

ヘリウムガス冷却大型高速炉
被覆粒子窒化物燃料炉心の設計検討
(六角ブロック型概念炉心)
－2004 年度報告－
(研究報告)

2005 年 7 月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division ,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu , Tokai-mura , Naka-gun , Ibaraki 319-1184 ,
Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

ヘリウムガス冷却大型高速炉・被覆粒子窒化物燃料炉心の設計検討
(六角ブロック型概念炉心)
— 2004 年度報告 —
(研究報告)

岡野 靖¹⁾ 相田達也^{1)*} 水野朋保¹⁾

要 旨

実用化戦略調査研究では、被覆粒子窒化物燃料を用いたヘリウムガス冷却高速炉の炉心概念設計を進めている。本年度は、被覆粒子燃料を固相マトリクスに内蔵し、縦方向に貫通する多数の冷却管内流により燃料を間接冷却する六角ブロック型概念に対し、炉心特性向上と定格時・過渡時除熱性能向上を両立させる諸方策を、様々な観点から検討した。

特性向上方策としては、主に核特性(径方向ピーキング低減、炉内構造物構成・形状改善)、主と熱特性(燃料温度上昇幅の低減、軸方向出力分布の平坦化、圧力損失の低減、過渡時炉心入口温度の低減)、核・熱両特性(燃料体積比の向上、燃料温度低減によるドップラ効果の向上)に関するものを対象とした。各方策の効用評価と開発課題検討を通じ、“マトリクス部接触熱抵抗合理化による定格時・過渡時燃料温度低減方策”、及び、“減圧過渡・自然循環除熱時の炉心入口温度低減による冷却材および炉心の最高温度低減方策”を採用した。これらの方策とともに、燃料集合体形状及び制御要素構成の合理化を図り、初装荷核分裂性 Pu 重量削減と取出平均燃焼度向上を両立する炉心概念を構築した。炉心構成としては、高い増殖性と燃焼度を追求する導入期炉心と、増殖比~1 ながら、より高燃焼度を達成する平衡期炉心を構築した。主たる炉心特性値は以下の通りである。

[基準炉心(熱出力 2400MWth／電気出力 1124MWe)]

炉心等価直径／高さ／遮蔽体外接円径	5.43m / 1.00m / 7.49m
取出平均燃焼度：炉心部(導入期/平衡期炉心)	121GWd/t / 123GWd/t
：ブランケット含(導入期/平衡期炉心)	69GWd/t / 89 GWd/t
増殖比(導入期/平衡期炉心)	1.11 / 1.03
初装荷核分裂性 Pu 量(導入期/平衡期炉心)	7.0t/GWe / 7.0t/GWe

また基準炉心(導入期)に対し、減圧事故でスクラムと強制循環除熱が失敗し自然循環除熱となる過渡解析を実施し、炉心部温度が大幅に改善される結果を得た(下記[]内は昨年度の値)。

1 次ピーク燃料温度	1867℃ [1857℃]
2 次ピーク燃料温度	2014℃ [7 時間超まで 2200℃以下]
長時間除熱時燃料温度	1809℃ [2200℃超]

さらに本炉心の設計柔軟性評価のため、1500MWe 級大出力化炉心(導入期、平衡期)を構築した。また 1124MWe 級基準炉心(導入期)に対し、TRU 燃料中の MA 含有率増加に伴う特性変化(燃焼欠損反応度の減少、減圧反応度の増加とドップラ効果の減少等)を評価した。

1) 大洗工学センター システム技術開発部 炉心・燃料システムグループ

* 日本原子力発電(株)からの派遣者

本報告書は、「高速増殖炉システムの実用化調査研究に関する協力協定」に基づき実施した JNC と原電(9 電力会社、電源開発株式会社及び原電の代表)との共有成果である。

**Feasibility Study of Large-Scale Helium GFR employing Coated Particle Fuel
(Design Study of Hexagonal Matrix-Block Fuel Assembly Cores)
- Annual Report of JFY2004 -**

Yasushi OKANO¹⁾, Tatsuya AIDA^{1)*}, Tomoyasu MIZUNO¹⁾

Abstract

Gas-cooled fast reactor has been taken an interest as a future nuclear reactor power source; we JNC have designed large-scale (1124MW electric power), high-temperature (850°C) with high thermodynamic efficiency (around 47%), helium-cooled fast reactors as a part of feasibility study. Hexagonal-block fuel assembly configuration has been considered as a candidate, where a number of coated particles packed in a SiC matrix are cooled indirectly by ascending flow in penetrating tubes. This manuscript describes, as an annual report of JFY2004, technical keys for enhancing core neutronics/thermal-hydraulics performances of the hex-block concepts and the best-to-date core designs

Technical keys for enhancing are from neutronics viewpoints (radial peaking factor, assembly layout and configuration), thermal-hydraulic viewpoints (heat transfer and film temperature rise, thermal conductivity and fuel-matrix temperature rise, core pressure drop, and coolant temperature), and neutronics/&/thermal-hydraulics combinational viewpoints (effective fuel volume fraction, local temperature decrees for increasing Doppler effects). Two issues (reducing contacting heat resistance in a matrix, and lowering core inflow temperature under depressurization transient) are selected from quantitative pre-evaluations; then are applied to select the reference core designs for achieving reduced Pu fissile inventory and improved average discharge burnup. Two reference cores are designed; one is 'breeding' core, which achieves high breeding ratio and high discharge burnup, the other is 'break-even' core, which brings much higher discharge burnup with a breeding ratio of around unity.

[Reference Core Designs (2400MW thermal / 1124MW electric Outputs)]

▪ Core equiv. diameter / Height / Outermost diameter	5.42m / 1.00m / 7.49m
▪ Average Discharge Burnup (Seed region average)**	121GWd/t / 123GWd/t
(Entire core average)**	69GWd/t / 89GWd/t
▪ Breeding Ratio**	1.11 / 1.03
▪ Initial Pu fissile quantity**	7.0ton/GWe / 7.0ton/GWe

The breeding core temperature under natural convection cooling conditions, after a depressurization accident without SCRAM or forced convection cooling of auxiliary core cooling system, is evaluated as follows (the temperatures in parentheses are of last JFY core design).

▪ Fuel temperature at 1 st peak point	1867°C [1857°C],
at 2 nd peak point	2014°C [< 2200°C over 7hrs.],
under long-term cooling conditions	1809°C [> 2200°C].

Larger power-scale (1500MWe) breeding and break-even core designs, and core performance changes with TRU (transuranium) fuel composition variations are studied in this manuscript; both exploring designs are typically for specifying core design & performance possibilities and varieties.

1) Fuel and core system engineering group, System engineering technology division, Oarai engineering center

*: Delegation from the Japan Atomic Power Company (JAPC).

** : the values are of breeding core and break-even core, respectively.

This report is the outcome of collaborative study between JNC and JAPC (that is the representative of 9 electric utilities, Electric Power Development Company and JAPC) in the accordance with "The Agreement About The Development of A Commercialized Fast Breeder Reactor Cycle System".

目 次

1. はじめに	1
1.1. ヘリウムガス冷却炉の検討経緯	1
1.1.1. 検討の経緯及び概略	1
1.1.2. FS フェーズ II 中間報告までの検討成果(平成 14 及び 15 年度)	2
1.2. FS フェーズ II 中間報告後の検討経緯(平成 16 年度検討の概要)	3
2. 炉心設計の流れ	8
2.1. 設計方針・目標と設計条件	8
2.1.1. 設計要求と目標	8
2.1.2. 設計条件	9
2.2. 炉心特性改善方策の検討	11
2.2.1. H15 年度基準炉心の特性分析	11
2.2.2. 改善への着眼点と方策	12
2.3. 評価方策の抽出	13
2.3.1. 核特性向上に着目した方策	13
2.3.1.1. 径方向ピーキング係数	13
2.3.1.2. 炉内構造物の構成・形状	13
2.3.2. 核特性および熱特性向上に着目した方策	14
2.3.2.1. 燃料体積比の向上	14
2.3.2.2. ドップラ反応度投入量の増加	14
2.3.3. 熱特性向上に着目した方策	14
2.3.3.1. 膜温度上昇幅の低減	14
2.3.3.2. マトリクス内温度上昇幅の低減	14
2.3.3.3. 軸方向出力分布の平坦化	15
2.3.3.4. 圧力損失の低減	15
2.3.3.5. AWS 時炉心入口温度の低減	16
2.3.4. 改善方策の選定	16
2.4. 炉心特性改善方策の評価	18
2.4.1. 径方向 3 領域化	18
2.4.2. 制御棒本数合理化	20
2.4.3. 接触熱抵抗合理化	21
2.4.4. AWS 時炉心入口温度の低減	22
2.4.5. 軸方向 2 領域化炉心	26
2.4.6. まとめ	28
2.5. 核・熱特性サーベイと改善方策の反映	29
2.5.1. 熱特性サーベイおよび長期除熱性簡易評価	29
2.5.2. 核特性サーベイ	30
2.5.3. 改善方策の反映	30
2.5.4. 特性向上炉心の選定と AWS 除熱特性評価	31
2.6. 安全解析モデルの高度化	32
2.6.1. 崩壊熱除去系熱漏洩モデル化	32
2.6.2. 空気冷却器除熱能力増強	32

2.6.3. 崩壊熱曲線多項式化	32
3. レファレンス炉心特性	88
3.1. 110 万 kW 級導入期炉心及び平衡期炉心の検討	88
3.1.1. 導入期炉心の構築	88
3.1.2. 平衡期炉心の構築	90
3.1.3. 炉心特性改善効果の分析	91
3.2. 150 万 kW 級大出力化炉心の構築	91
3.2.1. 導入期炉心の構築	91
3.2.2. 平衡期炉心の構築	92
3.3. TRU 燃焼炉心の構築	92
3.4. 炉心検討のまとめ	93
4. レファレンス炉心過渡解析	135
4.1. 解析条件・解析体系	135
4.2. DBE 事象：減圧事故	136
4.3. ATWS：UTOP 事象	137
4.4. ATWS：ULOF 事象	137
4.5. 設計検討用過渡挙動解析(AWS)	138
4.6. 過渡解析のまとめ	138
5. おわりに	159
謝辞	160
参考文献	161

表リスト

表 2.1-1	六角ブロック型ヘリウムガス冷却高速炉の主要な設計条件	33
表 2.3-1	炉心特性・過渡時除熱特性向上のための着眼点・方策	34
表 2.4-1	Pu 富化度 3 領域炉心の主要特性	35
表 2.4-2	冷却管細径化 3 領域炉心の主要特性	36
表 2.4-3	制御棒本数合理化による炉心主要特性の変化	37
表 2.4-4	接触熱抵抗合理化による定格時炉心温度の変化	38
表 2.4-5	軸方向 2 領域化炉心の炉心主要特性	39
表 2.5-1(1)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 80cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃）	40
表 2.5-1(2)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 90cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃）	41
表 2.5-1(3)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 100cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃）	42
表 2.5-1(4)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 80cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃）	43
表 2.5-1(5)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 90cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃）	44
表 2.5-1(6)	成立限界サーベイにおける主要目（炉心径固定条件、炉心高さ 100cm、 自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃）	45
表 2.5-2	成立限界サーベイにおける変数、設定値及び制限条件	46
表 2.5-3	成立限界サーベイにおける感度評価	47
表 2.5-4(1)	核特性サーベイ結果（炉心高さ 80cm）	48
表 2.5-4(2)	核特性サーベイ結果（炉心高さ 90cm）	49
表 2.5-4(3)	核特性サーベイ結果（炉心高さ 100cm）	50
表 2.5-5	核特性サーベイ結果の比較	51
表 2.5-6	初装荷核分裂性 Pu 重量削減炉心の特性	52
表 2.5-7	実効燃焼度向上炉心の特性	53
表 2.5-8	炉心等価直径削減炉心／実効燃焼度向上・Puf 量削減炉心の特性	54
表 2.5-9	特性向上炉心の比較	55
表 2.5-10	選定された炉心構成「燃焼度向上・Puf 削減炉心」の AWS 解析結果	56
表 2.6-1	崩壊熱テーブル	57
表 3.1-1	導入期炉心の燃料仕様	94
表 3.1-2	導入期炉心の主要核特性	95
表 3.1-3	導入期炉心の動特性パラメータ	96
表 3.1-4	導入期炉心の制御棒価値	97
表 3.1-5	導入期炉心の制御反応度収支	98
表 3.1-6	導入期炉心の燃料インベントリ [初装荷炉心]	99
表 3.1-7	導入期炉心の燃料インベントリ [平衡初期炉心]	100

表 3.1-8	導入期炉心の燃料インベントリ [平衡末期炉心]	101
表 3.1-9	導入期炉心の燃料インベントリ [平衡サイクル取替燃料 (1 バッチ)].....	102
表 3.1-10	導入期炉心の燃料インベントリ [平衡サイクル取出燃料 (1 バッチ)].....	103
表 3.1-11	導入期炉心の炉心流量配分及び熱流力特性	104
表 3.1-12	平衡期炉心の燃料仕様	105
表 3.1-13	平衡期炉心の主要核特性.....	106
表 3.1-14	平衡期炉心の燃料インベントリ [初装荷炉心].....	107
表 3.1-15	平衡期炉心の燃料インベントリ [平衡初期炉心]	108
表 3.1-16	平衡期炉心の燃料インベントリ [平衡末期炉心]	109
表 3.1-17	平衡期炉心の燃料インベントリ [平衡サイクル取替燃料 (1 バッチ)].....	110
表 3.1-18	平衡期炉心の燃料インベントリ [平衡サイクル取出燃料 (1 バッチ)].....	111
表 3.1-19	各種要因と主要核特性の関係.....	112
表 3.2-1	大出力化・導入期炉心の主要特性	113
表 3.2-2	大出力化・導入期炉心の新燃料 FP 重量	114
表 3.2-3	大出力化・導入期炉心の取出燃料重金属・FP 重量	114
表 3.2-4	大出力化・導入期炉心の取出燃料崩壊熱.....	115
表 3.2-5	大出力化・導入期炉心の取出燃料放射能.....	115
表 3.2-6	大出力化・平衡期炉心の主要特性	116
表 3.3-1	TRU 組成変動条件.....	117
表 3.3-2	導入期炉心における TRU 組成変動時の主要核特性変化.....	118
表 4.5-1	設計検討用過渡挙動解析結果(AWS)	139

図リスト

図 1.1-1	ヘリウムガス冷却炉心・燃料形態の選択 (FS フェーズ II : 検討の推移)	4
図 1.1-2	ヘリウムガス冷却炉における燃料形態概略図 (FS フェーズ II : 検討概念)	5
図 1.1-3	ヘリウムガス冷却炉の燃料形態検討の経緯 (FS フェーズ II)	6
図 1.2-2	ヘリウムガス冷却炉 (H16 年度) 検討の概要と主たる成果	7
図 2.4-1	Pu 富化度 3 領域炉心の径方向出力分布 (炉心燃料集合体数 492 体、炉心高さ 90cm)	58
図 2.4-2	冷却管細径化 3 領域炉心の径方向出力分布 (炉心燃料集合体数 492 体、炉心高さ 90cm)	59
図 2.4-3	制御棒 49 本配置型炉心構成図 (H15 年度導入期基準炉心)	60
図 2.4-4	制御棒 37 本配置型炉心構成図	61
図 2.4-5	制御棒本数合理化による径方向出力分布の変化 (炉心燃料集合体数 492 体、炉心高さ 90cm)	62
図 2.4-6	接触熱抵抗合理化による AWS 時炉心温度変化の差	63
図 2.4-7	接触熱抵抗合理化による AWS 時反応度変化の差	64
図 2.4-8	AWS 長期除熱時の燃料体積比、径方向ピーキング係数と炉心出口温度の関係	65
図 2.4-9	AWS 長期除熱時の炉心入口温度と燃料体積比の関係 (炉心出口温度一定条件)	65
図 2.4-10	軸方向 2 領域化炉心の軸方向出力分布	66
図 2.4-11	軸方向 2 領域化炉心の軸方向炉心温度分布	67
図 2.4-12	軸方向 2 領域化炉心の AWS 解析用軸方向出力分布	68
図 2.4-13	AWS 事象における炉内主要量の過渡挙動 (ケース 1)	69
図 2.4-14	AWS 事象における反応度の過渡挙動 (ケース 1)	70
図 2.4-15	AWS 事象における炉内主要量の過渡挙動 (ケース 2)	71
図 2.4-16	AWS 事象における反応度の過渡挙動 (ケース 2)	72
図 2-5.1(1)	炉心熱特性評価・長期除熱簡易評価結果の概要 (集合体寸法を同一とし、炉心高さを変化させた場合)	73
図 2-5.1(2)	炉心熱特性評価・長期除熱簡易評価結果の概要 (炉心高さを同一とし、冷却管配列ピッチを変化させた場合)	73
図 2.5-2(1)	径方向ピーキング係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ 80cm) (定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)	74
図 2.5-2(2)	径方向ピーキング係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ 90cm) (定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)	75
図 2.5-2(3)	径方向ピーキング係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ 100cm) (定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)	76
図 2.5-3(1)	成立限界燃料体積比の推移 (炉心入口温度 250℃)	77
図 2.5-3(2)	成立限界燃料体積比の推移 (炉心入口温度 200℃)	77
図 2.5-4(1)	径方向ピーキング係数と自然循環時圧力損失、定格時燃料最高温度の関係 (炉心高さ 90cm、実効燃料体積比 19.9%)	78

