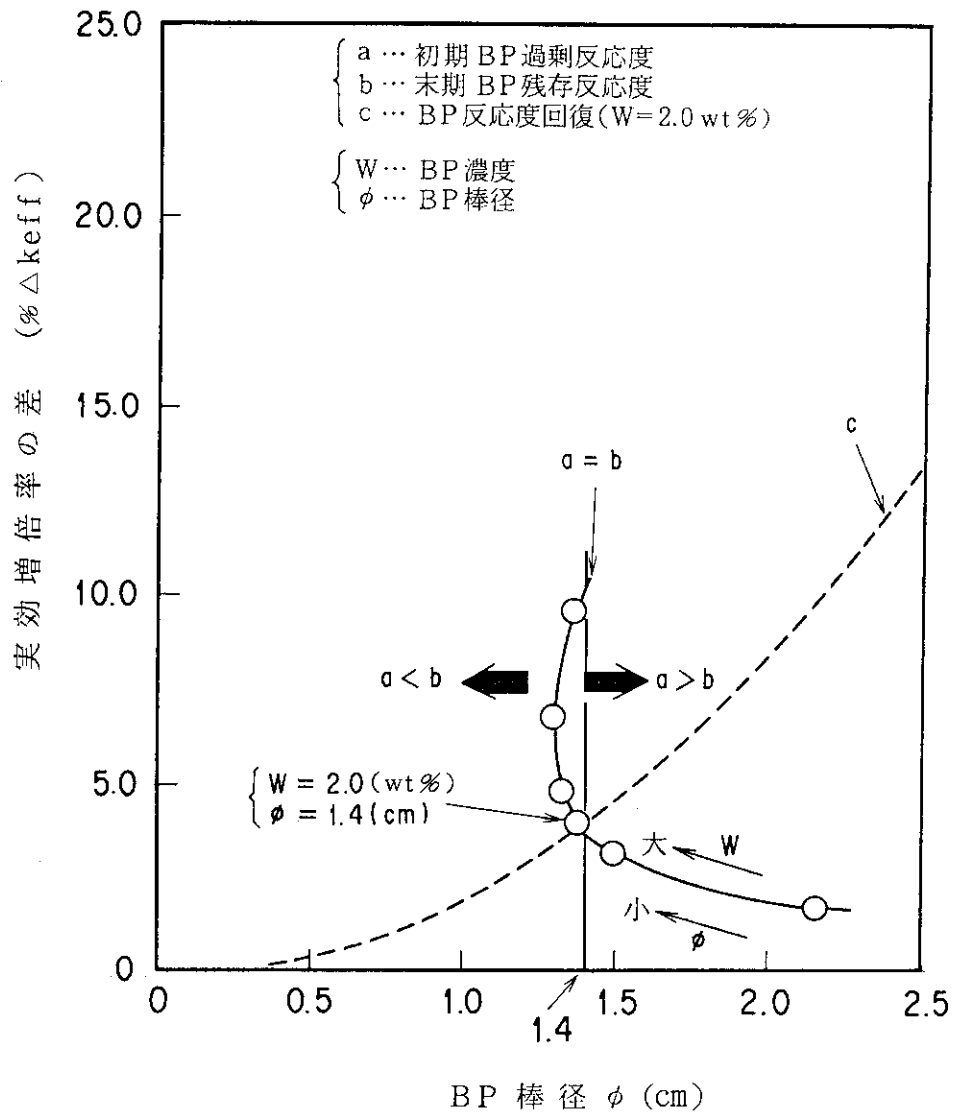


図 5.5 B P 棒諸元の最適化

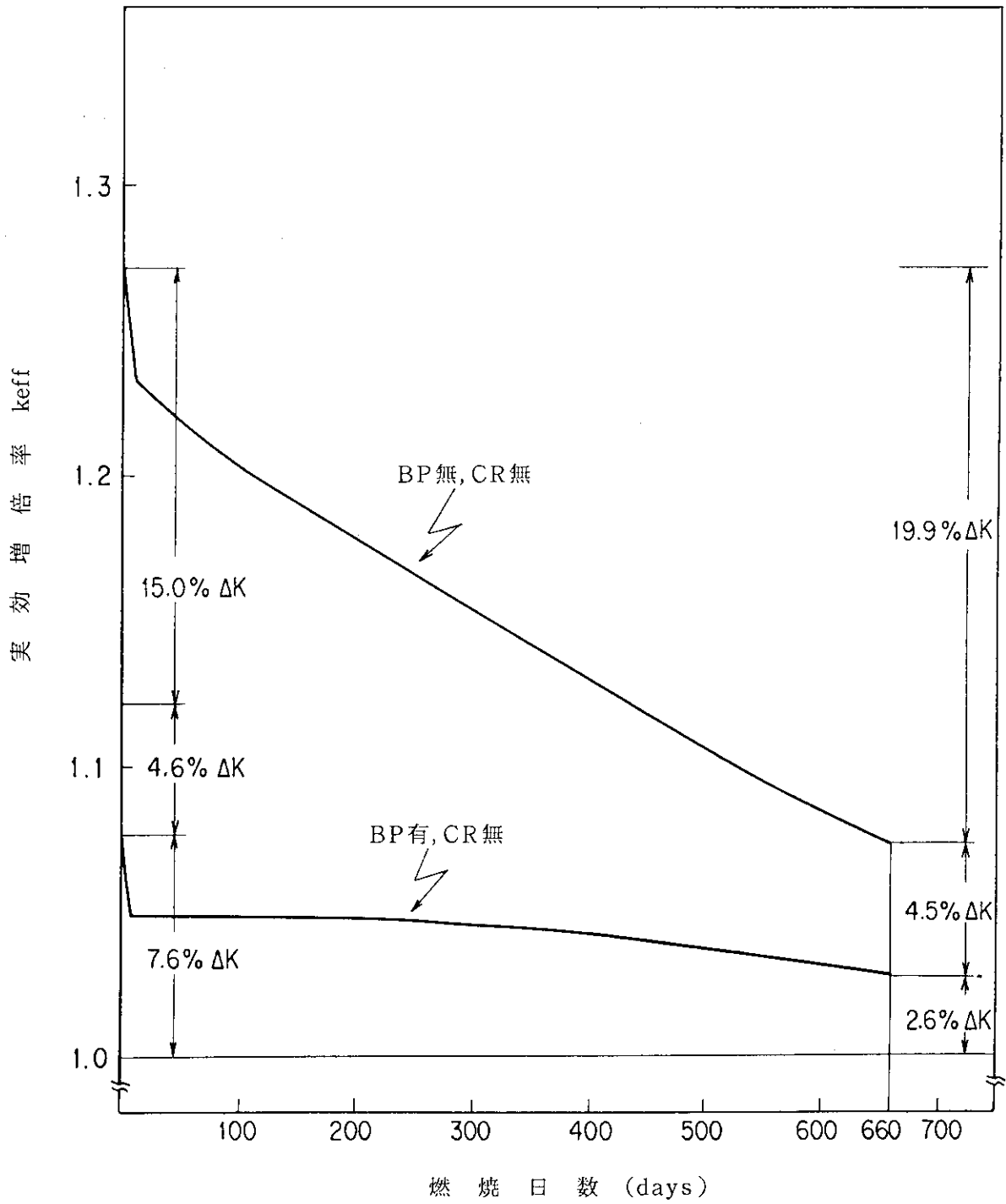


図 5.6 燃 燒 特 性

6. ウラン濃縮度配分の微調整

前章で設定した諸元のBPを各々の燃料体に装荷し、4章のウラン濃縮度配分比の基本調整で求めた径方向及び軸方向のウラン濃縮度配分比を出発点として、炉停止余裕が十分に得られ且つ燃料最高温度が十分に低い炉心が得られるまでウラン濃縮度配分を調整するために、ウラン濃縮度配分の微調整を行った。なお、ウラン濃縮度配分の微調整では、BP諸元の調整は行わない。表6.1に、本設計で行ったウラン濃縮度配分の微調整の過程を示す。また、各々の検討ケースで行った微調整の検討内容について以下に述べる。

①検討ケース1

検討ケース1の燃料配分は、基本調整より得られたウラン濃縮度配分比を用い平均ウラン濃縮度を6.1 wt%にしたものである。このケースの制御棒を挿入しない高温状態の実効増倍率は1.0804であり原子炉停止のために実効増倍率の制限値1.14及び初期に必要な実効増倍率の1.073を満しているが、制御棒の挿入度を少なくするため、実効増倍率を更に小さくすることにした。

②検討ケース2

検討ケース2は、制御棒を挿入しない高温状態の実効増倍率を低くするため平均ウラン濃縮度を6.0 wt%に下げた燃料配分である。制御棒全抜高温状態の実効増倍率は1.0768となる。原子炉出口温度が950℃の運転状態ではXe, Smの発生による反応度低下等を考慮すると制御棒の挿入度が1/4程度になることが見込まれ、この場合のカラム3,4の径方向ピーキングは1.18である。径方向ピーキングは1.10以下にすることを目安としているので、径方向ピーキングを平坦化する必要がある。

③検討ケース3

検討ケース3は、検討ケース2の径方向ピーキングを改善するためカラム3のウラン濃縮度配分を低減した検討ケースである。制御棒が全引抜で高温状態の実効増倍率は1.0783であり、初期必要余剰反応度は十分に有る。950℃運転状態では、検討ケース2と同様に制御棒の挿入度が1/4程度になり、この場合のカラム2の径方向ピーキングは1.107である。これは目安値1.10をわずかに上回っているが、超過分が少ないので径方向ピーキングは満足されているものとした。

④検討ケース4,5及び6

検討ケース4,5及び6は検討ケース3で得られた径方向ウラン濃縮度配分比を保持し軸方向ウラン濃縮度配分比を変化させたものである。検討ケース4及び5では、平均ウラン濃縮度を変えずに4及び5段のウラン濃縮度を下げ2及び3段のウラン濃縮度を高くしたケースである。この場合、制御棒が全引抜の高温状態の実効増倍率は各々1.0952及び1.0837となり、制御棒の挿入度が多少深くなる。そこで、検討ケース6では平均ウラン濃縮度を5.8 wt%に下げ、4及び5段のウラン濃縮度を下げ2及び3段のウラン濃縮度を高くしている。このケースでは、実効増倍率が1.0756となり目安値1.0793を下回ってい

る。

⑤ 検討ケース 7

検討ケース 7 は、検討ケース 6 のウラン濃縮度配分に基づいて、1 段目のウラン濃縮度を僅かに高くすることにより平均ウラン濃縮度を高め初期余剰反応度を高くしたケースである。

⑥ 検討ケース 8

検討ケース 8 は、検討ケース 7 で使用しているウラン濃縮度の種類数が 16 種で比較的多いことから濃縮度がほぼ同じものを 1 種類の濃縮度にまとめ、濃縮度の種類数を 12 種に低減したものである。制御棒が全引抜き高温状態での実効増倍率は 1.0791 であり原子炉停止のために必要な制限値を下回っている。また、初期余剰反応度は 7.9% ΔK であり初期必要余剰反応度の条件を満たしている。原子炉出口冷却材温度が 950℃ の場合の燃料最高温度は 1291℃ である。ウラン濃縮度配分の微調整の結果、検討ケース 8 が燃料最高温度も低く、低温状態の炉停止が可能であり初期余剰反応度が確保できる見込みを得た。これより、検討ケース 8 のウラン濃縮度配分を H T T R の燃料配分として採用することにした。検討ケース 8 の燃料配分から成る炉心について得られた主要な炉心特性を 7 章に示す。

表 6.1 ウラン濃縮度配分の微調整 (1/2)