図 2.5-4(2)	径方向ピーキング係数と自然循環時流量比、冷却管最高温度の関係 (炉心高さ 90cm、実効燃料体積比 19.9%)	79
図 2.5-5	実効燃料体積比と炉心特性の関係 (増殖比、減圧反応度、ドップラ係数、ミスマッチファクタ)	80
図 2.5-6	核分裂性 Pu 重量削減炉心の炉心配置図 (炉心高さ 90cm、 AWS 時入口温度 200℃相当、接触熱抵抗合理化を考慮)	81
図 2.5-7	実効燃焼度向上炉心の炉心配置図 (炉心高さ 100cm、AWS 時入口温度 200℃相当)	82
図 2.5-8	炉心等価直径削減炉心の炉心配置図 (炉心高さ 100cm、 AWS 時入口温度 200℃相当、接触熱抵抗合理化を考慮)	83
図 2.5-9	実効燃焼度・Pu 重量削減炉心の炉心配置図 (炉心高さ 100cm、 AWS 時入口温度 200℃相当、接触熱抵抗合理化を考慮)	84
図 2.5-10(1)	選定炉心構成に対する AWS 過渡挙動評価結果 (炉心主要パラメータ)	85
図 2.5-10(2)	選定炉心構成に対する AWS 過渡挙動評価結果 (反応度パラメータ)	86
図 2.6-1	崩壊熱の 7 次多項フィッティング式	87
図 2.6-2	線形補完および 7 次多項フィッティング式の差	87
図 3.1-1	110 万 kW 級導入期炉心の炉心構成	119
図 3.1-2	導入期炉心の集合体出力分布 (平衡サイクル包絡値)	120
図 3.1-3	導入期炉心の流量領域区分用出力分布 (平衡サイクル包絡値)	121
図 3.1-4	導入期炉心制御棒価値評価時のスタック制御棒位置	122
図 3.1-5	主炉停止系制御棒の反応度価値曲線 (全反応度 16.2%)	123
図 3.1-6	導入期炉心の流量領域区分	124
図 3.1-7	導入期炉心代表燃料集合体の軸方向出力分布 (平均 1.0 に規格化)	125
図 3.1-8	導入期炉心代表燃料集合体の軸方向温度分布	126
図 3.1-9	導入期炉心の径方向中性子束分布	127
図 3.1-10	110 万 kW 級平衡期炉心の炉心構成	128
図 3.1-11	平衡期炉心の 2 次元 RZ 解析体系図	129
図 3.1-12	各種要因と炉心部内部転換比の関係	130
図 3.2-1	150 万 kW 級導入期炉心の炉心構成	131
図 3.2-2	導入期炉心燃料の構成	132
図 3.2-3	150 万 kW 級平衡期炉心の炉心構成	133
図 3.2-4	平衡期炉心燃料の構成	134
図 4.1-1	炉心 1 次元核-熱動特性解析モデル(フローネットワーク過渡解析体系)	140
図 4.1-2	炉心及び崩壊熱除去系伝熱中心高さ関係	141
図 4.2-1(1)	減圧事故：炉内主要量の過渡挙動 (短期挙動・長期挙動)	142
図 4.2-1(2)	減圧事故：炉内主要量の過渡挙動 (制御棒挿入時)	143
図 4.2-2(1)	減圧事故：反応度の過渡挙動	144
図 4.2-2(2)	減圧事故：反応度の過渡挙動 (ドップラ反応度の内訳)	144
図 4.3-1	UTOP：炉内主要量の過渡挙動 (37¢ 投入条件)	145

図 4.3-2(1)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (37 ¢ 投入条件)	146
図 4.3-2(2)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (事象初期での過渡挙動) (37 ¢ 投入条件)	147
図 4.3-2(3)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (ドップラ反応度の内訳) (37 ¢ 投入条件)	148
図 4.3-3	UTOP : 炉内主要量の過渡挙動 (57 ¢ 投入条件)	149
図 4.3-4(1)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (57 ¢ 投入条件)	150
図 4.3-4(2)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (事象初期での過渡挙動) (57 ¢ 投入条件)	151
図 4.3-4(3)	UTOP : 反応度の過渡挙動 (ドップラ反応度の内訳) (57 ¢ 投入条件)	152
図 4.4-1	ULOF : 炉内主要量の過渡挙動	153
図 4.4-2(1)	ULOF : 反応度の過渡挙動	154
図 4.4-2(2)	ULOF : 反応度の過渡挙動 (ドップラ反応度の内訳)	155
図 4.5-1	設計検討用過渡挙動解析(AWS) 炉内主要量の過渡挙動.....	156
図 4.5-2(1)	設計検討用過渡挙動解析(AWS) 反応度の過渡挙動.....	157
図 4.5-2(2)	設計検討用過渡挙動解析(AWS) 反応度の過渡挙動 (ドップラ反応度の内訳).....	158

1. はじめに

1.1. ヘリウムガス冷却炉の検討経緯

1.1.1. 検討の経緯及び概略

ガス冷却を用いた原子炉として、ヘリウムおよび炭酸ガスを作動流体として用いる概念が実用化されているが、発電炉や原型炉（CO₂ 冷却：GCR, AGR, He 冷却：Fort St. Vrain, THTR-300）あるいは実験炉や研究炉（He 冷却：Dragon、HTTR）として実現されている概念は、すべて熱中性子炉である。

実用化戦略調査研究(以下、FS)においては、1998 年よりガス冷却による高速炉の概念検討が実施されており^{[1]~[4]}、その有望な候補の一つとして、ヘリウムを用いたガスタービン直接発電を採用する原子力プラントの概念設計が進められている^{[5]~[8]}。概念設計においては、ヘリウム固有の特性を引き出す観点から、様々な検討を行っている。すなわち、

- *他の冷却材と比べて中性子吸収・散乱が極めて少ないことから、核特性を高め、高速炉としての魅力を追及し得ること、

- *ヘリウムの化学的安定性を活かし、高温作動流体として用いることにより、高い熱効率を達成し得ること、

- *ガスタービンを用いた直接サイクルとすることにより、プラントシステムの簡素化を図り得ること、

- *水素製造プラントシステムへの応用展開が図れる可能性を有すること、

などの特長を活かし、炉心、燃料、プラント及び安全特性上優れた概念となる可能性がある。

FS では、そのフェーズⅠにおいてガス冷却高速炉の幅広い概念の比較を行い、ガスタービン直接サイクル型を有望と判断した。続くフェーズⅡでは選定された概念であるヘリウムガス冷却炉に対する各種設計オプションの検討および比較を行ってきた^{[5]~[8]}。フェーズⅡでの設計検討の流れを図 1.1-1 に記す。炉心概念検討においては、プラント概念検討との適合性（炉心圧力、温度条件、炉心部遮蔽体外径）に留意しつつ、特性比較を行った。その際、炉心実効燃焼度、増殖性能、重金属装荷量などで優れた特性を示すよう設計することに加え、炉心設計を進める際には、減圧事故時にスクラムを伴わずに自然循環除熱となる状況¹（以後、AWS と略記）に着目した過渡解析を実施している。燃料形態は、図 1.1-2 に示される窒化物燃料を用いた被覆粒子燃料炉心と耐熱被覆ピン型燃料炉心が、主たる検討対象である。H15 年度までの検討で、横方向流冷却型被覆粒子燃料炉心、六角ブロック型被覆粒子燃料炉心、耐熱被覆ピン(金属間化合物被覆管)型燃料炉心概念が検討されている。

1.1.2. FS フェーズⅡ 中間報告までの検討成果(平成 14 及び 15 年度)

¹ 本状況下での炉心冷却特性に着目した炉心設計を進めており、事故にスクラム失敗及び強制循環除熱失敗を重ねた状況であることから AWS(Accident Without Scram)と称することとする。

FS フェーズ II 中間報告まで、すなわち平成 14 及び 15 年度までのガス冷却高速炉検討結果を図 1.1-3 にまとめる。

平成 14 年度は被覆粒子燃料を用いた炉心概念として、横方向流冷却コンパートメント型燃料集合体概念炉心（以降、横流型とする）および縦方向流冷却六角ブロック型燃料集合体概念炉心（以降、六角ブロック型とする）について検討した。横流型炉心では、増殖性能(約 1.2)と炉心部平均取出燃焼度（以降、炉心平均燃焼度）100GWd/t を達成し、AWS で炉心除熱が確保される見通しを得たが、高燃焼度化(炉心平均燃焼度 150GWd/t)には、燃料構造と反応度特性の大幅な改善が必要とする結果が得られた。一方、多数の被覆粒子燃料を直接冷却することから、重金属や核分裂生成物(以降、FP)による 1 次系汚染の可能性に対し、被覆粒子に強度層を設け、かつ、粒子製造時の品質向上や検査を通じ初期破損を抑制することとした。

これに対し、1 次系汚染の可能性を減少させる概念として、被覆粒子をブロック体に内蔵し、間接的に冷却することとする 3 種類の被覆粒子燃料形状（六角ブロック型、板状燃料要素型、球状燃料要素型）を検討した。それらの定格時および減圧時における除熱特性と圧力損失特性を両立し得る概念として、六角ブロック型を代表形状とした。さらに、被覆粒子をマトリクスや 2 次粒子と組み合わせる方法について検討を行い、被覆粒子を固相マトリクスに内蔵させる燃料集合体形態が最も有望として、炉心設計及び安全解析を実施した。その結果、増殖性能(約 1.2)と炉心平均燃焼度 120GWd/t を達成する概念を構築した。一方、炉心平均燃焼度 150GWd/t まで高燃焼度を図った場合には、AWS 時に高出力チャンネルで温度逸走が生じ、緩慢型 SASS が必要となる結果が得られた。

平成 15 年度は、被覆粒子燃料を用いる有望な炉心概念検討を進展させる観点から、横流型概念および六角ブロック型概念の設計検討を実施した。すなわち、両炉心概念共通の検討課題として、増殖性能(～1.1 以上)と炉心平均燃焼度(120GWd/t)を確保し、さらにブランケットを含む炉心全体での実効的な燃焼度(以降、実効平均燃焼度)の向上を図ること、代表的な設計基準事象(以降、DBE とする)で炉心・燃料が制限目安温度(1600℃)以下となること、苛酷事象(ATWS として UTOP 及び ULOF)および AWS で炉心除熱が可能なこと、炉内構造物（制御棒、遮へい体）の構造検討を行うこと、等を検討課題とした。さらに過渡時における炉心・燃料の安全性を確保する観点から、DBE、ATWS、AWS に対し、核的不確かさを考慮することとした。その結果、横流型炉心および六角ブロック型炉心ともに、目標とする炉心性能（実効平均燃焼度として 55～58GWd/t、増殖率：1.14～1.17 など）を達成し、過渡事象で炉心除熱が可能な見通しが得られた。また高速炉導入シナリオ^回において軽水炉から高速炉への置き換えを考える場合に重要となる初装荷核分裂性 Pu 重量(以降、Puf 量)、すなわち高速炉の立ち上げ時に必要となる Pu 量は、六角ブロック型炉心(7.8t/GWe)が横流型炉心(9.6t/GWe)より低減される可能性がある一方で、六角ブロック型炉心では AWS 時にホットテストチャンネルで温度逸走性が生じ、横流型炉心と比べて長期炉心冷却性を改善する方策が必要なこと、などが認識された。なお六角ブロック型炉心を対象に、炉心ーガスタービンを錬成した AWS 評価、冷却管内詳細伝熱流動による減圧時の再層流化(加速層流化／混合対流効果)発生の可能性検討を行った。

1.2. FS フェーズ II 中間報告後の検討経緯(平成 16 年度検討の概要)

平成 16 年度は、これまでの被覆粒子燃料を用いた炉心概念の検討を踏まえ、Puf 量が低減される可能性のある六角ブロック型炉心に対し、長期炉心冷却性を改善する方策の適用と炉心設計の高度化を図ることとした。すなわち、

- *実効平均燃焼度 (～55GWd/t) の改善

- *Puf 量の削減

- *AWS における温度逸走性と長期炉心冷却性の改善

を目標とした炉心設計および安全解析を行うこととした。加えて多様な炉心形態への適用性を評価する目的で、

- *大出力化炉心の可能性検討

- *TRU 燃料炉心の特性検討

を行うこととした。

具体的には、以下の事項について検討を行うこととする。

- *炉心特性改善方策の検討：

 - 燃料・冷却管温度低減

 - 径方向・軸方向多領域化など

- *六角ブロック型集合体の形状適正化：

 - 基本仕様（冷却管径、径方向ピーキング係数、炉心高さ等）サーベイ

 - 安全解析による AWS 時長期除熱成立範囲サーベイ

- *炉心・燃料除熱性の確認

 - レファレンス炉心（導入期炉心、平衡期炉心）の構築

 - DBE、ATWS(UTOP,ULOF)及び AWS の過渡解析

 - 大出力化炉心の炉心特性および動特性の概略評価

 - TRU 燃料組成変動に対する炉心特性および動特性の影響評価

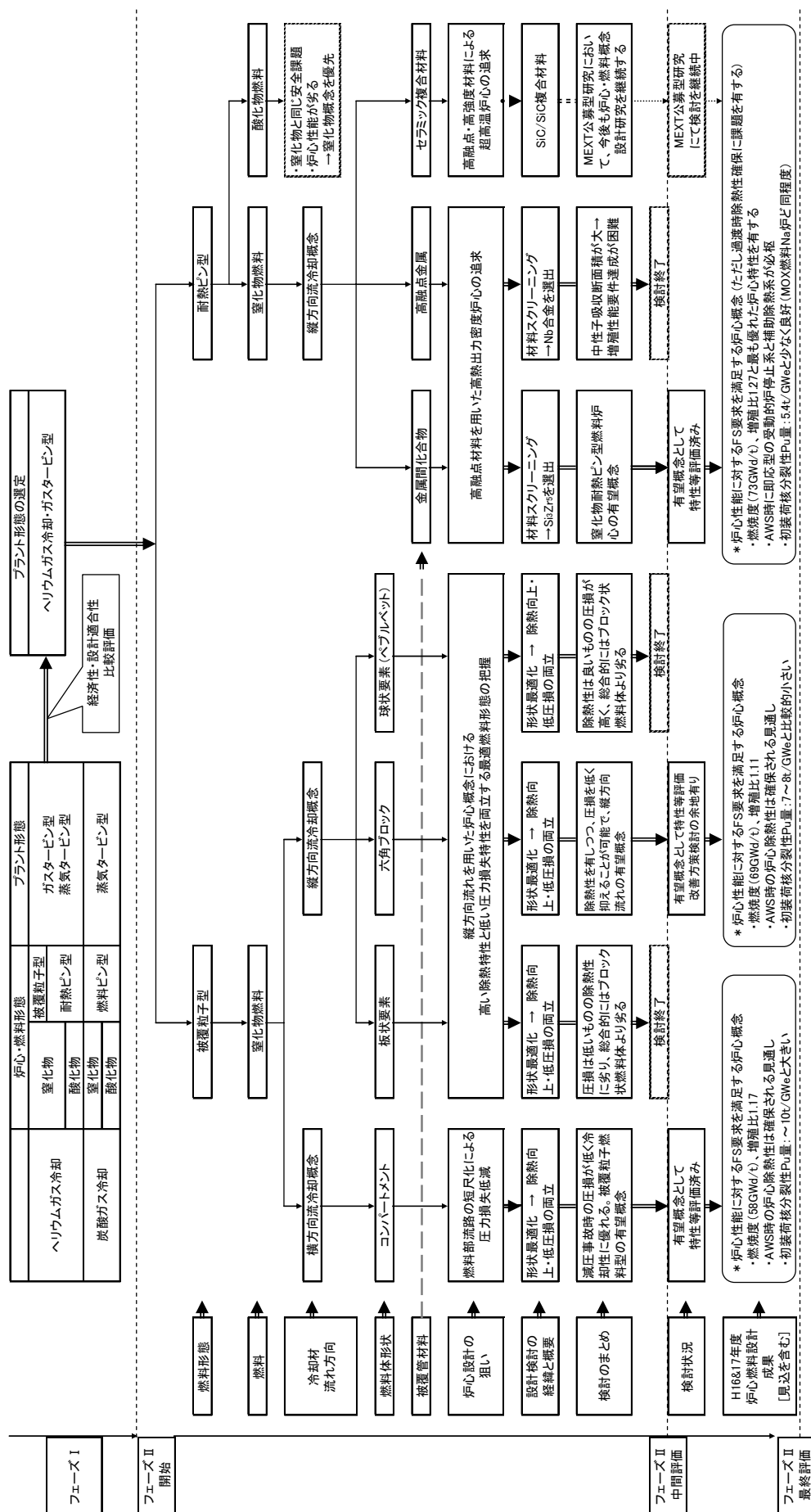


図 1.1-1 へリウムガス冷却炉心・燃料形態の選択 (FSフェーズⅡ: 検討の推移)