検討 ケース	ウラン濃縮度配分比	平均ウラン 濃縮度(wt%)	ウラン濃縮度配分(wt%)	該当 ステップ	検 討 結 果																								
1		6.1		②	$K_{eff} = 1.0804$ 炉停止の目安値を不満足																								
2	同 上	6.0		同 上	$K_{eff} = 1.0768$ 炉停止の目安値を満足																								
2-1	同 上	同 上	同 上	③	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CR挿入度 (段)</th> <th>K_{eff}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>-1/4</td><td>1.0568</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>1.0322</td></tr> <tr><td>2/4</td><td>1.0172</td></tr> <tr><td>3/4</td><td>1.0020</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.9874</td></tr> </tbody> </table>	CR挿入度 (段)	K_{eff}	-1/4	1.0568	1/4	1.0322	2/4	1.0172	3/4	1.0020	1	0.9874												
CR挿入度 (段)	K_{eff}																												
-1/4	1.0568																												
1/4	1.0322																												
2/4	1.0172																												
3/4	1.0020																												
1	0.9874																												
2-2	同 上	同 上	同 上	④	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">CR挿入度 (段)</th> <th colspan="4">ピーキング $P_1 \cdot P_2$</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1.028</td><td>1.064</td><td>1.124</td><td>1.110</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>1.019</td><td>1.057</td><td>1.118</td><td>1.106</td></tr> <tr><td>3/4</td><td>1.001</td><td>1.048</td><td>1.110</td><td>1.101</td></tr> </tbody> </table> <p>燃焼0日 CR = 1/4 段 $T_{out} = 950^\circ\text{C}$ 運転を想定 径方向ピーキングが不十分</p>	CR挿入度 (段)	ピーキング $P_1 \cdot P_2$				1	2	3	4	0	1.028	1.064	1.124	1.110	1/4	1.019	1.057	1.118	1.106	3/4	1.001	1.048	1.110	1.101
CR挿入度 (段)	ピーキング $P_1 \cdot P_2$																												
	1	2	3	4																									
0	1.028	1.064	1.124	1.110																									
1/4	1.019	1.057	1.118	1.106																									
3/4	1.001	1.048	1.110	1.101																									
3		6.0		②	$K_{eff} = 1.0783$ 炉停止の目安値を満足																								
3-1	同 上	同 上	同 上	③	<table border="1"> <thead> <tr> <th>CR挿入度 (段)</th> <th>K_{eff}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1.0474</td></tr> <tr><td>1/4</td><td>1.0340</td></tr> <tr><td>2/4</td><td>1.0191</td></tr> <tr><td>3/4</td><td>1.0040</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.9893</td></tr> </tbody> </table>	CR挿入度 (段)	K_{eff}	0	1.0474	1/4	1.0340	2/4	1.0191	3/4	1.0040	1	0.9893												
CR挿入度 (段)	K_{eff}																												
0	1.0474																												
1/4	1.0340																												
2/4	1.0191																												
3/4	1.0040																												
1	0.9893																												
3-2	同 上	同 上	同 上	④	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">CR挿入度 (段)</th> <th colspan="4">ピーキング $P_1 \cdot P_2$</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1/4</td><td>1.108</td><td>1.107</td><td>1.073</td><td>1.065</td></tr> <tr><td>2/4</td><td>1.098</td><td>1.100</td><td>1.068</td><td>1.062</td></tr> <tr><td>3/4</td><td>1.089</td><td>1.096</td><td>1.064</td><td>1.051</td></tr> </tbody> </table>	CR挿入度 (段)	ピーキング $P_1 \cdot P_2$				1	2	3	4	1/4	1.108	1.107	1.073	1.065	2/4	1.098	1.100	1.068	1.062	3/4	1.089	1.096	1.064	1.051
CR挿入度 (段)	ピーキング $P_1 \cdot P_2$																												
	1	2	3	4																									
1/4	1.108	1.107	1.073	1.065																									
2/4	1.098	1.100	1.068	1.062																									
3/4	1.089	1.096	1.064	1.051																									

表 6.1 ウラン濃縮度配分の微調整 (2 / 2)

検討 ケース	ウラン濃縮度配分比	平均ウラン 濃縮度(wt%)	ウラン濃縮度配分 (wt%)	該 当 ステップ	検 討 結 果
4	段 カラム1 2 3 4 R 1 1.44 0.79 0.92 1.075 1.114 2 1.25 3 1.05 4 } 0.63 5 } Z ↓	6.0	カラム1 2 3 4 R 段 1 6.8 7.9 9.3 9.8 2 5.9 6.9 8.1 8.6 3 5.0 5.8 6.8 7.2 4 3.0 3.5 4.1 4.3 5 Z ↓	④	$T_{fmax} = \begin{cases} 1444^{\circ}\text{C} & (2\text{段}) \\ 1453^{\circ}\text{C} & (3\text{段}) \\ 1334^{\circ}\text{C} & (5\text{段}) \end{cases}$ (燃焼 0日) (CR = 1/4 段) $T_{out} = 950^{\circ}\text{C}$ $K_{eff} = 1.0952$ (no CR)
5	段 カラム1 2 3 4 R 1 1.44 同 上 2 1.15 3 0.95 4 } 0.73 5 } Z ↓	同 上	カラム1 2 3 4 R 段 1 6.8 7.9 9.3 9.8 2 5.5 6.3 7.4 7.9 3 4.5 5.2 6.1 6.5 4 3.3 4.0 4.7 5.0 5 Z ↓	同 上	$T_{fmax} = \begin{cases} 1379^{\circ}\text{C} & (2\text{段}) \\ 1398^{\circ}\text{C} & (3\text{段}) \\ 1361^{\circ}\text{C} & (5\text{段}) \end{cases}$ (燃焼 0日) (CR = 1/4 段) $T_{out} = 950^{\circ}\text{C}$ $K_{eff} = 1.0837$ (no CR)
6	段 カラム1 2 3 4 R 1 1.44 同 上 2 1.16 3 0.96 4 } 0.72 5 } Z ↓	5.8	カラム1 2 3 4 R 段 1 6.6 7.7 9.0 9.5 2 5.3 6.2 7.2 7.7 3 4.4 5.1 6.0 6.3 4 3.3 3.8 4.5 4.8 5 Z ↓	同 上	$T_{fmax} = \begin{cases} 1388^{\circ}\text{C} & (2\text{段}) \\ 1406^{\circ}\text{C} & (3\text{段}) \\ 1357^{\circ}\text{C} & (5\text{段}) \end{cases}$ (燃焼 0日) (CR = 1/4 段) $T_{out} = 950^{\circ}\text{C}$ $K_{eff} = 1.0756$ (no CR)
7		5.84	カラム1 2 3 4 R 段 1 6.7 7.9 9.4 9.9 2 5.3 6.2 7.2 7.7 3 4.4 5.1 6.0 6.3 4 3.3 3.8 4.5 4.8 5 Z ↓ = は前ケースとの相違		(燃焼 380日) (CR = 1/4 段) $T_{out} = 950^{\circ}\text{C}$ $K_{eff} = 1.0793$
8		5.82	カラム1 2 3 4 R 段 1 6.7 7.9 9.4 9.9 2 5.2 6.3 7.2 7.9 3 4.3 5.2 5.9 6.3 4 3.4 3.9 4.3 4.8 5 Z ↓ = は前ケースとの相違		$T_{fmax} = 1291^{\circ}\text{C}$ (燃焼 330日) (CR = 1/4 段) $T_{out} = 950^{\circ}\text{C}$ $K_{eff} = 1.0791$

7. 主要炉心特性

前章で述べたように、検討ケース 8 のウラン濃縮度配分を H T T R に採用することとした。B P の炉内配分とウラン濃縮度配分から成る H T T R の燃料配分を表 7.1 に示す。

炉心が低温状態にある場合の燃焼初期の炉停止余裕の検討結果を表 7.2 に示す。全制御棒挿入時、第 1 リング制御棒 R_1 が 1 対スタック時及び第 1 リング制御棒が 2 対スタック時の炉停止余裕は各々 $26.0\% \Delta K/K$ 、 $11.3\% \Delta K/K$ 及び $4.5\% \Delta K/K$ である。 R_1 が 1 対スタック時の炉停止余裕の燃焼に伴う変化を図 7.1 に示す。これより、いかなる運転状態においても十分な炉停止余裕が確保されていることがわかる。尚、2 対スタック時の炉停止余裕は中心制御棒案内カラムを照射孔として用いる照射炉心の炉停止余裕に相当するものである。

燃焼に伴う定格出力運転時の軸方向出力分布の変化を図 7.2 及び図 7.3 に示す。前者は燃焼 0 日から 220 日までの変化を示すものであり、後者は燃焼 330 日から 660 日までの変化を示すものである。これらの図より、軸方向出力分布は燃焼を通して安定であり、常に炉心上部の出力が大きく炉心下部で出力が低く、燃料最高温度を低くするために適した分布となっていることがわかる。燃焼に伴う定格出力運転時の径方向出力分布の変化を表 7.3 に示す。これより、径方向出力ピーキングも燃焼を通じて安定であり、各領域の最大値は 1.10 以下であり十分な径方向の出力ピーキングの平坦化がなされていることがわかる。燃焼中期にあたる燃焼日数が 330 日において、原子炉出口冷却材温度が 950°C の場合の燃料最高温度が発生するチャンネルの軸方向温度分布を図 7.4 に示す。この図より、定格運転中において制御棒が挿入される 1 段目の燃料ブロックを除いて他の段の燃料最高温度はほぼ一様になっていることがわかる。したがって、軸方向のウラン濃縮度配分の調整により、軸方向温度分布の平坦化が十分になされていることがわかる。また、各カラムの燃料最高温度を図 7.5 に示す。図より、各カラムの燃料最高温度は $1278 \sim 1291^\circ\text{C}$ 内に収まっていることがわかる。したがって、径方向のウラン濃縮度配分の調整により径方向温度分布の平坦化が十分になされていることがわかる。また、設計上の不確定性を考慮したシステマテック燃料最高温度は約 1490°C 以下であり、制御温度の 1600°C より低いことが明らかとなった。

燃焼末期の燃料体平均燃焼度を表 7.4 に示す。燃焼日数は 660 日を達成しており、最大及び平均の燃焼度は約 $31,500 \text{ MWd/t}$ 及び約 $22,000 \text{ MWd/t}$ である。

表 7.1 H T T R の炉内燃料配分

カラム 上からの 燃料段数	燃料濃縮度 (W t %)				反応度調整材諸元		
	1	2	3	4	直径 (mm)	天然ボロン 濃度(Wt%)	ブロック内 装荷本数
1	6.7	7.9	9.4	9.9	14	2.0	2
2	5.2	6.3	7.2	7.9	14	2.5	2
3	4.3	5.2	5.9	6.3	14	2.5	2
4	3.4	3.9	4.3	4.8	14	2.0	2
5	3.4	3.9	4.3	4.8	14	2.0	2

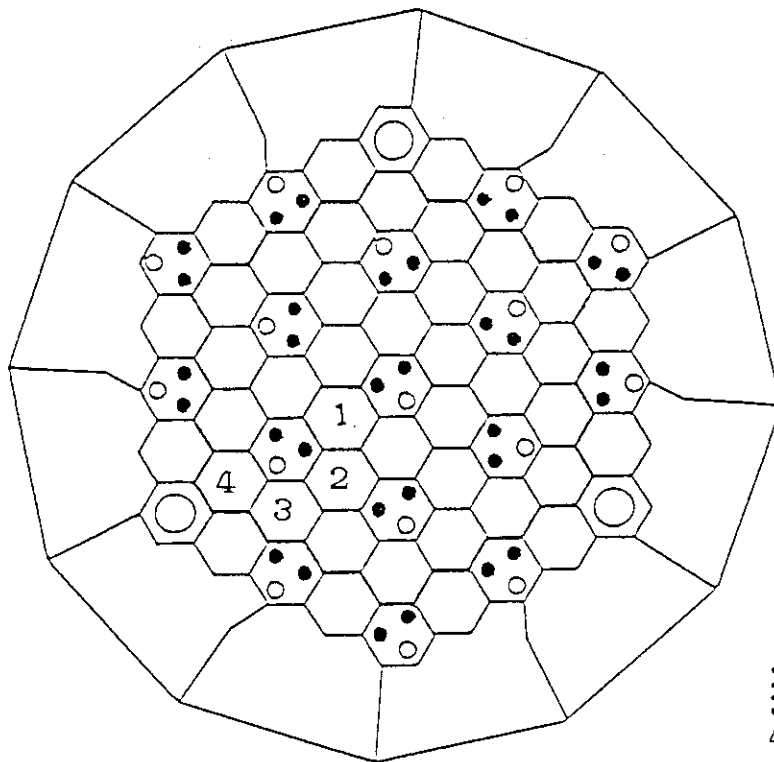
表 7.2 炉停止余裕 (検討ケース 8)

ケース 番号	CR挿入度 段/カラム				実効増倍率 K_{eff}	備 考
	C	R ₁	R ₂	R ₃		
C 1	0 0	0 0	0 0	0 0	1.32955	BP無, 全CR無
C 2	0 0	0 0	0 0	0 0	1.15538	BP有, 全CR無
C 3	5 1	5 5	5 6	5 3	0.86346	R ₁ 1対スタック
C 4	5 1	5 4	5 6	5 3	0.92419	R ₁ 2対スタック
C 5	5 1	5 6	5 6	5 3	0.75680	全CR挿入
H 1	0 0	0 0	0 0	0 0	1.07912	全CR無 (850 °C)
H 2	0 0	0 0	0 0	0 0	1.07559	全CR無 (950 °C)