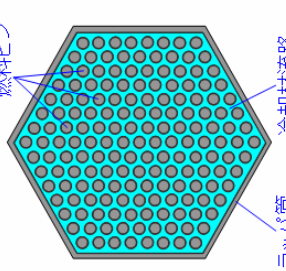
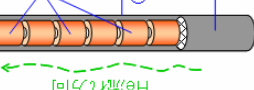
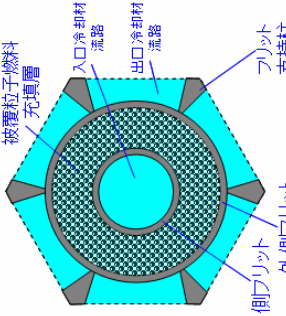
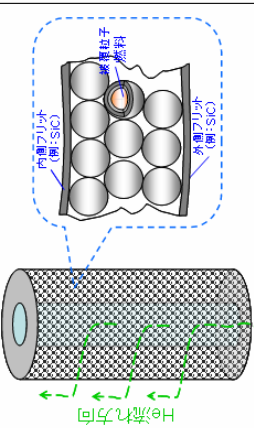
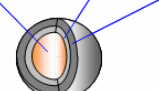
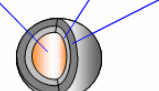
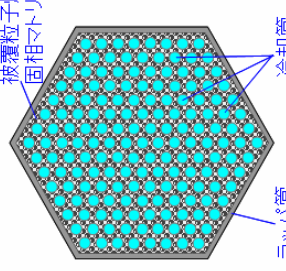
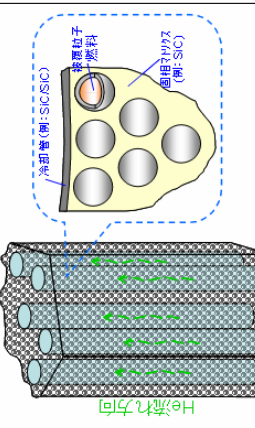
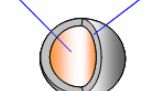
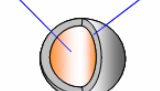
耐熱被覆ピン型	燃料体		燃料体構成要素		燃料
	ピン型 縦方向流冷却 概念	ピン(密封)型燃料集合体 	燃料ピン (被覆管+燃料) 	燃料ベレット (現状検討例: 中空構造) 	燃料 燃料ベレット (現状検討例: 中空構造) 
被覆粒子型	コンパートメント型 横方向流冷却 概念	コンパートメント型燃料体 	内外フリット (直円筒形状) + 被覆粒子燃料 	被覆粒子燃料 (現状検討例: 核+2層構造) 	被覆粒子燃料 (現状検討例: 核+2層構造) 
	六角ブロック型 縦方向流冷却 概念	六角ブロック型燃料体 	固相マトリクス + 被覆粒子燃料 	被覆粒子燃料 (現状検討例: 核+1層構造) 	被覆粒子燃料 (現状検討例: 核+1層構造) 

図 1.1-2 ヘリウムガス冷却炉における燃料形態概略図 (FS フェーズ II: 検討概念)

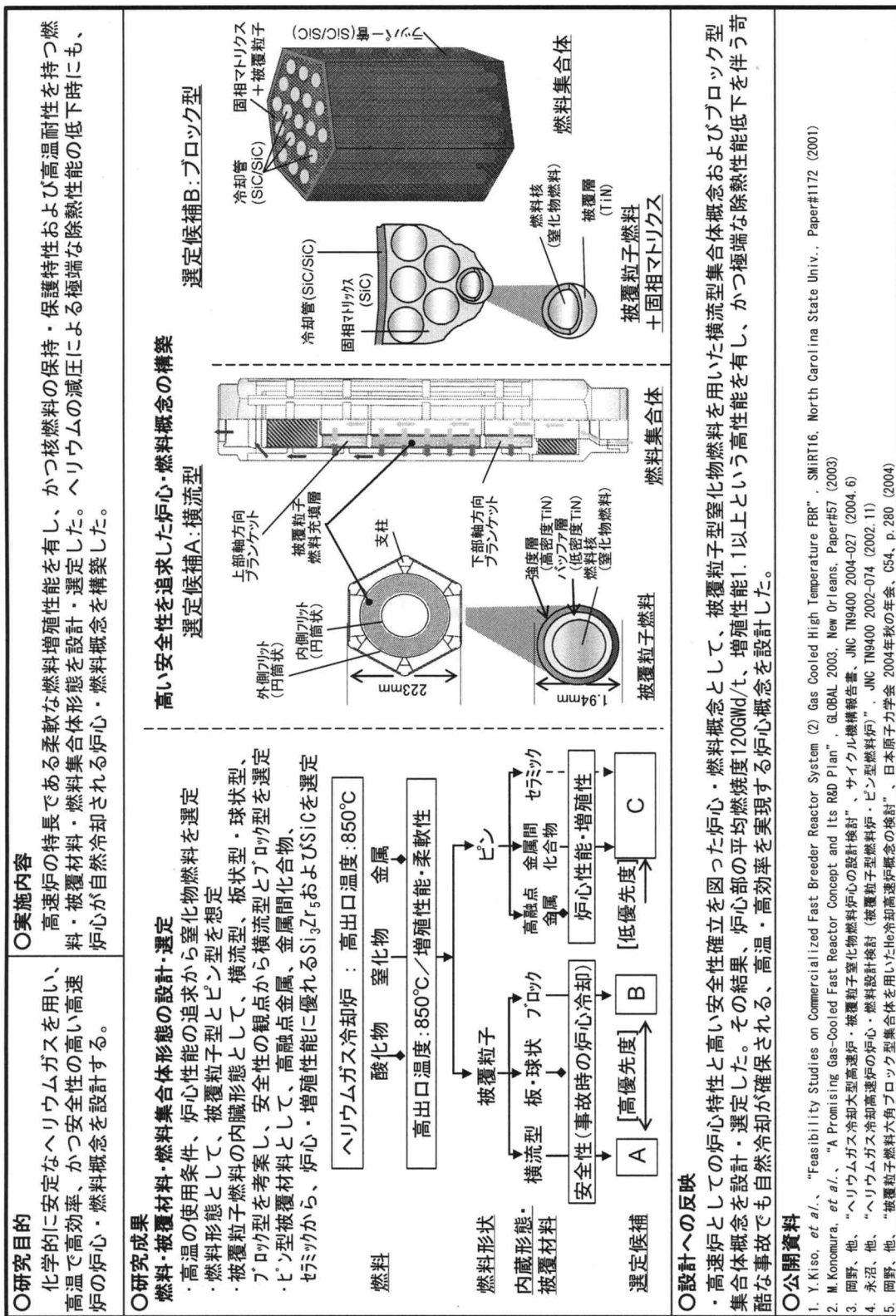


図 1.1-3 ヘリウムガス冷却炉の燃料形態検討の経緯(FS フェーズ II)

2005年度フェーズ2まとめに向けた設計検討のねらい

ガス冷却炉の課題である減圧事故でスクラムされず自然循環除熱となる厳しい事象*でも炉心溶融回避可能な安全性と、FSで目標とする核特性を有する炉心・燃料概念の構築。燃料開発課題の整理。

*AWSと略記

フェーズ2中間まとめ(2003年度)までの主な成果

- 六角ブロック型集合体方式(被覆粒子燃料炉心)
 - 取出平均燃焼度(炉心)120GWd/t、増殖比1.14の炉心を構築。
 - 装荷時核分裂性Pu重量 7.8t/GWe。径方向Pu富化度2領域。
 - AWSにおいて冷却管温度2200℃超過まで7時間強の猶予。
- 横方向流冷却方式(被覆粒子燃料炉心)
 - 取出平均燃焼度(炉心)119GWd/t、増殖比1.17の炉心を構築。
 - 装荷時核分裂性Pu重量 9.6t/GWeと過大。Pu富化度4領域化。
- AWSで1,2次ピーク温度が高く、低減には炉心性能力劣化は不可避。
- ピン型燃料炉(ハレット燃料炉心)
 - ピン型燃料炉(ハレット燃料炉心)
 - 炉心性に優れるが即応型(30秒程度)SASSの作動が必須。

2004年度(H16年度)の主な課題

- 六角ブロック型集合体炉心
 - ブランケットを含む取出平均燃焼度: ~55GWd/tの改善
 - 核分裂性Pu重量の削減
 - AWSにおける中・長時間の除熱性の改善
 - 設計基準事象での炉心温度(制限以下)の確認

2004年度(H16年度)の検討内容

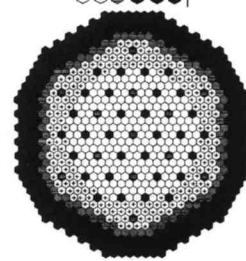
- 六角ブロック型集合体の最適化
 - 炉心基本仕様(冷却管径、径方向ピーキング係数、炉心高さ、等)・炉心性のサード・安全解析による熱的成立範囲のサード・安全解析。
 - 径方向・軸方向多領域化、冷却管ギャップ熱通率削減の影響評価。
- 炉心燃料成立性評価
 - レファレンス炉心の選定と詳細特性評価。
 - AWS及び苛酷事象(UTOP、ULOF)の安全解析。

2004年度(H16年度)検討の現状

六角ブロック型集合体炉心

- 炉心性性能要件を達成し、安全解析において燃料・冷却管の除熱性が確保される炉心を構築。
- 取出平均燃焼度69GWd/t(全炉心)、装荷時核分裂性Pu重量 7.0t/GWeと改善。
- 安全解析: AWSにおいて冷却管温度2200℃未満で安定する見込み。温度逸走発生せず。
- 補助冷却系の仕様小変更(空気冷却器段数等)が除熱性向上に大きく寄与。

	ブロック型燃料炉心	
	H16年度	H15年度
熱出力	MWt	2,400
電氣出力	MWe	1,124
炉心等価直径	m	5.43
遮蔽体外径	m	7.59
Pu富化度(内/外)	wt%	22.2/24.0
燃焼度(炉心/全体)	GWd/t	121/69
初装荷核分裂Pu重量	t/GWe	7.0
		7.8



- 内側炉心燃料集合体
- 外側炉心燃料集合体
- 径方向ブランケット燃料集合体
- S/C層へい体
- 主炉停止系制御棒
- 後端炉停止系制御棒

合 計

2.22体

1.92体

8.4体

2.88体

3.0体

1.3体

8.29体

現状の課題

- H17年度以降の検討課題
 - 炉出力大型化の影響評価
 - 遮蔽体構成・形状の合理化
 - 設計基準・苛酷事象の追加評価
 - 平衡期炉心の過渡解析
 - 大出力化炉心の過渡解析
 - TRU燃料炉心の過渡解析
- サイクル全体まとめに向けた課題
 - 燃料製造検討・再処理検討への燃料仕様・特性の反映

図 1.2-2 ヘリウムガス冷却炉(H16年度)検討の概要と主たる成果

2. 炉心設計の流れ

2.1. 設計方針・目標と設計条件

被覆粒子燃料を用いたヘリウムガス冷却炉の有望概念として、六角ブロック型概念炉心の概念設計を実施するに際し、設計方針、目標、条件を以下のように設定した。

2.1.1. 設計要求と目標

FS における設計要求^[2]において、炉心・燃料に関連する事項としては、安全性、経済性、資源有効利用性、環境負荷低減性、核拡散抵抗性が有り、FS フェーズ II のヘリウムガス冷却炉検討では、以下の目標を設定している^{[3],[8]}。

＊安全性：受動的炉停止あるいは反応度抑制機能の導入

後備炉停止系の切り離し機構に SASS を設置して炉停止機能を強化する。完全自然循環による除熱が可能な崩壊熱除去系として除熱機能を強化する。減圧事故に炉停止失敗と崩壊熱除去系の強制循環失敗を重ねた条件で、炉心が冷却できる概念とする。

＊経済性：高い実効平均燃焼度を有すること

核燃料サイクルとしての高い経済性を実現する観点から、炉心・ブランケットを含む全体の実効平均燃焼度を高めることが望まれる。本検討では、炉心平均燃焼度～120GWd/t とした上で、実効燃焼度を高めることを炉心設計の目標とした。

＊資源有効利用性：増殖比>1（低除染・TRU 燃料の使用）

Pu 需要に応じた増殖性を有する 2 種類の代表炉心を構築する。1 つは、高速炉が軽水炉に置き換わる状況下で増殖した Pu を新設炉への供給する時期を想定し、ブランケットを用い増殖比～1.1 以上とする炉心（以降、導入期炉心とする）である。もう 1 つは、高速炉が多数導入された時期を想定し、ブランケットを削減した維持増殖(増殖比～1.03)としながら、実効平均燃焼度を高め、より優れた経済性獲得をめざす炉心（以降、平衡期炉心）である。

本概念は被覆粒子・窒化物燃料を用いるが、その燃料組成は、燃料サイクルに伴う同位体組成変化を含めた検討が進んでいる Na 冷却 MOX 燃料炉心と同等の TRU 同位体組成とする。また燃料に随伴する FP についても同 Na 炉概念と同等とする。

＊環境負荷低減性：MA 燃焼および LLFP 核変換

高速炉の導入時期には、高速炉サイクル内のみならず、軽水炉の使用済 UO₂ 燃料、使用済プルサーマル燃料などから得られる重金属を高速炉燃料として活用することが考えられる。これらを核燃料として用いた場合の炉心特性、動特性への影響を評価する。

LLFP 核変換は、主に Tc、Y を対象に核変換性能が評価されている。それらの核変換集合体構成、装荷炉心構成および特性は、別途報告書にて報告されている^[10]。

＊核拡散抵抗性：

被覆粒子燃料は TiN 被覆層を用い^{[11],[12]}、さらにこれが SiC マトリクスに内蔵された形態である。これらの材料は高温での使用を前提とした化学的に安定な物質であり、核拡散抵抗性は定性的に高いという認識のもと、炉心設計に対しては特に要求を課さないこととする。

2.1.2. 設計条件

炉心設計上の各種仕様、設計要求、制約条件を以下に説明する(表 2.1-1 も参照のこと)。

(a) プラント仕様

原子炉熱出力 2400MWth、電気出力 1124MWe を基準炉心とする。大出力化炉心は熱出力 3203MWt、電気出力 1500MWe とする。基準炉心、大出力化炉心ともに熱効率²は 47%で、原子炉運転圧力は 6MPa、原子炉出入口温度は 460℃ / 850℃である。原子炉容器外径の増大はプラントコスト上の課題を増加させることになるため、径遮蔽体を含む外接円径として 8m²程度、軸方向ブランケットを含む炉心高さとして 3m 程度を上回らないことを制約目標とした。格納容器背圧は 0.65MPa (絶対圧) である。

(b) 炉心性能要求

増殖比は、導入期炉心に対し 1.1 以上、平衡期炉心に対し燃料サイクルロス率 3%想定条件での維持増殖確保のため 1.03 以上を要求値とする。炉心取出平均燃焼度は 120GWd/t を標準目標値とする。運転サイクル長さは 18.0 ヶ月以上とする。

(c) 炉心・燃料基本仕様

炉心材料としては、窒化物燃料核に TiN 被覆層を重層した被覆粒子燃料を、SiC 製固相マトリクスからなる六角ブロックに分散させた燃料集合体^[8]を用いる。

(d) 制限条件

定格運転時の冷却管内ヘリウム流速に対し、工学的判断により 100m/s 以下を課す。安全性に関連する炉心特性として、減圧反応度は $\sim 1\%$ 以下(定格 6MPa $\rightarrow$ 0MPa 条件)を目標とする。

燃料健全性確保の観点から、燃料温度及び冷却管温度(肉厚中心)に対して制約条件を設ける。先行高温ガス炉における温度制限を参考に、通常運転時には 1,600℃以下、設計基準事象(事故・過渡事象)時にも 1,600℃以下とする。設計基準を超える過酷事象(ATWS)および炉心設計を進める上で着目する事象(AWS)に対しては、炉心の冷却形態維持が第一義と考え、設計を進める上では燃料温度 2,800℃以下、冷却管温度(肉厚中心)2,200℃以下を目安とする。前者は窒化物燃料の解離圧に基づく温度制限(PuN で 2400℃/0.1atmN₂時、UN ではさらに高温)および融点、さらに被覆層を形成する TiN 融点(2950℃)からの暫定値であり、後者は SiC 分解温度(2500℃)という条件からの暫定値である。

なおこれらの温度は、炉心概念検討を進める上で暫定したものであり、今後の燃料や材料に関する知見および製造技術の進展に応じ、随時適切なものに見直してゆくべきものである。

(e) 取合条件

窒化物燃料の密度は 95%T.D.と設定する。TiN によるバッファ層の密度は 50%T.D.を設定する。被覆粒子外径およびその燃料核の直径は、熱中性子炉燃料での実績、冷却管ピッチ(1~2cm)へ十分充填する必要から $\sim 1\text{mm}$ を想定する。TiN 層厚は、SiC 被覆程度の強度確保を想定した暫定値 $\sim 0.1\text{mm}$ 程度とする。被覆粒子の充填率は理論充填率(66%, 72%)に対し余裕を持って 50%を想定する。この時 SiC 固相マトリクス体積率は $(100-50)=50\%$ となる。材料部材である固相マトリクスと冷却管を構成する SiC 密度は 100%T.D.と設定する。

² 原子炉圧力容器の外径で 9 m 程度となる。

(f) 核設計手法

核設計評価手法^[13]を以下にまとめる。

- 炉定数 : 結合炉定数 ADJ2000R^[14]
- 燃焼計算 : 2次元 RZ 体系拡散計算
- 出力分布計算 : 3次元拡散計算
- 反応度係数計算 : ドップラ係数 1次近似摂動計算
減圧反応度 2次元 RZ 体系拡散計算
(輸送計算・厳密摂動計算による補正考慮)
- 制御棒価値計算 : 3次元三角メッシュ拡散計算
- 燃料組成 : 高速炉多重リサイクル TRU 組成+随伴 FP 0.2vol%
 $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am}/$
 $^{242}\text{Cm}/^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}/^{237}\text{Np}$
= 1.1 / 54.1 / 32.1 / 4.3 / 3.9 / 2.0 / 0.0 / 1.0 /
0.0 / 0.0 / 1.0 / 0.0 / 0.5 (wt%)

2.2. 炉心特性改善方策の検討

六角ブロック型炉心に対し、炉心特性および長期除熱特性の改善を図るための着眼点と方策、その比較評価と選定、炉心特性向上への反映策について、以下に説明する。

2.2.1. H15 年度基準炉心の特性分析

H15 年度に検討された六角ブロック型導入期炉心(以降、H15 基準炉心)は、以下の炉心特性を有する。

* 炉心特性：

－取出燃焼度（炉心平均／実効平均）	120 / 55GWd/t
－増殖比	1.14
－初装荷核分裂性 Pu 量	7.8 t/GWe
－減圧反応度	0.29 \$
－ドップラ係数(Tdk/dT)	-10.0x10 ⁻³

実効平均燃焼度は、Na 大型 MOX 燃料炉心の 63GWd/t、Na 大型 MOX 金属燃料炉心の 72GWd/t、PbBi 窒化物燃料炉心の 105GWd/t など、他の炉型に比べて低い。増殖比は、他炉型(～1.15)と同程度ではあるが、Puf 量は、Na 大型 MOX 燃料炉の 4.4t/GWe、Na 大型金属燃料炉の 4.0t/GWe、PbBi 窒化物燃料炉の 5.8t/GWe と比べ大きい。

また H15 基準炉心の過渡時炉心温度は、以下の通りである。

* DBE(減圧事故)時炉心温度

－平均出力チャンネル	≤1000℃
－高出力チャンネル	≤1599℃

* AWS 時炉心燃料温度

－ 1 次ピーク時：平均出力チャンネル	1500℃
高出力チャンネル	1850℃
－ 2 次ピーク時：平均出力チャンネル	1350℃
高出力チャンネル	≤2200℃ (26,000 秒まで)

DBE 代表事象として減圧事故を検討し、制約温度 1600℃以下を満たしている。AWS でも 1 次ピーク温度は低く、2 次ピークも 26,000 秒時点まで制限目標の 2200℃以下を満たす結果が得られている。AWS 時の炉心温度変化に着目した場合、平均チャンネルは 1 次ピークで 1500℃、2 次ピークで 1350℃と冷却可能なのに対し、高出力チャンネルでは長期除熱(2 次ピーク)において温度逸走が生じていることが分かる。すなわち、温度上昇と共に動粘性と圧力損失が増大するガス特有の特性のため、高出力／平均チャンネルでの出力差(径方向ピーキング係数)以上に、ホットテストチャンネルの 2 次ピーク温度が高くなる現象が生じている。また高出力チャンネルでの 2 次ピーク出現時刻は、平均チャンネルのものより大幅に遅れている⁸⁾。

2.2.2. 改善への着眼点と方策

上記から、炉心特性、過渡特性上改善を目差すべき事項として、以下が挙げられる。

* 実効平均燃焼度：

他の炉心概念より低い値となっているが、これは増殖比確保に要するブランケット物量が多いこと、炉心平均燃焼度(120GWd/t)が 150GWd/t より 2 割低いことが原因である。前者に対しては、炉心の内部転換比を高めることが有効である。後者の改善には、炉心動特性の変化により AWS での炉心冷却維持が厳しくなる結果が得られているおり、本検討では H15 基準炉心と同等の 120GWd/t を目標とする。

* Puf 量：

横流型炉心 9.8t/GWe と比べ、7.8t/GWe と低減しているが、他の炉心概念との比較では過大となっている。これは、燃料の比出力(kW/kgHM)を高めることにより改善するが、炉心出力密度の増加(同燃料体積率の場合)、核特性の向上(同炉心出力密度の場合)などを図る必要があり、除熱性あるいは内部転換率の向上等を図る方策が必要となる。

* ホッテストチャンネルでの温度逸走性：

ホッテストチャンネルでの温度逸走性が生じ 2 次ピーク温度が高くなるのは、平均出力チャンネルに対するホッテストチャンネル出力の比、すなわち炉心の径方向ピーキング係数に基づく出力差が、ガス粘性の特性（高温状況下で高くなり、圧力損失が高くなる）によるフィードバック効果を通じて一層顕著になるためである。温度逸走性低減には、炉心径方向ピーキング係数を低減し、チャンネル間の出力格差を軽減することが必要である。

上記の内、実効平均燃焼度、Puf 量は、高速炉としての炉心特性を高めること、すなわち、

A) 扁平大型炉心の形状改善（炉心 H/D 比を 1 に近づける）、

B) 燃料体積比を向上させ、重金属の炉心内部実効密度を高めること、

C) 構造材体積比を削減し、中性子束エネルギースペクトルを硬化させること、

などにより改善可能と考えられる。一方で

A)は冷却管流路長増加から圧力損失増加を生じ、特に AWS 長期除熱時に不利となること、

B)は同比出力条件では出力密度増加と炉心温度上昇を、同出力密度条件では比出力低下と燃焼度低下をまねくこと、

C)はドップラ係数低下、減圧反応度上昇、燃料熱容量低下により過渡が厳しくなること、などの影響を生ずる可能性がある。また温度逸走性は、

D)炉心径方向ピーキング係数の低減により改善されること、

から、径方向の Pu 富化度領域分割を増やすなどの、炉心・燃料構成上の変更を必要とする。

なお径方向ピーキング係数の改善方策として、効果の高い反射体を設置すること、なども考えられるが、本炉心は扁平大型であることから、その効果は限定される可能性がある。

2.3. 改善方策の抽出

特性改善を図るための着眼点に関する考察から、核特性、熱特性上の改善項目、設計変更点を抽出する。着眼点、改善項目等は表 2.3-1 にまとめるとともに、以下に説明する。

2.3.1. 核特性向上に着目した方策

径方向ピーキング係数の改善方策と、炉内構造物の構成・形状の改善方策とに分けられる。

2.3.1.1. 径方向ピーキング係数

A) Pu 富化度分布

Pu 富化度調整と内側・外側炉心体数比調整により、径方向出力分布平坦化を図る。通常の炉心設計でも行われるが、本検討では特性サーベイで用いる 2D-RZ 体系計算での径方向および局所ピーキング係数に対し、H15 基準炉心相当での 3D-Hex 体系計算による出力ピーク(集合体出力と局所ピーキング係数および出力ミスマッチ係数を考慮)と 2D-RZ 体系計算での出力ピーク(径方向ピーキング係数と出力ミスマッチ係数)との差(以下、3D 効果)を考慮したサーベイを行うこととした。これにより、RZ 体系上の出力平坦化サーベイが、3D 体系上の集合体出力平坦化へ反映されるようにした。

サーベイでは、炉心径方向に 3 領域化する方策を採る。これには、Pu 富化度分布を 3 領域化(内側炉心・中間炉心・外側炉心)する方策と、燃料体積比分布を 3 領域化(集合体出力が低く、必要流量の少ない外側炉心の最外周集合体で、冷却管直径を減少させ燃料体積比向上を図る)方策がある。いずれの方策も、炉心最外部での核分裂性 Pu 量を増加させ、そこでの出力を増加させることとなる。この際、内部転換比は若干変化することから増殖比を維持するようブランケット増加量を調整し、実効平均燃焼度への影響もあわせて評価する。

B) 燃料交換バッチ数

内側炉心と外側炉心とで異なるバッチ数を用いる変則バッチ方策の適用を図る。これは、平均燃焼度の低い外側炉心のバッチ数を内側炉心より多くすることにより、燃焼度分布の平坦化が図れる利点がある。出力平坦化の観点からは、燃焼寿命中の出力変動が大きい内側炉心で、変動が抑制できる可能性がある。

C) 運転サイクル長

運転サイクル長を H15 基準炉心の 20 ヶ月から、設計要求である 18 ヶ月とする。Pu 富化度の低減と内部転換比向上が図れ、出力分布変動が若干抑制されることが期待できる。

2.3.1.2. 炉内構造物の構成・形状

A) 制御棒本数

制御棒本数削減により炉心等価直径が減少し、H/D 比が改善される。He ガス炉では制御棒フォロア部からの中性子漏洩が大きく^[11]、必要以上に制御棒を設置した場合、臨界性減少により Pu 富化度増加と増殖比減少、ブランケット増加と実効平均燃焼度低下をまねく可能性がある。H15 基準炉心では制御棒は 4 リングで構成されているが、最外周リングの価値は小さく、この分を第 1~3 リングで負えれば、第 4 リングを削減できることとなる。これには必要反応度収支成立が前提となるが、例えば炉心高さを高め、併せて制御棒吸収体スタック長を増加させた構成では、制御棒 1 本当りの価値は増加し、本方策の適用可能性が生じてくる。

B) 中性子漏洩抑制

炉心からの中性子漏洩を抑制することにより、臨界性向上と Pu 富化度低減、内部転換比向上が期待できる。炉心径方向の抑制効果は扁平炉心のため大きく期待できず、また炉心軸方向には増殖比確保に必要な軸方向ブランケット、さらに外部には遮蔽材が設置されていることから、こちらも大きな向上は望めない。一方、制御棒フォロアーを通じた中性子漏洩は比較的大きい^[11]ことから、フォロアー部上下位置での漏洩防止策は効果的と考えられる。ただし制御棒要素集合体（下部エントランスノズル、上部ハンドリング構造部など）を対象とした具体的な形状検討および中性子ストリーミングの輸送特性評価が必要となる。

2.3.2. 核特性および熱特性向上に着目した方策

2.3.2.1. 燃料体積比の向上

燃料構成の変更により燃料体積比の増加を図り、炉心特性を向上させる方策である。被覆粒子構造、粒子充填率の取合条件を保ちながら燃料体積比を向上させるためには、冷却管径を減少する方策が考えられる。すなわち、必要な冷却性能が異なる内側炉心・外側炉心で、あるいは外側炉心の最外周集合体のみで、異なる冷却管径の燃料集合体を用いる。本方策は、燃料構成部材(冷却管)製造設備および集合体製造設備に対して、各集合体構成に対応する機能を持たせる必要が生じ、核燃料サイクル全体での負荷バランスが重要となる。本方策の効用評価は、径方向ピーキング係数(Pu 富化度分布)の一環として実施することとする。

2.3.2.2. ドップラ反応度投入量の増加

減圧事故及び AWS 時におけるドップラ反応度投入量を実効的に増加させるため、定常運転時の炉心燃料及びブランケット燃料温度を低減させる方策である。具体的には、炉心燃料部分におけるリブ設置に加えて、線出力が低いことからこれまで設置を想定していなかった軸方向ブランケット部分にもリブを設置する。特に上部ブランケット位置へのリブ設置は、定格運転時に膜温度差が大きいことに加え、特に AWS 時に高温となり定格-AWS 時の温度差が大きいことから、効果を有するものと期待できる。

2.3.3. 熱特性向上に着目した方策

燃料集合体での温度上昇幅、冷却材の流量や温度に着目した方策である。

2.3.3.1. 膜温度上昇幅の低減

ヘリウムと冷却管間の熱伝達率を向上させ、冷却管及び燃料温度低下を図る方策で、リブの形状・高さ・配置・数が設計変更点となる。H15 年度炉心設計では、リブに相当する設計パラメータとして表面粗さ($\epsilon=50\mu\text{m}$)を想定したが、表面粗さとしては比較的大きな値であること、これ以上増加させた場合でも熱伝達率上昇率は鈍化してゆくことから、本年度は特に変更しないこととした。なお SiC/SiC 複合材料の製造技術向上、特に表面粗さやリブ形状・設置等の自由度や精度向上により、今後特性向上を図り得る事項である。

2.3.3.2. マトリクス内温度上昇幅の低減

解析モデルの向上方策、実効的な熱伝導特性の向上方策、出力分布平坦化方策がある。

A) 軸方向熱伝導モデルの導入

六角ブロックは固相マトリクスからなる一体構造であることから、軸方向および径方向ともに熱移動を生じ、単一セルからなるピン構成での径方向熱移動と比較した場合、ブロック体内部の温度分布が平坦化される方向である。特に、熱出力が低く燃料全体が比較的高温な状態となる AWS 状況下では、この効果による温度平坦化の効果が相対的に大きくなる(=空間的な温度差 ΔT の炉心温度 T に対する比が小さい)と考えられる。本方策は、定格運転時の燃料温度評価において軸方向熱伝導を考慮し、燃料ピーク温度の低減を図るものである。定格時の温度評価に加えて、過渡時の温度評価についても同様の熱計算モデル改良を行う。

B) 接触熱抵抗の合理化

SiC/SiC 複合材料製の冷却管と、冷却管間に充填される SiC 製の固相マトリクス間の接触熱抵抗に対し、実際に想定される構成を反映し、その改善を図る方策である。冷却管間に SiC 粉体を充填し焼結成型する過程では、同じ SiC を用いる冷却管とマトリクスは接合してしまふと考えられること(すなわち、両方の固体表面が分離した状態で成型されることは想定しがたいこと)、冷却管は運転時 6MPa の内圧を受けてマトリクスと密着する方向の応力を受けること、SiC 熱膨張率は小さく温度分布を生じても接合状態は維持し得ると考えられることによる。本合理化により、定格時ホッテストチャンネルでは冷却管とマトリクス間温度差で $\sim 50^{\circ}\text{C}$ 低減が見込まれる。なお H15 年度炉心設計では、冷却管とマトリクスは別過程で製造され、その間には固体表面間の接触熱抵抗が生ずる、という想定に基づく評価を実施した。

C) 材料熱伝導率の改善

燃料マトリクスは、被覆粒子燃料(TiN 被覆と窒化物燃料核)を内蔵した複合媒体であり、その実効熱伝導率は $\sim 40\text{W/mK}$ (常温時)となる。NITE 法を用いた SiC/SiC 複合材料^[15]では、熱伝導率 $\sim 70\text{W/mK}$ 、引き張り強さ $\geq 100\text{MPa}$ となる報告がある。またナノ粒子をマトリクスに混合することにより熱伝導が改善される、という報告も為されている^[16]。

SiC 熱伝導率は製造法や製造技術に大きく依存するが、報告されている値としては、例えば宇宙環境条件(被爆条件、 $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 程度)での熱伝導率は、常温で $70\sim 100\text{W/mK}$ 程度であるが、温度上昇に伴い一端低下後、更なる高温条件では回復することも知られている。これらの知見を反映し、減圧事故時等の高温条件に対しては、SiC の熱伝導率として高温条件での向上効果を想定する方策が考えられるものの、本方策は SiC 製造実績および照射実績を積んだ段階で適切に反映すべき事項と考え、本年度検討では採用しないこととした。

2.3.3.3. 軸方向出力分布の平坦化

Pu 富化度を軸方向に 2 領域化し、出力分布平坦化と最高温度低減を目指す方策である。燃料最高温度の低下は、設計基準事象での制限温度 1600°C に対する余裕を増加させる効果と、燃料温度が炉心全体で低下するために高温になった状態で投入されるドブプラ反応度が大きくなる効果がある。

2.3.3.4. 圧力損失の低減

燃料集合体部での圧力損失を低減し、自然循環時の冷却材流量を増加させる方策である。冷却材流路長を短くする方策が有効であるが、炉心燃料部の高さ低減は炉心特性劣化や内部転換比減少をもたらすことから、本検討ではブランケット部の高さを減する方策とする。特に上部ブランケットの高さ低減を目差すが、これは減圧事故時に冷却材が高温となる上部での

特性が、圧力損失に対し大きく寄与するためである。軸ブランケット削減量は、炉心特性向上(H/D 改善、燃料体積比増加)もしくは下部ブランケット増加、径方向ブランケット増設により、増殖比確保が可能な範囲とする。

2.3.3.5. AWS 時炉心入口温度の低減

崩壊熱除去系の熱交換器容量を増加させることにより、減圧事故及び AWS 時の炉心入口温度を低減し、結果として炉心温度低下を図る方策である。具体的には、自然循環除熱時の炉心入口温度換算で $\sim 50^{\circ}\text{C}$ 低下を見込む程度、すなわち長時間除熱時での H15 基準炉心での温度 270°C から $\sim 220^{\circ}\text{C}$ とするもので、これは空気冷却器の熱交換器段数を 2 $\rightarrow$ 3 段とする程度であり、プラント設備への影響は極めて限定的である。また“2.3.2.2”節で論じられたドップラ効果が増大した場合、AWS 長期冷却時の炉心反応度釣合(主として、減圧反応度とドップラ反応度の釣合)がより低い炉心温度で達成され、結果として 1 次系ヘリウムもより低い温度で釣合うことになることから、ドップラ係数向上による副次的効果としても期待できる事項である。