- (1) 制御すべき反応度 15.0 % $\Delta k/k$
 全余剰反応度 24.7 % $\Delta k/k$
 反応度調整材 -11.3 % $\Delta k/k$
 誤 差 1.6 % $\Delta k/k$
- (2) 制御棒補償反応度
 R₁ 1対スタック 26.3 % $\Delta k/k$
 R₁ 2対スタック 19.5 % $\Delta k/k$
 全CR挿入 41.0 % $\Delta k/k$
- (3) 炉停止余裕
 R₁ 1対スタック 11.3 % $\Delta k/k$
 R₁ 2対スタック 4.5 % $\Delta k/k$
 全CR挿入 26.0 % $\Delta k/k$

表 7.3 燃焼に伴う半径方向出力ピーキング係数 ($P_1 \cdot P_2$)

燃焼日数 (日)	燃 料 領 域 番 号			
	1	2	3	4
0	1.04	1.07	1.08	1.10
10	1.06	1.08	1.09	1.10
110	1.08	1.08	1.09	1.10
220	1.09	1.08	1.09	1.10
330	1.09	1.08	1.08	1.09
440	1.10	1.08	1.08	1.09
550	1.10	1.08	1.08	1.10
660	1.09	1.09	1.09	1.10



- 1 : 第 1 燃料領域
- 2 : 第 2 燃料領域
- 3 : 第 3 燃料領域
- 4 : 第 4 燃料領域

表 7.4 燃焼末期の燃料体平均燃焼度 (MWd/t)

燃料 ブロック 段数	燃料領域番号			
	1	2	3	4
1	20,500	21,000	20,500	21,000
2	31,000	31,500	30,500	30,500
3	27,500	28,500	27,000	26,500
4	18,500	19,000	17,500	17,500
5	13,000	13,000	12,000	12,000

(燃焼660日)

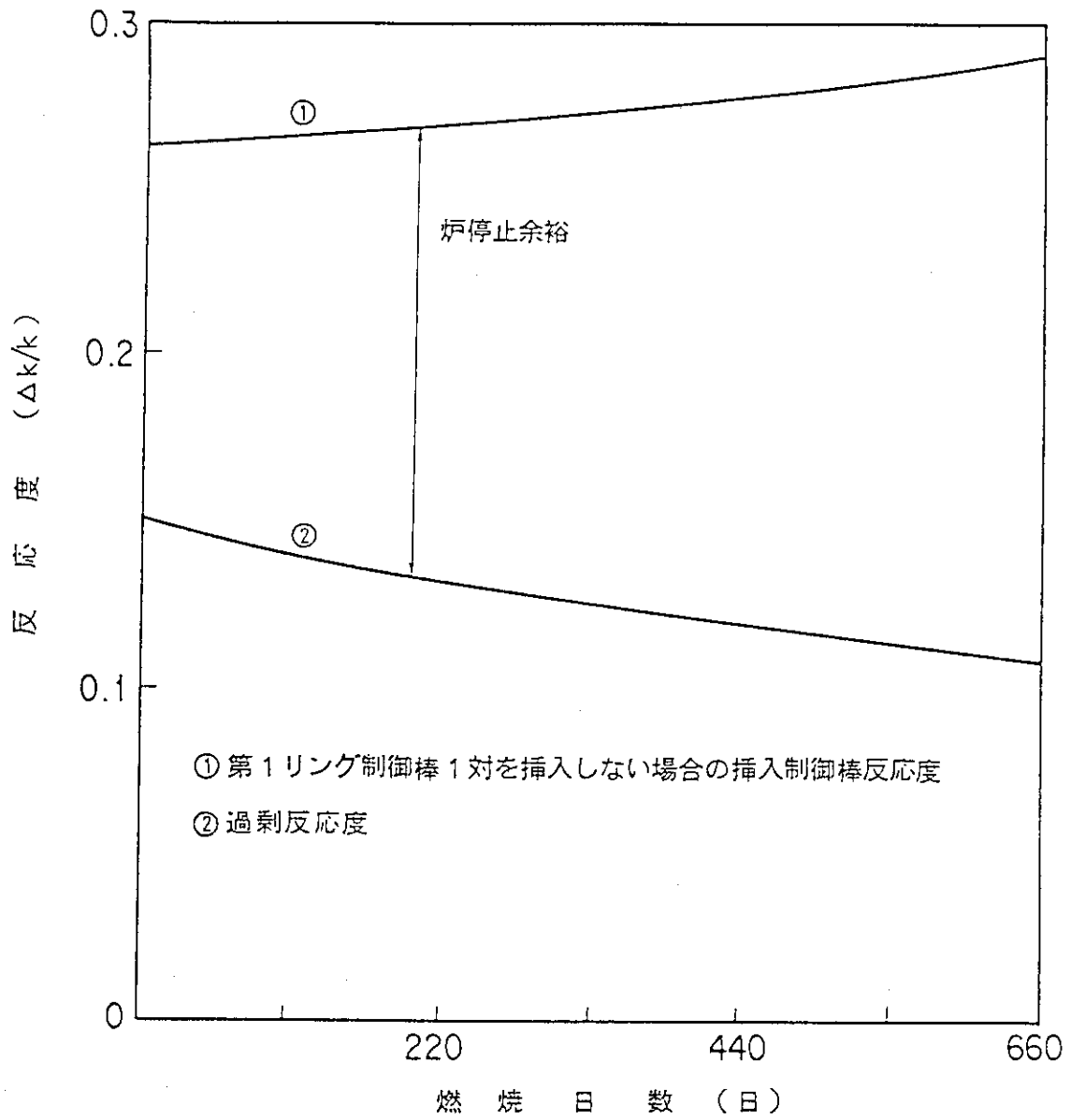


図 7.1 第1リング制御棒1対がスタック状態の炉停止余裕の燃焼に伴う変化

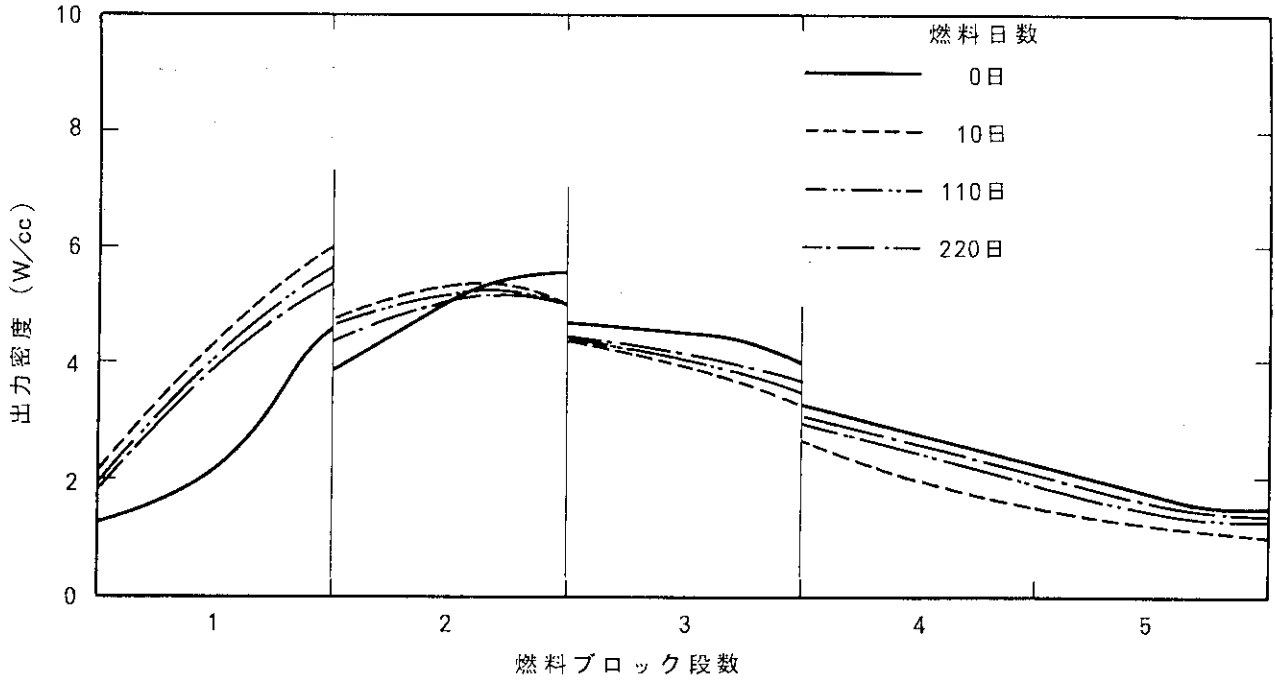


図 7.2 基準炉心の燃焼に伴う軸方向出力分布の変化 (0日～220日)

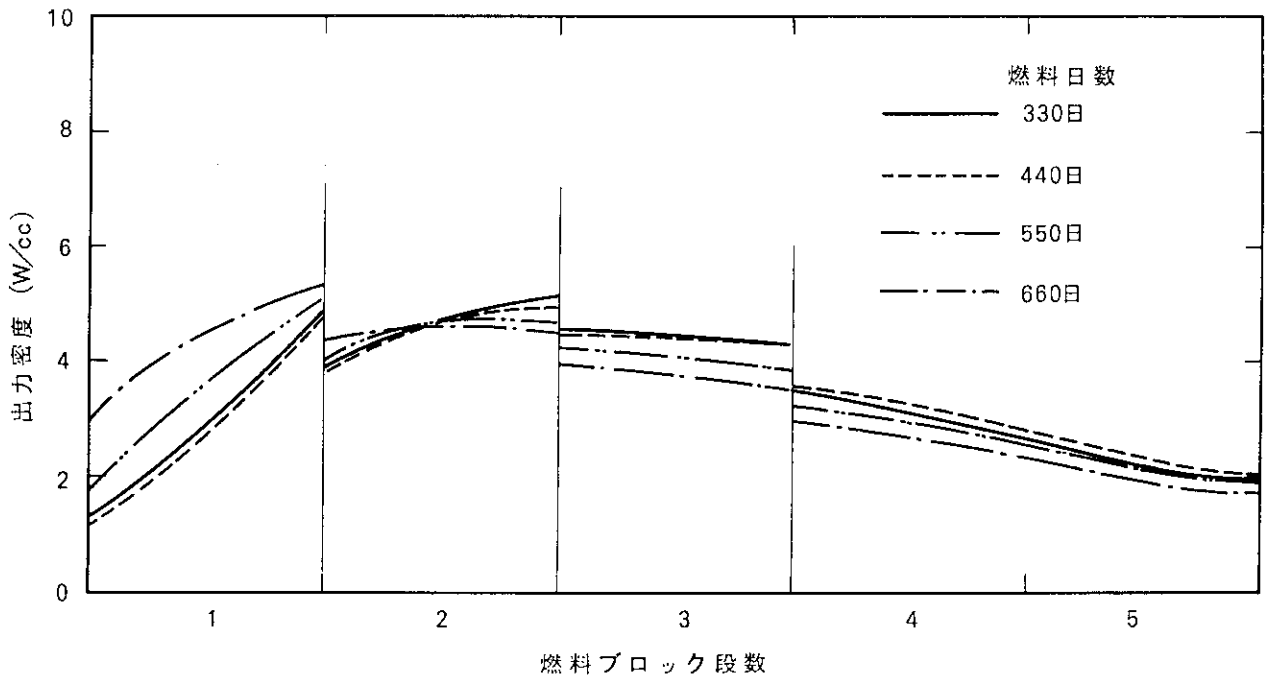


図 7.3 基準炉心の燃焼に伴う軸方向出力分布の変化 (330日～660日)