2.3.4. 改善方策の選定

上記の諸方策に対し、実現可能性と効用を定性的に検討し、絞込みを行った。本年度は、以下の方策に対し、その効果を定量的に検討することとした。

A) Pu 富化度分布(Pu 富化度調整、集合体数比配分)、運転サイクル長

炉心設計における設計適正化の 1 つとして実施する。

B) Pu 富化度分布(径方向 3 領域化)及び冷却管径

これまでの高速炉炉心設計経験から、多領域化による設計パラメータ増加は、核特性改善の 1 方策となり得る。外側炉心最外周層に対する Pu 富化度増加および冷却管細径化を行った場合の核的、熱的影響を評価する。

C) 制御棒本数

炉心設計における適正化の 1 つとして実施するが、その効用について事前評価をする。

D) 接触熱抵抗

定格時および AWS 時の燃料温度、冷却管温度の低減効果を評価する。

E) AWS 時炉心入口温度

空気冷却器増段による長期冷却性向上効果を定量的に評価する。

F) 軸方向出力分布

多領域化による設計パラメータ増加により、特性改善を図る。平坦化効果を定格状態と AWS 状況で解析し、利害得失を定量的に評価する。

上記以外の方策については、炉内構造物構造が具体的に設定され、その最適化を図る段階で行われるべきもの、もしくは、新材料製造法が確立された段階で行われるべきものと考え、本年度の検討では対象外とした。

炉心概念設計および安全解析実施にあたっては、炉心性能向上(燃焼特性、熱特性)と安全特性向上(動特性パラメータ、AWS 時 1 次ピーク及び 2 次ピーク温度)の両立を図る必要があることから、以下のステップ 1 $\sim$ 4 に示されるように、炉心設計一過渡解析を連携・フ

ードバックさせることとした。これは、炉心仕様と特性変化(減圧反応度、炉心出力密度・熱容量、炉心高さ、減圧反応度、径方向ピーキング係数)が、AWS でのヘリウム流動や燃料温度に与える影響が大きい、というガス冷却高速炉設計上の特徴を考慮したためである。

ステップ1) 過渡特性サーベイ

H15 年度炉心を基準とし、サーベイ変数(径方向ピーキング係数、炉心高さ、燃料体積比、AWS 時炉心入口温度)、従属変数(出力密度、冷却管径・ピッチ)を変化させ、AWS 時燃料・冷却管温度制限が満足される炉心構成範囲を把握する。

ステップ2) 核特性サーベイ

H15 年度炉心を基準とし、従属変数(出力密度、Pu 富化度、ブランケット高さ、燃料体積比)を調整しながら、サーベイ変数(冷却管径・ピッチ、燃料体数、炉心高さ)を変化させる。この際、増殖比、減圧反応度、ドップラ係数、径方向ピーキング係数も合わせて評価する。

ステップ3) 炉心設計範囲評価

ステップ1とステップ2から、過渡特性を満たし、かつ、炉心特性が向上する炉心形状(炉心高さ、冷却管径・ピッチ)、燃料体積比、径方向ピーキング係数の成立範囲を同定する。成立範囲内で炉心特性(実効燃焼度、Puf 量、炉心径、減圧反応度、ドップラ係数、径方向ピーキング係数)も評価する。

ステップ4) 過渡挙動評価

ステップ3で同定された概念候補に対し、AWS 解析を実施し1次・2次ピーク温度、長期除熱時の温度逸走性を評価する。ピーク温度に余裕がある場合、もしくは温度制限を若干超えた場合でも、概念候補近傍の適切な設計点を、集合体寸法は配置等の調整により見いだす。

2.4. 炉心特性改善方策の評価

2.4.1. 径方向3領域化

A) Pu 富化度3領域化

本方策として、径方向2領域炉心(H15年度設計炉心)における外側炉心最外1層に対し、Pu 富化度を増加させることにより、径方向出力分布の平坦化を図る。サーベイにおいて主として変化させるパラメータ(以後、主パラメータ)、特性評価を行うパラメータ(以後、評価パラメータ)、性能目標値であるパラメータ(以後、性能パラメータ)と、それらの値調整に必要なパラメータ(以後、調整パラメータ)を下記に示す。以下に記されていない値は固定値として扱われる。

ー主パラメータ

Pu 富化度(外側炉心最外周層): 基準炉心 26.6wt% → 30.0wt%

ー評価パラメータ

炉心部径方向ピーキング係数: 基準炉心 BOEC 1.297 / EOEC 1.333
(炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ考慮)

ー性能パラメータ

炉心平均燃焼度: 基準炉心 炉心部 120GWd/t
増殖比: 1.14

ー調整パラメータ

Pu 富化度: 基準炉心 内側炉心 23.6wt%/外側炉心 26.6wt%

主パラメータに応じ、Puf 量は従属的に変化する。調整パラメータは、内側炉心と外側炉心の最大出力密度が同一で、かつ、性能パラメータが満たされるよう調整した。

本方策の評価結果を表2.4-1に示す。下最大出力密度は、外側炉心最外層で79W/cc→96W/ccと大幅に上昇し、炉心内層(内側炉心および外側炉心)の値133W/ccに近づいており、径方向出力分布(図2.4-1)でも平坦化が図られていることが分かる。ミスマッチを考慮した径方向ピーキング係数は、

基準炉心 内側炉心 1.297/外側炉心 1.333 → 内側炉心 1.250/外側炉心 1.287
と約14% $([1.333-1.287]/[1.333-1])$ も低下している。

最外周層でのPu 富化度増加は、内側・外側炉心でのPu 富化度低下(内側炉心 23.6wt%→23.5wt%、外側炉心 26.6wt%→26.0wt%)と相殺し、Puf 量はほとんど変化しない(8.2t/GWe→8.3t/GWe)。また内部転換率(0.657→0.654)はほとんど変化せず、燃焼欠損反応度は1.61→1.55と低減したがこれは、最外周部の出力分担率上昇が径方向ブランケットの増殖比を増加させ(0.088→0.099)、結果として炉心部Pu 富化度低減に寄与した効果も含まれる。

利害得失は以下のようにまとめられる。

- ー径方向ピーキング係数の低減化に十分な効果がある、
- ー径方向ブランケットの増殖性が向上する、
- ー炉心欠損反応度は若干低減する、
- ー初装荷核分裂性Pu 重量はほぼ同等である。

B) 冷却管細径化方策

径方向 2 領域炉心(H15 年度設計炉心)における外側炉心最外 1 層に対し、冷却管径を 10%、30%低減した場合の炉心特性を評価する。主パラメータ、評価パラメータ、性能パラメータ、調整パラメータは以下の通りである。

ー主パラメータ

冷却管内径 (外側炉心最外層): 基準炉心 15.0mm → (10%減) 13.50mm、
(30%減) 10.50mm

ー評価パラメータ

炉心部径方向ピーキング係数: 基準炉心 BOEC 1.297 / EOEC 1.333
(炉心平均燃焼ミスマッチファクタを考慮した値)

ー性能パラメータ

炉心平均燃焼度: 基準炉心 炉心部 120GWd/t
増殖比: 1.14

ー調整パラメータ

Pu 富化度: 基準炉心 内側炉心 23.6wt%/外側炉心 26.6wt%
運転サイクル長さ: 599 日

主パラメータに応じ内側・外側炉心・外側炉心最外層の燃料体積比は変化する。調整パラメータは、内側・外側炉心の最大出力密度が同一で、性能パラメータを満たすよう設定した。

評価結果を表 2.4-2 に示す。最大出力密度は、外側炉心最外層で 79W/cc→(径 10%減)88W/cc、(径 30%減)102W/cc と大幅に上昇し、炉心内層(内側炉心/外側炉心)での値 132-138W/cc に近づいており、径方向出力分布(図 2.4-2)でも平坦化が図られていることが分かる。ミスマッチを含む径方向ピーキング係数は、次のように約 17% ($(1.333-1.277)/(1.333-1)$)も低下する。

基準炉心 内側炉心 1.297/外側炉心 1.333 → (径 10%減)内側炉心 1.276/外側炉心 1.307
(径 30%減)内側炉心 1.248/外側炉心 1.277

最外周部での燃料体積比向上により炉心特性が向上し、外側炉心での Pu 富化度は若干低下(26.6wt%→[径 10%減]22.8%/[径 30%減]25.4%)するが、Puf 量は増加している (8.2t/GWe→[径 10%減]8.3t/GWe/[径 30%減]8.4t/GWe)。径方向ブランケットの出力分担率変化は微小で、燃焼欠損反応度、減圧反応度、ドップラ係数に変化はほとんど見られない。

利害得失は以下の通りである。

- ー径方向ピーキング係数の低減化には、十分な効果がある、
- ーPuf 量低減効果はなく、同等もしくは逆に若干増加する。

なお本評価は核特性のみであり、冷却管細径化の過渡特性への影響は別途考慮する必要があるものの、最外周集合体では、低出力のため AWS でも温度逸走を生じる可能性は低い。

なお径方向ブランケットにおける出力分担率(EOEC 時)が、方策 A)、B) とともに 1.8%なのに対し、増殖比は方策 A) で 0.091、方策 B) で 0.099 と 1 割異なっている。これは、方策 A) が SiC 構造材増加を伴うのに対し、方策 B) では増加を伴わないことから、最外周燃料集合体と径方向ブランケット境界近傍での中性子束エネルギーおよび空間分布が異なること、すなわち方策 A) では若干軟化していることが要因と考えられる。

2.4.2. 制御棒本数合理化

本方策は、第3章での炉心設計で適正化方策の1つとして実施するが、その効用について本節にて事前評価を行う。具体的には、H15 基準炉心相当の制御棒本数 49 本構成(図 2.4-3)に対し、第4リング制御棒を合理化した炉心体系での制御棒本数 37 本構成(図 2.4-4)を考え、炉心取出燃焼度(120GWd/t)となる Pu 富化度条件を設定し、その時の運転サイクル長、燃料交換バッチ数、増殖比、径方向ピーキング係数等を比較する。

評価結果を表 2.4-3 に示す。炉心等価直径は 5.94m→5.87m とわずかな低減だが、臨界性向上に伴い Pu 富化度は $\sim 0.1\text{wt}\%$ 減、燃焼欠損反応度は $1.55 \rightarrow 1.29\% \Delta k/k'$ と2割低減する。運転サイクル長と燃料交換バッチ数は 21.2 ヶ月 x6 バッチ→18.1 ヶ月 x7 バッチで燃料の炉内滞在時間はほぼ同一、すなわち炉心平均燃焼度は 123GW/t でほとんど変化はない。増殖比は $1.154 \rightarrow 1.167$ と増加するが、これは炉心での内部転換比が 0.027 改善したことによる。Puf 量は $8.5 \rightarrow 8.1\text{t/GWe}$ と改善する。減圧反応度、ドップラ係数はほとんど変化しない。径方向出力分布を図 2.4-5 に示す。径方向ピーキング係数は $1.320 \rightarrow 1.287$ と1割程度改善する。

本方策は、炉心径減少や H/D 改善はほとんどないものの、制御棒本数減少による臨界特性向上により炉心特性向上が図れる。反応度収支は、基準炉心設計時に別途評価する必要があるが、燃焼欠損反応度が減少していることから、成立性確保が見込まれる。

利害得失は以下のようにまとめられる。

- －炉心等価直径が若干減少し、Puf 量も低減する。
- －炉心内部転換比の向上により、全体の増殖比が向上する。
- －燃焼欠損反応度が減少する。
- －径方向ピーキング係数が改善する。

なお、全制御棒価値の低下と反応度収支成立性は、詳細炉心設計段階で別途評価する必要がある。

2.4.3. 接触熱抵抗合理化

H15 年度導入期炉心に対し、接触熱抵抗が合理化された条件における定格時炉内温度、および AWS 長期除熱時(36000 秒時)の炉内温度を評価した。

温度評価結果を表 2.4-4 に示す。また AWS 時の炉心温度変化および反応度変化を図 2.4-6 および図 2.4-7 に示す。ピーク出力チャンネルでの冷却管最高温度は 1239℃→1240℃と同等だが、燃料最高温度は 1529℃→1467℃と約 60℃低下する。炉心燃料全体の平均温度も 958.7℃→921.4℃と約 35℃低下しているが、これは炉心温度上昇時のドブプラ反応度投入量が増加することを意味する。例えば AWS 長期除熱時の燃料平均温度を(H15 年度解析より)1250℃とした場合、ドブプラ反応度は、

$$[1250 - 921.4 = 328.6^\circ\text{C}] / [1250 - 958.7 = 291.3] = 1.12$$

であり、反応度としては 12%も増加することとなり、長期除熱時の出力減少(1.60→1.55%)に繋がる。炉心入口温度は 221℃→219℃と同等だが、冷却管最高温度は 2212℃→2030℃と 182℃も低下する。これは、出力低減に伴うホットテストチャンネルでのヘリウム温度低下により、炉心上端位置でヘリウム動粘性係数 $6.10 \times 10^{-4} \rightarrow 5.32 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ が 1 割以上低下し、さらにホットテストチャンネル流量 ($0.55 \text{kg/s} \rightarrow 0.60 \text{kg/s}$) の増加のため、さらにヘリウム温度が低減する、というフィードバック効果が生じたためと考える。流量増加は Re 数で 160.6→183.5 と 1 割程度向上しているが、ヘリウム温度低下による熱伝導率減少により熱伝達率 $188.9 \rightarrow 179.1 \text{W/m}^2\text{K}$ には大きな差は生じないため、膜温度上昇に対する低減効果は限定される。

本方策は、直接的にはマトリクス内での温度差低減効果を持ち、さらに、燃料温度低下→ドブプラ反応度増加→長期除熱時の熱出力低下→ホットテストチャンネルでの温度逸走性減少→ヘリウム流量増加と出口温度低下→冷却管温度低下という間接的な効果も有する。

利害得失は以下のとおりである。

- 定格運転時の燃料温度低下に効果がある、
- AWS 長期除熱時も、ドブプラ効果増加による出力低減が期待できる、
- 特に長期除熱時のホットテストチャンネルにおける温度逸走性低減効果が大きい、
- 冷却管における熱伝達改善効果や、膜温度上昇幅の低減効果は限定される。

2.4.4. AWS 時炉心入口温度の低減

本方策は、崩壊熱除去系の 3 次系にあたる空気冷却器段数増加(2 → 3 段)をさせ、長期冷却時の炉心入口温度低減を図るものである。これらの効果は過渡解析により詳細に解析されるものの、導入効果の見通しを得るために下記の分析を実施した。

AWS 長期冷却時は、1 次系統は自然循環により除熱され、冷却管内は層流状態にある。摩擦損失係数、Re 数、及び摩擦損失に関する式を以下に示す。

$$Cd = 64 / Re \quad (\text{自然循環時は層流状態}) \quad (1)$$

$$Re = \frac{u \cdot de}{\nu} \quad (2)$$

$$\Delta P_L = Cd \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot \frac{H}{de} \quad (3)$$

ここで、

Cd	:	摩擦損失係数
Re	:	レイノルズ数
ΔP_L	:	圧力損失 (Pa)
ρ	:	密度 (kg/m ³)
u	:	流速 (m/s)
H	:	集合体高さ (m)
de	:	水力等価直径 (m)
ν	:	動粘性係数 (m ² /s)

である。(1)、(2) 及び (3) 式より、圧力損失は以下の式となる。

$$\begin{aligned} \Delta P_L &= 32 \cdot \frac{\rho \cdot \nu \cdot u \cdot H}{de^2} \\ &= 32 \cdot \frac{\mu \cdot u \cdot H}{de^2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

μ	:	粘性係数 (Pa · s)
-------	---	---------------

である。冷却材温度上昇による浮力は以下に示す式となる。

$$\Delta P_B = g \cdot (\rho_{CL} - \rho_{HL}) \cdot H_{CH} \quad (5)$$

ここで、

ΔP_B	:	浮力 (Pa)
g	:	重力加速度
ρ_{CL}	:	コールドレグ (= 炉心入口) 冷却材密度 (kg/m ³)
ρ_{HL}	:	ホットレグ (= 炉心出口) 冷却材密度 (kg/m ³)
H _{CH}	:	炉心・DHX 伝熱中心差 (m)

である。H15 年度の AWS 解析から、長期除熱／自然循環時の圧力損失は、そのほとんどを摩擦損失が占めることが分かっており、炉内摩擦損失以外の出入口圧力損失、加速損失を無視することにより、(4) 及び (5) 式から、

$$\rho_{CL} - \rho_{HL} = \frac{32 \cdot H}{g \cdot H_{CH}} \cdot \frac{\mu}{de^2} \cdot u \quad (6)$$

となる。また出力と冷却材温度上昇の関係から、以下の式が成立する。

$$Q = \rho \cdot u \cdot A \cdot Cp \cdot (T_{HL} - T_{CL}) \quad (7)$$

ここで、	Q	:	発熱量 (W)
	ρ	:	密度 (kg/m ³)
	u	:	流速 (m/s)
	A	:	冷却材流路面積 (m ²) (= $61 \cdot (\pi \cdot de^2 / 4)$)
	T_{HL}	:	ホットレグ温度 (°C)
	T_{CL}	:	コールドレグ温度 (°C)

である。さらにホットレグでのヘリウム密度は、コールドレグでのヘリウム密度、及びホットレグ温度、コールドレグ温度、体膨張係数を用いて、以下の式で簡易的に表せる。

$$\rho_{HL} = \rho_{CL} [1 - \beta(T_{HL} - T_{CL})] \quad (8)$$

発熱量計算において燃料核体積発熱率を一定として、以下の式とする。

$$Q = q''' \cdot w \cdot p_k \cdot V_f \cdot A_{all} \cdot H' \quad (9)$$

ここで、	q'''	:	定格時燃料核体積発熱率 (W/m ³)
	w	:	自然循環時出力割合 (-)
	p_k	:	径方向ピーキングファクタ (-)
	V_f	:	実効燃料体積比 (-)
	A_{all}	:	集合体断面積 (m ²)
	H'	:	炉心高さ (m)

である。さらに (6) 式の粘性係数、流速、(7) 式の流速、密度、比熱は、炉心中心位置(添え字 CE)でのヘリウム温度での値とする。以上により冷却材温度上昇に関する式が導かれる。

$$(T_{HL} - T_{CL})^2 = \frac{128 \cdot q''' \cdot A_{all}}{61 \cdot \pi \cdot g \cdot H_{CH}} \cdot \frac{1}{\rho_{CL}} \cdot \frac{\mu_{CE}}{\rho_{CE} \cdot \beta \cdot Cp} \cdot p_k \cdot w \cdot \frac{H \cdot H' \cdot V_f}{de^4} \quad (10)$$

マトリクスでの水力等価直径(すなわち冷却管内径)と実効燃料体積比の関係を以下に示す。

$$V_f = 0.95 \cdot \frac{0.92 A_{all} - 61 \cdot \frac{\pi \cdot (1.1 \cdot de)^2}{4}}{A_{all}} \cdot 0.5 \cdot V_p \quad (11)$$

ここで、	0.95	:	燃料理論密度割合
	0.92	:	集合体内ラッパ管等による補正係数
	0.5	:	燃料粒子充填ポロシティ
	V_p	:	被覆粒子燃料内燃料体積比 (=0.641)

である。(11) 式より水力等価直径 de は以下に示す式となる。

$$de^2 = f \cdot A_{all} \left(0.92 - \frac{V_f}{0.30} \right) \quad (12)$$

ここで、	f	:	1.725×10^{-2}
------	-----	---	------------------------

である。

これより冷却材温度上昇、出力、燃料体積比の関係として、次の式が得られる。

$$(T_{HL} - T_{CL})^2 = \frac{128 \cdot q'''}{\underbrace{61 \cdot \pi \cdot g \cdot H_{CH} \cdot f^2 \cdot A_{dl}}_{\text{定数}}} \cdot \underbrace{\frac{1}{\rho_{CL}}}_{\text{炉心入口温度に依存}} \cdot \underbrace{\frac{\mu_{CE}}{\rho_{CE} \cdot \beta \cdot Cp}}_{\text{炉心中心温度に依存}} \cdot p_k \cdot w \cdot \underbrace{\frac{H \cdot H'}{V_f \left(0.92 - \frac{V_f}{0.3}\right)^2}}_{\text{形状}} \quad (13)$$

式(13)において、燃料体積比、径方向ピーキング係数、及び炉心入口温度をパラメータに、長期除熱時の炉心出口温度を簡易的に求めることができる。なお、炉心中心温度は 1100℃ に固定し、炉心入口温度設定に応じてコールドレグ冷却材密度を変更する。

図 2.4-8 に燃料体積比、径方向ピーキング係数と炉心出口温度の関係を、図 2.4-9 に炉心出口温度を同一温度とした場合の炉心入口温度と燃料体積比の関係を示す。燃料体積比の変更は炉心体積と出力密度、炉心径の増減に相当するが、これにより燃料温度は大きく変化する。炉心入口温度を 250℃→150℃と 100℃低下させた場合、燃料体積比が 20%→21%に増加できることを意味しており、これは図 2.4-9 と対比すれば、同一燃料体積比であれば燃料温度を 250℃低減可能なことを意味する。なお径方向ピーキング係数を 1.5→1.4 としても、燃料温度は～100℃の変化に留まっているが、これは中心温度を固定したためであり、別途実施した過渡解析、および下記の考察に従えば、径方向ピーキング係数の影響は大きい。

式(13)を、ヘリウムガスの状態方程式：

$$\rho \propto P_{\text{BackPressure}} T$$

を用いて、温度とピーキング係数で表し、以下の式を得る。

$$(T_{HL} - T_{CL})^2 \propto T_{CL} T_{CE} \cdot p_k \quad (14)$$

さらに、ホットチャンネルでのヘリウム出口温度を以下の式で表す。

$$T_{HC} = (T_{HL} - T_{CL}) \cdot p_k / \alpha_{HC} + T_{CL}$$

ここで、 α_{HC} ：定格運転時流量配分設計に応じたホットチャンネル流量に対する実流量の比であり、温度逸走状態に応じた値となる。これより、

$$\begin{aligned} T_{CE} &= (T_{HC} + T_{CL}) / 2 = (T_{HL} - T_{CL}) p_k / 2\alpha_{HC} + T_{CL} \\ &= T_{HL} p_k / 2\alpha_{HC} + (1 - p_k / 2\alpha_{HC}) T_{CL} \end{aligned} \quad (15)$$

となる。式(14)および(15)より、

$$(T_{HL} - T_{CL}) \propto T_{CL} \cdot p_k \cdot \sqrt{(T_{HL} / T_{CL}) / 2\alpha_{HC} + (1 / p_k - 1 / 2\alpha_{HC})}$$

であり、典型的な設計例： $p_k=1.5$ 、 $T_{HL}/T_{CL}=1500\text{K}/500\text{K}=3$ において、 $\alpha \sim 0.9$ として、

$$(T_{HL} - T_{CL}) \propto T_{CL} \cdot 1.5 \cdot \sqrt{(3) / 0.9 / 2 + (1 / 1.5 - 1 / 0.9 / 2)} = T_{CL} \cdot 2 = 2T_{CL}$$

となる。

他方、横流冷却型炉心^[8]では、冷却材入口にあたる内管フリット(開孔率 4~5%の SiC 製多孔円筒管)での摩擦損失係数、圧力損失は以下となる。

$$Cd = f / Re \quad (\text{自然循環時は層流}) \quad (16)$$

$$\Delta P_L = Cd \cdot \frac{\rho}{2} u^2 \cdot \frac{L}{d_h} = \frac{f}{2} \cdot \frac{\mu_{CL} \cdot u \cdot L}{d_h^2} \quad (17)$$

ここで、
 f : 摩擦損失形態係数
 L : フリット厚さ (m) : ~5mm
 d_h : 多孔の水力等価直径 (m)
 μ_{CL} : 炉心入口における粘性係数 (Pa・s)

である。式(5)と式(17)から、

$$\rho_{CL} - \rho_{HL} = \frac{f \cdot L}{2g \cdot H_{CH}} \cdot \frac{\mu_{CL}}{d_h^2} \cdot u \quad (18)$$

となり、式(8)と併せて、

$$T_{HL} - T_{CL} = \frac{f \cdot L}{2g \cdot H_{CH} \cdot \beta} \cdot \frac{\mu_{CL}}{\rho_{CL}} \cdot \frac{u}{d_h^2} \quad (19)$$

となる。出力と冷却材温度上昇の関係から、以下の式が成立する。

$$Q = \rho_{CL} \cdot u_{CL} \cdot A_{frit} \cdot Cp \cdot (T_{HL} - T_{CL}) \quad (20)$$

ここで、 A_{frit} : 内管フリット表面積 (m²)

である。式(20)と式(9)から、

$$(T_{HL} - T_{CL}) = \frac{q''' \cdot w \cdot A_{all} \cdot H'}{A_{frit} \cdot Cp} \cdot \frac{1}{\rho u} \cdot p_k \cdot V_f \quad (21)$$

さらに式(19)と(21)から、

$$(T_{HL} - T_{CL})^2 = \frac{f \cdot L}{2g \cdot H_{CH} \cdot \beta} \cdot \frac{q''' \cdot w \cdot A_{all} \cdot H'}{A_{frit} \cdot Cp} \cdot \frac{1}{d_h^2} \cdot \frac{1}{\rho_{CL}} \cdot \frac{\mu_{CL}}{\rho_{CL}} p_k \cdot V_f \quad (22)$$

となる。よって、以下の関係式が得られる。

$$(T_{HL} - T_{CL}) \propto T_{CL} \sqrt{p_k} \quad (23)$$

ホットチャンネル出口温度の影響を受けない点が特徴である。設計例： $p_k=1.5$ として、

$$(T_{HL} - T_{CL}) \propto T_{CL} \cdot \sqrt{1.5} = T_{CL} \cdot 1.225 \approx 1.2 T_{CL}$$

となる。長期冷却時の炉心入口温度低減は、縦方向流により冷却を行う六角ブロック型において、横方向流冷却型より効果が大きいことが分かる。

本方策の利害得失は以下の通りである。

- －炉心入口温度の低減は、ホッテストチャンネルでの温度逸走性低減に効果的である、
- －空気冷却器の段数増加などの設備対応を要する。

を低 Pu 富化度（内側/外側＝18.2/19.7wt%）と設定したもの、ケース 2 はケース 1 の軸方向出力分布を上下反転させた設定としたものである。図 2.4-12 にケース 1、2 の軸方向出力分布を示す。なお炉心・燃料寸法、動特性パラメータ、及び径方向ピーキング係数は、H15 年度基準炉心と同一値を用いることとした。

ケース 1) 上部ピーク型

定格時燃料最高温度が 1600℃弱となるよう軸方向出力分布を設定した。AWS 過渡解析結果を図 2.4-13(主要パラメータ挙動)、図 2.4-14(反応度挙動)を示す。燃料の 1 次ピーク温度は 2131℃で軸方向 1 領域炉心より 264℃上昇した。2 次ピーク及び 36000 秒後の冷却管温度は 2012℃及び 1848℃で、軸方向 1 領域炉心より 2 次ピークで 2℃、36000 秒後で 39℃上昇した。定格運転時及び 1 次ピーク時は、軸方向 1 領域炉心よりも燃料最高温度位置が炉心上部に位置するため、燃料最高温度は上昇する。2 次ピーク及び長時間経過後では、炉心上部に高出力密度領域があるためヘリウム温度が上昇する位置が上部に移動し、摩擦圧力損失の減少により流量が増加している。

ケース 2) 下部ピーク型

図 2.4-15 に炉内主要パラメータの過渡挙動を、図 2.4-16 に反応度の過渡挙動を示す。定格運転時の燃料最高温度は～1400℃であり、軸方向 1 領域炉心より～50℃低下する。AWS 事象を想定した場合の 1 次ピーク燃料最高温度は～1950℃となり、軸方向 1 領域炉心より若干上昇する。2 次ピーク及び 36000 秒後の冷却管最高温度は 2035℃及び 1847℃と、軸方向 1 領域炉心とほぼ同等の温度となった。定格運転の燃料時温度は、軸方向非均質化による軸方向温度分布の平坦化により燃料温度は低下したものの、2 次ピーク及び長時間経過後は、炉心下部に高出力部があるために摩擦圧力損失の増大及び冷却材温度上昇をまねき、流量減少により冷却管温度が上昇した。

以上の結果から、上部ピーク型の場合、定格時の燃料温度は上昇するが AWS 時温度は若干低下すること、下部ピーク型の場合、定格時の燃料温度は減少するが AWS 時に温度が若干低下する可能性があることが判明した。これは、定格時はマトリクス内燃料温度上昇幅が大きく、下部ピークが温度低減に有効な一方で、AWS 時はヘリウム温度上昇幅が大きく、動粘性増加の観点では高温ヘリウムの流路長が長くなることによる。本評価は、定格時と AWS 時の温度挙動について、軸方向 1 領域炉心、上部ピーク型、下部ピーク型を比較したものであり、軸方向 2 領域化は利得と損失が混在するという結果となった。しかし、例えば、炉心設計上着目する事象が、AWS ではなく、減圧事故で自然循環除熱ながらスクラムされる事象に設定された場合は、長期除熱特性に対する要求が緩和されるため、軸方向 2 領域化が有効な方策となる可能性も示唆している。

利害得失は以下のようにまとめられる。

－軸方向非均質化(下部ピーク型)は、定格時の燃料温度を～30℃低減させるが、AWS 長期除熱時には若干高める可能性がある、

－軸方向非均質化(上部ピーク型)は、AWS 長期除熱時の燃料温度を低減させる効果を持つが、定格時には上昇するため制限温度を考慮した Pu 富化度分布及び分離位置設定が必要となる、

これらの利害得失を踏まえ、本年度設計での採用は見合わせることにしたが、利害得失の最終的な評価は、軸方向出力分布最適化(Pu 富化度分布及び分離位置設定など)を踏まえた後に行われるべきものであり、今後も適正な出力分布評価検討を継続する意義は大きい。

2.4.6. まとめ

上記の定量的な方策検討を踏まえ、以下を本年度の基準炉心設計で採用することとした。

－接触熱抵抗の合理化

－AWS 時炉心入口温度の低減

これらの方策は、炉心特性を維持もしくは向上しつつ、定格時・AWS 時の除熱特性を高めることが可能なものである。炉心設計では、これらの方策を取入れた上で、炉心・燃料形状の適正化、径方向ピーキング係数の低減、燃料体積比の向上を実現し、炉心特性向上を図ることとした。

また以下の方策は、炉心設計を進める中で採り入れることとする。

－径方向ピーキング係数 (Pu 富化度分布、集合体数配分)、運転サイクル長

－制御棒本数合理化

2.5. 核・熱特性サーベイと改善方策の反映

上記改善方策を炉心特性向上に結びつける設計条件を探索する。それには、炉心・燃料形状変更に対する核特性と熱特性の影響をサーベイし、炉心性能と定格時熱特性及び AWS 時長期除熱特性を両立させる設計範囲を捉えることが必要であり、核特性評価と熱特性評価及び長期除熱特性評価のフィードバックを行うこととなる。具体的には、形状(炉心高さ、冷却管径等)と特性(径方向ピーキング係数)を仲介し、以下の手順によりサーベイする。

I) 熱特性評価および長期除熱性簡易評価

定格燃料温度 1600℃以下、長期除熱時冷却管温度 2200℃以下となる燃料構成(冷却管径、炉心高さ、燃料体積比等)を径方向ピーキング係数、長期除熱時炉心入口温度に対して求める。この際、炉心熱出力、等価直径、冷却管 P/D 比は固定して扱う。温度評価は、流量・出力条件に応じ単一セル体系での簡易計算により行う。工学的安全係数を考慮する。

II) 核特性評価

I) で同定された燃料構成に対し、炉心特性(増殖比、炉心平均燃焼度、Puf 量、径方向ピーキング係数)を評価する。I) とあわせて設計候補の範囲が求められる。

III) 改善方策の反映

II) で同定した設計候補範囲から、改善対象である炉心特性(Puf 量と実効平均燃焼度)が改善可能な炉心概念を選定する。径方向ピーキング係数、減圧反応度、ドップラ係数も合わせて評価する。

IV) 選定炉心構成での AWS 除熱特性評価

過渡解析コード MrX を用いて、III)選定炉心の AWS 解析を行い、除熱性を確認する。

2.5.1. 熱特性サーベイおよび長期除熱性簡易評価

定格時燃料温度制限 1600℃、長期除熱時冷却管温度制限 2200℃を満たす冷却管径、炉心高さ、燃料体積比を求める。冷却管径は実効燃料体積比換算で 17~26vol%、炉心高さは 80~100cm、想定径方向ピーキング係数は 1.30~1.55 とした。サーベイした炉心・燃料体系を表 2.5-1 に、各種変数、設定値及び制限条件を表 2.5-2 にまとめた。なお H15 基準炉心は、冷却管内径 15mm、実効燃料体積比 20.2%、炉心高さ 90cm、径方向ピーキング係数 1.4379 である。

計算は、炉心高さ、冷却管径(実効燃料体積比)、径方向ピーキング係数を与え、定格時の燃料ピーク温度、AWS 長期除熱時冷却管ピーク温度を求めることの繰り返しとなる。まず冷却管径(実効燃料体積比)に対し、定格時燃料温度が 1600℃となる値と AWS 長期除熱時冷却管温度が 2200℃となる値をサーベイする。同様のサーベイを、炉心高さを固定し、径方向ピーキング係数を変えて行う。その後、炉心高さを変更したサーベイを同様に行う。燃料構成を固定し炉心高さを変えた場合の設計点の変化と、炉心高さを固定し燃料構成を変えた場合の設計点の変化を図 2.5-1(1),(2)に示す。図中の左下部分が温度制限を満足する範囲となる。

炉心高さを 80cm、90cm、100cm と変更した場合の制限満足範囲を図 2.5-2(1)~(3)に示す。定格時および AWS 長期除熱時の除熱性確保には、径方向ピーキング係数を低く、かつ、燃料体積比を小さく(すなわち冷却管径を太く)することが望ましいが、これは出力分布平坦化と炉