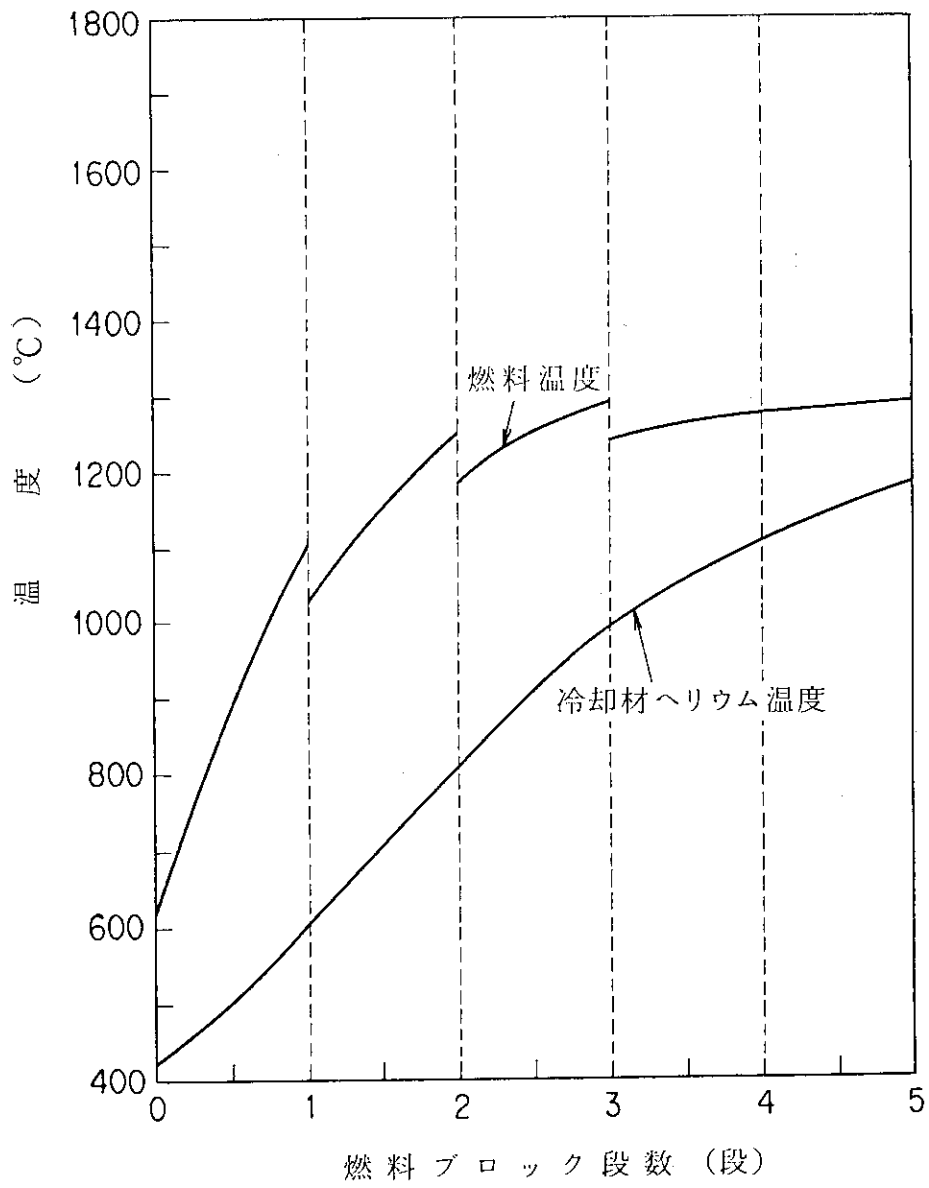


図 7.4 燃料最高温度チャンネルの軸方向温度分布
(検討ケース 8 燃焼 330 日)

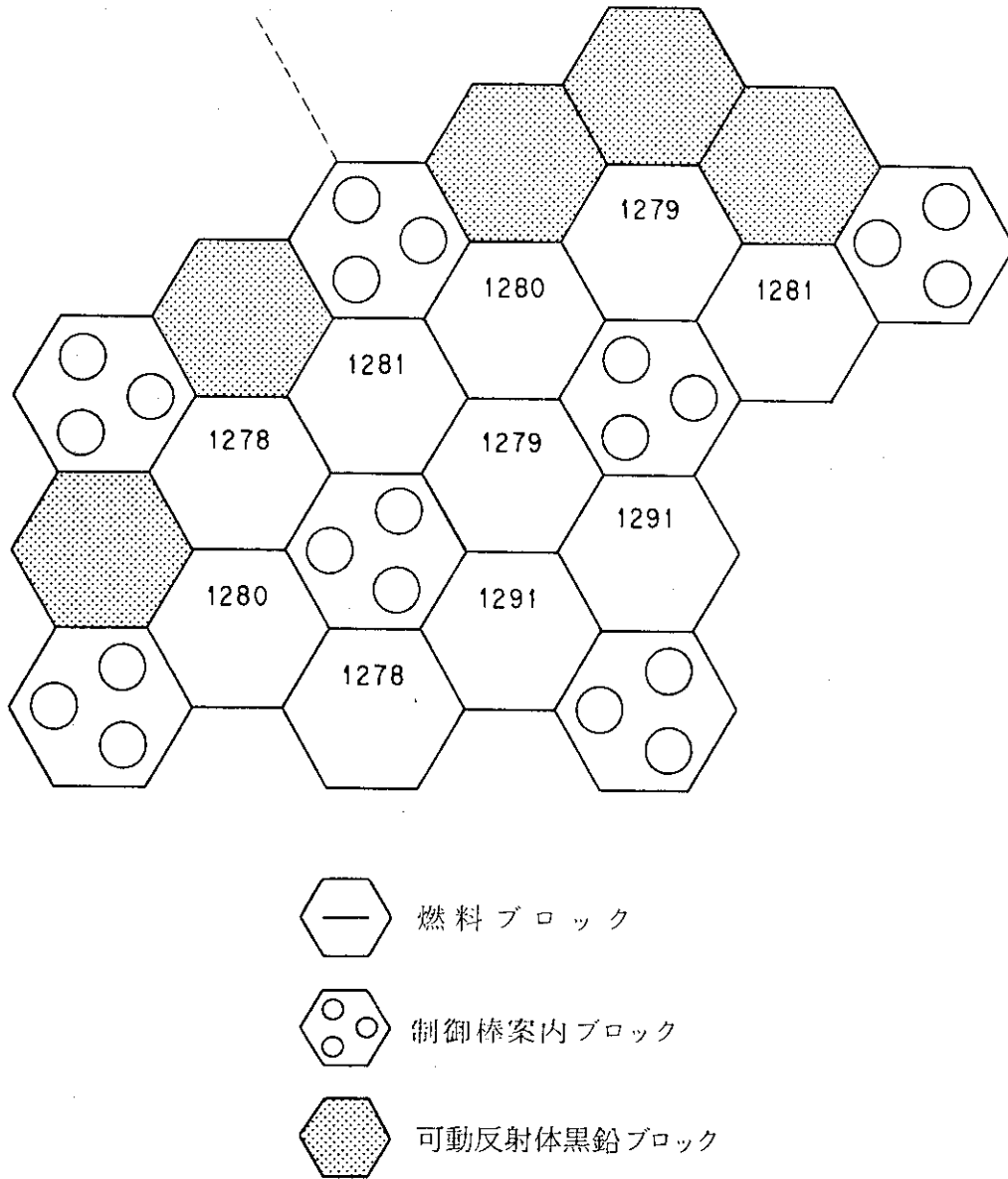


図 7.5 各カラムの燃料最高温度 (1 / 3 炉心)
 (検討ケース 8 燃焼 330 日)

8. 結 論

ウラン濃縮度配分については9種から16種の範囲、反応度調整材については、天然ボロン濃度を0.5から4.5 wt%，棒径を最大2.5 cmの範囲で、950℃の原子炉出口冷却材温度を達成するための炉内燃料配分の最適設計を行った。その結果、ウラン濃縮度種類数は12種、反応度調整材としては天然ボロン濃度が2.0及び2.5 wt%，棒径が1.4 cmの諸元のものを用いることにより、十分な炉停止余裕が確保されシステムテック燃料最高温度が約1490℃で熱的制限値の1495℃よりも低くなる燃料配分の炉心を設計することができた。ウラン濃縮度種類数の決定には種類数の削減をも考慮した。この燃料配分の設計においては、燃焼日数は炉心平均ウラン濃縮度で、炉心の余剰反応度は反応度調整材で、出力分布及び燃料温度分布はウラン濃縮度配分比で調整を行う設計手順により行った。この設計手順を用いることによりH T T Rの燃料配分の最適設計が行えたことから、この燃料配分の設計手順はH T T Rのみならず小型高温ガス炉の燃料配分の設計にも有用であり、大型高温ガス炉の燃料配分の設計にも十分参考になるものである。

謝 辞

高温工学試験研究炉の燃料配分手順を定めるにあたり、有益な助言をして頂いた高温工学試験研究炉開発部計画室長数土幸夫氏、同部原子炉建設室研究員沢和弘氏及び藤本望氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 土井, 新藤, 平野, 高野: 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6, JAERI-M 83-176 (1983).
- (2) 山下, 新藤: 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6 (Revised), JAERI-M 83-163 (1985).
- (3) LATHROP K. D., BRINKLEY F. W.; TWOTRAN-2: An Interfaced exportable version of the TWOTRAN code for two-dimensional transport, LA-4848-MS (1973).
- (4) FOWLER, T. B., VONDY, D. R., CUNNINGHAM, G. W.; Nuclear reactor core analysis code, CITATION, ORNL-TM-2496, (1971).
- (5) 小林 武司: 高温ガス炉用炉心伝熱流動解析コード TEMDIMの開発, FAPIG 第88号, pp. 12-18 (1978).
- (6) 丸山 創他: 燃料温度解析コード TEMDIMの検証, JAERI-M 88-170 (1988).
- (7) 丸山 創他: 炉内流動解析コード FLOWNETの検証, JAERI-M 88-138 (1988).
- (8) 新藤, 平野, 有賀, 安川: 多目的高温ガス冷却実験炉の参考設計-燃料体諸元設定のための格子核特性サーベイ- JAERI-M 6974 (1977).

付録 A 炉停止余裕の簡便評価法

燃料配分の設計では、定格運転時の燃料温度をできる限り低くすることを主眼としている。このため、主に定格運転状態の炉心核特性計算を行うことになり、燃料配分を調整するごとに低温停止時の炉停止余裕を確認することは設計作業の円滑性を欠くことになる。そこで低温時の制御棒等の反応度値を予め計算し炉停止余裕と、定格運転状態の炉心の反応度の関係を求め、この関係を用いて低温停止時の炉停止の可能性を評価することとした。4章に示す仮設定ケースの燃料配分について求めた低温停止時の炉停止余裕と定格運転時の実効増倍率の関係を表A.1に示す。C1、C2及びC3のケースより得られる低温状態の実効増倍率の計算結果より、制御棒の2対スタック*時の制御棒補償反応度は20.7% $\Delta\rho$ であり、制御すべき反応度は16.1% $\Delta\rho$ であることがわかる。ここで、炉心の反応度誤差として1.5% $\Delta\rho$ 、必要な未臨界度として1% $\Delta\rho$ 及び制御棒の反応度値として2.3% $\Delta\rho$ を考慮している。これらの関係から得られる炉停止余裕は4.6% $\Delta\rho$ であり、この炉停止余裕が零となる場合の低温時及び高温時の実効増倍率は、各々以下のように求められる。

$$\begin{aligned} \text{低温時の実効増倍率} &= \left(\frac{1}{1 - (\text{誤差} + \text{未臨界度})} - \text{制御棒補償反応度} \right) \\ &= \left(\frac{1}{1 - (0.015 + 0.01)} - 0.207 \right)^{-1} \\ &= 1.2215 \\ \text{高温時の実効増倍率} &= 1.0793 + (1.2215 - 1.1568) \\ &= 1.1440 \end{aligned}$$

したがって、低温時及び高温時の実効増倍率を各々約1.22及び約1.14以下にすることにより低温停止が可能な炉心となる。燃料配分の設計過程では、この高温時の実効増倍率を越えないようにする

* 制御棒の1対スタック分は中央制御棒案内カラムに照射物を装荷する場合に中央制御棒1対を使用しないことを考慮している。

表 A.1 制御棒挿入状態と実効増倍率の関係

ケース 番号	C R 挿入度 (段)/カラム数				K _{eff}	備 考
	C	R ₁	R ₂	R ₃		
C 1	0 0	0 0	0 0	0 0	1.3173	BP無し, 全CR無
C 2	0 0	0 0	0 0	0 0	1.1568	全CR無
C 3	5 1	5 4	5 6	5 3	0.9136	R ₁ 制御棒 2 対無
C 4	5 1	5 6	5 6	5 3	0.7329	全CR完全挿入
H 1	0 0	0 0	0 0	0 0	1.0793	全CR無 原子炉出口冷却材温度 850℃

- | | |
|-------------------------|-----------|
| (1) 制御すべき反応度 | 16.1 %Δρ |
| 全余剰反応度 | 24.1 %Δρ |
| 反応度調整材 | -10.5 %Δρ |
| 誤 差 | 1.5 %Δρ |
| 未臨界度 | 1.0 %Δρ |
| (2) 制御棒補償反応度 | 20.7 %Δρ |
| R ₁ 制御棒 2 対無 | 23 %Δρ |
| 誤差+輸送補正 | -2.3 %Δρ |
| (3) 炉停止余裕 | 4.6 %Δρ |