心特性向上の両立を意味する。図によれば、設計範囲は定格時温度 1600℃条件曲線より下部と、AWS 時温度 2200℃条件曲線より下部の範囲である。両曲線の交点近傍が設計候補点となるが、これを径方向ピーキング係数と燃料体積比に対してまとめたものを図 2.5-3(1),(2)に示す。それぞれ AWS 時炉心入口温度を 250℃のまま、および 200℃へ低減した場合のものである。炉心高さを高くとることにより、同一ピーキング係数では、燃料体積比を高めることができ、炉心特性向上が期待できることがわかる。同一ピーキング係数・炉心高さ条件では、20.6→21.5%と～0.5%の燃料体積比向上が見込める。炉心高さ 90cm で集合体仕様を固定した場合の、径方向ピーキング係数に対する炉心温度変化を図 2.5-4(1),(2)に示す。温度は径方向ピーキング係数に敏感であること、係数としては 1.45～1.50 まで許容できる可能性があることが分かる。

2.5.2. 核特性サーベイ

前節で抽出した炉心・燃料構成の設計候補点における核特性を行う。AWS 時炉心入口温度 200℃相当条件で熱的成立が見込める炉心構成(炉心高さ 80cm、90cm、100cm)に対し、炉心特性を評価した結果を表 2.5-4(1),(2),(3)に、それらをまとめて表 2.5-5 に示す。サーベイにおいて増殖比向上が図れた場合、径方向ブランケット、軸方向ブランケットを削減し、実効平均燃焼度がどの程度向上するかもあわせて評価している。

軸・径方向ブランケット構成を同一とした場合、炉心高さ、実効燃料体積比に応じた増殖比、減圧反応度、ドップラ係数、燃焼ミスマッチファクタの変化を図 2.5-5 に示す。増殖比と減圧反応度は燃料体積比の影響が強く、燃料体積比が高いほど優れること、ドップラ係数は炉心部とブランケット部を加えた値としては燃料体積比に対する変化は小さいこと、燃焼ミスマッチファクタは炉心高さと燃料体積比が高いほど削減されることがわかる。

2.5.3. 改善方策の反映

核特性サーベイから炉心高さを高くした場合、燃料体積比を高めることができ、それにより炉心特性改善が図りえることが示された。本節では、炉心特性向上の方向性を探るため、熱的・核的成立性が見込める幾つかの炉心構成に対し、比較検討を行う。

A) 初装荷核分裂性 Pu 重量削減炉心(Puf 削減炉心)

H15 年度炉心に対し、改善方策(接触熱抵抗と AWS 時炉心入口温度)を取入れ、炉心高さ 90cm で成立が見込める構成に相当する炉心配置を図 2.5-6 に、その特性評価結果を表 2.5-6 に示す。径方向ピーキング係数は、1.50 と H15 年度炉心(1.44)より劣化した値を想定した場合でも、実効平均燃焼度は 54.3GWd/t→55.2GWd/t と改善される。Puf 量も 8.2→7.3t/GWe と大幅に改善される。

B) 実効燃焼度向上炉心

H15 年度炉心に対し、改善方策(接触熱抵抗と AWS 時炉心入口温度)を取入れ、炉心高さ 100cm で成立が見込める構成に相当する炉心配置を図 2.5-7 に、その特性評価結果を表 2.5-7 に示す。実効平均燃焼度が 58.3GWd/t へ向上するものの、Puf 量は 8.6t/GWe と増加する。

C) 炉心等価直径削減炉心

Puf 削減炉心に対し、炉心高さ 100cm とし出力密度を高める設定とした場合の炉心は一途を図 2.5-9 に示す。炉心等価直径は 5.94→5.25m と大幅に小型化され、Puf 量も 6.9t/GWe と大幅に削減されるが、実効平均燃焼度は 53.7GWd/t と若干低下する。

D) 燃焼度向上・Pu 削減炉心

実効燃焼度向上炉心と炉心等価直径削減炉心の中間的な性格を有するよう出力密度を設定した炉心であり、その炉心配置図を図 2.5-8 に、特性評価結果を表 2.5-8 に示す。実効平均燃焼度は 53.7GWd/t に改善し、Puf 量も 7.3t/GWe へ改善される。

2.5.4. 特性向上炉心の選定と AWS 除熱特性評価

上記 4 つの炉心構成：「Puf 削減炉心」、「実効燃焼度向上炉心」、「等価炉心直径削減炉心」、「燃焼度向上・Pu 削減炉心」の特性比較を表 2.5-9 に示す。基準炉心構築を図る炉心構成としては、Puf 量と実効平均燃焼度がともに改善される「燃焼度向上・Pu 削減炉心」を採用することとした。

選定した炉心に対し、AWS 解析を実施し、その除熱特性を確認することとした。なお径方向ピーキング係数は、特性サーベイで用いた 1.5 とした。解析結果を図 2.5-10(1),(2)に示す。定格時燃料温度は 1450℃で 1600℃以下である。1 次ピークは燃料 1867℃、冷却管 1848℃で 2200℃未満である。2 次ピークも燃料 2014℃、冷却管 2011℃、長期除熱時(36000 秒)は冷却管 1809℃といずれも 2200℃未満である。本解析は径方向ピーキング係数 1.5 における評価であり、基準炉心設計において低減が図れれば、さらなる温度低減が可能となる。

2.6. 安全解析モデルの高度化

2.6.1. 崩壊熱除去系熱漏洩モデル化

本年度、通風系ダンパーでの漏洩流れによる放熱モデルを導入した。これまでは、定格時における2次系自然循環流量を0とし、DHXからの放熱は無視できるものとしてきた。

具体的には、通風系ダンパーでの漏洩流れによる定格時2次系自然循環流速及びDHXでの熱伝達率を設定し、熱喪失量を求めた。漏洩流量を定格流量の0.6%とした場合、定格時にはDHXより～4%熱喪失が生ずる。結果として、定格時の2次系待機時入口温度が、これまでのコールドレグ設計温度160℃から、熱喪失と釣り合う温度210℃へ上昇しており、過渡初期での炉心入口温度は上昇している。計算モデルとしては、DHXに上記設定に見合う熱伝達率を与えて2次系への放熱を模擬し、2次系および3次系は自然循環解析により流量と温度を算出した。

なお漏洩流量0.6%と熱損失4%の設定根拠は、2次系自然循環流速を0.1m/s、DHX部ヘリウム平均温度300℃と仮定した場合、伝熱管外径(3.18cm)、動粘性係数($5.95 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)から $Re=534$ を得、熱伝達係数と上記温度設定と併せて漏洩流量～0.6%、熱喪失～4%を得る。

2.6.2. 空気冷却器除熱能力増強

空気冷却器(以下、ACとする)のサーペンタイン型伝熱器段数を1段分増設し、除熱能力を増強している。ACシュラウド寸法は7m×11.4mから11m×11.4mに変更されている。AC除熱能力増強有無によるAWS挙動の相違を別途解析により評価した。その結果によれば、長期所熱時の炉心入口温度は186→173℃と～13℃程度の低下に過ぎず、1次ピーク温度に変化は見られないものの、2次ピークでは冷却管温度を約75℃低下させる効果を有する。

2.6.3. 崩壊熱曲線多項式化

これまで崩壊熱は、時刻歴に対しテーブル(表2.6-1参照)で与え、時点間の線形補間により算出してきた。本年度は崩壊熱算出方法として「原子炉崩壊熱とその推奨値：社団法人日本原子力学会(1989)」p86に記載されるGE値(Scatena, Upham, 1973)で採用された7次多項式によるフィッティング方法について検討した。フィッティング式による崩壊熱変化を図2.6-1に示す。また線形補完した場合と、7次多項式を用いた場合の崩壊熱変化の差を図2.6-2に示す。

別途実施した補間方法の違いによるAWS挙動の違いは、1次ピーク燃料温度で～1℃、2次ピーク燃料温度で～9℃、長期除熱時(36000秒)で～0℃であり、結果として僅かな差であったため、本年度の仕様サーベイ解析、および、基準炉心のDBE、ARTWS、AWS解析では線形補完を用いている。

ただし、スクラム直後で崩壊熱が高く、また核出力が低下した状況では、補完方法による熱出力差は大きくなると考えられ、今後7次多項フィッティング式の適用を図ることとする。

表2.1-1 六角ブロック型ヘリウムガス冷却高速炉の主要な設計条件

炉心形態分類		基準炉心			大出力化炉心	
		導入期炉心	平燃期炉心	導入期炉心	平燃期炉心	平燃期炉心
プラント仕様	電気出力	1124MWe	←	1500MWe	←	←
	原子炉熱出力	2400MWth	←	3202MWth	←	←
	原子炉出口/入口温度	850 / 460 °C	←	←	←	←
	1次系流量	1185kg/s	←	1581kg/s	←	←
	燃料形態	窒化物燃料核	←	←	←	←
炉心・燃料基本仕様	炉心型式	均質2領域	←	←	←	←
	燃料	組成	高速炉多重リサイクル組成 ^{*1}	←	←	←
		FP混入率	0.2Vol%	←	←	←
	炉心材料	被覆材/被覆管	被覆材: TiN	←	←	←
		構造材	固相マテリアル・冷却管: SiC	←	←	←
制限条件	安全要求	減圧反応度	～1 \$ 以下	←	←	←
	燃料健全性	炉心高さ(上下軸方向フラケットを含む)	～3m 以下	←	←	←
		燃料/冷却管 ^{*2} 最高温度 (定格時)	1600°C 以下	←	←	←
		(DBE時)	1600°C 以下	←	←	←
		(ATWS及びAWS時)	2800°C / 2200°C 以下	←	←	←
取合条件	炉心燃料スミア密度	95%TD	←	←	←	←
	遮へい体外接円径	～8m 以下	←	←	←	←
	制御棒、SASS配置	配置間隔: 2S/A ^{*3} 以上	←	←	←	←
	ヘリウム流速(燃料集合体部分)	100m/s 以下	←	←	←	←
	炉心圧力損失(運転時/過渡時)	～0.2MPa/～100Pa 以下	←	←	←	←
炉心性能目標	格納容器背圧(減圧事故時)	0.65MPa(abs.)	←	←	←	←
	増殖比	1.1以上	1.03程度	1.1以上	1.03程度	1.03程度
	複合システム倍増時間(導入期炉心)	50～100年 以下	←	50～100年 以下	←	←
	取出平均燃焼度	炉心部 全炉心実効 ^{*4}	120GWd/t程度 ～50GWd/t以上	←	←	←
	運転サイクル長さ	18ヶ月 以上	←	←	←	←

^{*1} Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Np237/Am241/Am243/Cm244/Cm245=1.1/54.1/32.1/4.3/3.9/0.5/2.0/1.0/0.0 (wt%)

^{*2} 肉厚中心、^{*3} S/A: Sub-assembly (燃料集合体)、^{*4} フラケット燃料を含む全炉心取出平均燃焼度

表2.3-1 炉心特性・過渡時除熱特性向上のための着眼点・方策

影響項目	着眼点	改善項目	設計変更点	留意点
核特性	径方向ピーキング係数 [現状：RZ体系 1.45~1.50] [3D詳細 1.65]	Pu富化度分布	Pu富化度調整	
		燃料交換バッチ数	内側・外側炉心体数比調整	
		運転サイクル長	径方向3領域化	
		制御棒本数	内側炉心・外側炉心の変則バッチ構成	
	炉内構造物の構成・形状	中性子漏れ抑制	20ヶ月→18ヶ月	
核特性 & 熱特性	燃料体積比 ドップラ反応度増加 膜温度上昇幅の低減	制御棒最外リングの合理化	制御棒反応度収支の確認	
		冷却管径	制御棒フォロア構造の見直し	構造具体化及び輸送解析が必要
		ブランケット温度低減	外側炉心最外周部で異径	径方向3領域化の一環として評価
		熱伝達率	リブ形状・高さ・位置の変更	上部軸ブランケット部で変更
熱特性	マトリクス内温度上昇の低減	軸方向熱伝導	熱計算手法の改善	炉心部で変更
		接触熱抵抗	冷却管-マトリクス間の接合性考慮	定格設計と過渡解析の両方で考慮
		実効熱伝達率	SiC物性値	マトリクス部焼結成形過程の反映
		軸方向出力分布	軸方向Pu富化度2領域化	高温状態物性値の反映
	燃料／冷却管最高温度の低減	流路長さ	上部ブランケット長さの削減	ナノ粒子による改善
	圧力損失の低減 ヘリウム温度	AWS時炉心入口温度	空気冷却器の伝熱面積増加	空気冷却系の配置構成への影響

表2.4-1 Pu富化度3領域炉心の主要特性

項 目		径方向2領域炉心	径方向3領域炉心
基本条 件 ・ 炉 心 構 成	原子炉熱出力	2,400MWt	←
	電気出力	1,124MWe	←
主 要 炉 心 特 性	炉心形式	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	19.7ヵ月 (599日)	←
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ	←
	炉心高さ	90 cm	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	492 (264/228) 体	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	174体 (2層)	←
	制御棒本数	49体	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	198体 (2層)	←
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	30/30cm	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	21.3/11.9/42.4/24.3%	←
		27.1/ 6.1/42.4/24.3%	←
		5.94m / 8.28m	←
	炉心等価直径 / 遮へい体外径 Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側/最外層)	23.6 / 26.6 / -	23.5 / 26.0 / 30.0
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	121.7/22.0/2.9	121.6/21.6/3.5
	炉心/軸ブラ/径ブラ	54.3	54.3
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	1.61	1.55
	燃焼欠損反応度 (%Δk/k')	1.139	1.144
	増殖比	0.657/0.394/0.088	0.654/0.391/0.099
	炉心/軸ブラ/径ブラ	138 / 137 / 79	133 / 133 / 96
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側/最外層)	86.7/11.9/1.4	86.6/11.7/1.7
	出力分担率 (%)	83.6/14.7/1.7	83.5/14.5/1.8
	炉心/軸ブラ/径ブラ	60.4/52.2/46.2	60.4/52.2/46.2
	装荷時重金属インベントリ (t)	約1.6	約1.6
	炉心/軸ブラ/径ブラ	8.2	8.3
	ブランケット対炉心重量比	0.32	0.32
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)		
	減圧反応度 (\$) *2		
	ドップラ係数 (-1×10 ⁻³ Tdk/dT) *3		
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	10.0/2.4/1.9/0.3	10.1/2.4/1.9/0.4
	炉心部径方向ピーキング係数 *4	1.297 [1.197]	1.250 [1.154]
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ	1.333 [1.233]	1.287 [1.196]
		1.082	1.080
		1.078	1.076

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。
*2 制御棒領域 (フロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、β=0.002951 (H15検討値；原電殿提示)。
*3 燃料物質の温度を500℃昇温。
*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。
燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.4-2 冷却管細径化3領域炉心の主要特性

項 目	径方向2領域炉心		径方向3領域炉心	
	基準冷却管仕様 (H15年度仕様)	外側炉心最外層 冷却管径 -10%	外側炉心最外層 冷却管径 -30%	
原子炉熱出力	2,400MWt	←	←	
電気出力	1,124MWe	←	←	
炉心形式	均質2領域炉心	均質3領域炉心	←	
運転サイクル長さ	19.7ヵ月 (599日)	19.9ヵ月 (606日)	20.4ヵ月 (620日)	
燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ	←	←	
炉心高さ	90 cm	←	←	
炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	492 (264/228) 体	←	←	
径方向ブランケット燃料集合体数	174体 (2層)	←	←	
制御棒本数	49体	←	←	
軸方向ブランケット厚 (上/下)	30/30cm	←	←	
冷却管内径 (外側炉心最外層)	15.0 (15.0) mm	15.0 (13.50) mm	15.0 (10.50) mm	
冷却管外径 (外側炉心最外層)	16.5 (16.5) mm	16.5 (14.85) mm	16.5 (11.55) mm	
炉心部燃料体積比 (外側炉心最外層)	21.3 (21.3) %	21.3 (22.8) %	21.3 (25.4) %	
炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	5.94m / 8.28m	←	←	
Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	23.6 / 26.6	23.6 / 26.4	23.6 / 26.1	
炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	121.7/22.0/2.9	121.8/22.0/3.0	122.4/22.0/3.2	
炉心/軸ブラ/径ブラ	54.3	54.6	55.1	
ブランケット込み全炉心平均燃焼度	1.61	1.60	1.60	
燃焼欠損反応度 (%Δk/k')	1.139	1.141	1.142	
増殖比	0.657/0.394/0.088	0.658/0.393/0.089	0.660/0.391/0.091	
炉心/軸ブラ/径ブラ	138 / 137 / 79	135 / 135 / 88	133 / 132 / 102	
最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側/最外層)	86.7/11.9/1.4	86.7/11.9/1.4	86.7/11.8/1.5	
出力分担率 (%)	83.6/14.7/1.7	83.6/14.7/1.6	83.6/14.6/1.8	
炉心/軸ブラ/径ブラ	60.4/52.2/46.2	61.0/52.8/46.2	62.1/53.7/46.2	
装荷時重金属インベントリ (t)	約1.6	約1.6	約1.6	
炉心/軸ブラ/径ブラ	8.2	8.3	8.4	
ブランケット対炉心重量比	0.32	0.32	0.31	
初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	10.0/2.4/1.9/0.3	10.1/2.4/1.9/0.3	10.1/2.4/1.9/0.3	
減圧反応度 (\$) *2	1.297 [1.197]	1.276 [1.178]	1.248 [1.152]	
ドップラ係数 (−1×10 ^{−3} Tdk/dT) *3	1.333 [1.233]	1.307 [1.211]	1.277 [1.182]	
炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	1.082	1.081	1.082	
炉心部径方向ピーキング係数 *4	1.078	1.077	1.077	
炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ				