付録 B 反応度調整材諸元選定のための 格子燃焼特性計算結果

5.2節のBP諸元の選定に用いた表5.2のBP諸元と初期BP過剰反応度及び末期BP残存反応度の関係を求めるために用いた格子燃焼特性計算結果について以下に示す。2章に示す燃料格子及びBP格子計算のモデルを用いてDELIGHT-6.7で行った燃焼に伴う実効増倍率の変化の計算値を表B.1に示し、この値をグラフにプロットしたものを図B.1に示す。これらの燃焼に伴う実効増倍率の値に基づいて求めた初期BP反応度、末期BP残存反応度及びBP反応度回復の値とBP諸元との関係を表B.2に示す。表B.1及び図B.1に示すケース番号は表B.2のケース番号に対応している。表B.2の値を用いて得られるBP諸元をパラメータとした場合のウラン濃縮度と初期BP反応度の関係を図B.2に示す。また、図B.3及び図B.4にBP諸元をパラメータとした場合のウラン濃縮度と末期BP残存反応度の関係を示す。この場合、燃料2,3段の末期平均燃焼度として25GWd/tを想定しており、燃料4,5段の末期平均燃焼度として16GWd/tを想定している。5.2節の表5.1に示す初期BP過剰反応度は、図B.2のウラン濃縮度が4.6及び5.9wt%の場合の初期BP反応度から初期BP必要補償反応度の15% ΔK を差し引くことにより得られた値である。また、表5.2に示す末期BP残存反応度は、燃料2,3段については図A.3のウラン濃縮度が5.9wt%の場合の値に対応するものであり、また燃料4,5段については図B.4のウラン濃縮度が4.6wt%の値に対応するものである。反応度回復は、図B.5のウラン濃縮度が4.6wt%及び5.9wt%の場合に対応する値を読み取ったものである。

表 B.1 格子燃焼特性計算結果 (1 / 2)

ケース No	実効増倍率 K_{eff} (上段) 燃焼度 (GWd/t, 下段)							ケース No	実効増倍率 K_{eff} (上段) 燃焼度 (GWd/t, 下段)						
	0 日	10 日	50 日	150 日	250 日	450 日	650 日		0 日	10 日	50 日	150 日	250 日	450 日	650 日
BP 1	0.89396	0.86601	0.86064	0.79964	0.75005	0.68090	0.63263	BP 17	1.1272	1.0802	1.0741	1.0435	1.0064	0.93771	0.87693
" 2	1.1710	1.1182	1.1047	1.0608	1.0152	0.93856	0.87395	" 18	1.2192	1.1713	1.1637	1.1383	1.1083	1.0511	0.99985
" 3	1.2504	1.1988	1.1878	1.1554	1.1199	1.0560	1.0006	" 19	0.61632	0.62717	0.68564	0.73626	0.75686	0.71493	0.65961
" 4	0.89983	1.87162	0.86372	0.79629	1.74103	0.66400	0.61123	" 20	0.96502	0.93270	0.93788	0.93293	0.92297	0.90444	0.87512
" 5	1.1863	1.1321	1.1176	0.0712	1.0231	0.94076	0.86884	" 21	1.0923	1.0545	1.0526	1.0404	1.0241	0.99413	0.96876
" 6	1.2684	1.2149	1.2033	1.1694	1.1327	1.0558	1.0070	" 22	0.46598	0.48900	0.55831	0.62756	0.68677	0.74555	0.69782
" 7	0.87422	0.85193	0.85580	0.79987	0.75199	0.68551	0.63865	" 23	0.81100	0.79008	0.80152	0.80865	0.80991	0.81942	0.83476
" 8	1.1594	1.1086	1.0978	0.578	1.0139	0.93882	0.87636	" 24	0.95798	0.92912	0.93073	0.92613	0.91699	0.90192	0.89540
" 9	1.2424	1.1922	1.1825	1.1524	1.1184	1.0557	1.0015	" 25	0.79508	0.78500	0.81210	0.79370	0.75661	0.69103	0.64258
" 10	0.76471	0.76578	0.81439	0.80002	0.75745	0.69072	0.64210	" 26	1.1073	1.0620	1.0569	1.0296	0.99688	0.93522	0.87723
" 11	1.0879	1.0463	1.0483	1.0310	1.0011	0.93769	0.87794	" 27	1.2042	1.1575	1.1504	1.1264	1.0983	1.0451	0.99718
" 12	1.1909	1.1462	1.1424	1.1243	1.0996	1.0483	0.99945	" 28	0.57211	0.58380	0.63470	0.67177	0.70673	0.73014	0.67809
" 13	0.63597	0.65540	0.74212	0.79154	0.76632	0.70080	0.64884	" 29	0.91994	0.89004	0.89351	0.88419	0.87060	0.85376	0.84648
" 14	0.98745	0.95647	0.97067	0.97997	0.97208	0.93320	0.88062	" 30	1.0522	1.0165	1.0138	0.99968	0.98149	0.94974	0.92736
" 15	1.1137	1.0760	1.0784	1.0744	1.0625	1.0308	0.99366	" 31	0.42487	0.44848	0.51035	0.56039	0.59834	0.66795	0.71565
" 16	0.82360	0.81077	0.83324	0.79897	0.75467	0.68827	0.64064	" 32	0.75731	0.73906	0.74855	0.75031	0.74536	0.74157	0.74899
		0.6482	3.310	9.725	15.963	28.101	40.323		0.6382	3.223	9.703	16.076	28.630	40.976	

表 B.1 格子燃焼特性計算結果 (2 / 2)

ケース No.	実効増倍率 K_{eff} (上段) 燃焼度 (Gwd/t, 下段)							ケース No.	実効増倍率 K_{eff} (上段) 燃焼度 (Gwd/t, 下段)						
	0 日	10 日	50 日	150 日	250 日	450 日	650 日		0 日	10 日	50 日	150 日	250 日	450 日	650 日
BP 33	0.90462	0.87841	0.87897	0.87155	0.85932	0.83786	0.82449	BP 49	0.45868	0.48290	0.55305	0.62550	0.69056	0.74102	0.67549
" 34		0.6357	3.188	9.572	15.909	28.431	40.842	" 50	0.80852	0.78790	0.79971	0.80737	0.80990	0.82337	0.84091
" 35								" 51	0.95957	0.93036	0.93212	0.92771	0.91902	0.90546	0.90141
" 36								" 52	0.6765	0.6765	3.389	10.155	16.868	30.057	43.096
" 37	0.76398	0.76692	0.81749	0.79830	0.74921	0.67386	0.61991	" 53							
" 38	1.0973	1.0553	1.0580	1.0408	1.0096	0.94059	0.87324	" 54							
" 39	1.2043	1.1583	1.1547	1.1368	1.1118	1.0585	1.0064	" 55	0.56631	0.57911	0.63033	0.66888	0.70769	0.72095	0.65544
" 40		0.6758	3.379	10.096	16.767	29.808	42.721	" 56	0.92169	0.89175	0.89522	0.88554	0.87218	0.85677	0.84942
" 41								" 57	1.0584	1.0219	0.0192	0.0047	0.98636	0.95473	0.93311
" 42								" 58		0.6762	3.385	10.129	16.826	29.962	42.963
" 43	0.82568	0.81372	0.83614	0.79664	0.74622	0.67145	0.61862	" 59							
" 44	1.1393	1.0914	1.0852	1.0534	1.0146	0.94038	0.87215	" 60							
" 45	1.2348	1.1853	1.1776	1.1515	1.1207	1.0612	1.0066	" 61							
" 46	0.6113	0.62338	0.68344	0.73762	0.75567	0.69928	0.63690	" 62							
" 47	0.96824	0.93587	0.94142	0.93712	0.92850	0.91044	0.87431	" 63							
" 48	1.1001	1.0614	1.0596	1.0476	1.0318	1.0027	0.97724	" 64							
		0.6760	3.383	10.119	16.807	29.906	42.860								

表 B.2 BP 諸元とその反応度の関係 (1/3)

ケース No	ピン数 (本/ブロック)	Enrich (wt%)	BP			Nc/Nu	ρ_{BP}^{BOL} *(%Δk)	ρ_{BP}^{EOL} **(%Δk)				ρ_{BP}^{***} (%Δk)	備考
			n (本)	φ (cm)	W (wt%)								
BP1	33	2	0	0	0	305	—	—	—	—	—		
" 2	"	6	"	"	"	"	—	—	—	—	—		
" 3	"	10	"	"	"	"	—	—	—	—	—		
" 4	31	2	"	"	"	329	—	—	—	—	—		
" 5	"	6	"	"	"	"	—	—	—	—	—		
" 6	"	10	"	"	"	"	—	—	—	—	—		
" 7	33	2	2	0.5	0.5	305	- 2.0	(0.2)	(0.3)	(0.4)	0.4		
" 8	"	6	"	"	"	"	- 1.2	0	0	0	0		
" 9	"	10	"	"	"	"	- 0.8	-0.3	-0.2	-0.1	0		
"10	"	2	"	1.5	"	"	-12.9	(0.8)	(1.0)	(1.0)	5.0		
"11	"	6	"	"	"	"	- 8.3	-1.4	-1.0	-0.5	0.3		
"12	"	10	"	"	"	"	- 6.0	-2.0	-1.6	-1.0	0		
"13	"	2	"	2.5	"	"	-25.8	(1.6)	(1.9)	(2.0)	15.6		
"14	"	6	"	"	"	"	-18.4	-4.3	-3.1	-1.4	2.4		
"15	"	10	"	"	"	"	-13.7	-5.7	-4.7	-3.3	0.2		
"16	"	2	"	0.5	2.5	"	- 7.0	(0.6)	(0.6)	(0.6)	2.2		
"17	"	6	"	"	"	"	- 4.4	-1.0	-0.6	-0.2	0		
"18	"	10	"	"	"	"	- 3.1	-1.1	-1.0	-0.6	0		
"19	"	2	"	1.5	"	"	-27.8	(0.6)	(2.4)	(3.2)	14.0		
"20	"	6	"	"	"	"	-20.6	-9.1	-7.6	-4.8	0.6		
"21	"	10	"	"	"	"	-15.8	-9.4	-8.6	-7.0	0		

* 初期BP反応度

** BU = 16/19/25 GWD/T 時点の末期BP残存反応度

*** BP反応度回復

Power = 6 (W/cc)

(T_f, T_m) = (1273 K, 900 K)

表B.2 BP諸元とその反応度の関係(2/3)

ケース No	ピン数 (本/ブロック)	Enrich (wt%)	BP			Nc/Nu	ρ_{BP}^{BOL} * (%Δk)	ρ_{BP}^{EOL} ** (%Δk)			ρ_{BP}^{***} (%Δk)	備考
			n (本)	φ (cm)	W (wt%)			()	()	()		
BP22	33	2	2	2.5	2.5	305	-42.8	-6.8	-2.2	(4.2)	28.0	
" 23	"	6	"	"	"	"	-36.0	-20.4	-18.2	-14.2	2.6	
" 24	"	10	"	"	"	"	-29.2	-20.2	-19.0	-16.6	0.2	
" 25	"	2	"	0.5	4.5	"	-9.9	(0.8)	(0.9)	(1.0)	2.5	
" 26	"	6	"	"	"	"	-6.4	-1.8	-1.3	-0.8	0	
" 27	"	10	"	"	"	"	-4.6	-2.2	-1.7	-1.3	0	
" 28	"	2	"	1.5	"	"	-32.2	-4.6	-1.2	(3.6)	16.2	
" 29	"	6	"	"	"	"	-25.1	-14.2	-12.8	-10.0	0.4	
" 30	"	10	"	"	"	"	-19.8	-13.6	-12.8	-11.4	0	
" 31	"	2	"	2.5	"	"	-46.9	-15.8	-11.8	-5.1	21.9	
" 32	"	6	"	"	"	"	-41.4	-26.8	-25.1	-21.4	1.1	
" 33	"	10	"	"	"	"	-34.6	-26.0	-24.8	-22.9	0.1	
" 34	31	2	"	0.5	0.5	329						
" 35	"	6	"	"	"	"						
" 36	"	10	"	"	"	"						
" 37	"	2	"	1.5	"	"	-13.6	(0.7)	(0.9)	(1.0)	5.4	
" 38	"	6	"	"	"	"	-8.9	-1.6	-1.0	-0.3	0.3	
" 39	"	10	"	"	"	"	-6.4	-2.3	-2.0	-1.4	0	
" 40	"	2	"	2.5	"	"						
" 41	"	6	"	"	"	"						
" 42	"	10	"	"	"	"						

* 初期BP反応度

** BU = 16/19/25 GWD/T 時点の末期BP残存反応度

*** BP反応度回復

Power = 6 (W/cc)

(T_f, T_m) = (1273 K, 900 K)

表 B.2 BP 諸元とその反応度の関係 (3 / 3)

ケース No	ピン数 (本/ブロック)	Enrich (wt%)	BP			Nc/Nu	ρ_{BP}^{BOL} (%Δk)	ρ_{BP}^{EOL} (%Δk)			ρ_{BP}^{***} (%Δk)	備考
			n (本)	φ (cm)	W (wt%)							
BP43	31	2	2	0.5	2.5	329	- 7.4	(0.4)	(0.4)	(0.6)	2.4	
" 44	"	6	"	"	"	"	- 4.7	- 1.0	- 0.7	- 0.2	0	
" 45	"	10	"	"	"	"	- 3.4	- 1.2	- 1.1	- 0.8	0	
" 46	"	2	"	1.5	"	"	-28.9	(0.8)	(2.0)	(3.0)	14.6	
" 47	"	6	"	"	"	"	-21.8	- 9.8	- 8.0	- 5.0	0.6	
" 48	"	10	"	"	"	"	-16.8	-10.3	- 9.4	- 7.7	0	
" 49	"	2	"	2.5	"	"	-44.1	- 7.2	- 1.8	(4.4)	28.2	
" 50	"	6	"	"	"	"	-37.8	-21.8	-19.5	-15.2	2.0	
" 51	"	10	"	"	"	"	-30.9	-21.8	-20.5	-18.0	0.2	
" 52	"	2	"	0.5	4.5	"						
" 53	"	6	"	"	"	"						
" 54	"	10	"	"	"	"						
" 55	"	2	"	1.5	"	"	-33.4	- 4.6	- 1.0	(3.7)	16.0	
" 56	"	6	"	"	"	"	-26.5	-15.4	-13.8	-10.8	0.3	
" 57	"	10	"	"	"	"	-21.0	-14.8	-14.1	-12.4	0	
" 58	"	2	"	2.5	"	"						
" 59	"	6	"	"	"	"						
" 60	"	10	"	"	"	"						
" 61	33	2	"		0.5							
" 62	"	6	"		"							
" 63	"	10	"		"							

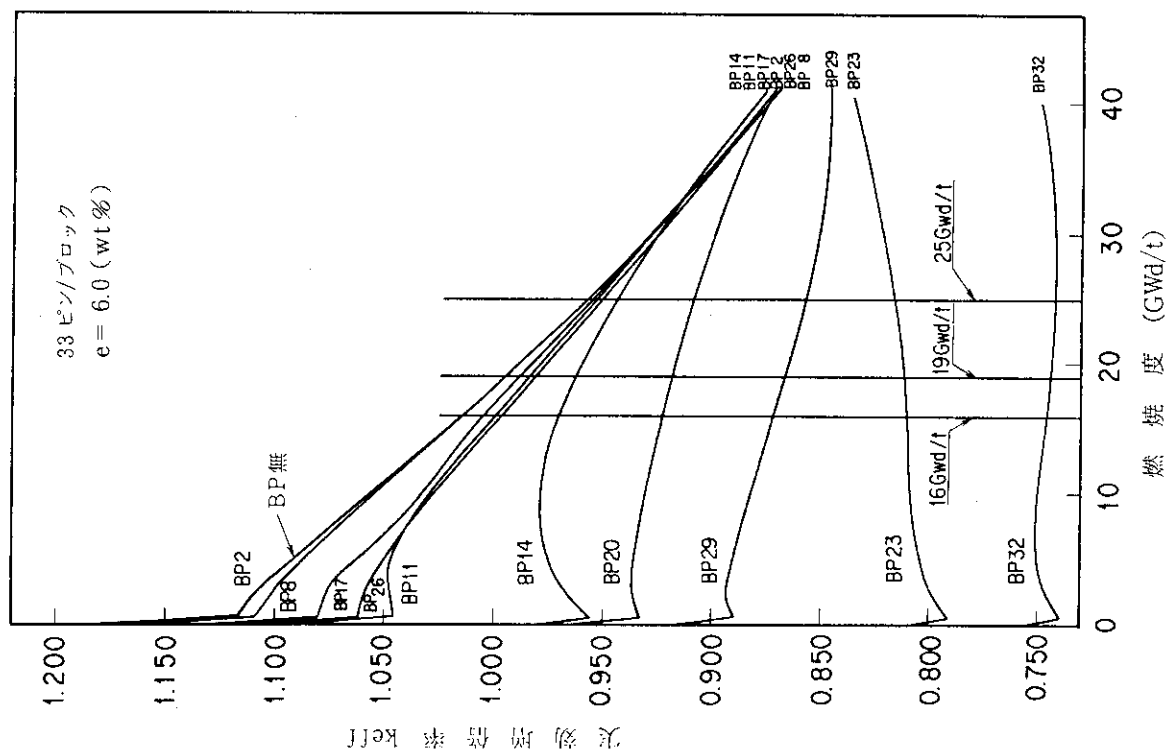
* 初期BP反応度

** BU = 16/19/25 GWD/T 時点の末期BP残存反応度

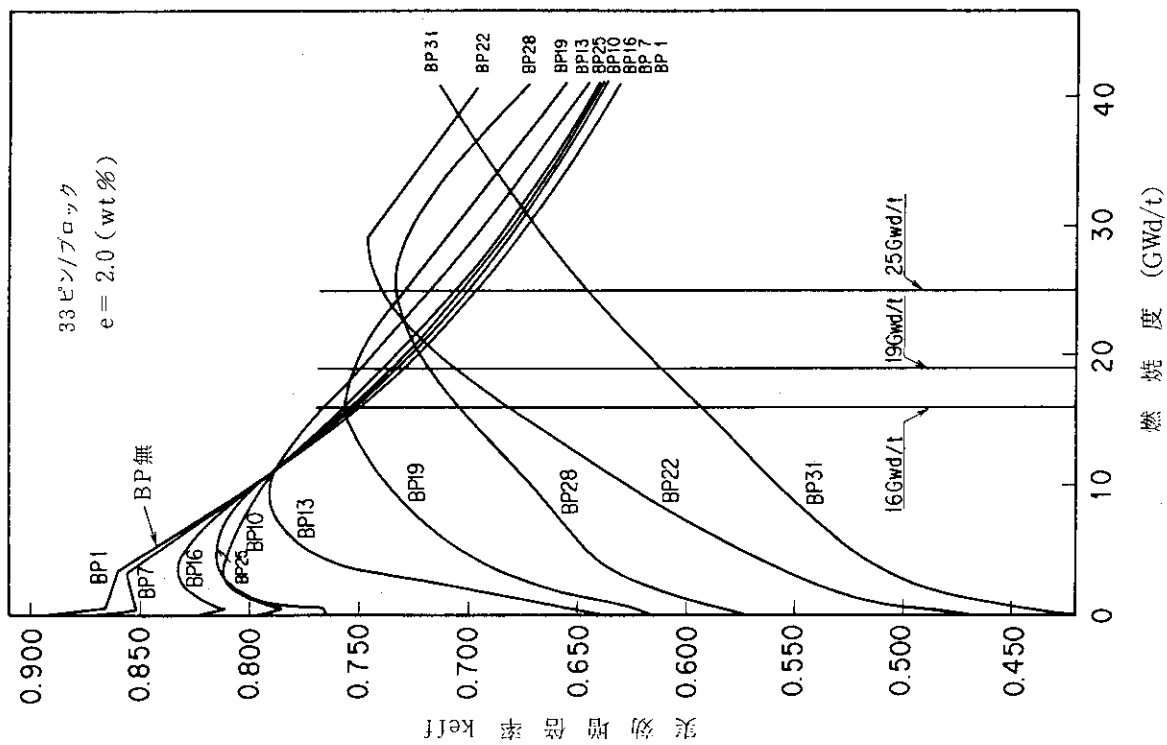
*** BP反応度回復

Power = 6 (W/cc)

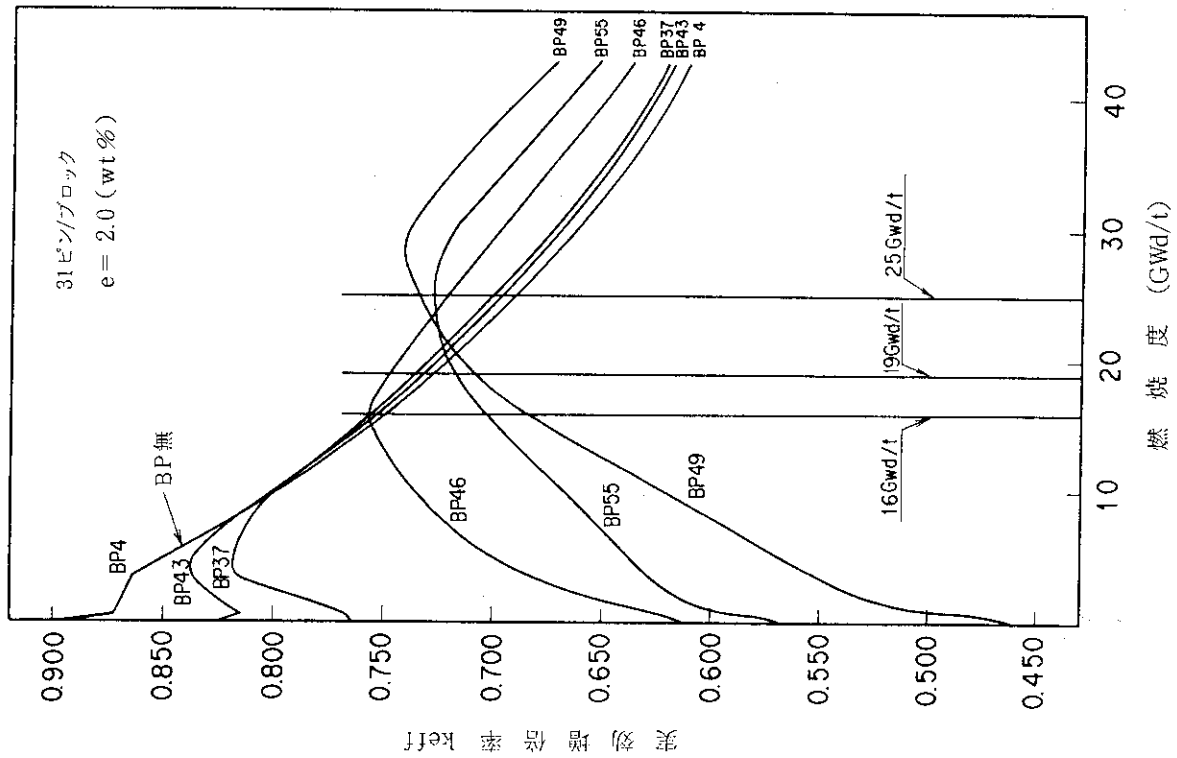
(T_f, T_m) = (1273 K, 900 K)



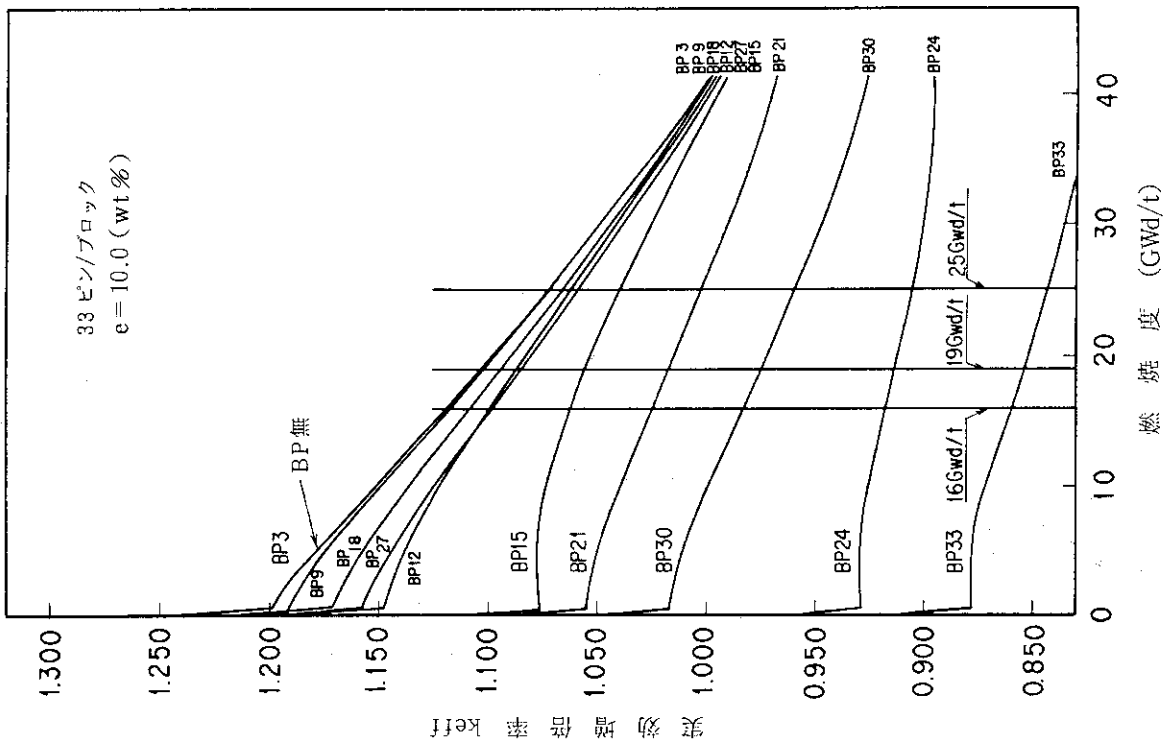
図B.1 格子特性計算結果 (2 / 6)



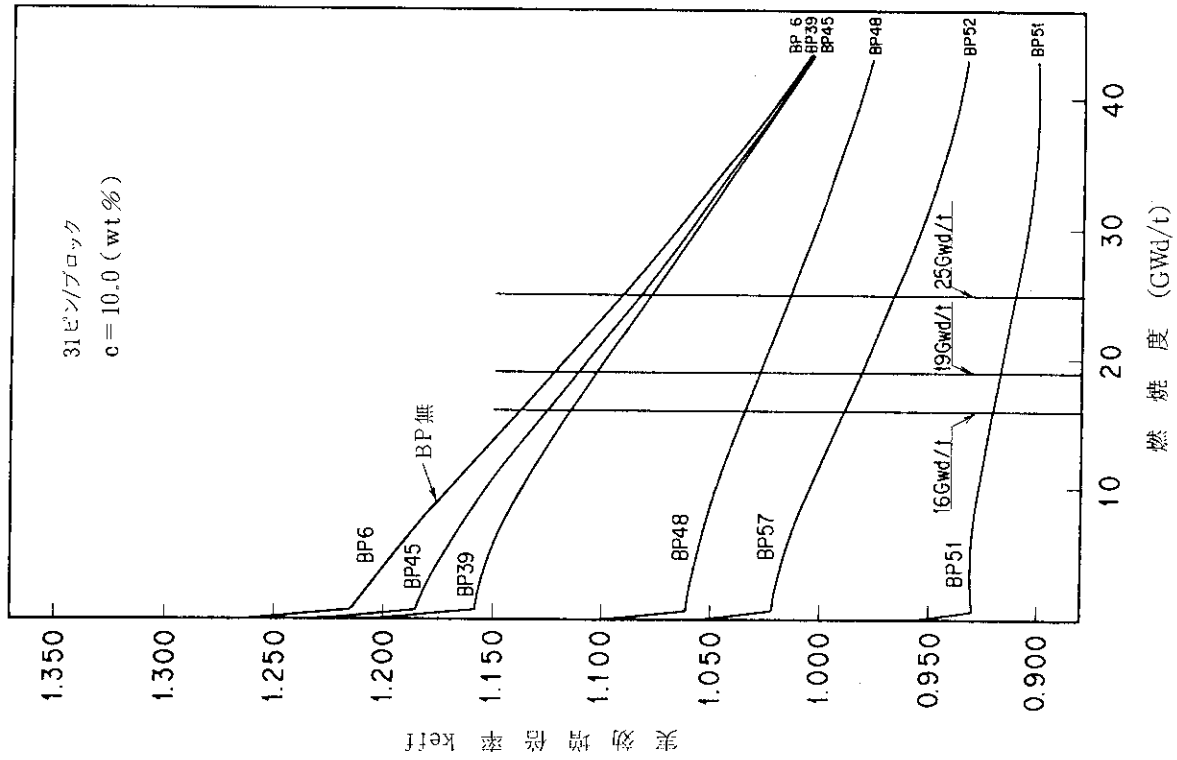
図B.1 格子特性計算結果 (1 / 6)



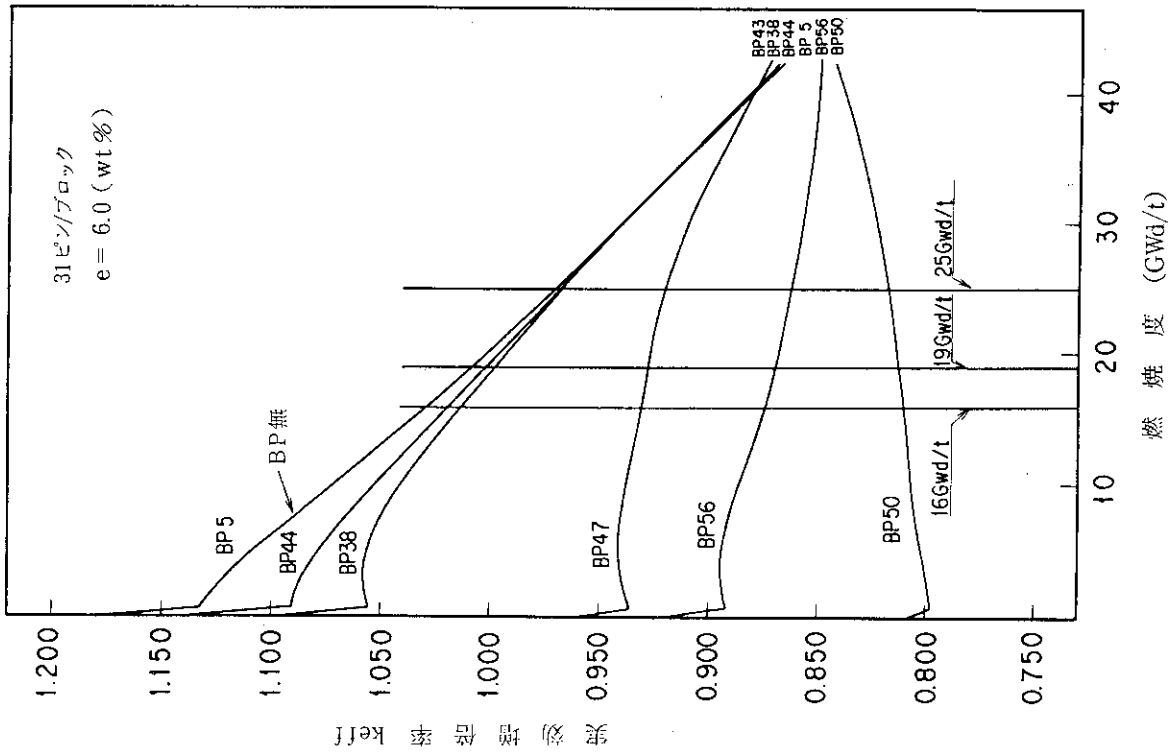
図B.1 格子特性計算結果 (4 / 6)



図B.1 格子特性計算結果 (3 / 6)



図B.1 格子特性計算結果 (6 / 6)



図B.1 格子特性計算結果 (5 / 6)

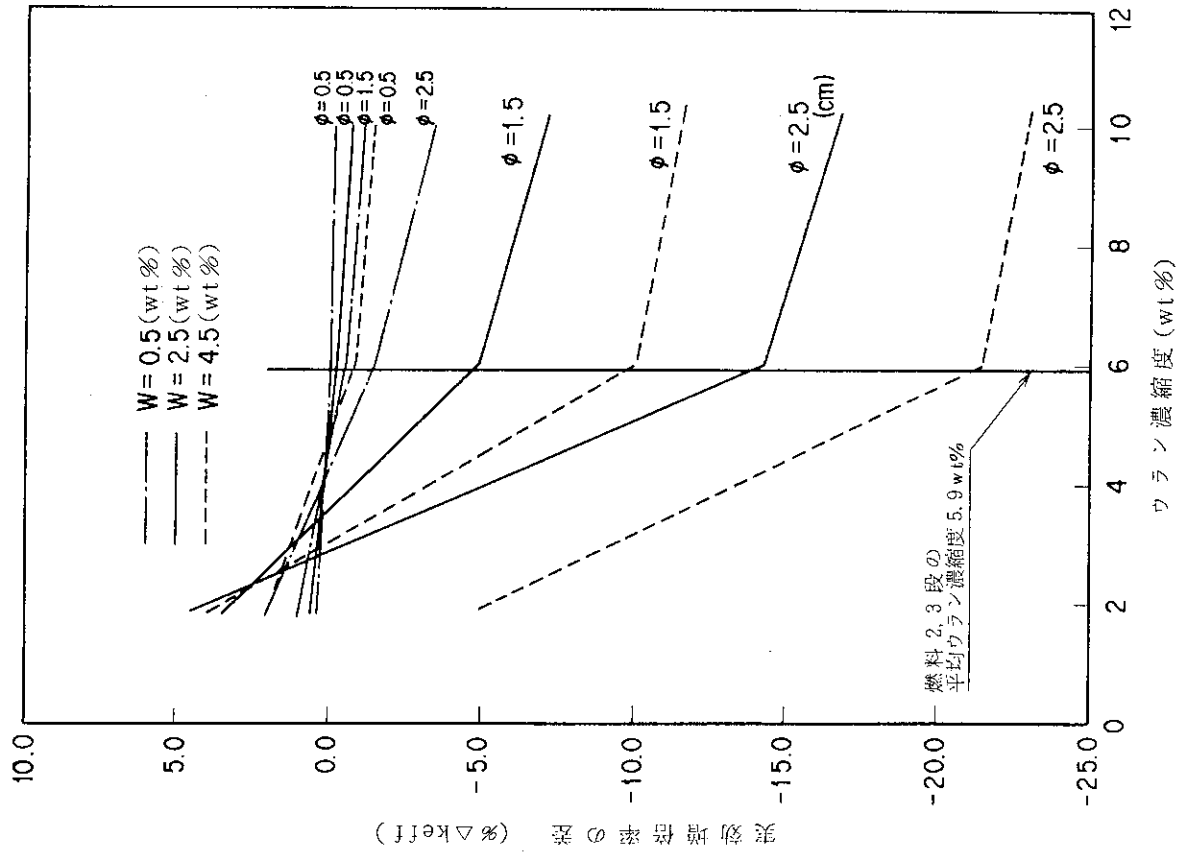


図 B.3 燃焼度 25 GWd/t 時の末期 B P 残存反応度 (33ピン/ブロック)

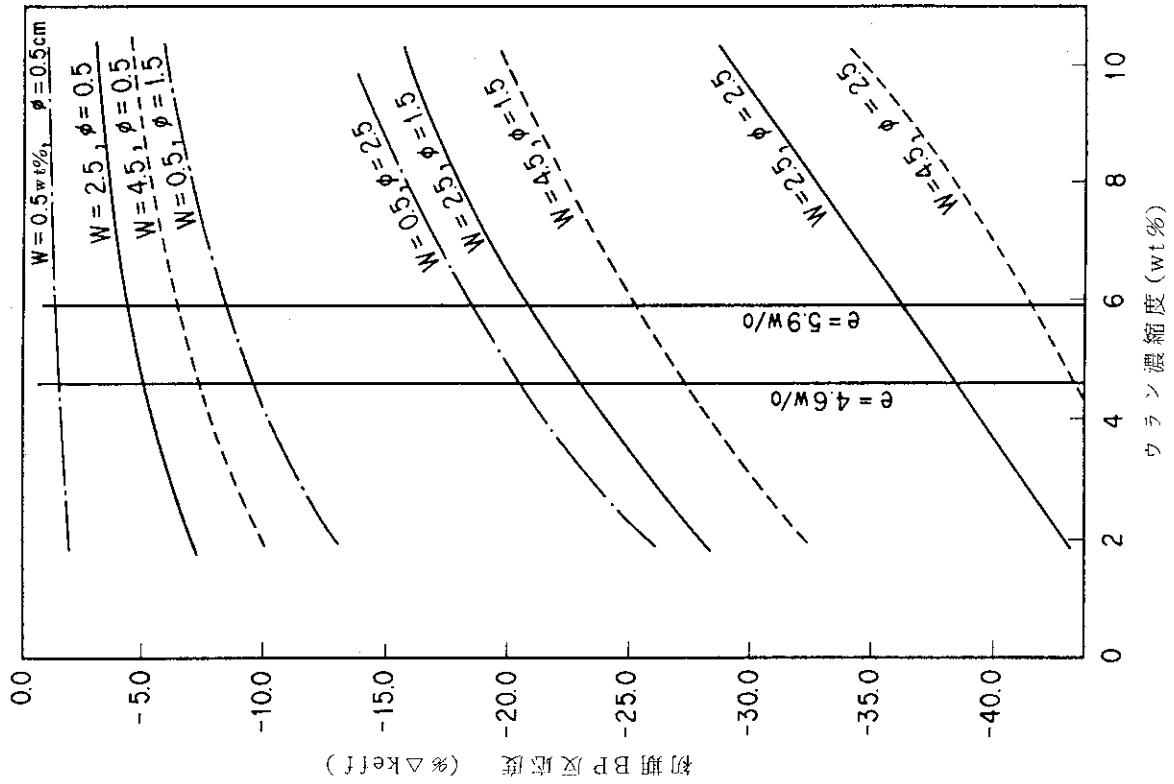


図 B.2 ウラン濃縮度と初期 B P 反応度の関係 (33ピン/ブロック)

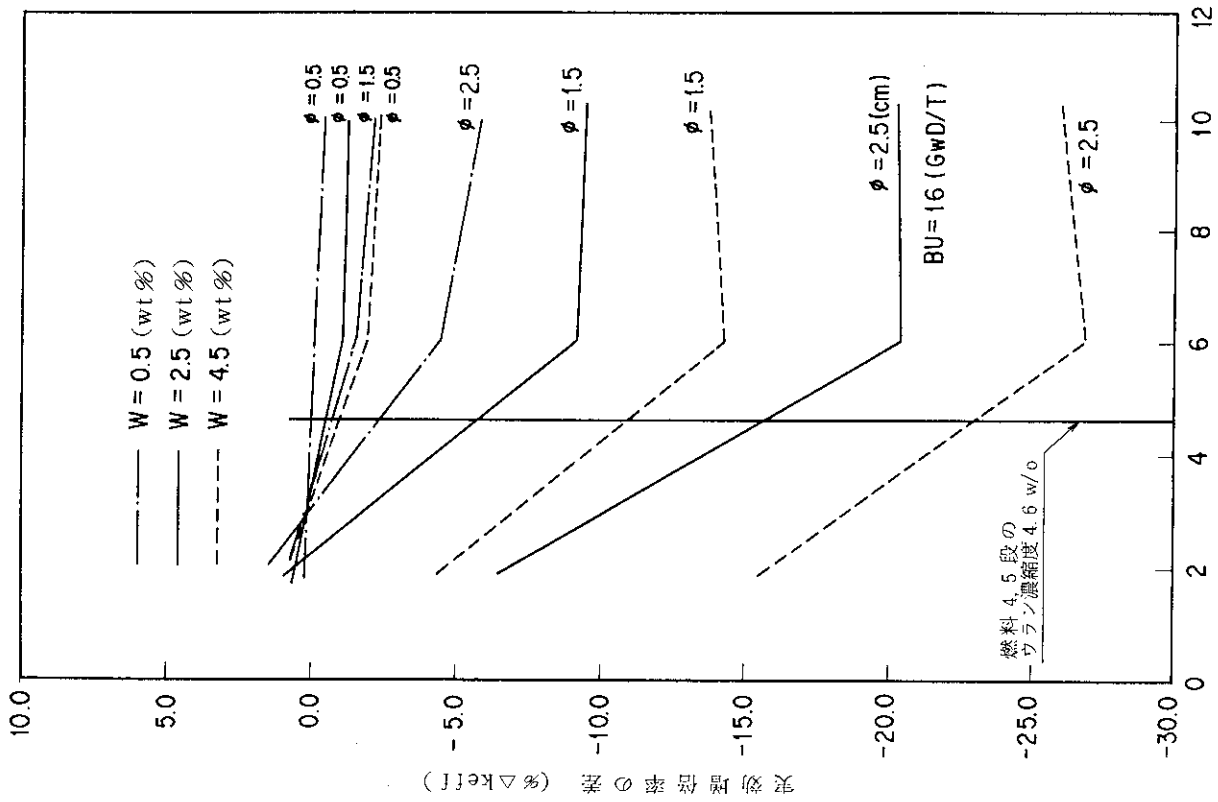


図 B.4 燃焼度 16 GWd/t 時の末期 BP 残存 (33ピン/ブロック)

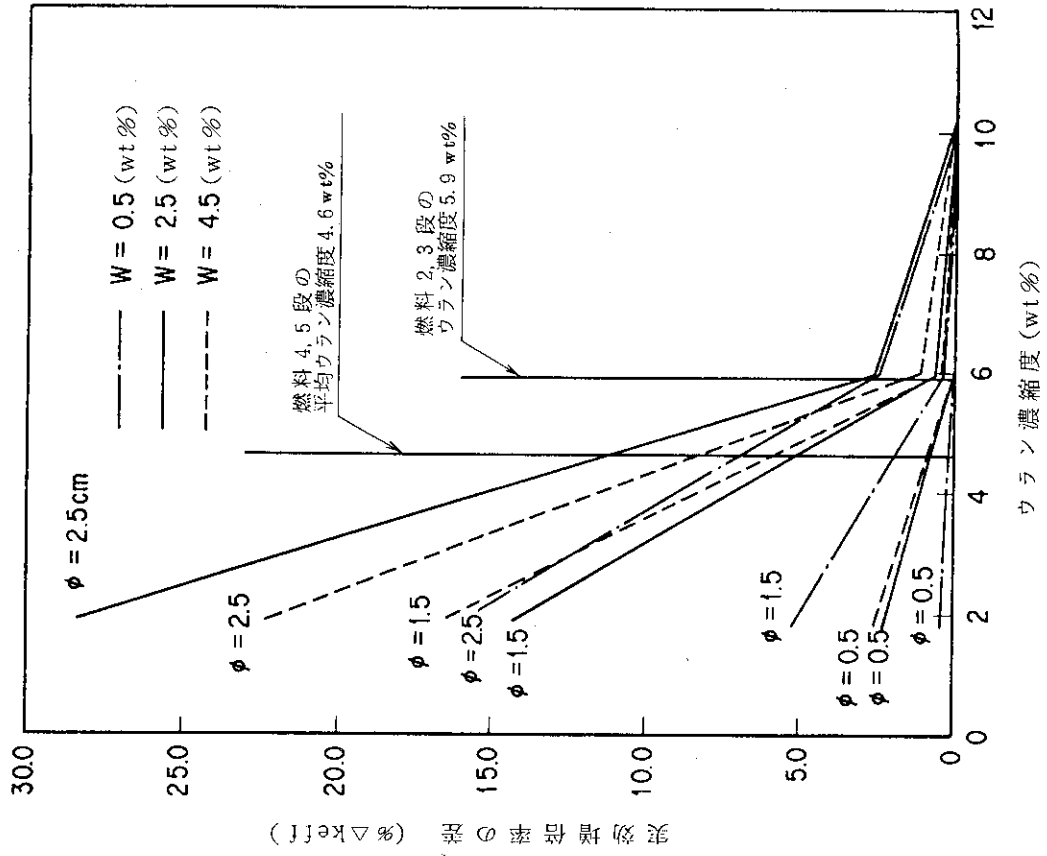


図 B.5 BP 反応度回復 (33ピン/ブロック)

付録 C ウラン濃縮度種類数の削減

ウラン濃縮度配分の微調整を行う過程の中のウラン濃縮度種類数を削減する作業の中で行った検討ケースを表 C.1 に示す。表 C.1 に示す基準炉心及び調整炉心 F は、各々本文の表 6.1 の検討ケース 7 及び検討ケース 8 に対応する。基準炉心に基づいてウラン濃縮度種類数を削減した検討ケースの炉心が調整炉心 A, B, C, D, E 及び F である。これらの調整炉心の中で燃料最高温度（システムテック）が最も低くなる調整炉心 F を選定炉心とした。

表C.1 ウラン濃縮度種類数削減の検討

ウラン濃縮度配分					制御棒挿入度 (段)	Keff	P _{MAX} (W/C)	出力ピーキング係数 P _i × P _j				システム全体の燃料最高温度 (850℃/950℃)	備 考
1	2	3-4	5										
(基準炉心)					0.5	1.0163 ₄	5.51	1.050 ₃	1.056 ₇	1.099 ₃	1.093 ₆	1381/1495	
1	6.7	7.9	9.4	9.9	0.75	0.9991 ₁	5.61	1.042 ₄	1.050 ₇	1.094 ₇	1.090 ₆		
2	5.3	6.2	7.2	7.7									
3	4.4	5.1	6.0	6.3	1.0	0.9815 ₅	5.57	1.035 ₅	1.045 ₅	1.090 ₆	1.088 ₆		
4	3.3	3.8	4.5	4.8									
5					(16種, E=5.8 ₄ w/o)								
(調整炉心A)					0.5	1.0155 ₃	5.59	1.041 ₆	1.061 ₇	1.093 ₃	1.101 ₅ [○]	1381/	4種減 E間隔 2.5%以下
1	6.7	7.9 [○]	9.4	9.9	0.75	0.9980 ₅	5.69	1.034 ₄	1.056 ₆	1.088 ₆	1.099 ₆ [○]		
2	5.1 [○]	6.3 [○]	7.2	7.9 [○]									
3	4.4	5.1	5.9 ₅	6.3	1.0	0.9803 ₅	5.65	1.028 ₅	1.050 ₆	1.083 ₅	1.095 ₅ [○]		
4	3.3	3.8	4.4 [○]	4.8									
5					(12種, E=5.8 ₃ w/o)								
(調整炉心B)					0.5	1.0174 ₆	5.57	1.0352	1.0569	1.1020 ₃	1.0983	1406/-	5種減 感度検討用
1	6.7	7.9 ₅	9.4	9.9	—								
2	5.1 [○]	6.3 [○]	7.2	7.9 ₅									
3	4.4	5.1	6.3 [○]	6.3	1.0	0.9827 ₆	5.64	1.0216	1.0459	1.0940 ₅	1.0929		
4	3.3	3.8	4.4 [○]	4.8									
5					(11種, E=5.8 ₅ w/o)								
(調整炉心C)					0.5	1.0163 ₆	5.52	1.0384	1.0561	1.1013 ₃	1.0978	1400/-	5種減 感度検討用
1	6.7	7.9 ₅	9.4	9.9	—								
2	5.1 [○]	6.2	7.2	7.9 ₅									
3	4.4	5.1	6.2 [○]	6.2 [○]	1.0	0.9814 ₄	5.58	1.0250	1.0449	1.0919 ₅	1.0908		
4	3.3	3.8	4.4 [○]	4.8									
5					(11種, E=5.8 ₄ w/o)								
(調整炉心D)					0.5	1.0161 ₇	5.59	1.053	1.061	1.095	1.093	/1498	2種減 E間隔 2%以下
1	6.7	7.9	9.4	9.9	0.75	0.9987 ₆	5.67	1.045	1.055	1.089	1.090		
2	5.3	6.3 [○]	7.2	7.7									
3	4.4	5.1	6.0	6.3	1.0	0.9810 ₃	5.66	1.039	1.050	1.084	1.087		
4	3.3	3.8	4.4 [○]	4.8									
5					(14種, E=5.8 ₃ w/o)								
(調整炉心E)					0.5	1.0160 ₃	5.59	1.048	1.065	1.091	1.099	/1496	4種減 温度低下期 待ケース
1	6.7	7.9	9.4	9.9	0.75	0.9965 ₂	5.69	1.040	1.059	1.085	1.096		
2	5.2 [○]	6.3 [○]	7.2	7.9 [○]									
3	4.4	5.2 [○]	5.9 ₅	6.3	1.0	0.9808 ₃	5.66	1.034	1.054	1.081	1.093		
4	3.3	3.8	4.4 [○]	4.8									
5					(12種, E=5.8 ₃ w/o)								
(調整炉心F)					—							1376/1487	4種減 最終燃焼 ケース
1	6.7	7.9	9.4	9.9	0.75	0.9983 ₃	5.68	1.044	1.066	1.081	1.096		
2	5.2 [○]	6.3 [○]	7.2	7.9 [○]									
3	4.3 [○]	5.2 [○]	5.9 ₅	6.3	1.0	0.9806 ₆	5.64	1.039	1.062	1.075	1.093		
4	3.4 [○]	3.9 [○]	4.3 [○]	4.8									
5					(12種, E=5.8 ₂ w/o)								

○: 基準炉心より増加
○: // 減少