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。

*2 制御棒領域 (フオロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、 $\beta=0.002951$ (H15検討値; 原電殿提示)。

*3 燃料物質の温度を500°C昇温。

*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。

燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.4-3 制御棒本数合理化による炉心主要特性の変化

項 目		制御棒49体炉心 (21.2ヶ月×6バッチ運転)	制御棒37体炉心 (18.1ヶ月×7バッチ運転)
基本条 件	原子炉熱出力	2,400MWt	←
	電気出力	1,124MWe	←
・ 炉 心 構 成	炉心形式	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	21.2ヵ月 (644日)	18.1ヵ月 (552日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ	7 / 7 バッチ
	炉心高さ	90 cm	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	492(264/228)体	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	174体 (2層)	←
	制御棒本数	49体	37体
	径方向遮へい体数 (SiC)	198体 (2層)	←
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	30/30cm	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	22.8/12.8/44.0/20.3% 29.0/6.6/44.0/20.3%	←
主 要 炉 心 特 性	炉心等価直径 / 遮へい体外径 Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	22.8 / 25.6	22.7 / 23.5
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	122.5/21.6/2.7	123.6/20.1/2.9
	炉心/軸ブラ/径ブラ	54.4	54.4
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	1.55	1.29
	燃焼欠損反応度 (%Δk/k _{k'})	1.154	1.167
	増殖比	0.679/0.390/0.084	0.707/0.371/0.089
	炉心/軸ブラ/径ブラ	138 / 139	135 / 135
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	87.1/11.6/1.3	87.6/11.0/1.5
	出力分担率 (%)	84.0/14.5/1.6	85.0/13.3/1.7
	炉心/軸ブラ/径ブラ	64.8/56.0/49.5	64.8/56.0/49.5
	装荷時重金属インベントリ (t)	約1.6	約1.6
	炉心/軸ブラ/径ブラ	8.5	8.1
	ブランケット対炉心重量比	0.256	0.255
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)		
	減圧反応度 (\$) *2		
	ドップラ係数 (-1×10 ⁻³ Tdk/dT) *3		
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	10.2/2.2/1.8/0.2	10.8/1.9/1.6/0.3
	炉心径方向ピーキング係数 *4	1.300[1.187]	1.246[1.158]
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ	1.320[1.229]	1.287[1.198]
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ	1.077	1.072
		1.073	1.070

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。

*2 制御棒領域 (フオロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、β=0.002951 (H15検討値；原電殿提示)。

*3 燃料物質の温度を500℃昇温。

*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。
燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.4-4 接触熱抵抗合理化による定格時炉心温度の変化

接触熱抵抗			合理化前	合理化後
定格比出力		-	1.601	1.555
自然循環時流量		kg/h	0.553	0.597
温度	炉心入口温度	°C	221.4	219.3
	冷却管最高温度	°C	2212.6	2030.8
	燃料最高温度	°C	2215.0	2032.8
	冷却材温度上昇	°C	1897.6	1712.9
温度上昇分	冷却材-冷却管壁面温度上昇	°C	92.9	97.8
	冷却管温度上昇	°C	1.5	1.7
	燃料層-冷却管接触面温度上昇	°C	0.5	0.0
	燃料層温度上昇	°C	1.1	1.2
(出力/流量) 比		-	2.896	2.604
定格時炉心平均温度		°C	958.7	921.4
Re(炉心上端)		-	160.6	183.5
冷却材-冷却管壁面熱伝達率		W/(m ² K)	188.9	179.1
動粘性係数(炉心上端)		m ² /s	6.00×10 ⁻⁴	5.32×10 ⁻⁴

表2.4-5 軸方向2領域化炉心の炉心主要特性

項 目		基準炉心 (導入期炉心)	軸方向2領域化炉心		
			Case A	Case B	Case C
基本 条件	原子炉熱出力	2,400MWt	←	←	←
	電気出力	1,124MWe	←	←	←
・ 炉 心 構 成	炉心形式	均質2領域炉心	←	←	←
	運転サイクル長さ	18ヵ月 (548日)	←	←	←
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ	←	←	←
	炉心高さ	100 cm	←	←	←
	炉心燃料集合体数 (内側/外側)	414 (222/192) 体	←	←	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	84 体 (1層)	←	←	←
	制御棒本数	43 体	←	←	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	288 体 (3層)	←	←	←
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	25/25cm	←	←	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	21.0/11.8/42.2/25.0%	←	←	←
主 要 炉 心 特 性	体積比	26.7 / 6.1 / 42.2 / 25.0%	←	←	←
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	5.43m / 7.59m	←	←	←
	Pu富化度 [Pu/HM] (wt%)	22.2 / 24.0	18.2 / 19.7	19.6 / 21.2	20.9 / 22.6
	(内側/外側)	同上	27.8 / 30.0	25.9 / 28.0	24.1 / 26.0
	炉心取出平均燃焼度 (Gwd/t)				
	炉心/軸ブラ/径ブラ	121.0/26.7/6.2	120.2/27.8/6.3	120.5/27.4/6.2	120.7/27.1/6.2
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	69.3	69.3	69.3	69.3
	燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	1.44	1.58	1.48	1.43
	増殖比	1.107	1.107	1.107	1.107
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	0.709/0.176/0.150/0.072	0.703/0.202/0.128/0.073	0.706/0.193/0.136/0.072	0.708/0.185/0.143/0.072
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	181 / 120	225 / 150	208 / 139	193 / 129
	出力分担率 (%)				
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	87.6/6.3/4.6/1.5	87.0/7.9/3.5/1.6	87.2/7.4/3.9/1.5	87.3/6.8/4.3/1.5
	炉心平均出力密度 (W/cc)	84.8/7.6/5.7/1.9	84.3/9.3/4.5/1.9	84.5/8.7/4.9/1.9	84.6/8.2/5.3/1.9
	装荷時重金属インベントリ (t)	89.3	88.7	88.9	89.1
	炉心/軸ブラ/径ブラ				
	ブランケット対炉心重量比	56.2/35.8/21.8	56.2/35.8/21.8	56.2/35.8/21.8	56.2/35.8/21.8
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	約1.0	約1.0	約1.0	約1.0
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	7.0	7.0	7.0	7.0

*1 燃焼ミスマッチファクタ考慮した2次元RZ計算結果

表 2.5-1(1) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 80cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	15.18	15.01	14.82	14.68	14.63	14.44	14.23
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	16.70	16.51	16.31	16.15	16.10	15.88	15.65
冷却管ピッチ	(mm)	31.32	30.10	28.89	28.00	27.71	26.55	25.41
フラッパ―管内対面距離	(mm)	244.1	234.6	225.2	218.2	216.0	207.0	198.0
フラッパ―管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	254.1	244.6	235.2	228.2	226.0	217.0	208.0
有効発熱長	(mm)	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0
冷却管長さ	(mm)	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0
平均発熱密度	(W/cc)	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	589	636	687	730	745	808	879
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	6.5	6.9	7.2	7.5	7.6	8.1	8.5
流路面積割合	(%)	19.7	20.8	22.0	22.9	23.2	24.5	25.9
実効燃料体積比	(%)	20.82	20.33	19.81	19.39	19.26	18.67	18.05
水力等価直径	(mm)	15.2	15.0	14.8	14.7	14.6	14.4	14.2
定格時炉心圧力損失	(MPa)	3.45E-02	3.15E-02	2.88E-02	2.69E-02	2.63E-02	2.40E-02	2.20E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	6.56E-05	6.60E-05	6.64E-05	6.68E-05	6.69E-05	6.73E-05	6.78E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1262	1285	1307	1323	1328	1349	1369
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2204	2204	2204	2204	2204	2203
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1064	1059	1054	1050	1049	1044	1039
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1238	1216	1196	1181	1177	1159	1142
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	69.0	65.4	62.0	59.5	58.7	55.6	52.6
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	9401	8951	8526	8218	8123	7738	7371
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1761	1650	1545	1469	1445	1351	1260
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-1(2) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 90cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	15.73	15.56	15.38	15.24	15.19	14.99	14.79
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	17.30	17.11	16.92	16.76	16.71	16.49	16.27
冷却管ピッチ	(mm)	33.59	32.31	31.07	30.14	29.85	28.64	27.46
フラッバー管内対面距離	(mm)	261.8	251.9	242.2	234.9	232.6	223.3	214.0
フラッバー管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	271.8	261.9	252.2	244.9	242.6	233.3	224.0
有効発熱長	(mm)	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0
冷却管長さ	(mm)	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
平均発熱密度	(W/cc)	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	515	555	598	634	646	699	758
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	6.1	6.4	6.8	7.1	7.1	7.5	7.9
流路面積割合	(%)	18.5	19.5	20.6	21.4	21.7	22.9	24.1
実効燃料体積比	(%)	21.41	20.96	20.49	20.11	19.99	19.46	18.90
水力等価直径	(mm)	15.7	15.6	15.4	15.2	15.2	15.0	14.8
定格時炉心圧力損失	(MPa)	3.99E-02	3.65E-02	3.34E-02	3.12E-02	3.06E-02	2.80E-02	2.57E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	6.45E-05	6.50E-05	6.54E-05	6.58E-05	6.59E-05	6.63E-05	6.68E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1246	1268	1290	1307	1312	1333	1353
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2204	2204	2204	2204	2204	2203
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1053	1048	1043	1040	1039	1034	1029
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1233	1212	1191	1177	1173	1155	1138
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	73.5	69.7	66.2	63.6	62.8	59.6	56.5
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	9868	9405	8967	8651	8552	8157	7780
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1728	1622	1522	1449	1426	1336	1249
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-1(3) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 100cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 250℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	16.26	16.09	15.91	15.77	15.73	15.53	15.33
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	17.88	17.70	17.50	17.35	17.30	17.08	16.86
冷却管ピッチ	(mm)	35.71	34.39	33.10	32.14	31.84	30.60	29.37
ラッパ―管内対面距離	(mm)	278.3	268.0	258.0	250.5	248.1	238.5	228.9
ラッパ―管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	288.3	278.0	268.0	260.5	258.1	248.5	238.9
有効発熱長	(mm)	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
冷却管長さ	(mm)	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0
平均発熱密度	(W/cc)	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	457	492	529	560	571	616	666
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	5.8	6.1	6.4	6.7	6.8	7.1	7.5
流路面積割合	(%)	17.6	18.5	19.5	20.3	20.5	21.6	22.8
実効燃料体積比	(%)	21.88	21.46	21.02	20.67	20.56	20.07	19.55
水力等価直径	(mm)	16.3	16.1	15.9	15.8	15.7	15.5	15.3
定格時炉心圧力損失	(MPa)	4.50E-02	4.12E-02	3.78E-02	3.54E-02	3.46E-02	3.18E-02	2.92E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	6.36E-05	6.40E-05	6.45E-05	6.48E-05	6.49E-05	6.54E-05	6.59E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1232	1255	1277	1293	1298	1319	1339
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2205	2204	2204	2204	2204	2204
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1043	1039	1034	1031	1030	1026	1021
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1229	1208	1188	1174	1169	1152	1135
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	77.4	73.5	69.8	67.2	66.3	63.0	59.8
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	10248	9774	9327	9004	8903	8500	8115
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1693	1591	1495	1425	1403	1317	1234
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-1(4) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 80cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	14.27	14.12	13.97	13.84	13.80	13.63	13.45
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	15.70	15.54	15.36	15.23	15.18	14.99	14.79
冷却管ピッチ	(mm)	31.17	29.99	28.84	27.98	27.70	26.59	25.49
ラッパ－管内対面距離	(mm)	243.0	233.8	224.8	218.0	215.9	207.2	198.7
ラッパ－管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	253.0	243.8	234.8	228.0	225.9	217.2	208.7
有効発熱長	(mm)	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0	800.0
冷却管長さ	(mm)	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0	1400.0
平均発熱密度	(W/cc)	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1	91.1
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	594	640	690	731	745	806	873
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	5.8	6.1	6.4	6.7	6.8	7.2	7.6
流路面積割合	(%)	17.6	18.6	19.6	20.4	20.6	21.8	23.0
実効燃料体積比	(%)	21.59	21.15	20.68	20.32	20.20	19.68	19.13
水力等価直径	(mm)	14.3	14.1	14.0	13.8	13.8	13.6	13.4
定格時炉心圧力損失	(MPa)	4.72E-02	4.31E-02	3.94E-02	3.69E-02	3.61E-02	3.30E-02	3.03E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	7.63E-05	7.67E-05	7.72E-05	7.75E-05	7.77E-05	7.81E-05	7.86E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1240	1262	1284	1301	1306	1327	1347
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2205	2204	2204	2204	2204	2204
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1048	1043	1039	1036	1034	1030	1025
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1232	1211	1190	1176	1172	1154	1137
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	77.3	73.3	69.5	66.8	66.0	62.5	59.3
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	10811	10299	9816	9467	9359	8923	8508
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1855	1741	1633	1555	1531	1434	1341
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-1(5) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 90cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	14.81	14.66	14.51	14.38	14.34	14.17	13.99
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	16.29	16.13	15.96	15.82	15.78	15.59	15.39
冷却管ピッチ	(mm)	33.38	32.15	30.95	30.06	29.77	28.62	27.48
フラッパ－管内対面距離	(mm)	260.2	250.6	241.2	234.3	232.1	223.1	214.2
フラッパ－管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	270.2	260.6	251.2	244.3	242.1	233.1	224.2
有効発熱長	(mm)	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0	900.0
冷却管長さ	(mm)	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
平均発熱密度	(W/cc)	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	521	560	602	637	649	700	757
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	5.5	5.8	6.1	6.3	6.4	6.7	7.1
流路面積割合	(%)	16.6	17.5	18.4	19.2	19.4	20.5	21.5
実効燃料体積比	(%)	22.10	21.69	21.27	20.93	20.82	20.35	19.84
水力等価直径	(mm)	14.8	14.7	14.5	14.4	14.3	14.2	14.0
定格時炉心圧力損失	(MPa)	5.39E-02	4.93E-02	4.51E-02	4.22E-02	4.14E-02	3.79E-02	3.48E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	7.51E-05	7.56E-05	7.61E-05	7.65E-05	7.66E-05	7.71E-05	7.76E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1225	1247	1269	1286	1291	1312	1332
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2205	2204	2204	2204	2204	2204
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1038	1033	1029	1026	1025	1021	1017
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1228	1206	1187	1172	1168	1150	1134
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	81.9	77.8	73.8	71.0	70.1	66.6	63.2
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	11277	10752	10256	9898	9787	9341	8916
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1813	1704	1601	1527	1503	1411	1322
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-1(6) 成立限界サーベイにおける主要目
(炉心径固定条件、炉心高さ 100cm、自然循環時冷却材炉心入口温度 200℃)

主要目	単位	P=1.30	P=1.35	P=1.40	P=1.4379	P=1.45	P=1.50	P=1.55
燃料粒子径	(mm)	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862	0.862
被覆粒子径	(mm)	1	1	1	1	1	1	1
燃料粒子充填率	(%)	50	50	50	50	50	50	50
冷却管内径	(mm)	15.33	15.18	15.03	14.90	14.86	14.69	14.51
燃料核理論密度比	(%)	95	95	95	95	95	95	95
冷却管外径	(mm)	16.86	16.70	16.53	16.39	16.35	16.16	15.96
冷却管ピッチ	(mm)	35.45	34.18	32.93	32.01	31.71	30.52	29.34
フラッパ―管内対面距離	(mm)	276.3	266.4	256.7	249.5	247.2	237.8	228.7
フラッパ―管肉厚	(mm)	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
集合体ピッチ	(mm)	286.3	276.4	266.7	259.5	257.2	247.8	238.7
有効発熱長	(mm)	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0	1000.0
冷却管長さ	(mm)	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0	1600.0
平均発熱密度	(W/cc)	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9	72.9
径方向ピーキング係数	-	1.30	1.35	1.40	1.44	1.45	1.50	1.55
冷却流路数	(本)	61	61	61	61	61	61	61
燃料集合体数	(体)	464	498	535	565	575	619	668
炉心熱出力	(MW)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400
全炉心流路面積	(m ²)	5.2	5.5	5.8	6.0	6.1	6.4	6.7
流路面積割合	(%)	15.9	16.7	17.6	18.2	18.5	19.4	20.5
実効燃料体積比	(%)	22.50	22.12	21.73	21.41	21.31	20.87	20.40
水力等価直径	(mm)	15.3	15.2	15.0	14.9	14.9	14.7	14.5
定格時炉心圧力損失	(MPa)	6.02E-02	5.51E-02	5.05E-02	4.73E-02	4.63E-02	4.25E-02	3.91E-02
自然循環 1.6%出力時圧力損失	(MPa)	7.41E-05	7.46E-05	7.51E-05	7.55E-05	7.56E-05	7.61E-05	7.67E-05
定格時冷却管最高温度	(℃)	1213	1235	1257	1273	1279	1300	1320
定格時燃料最高温度	(℃)	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600
自然循環時推定燃料最高温度	(℃)	2205	2205	2205	2204	2204	2204	2204
定格時ノミナル冷却管温度	(℃)	1029	1025	1021	1018	1017	1013	1009
定格時ノミナル燃料温度	(℃)	1224	1203	1183	1169	1165	1147	1131
ノミナルチャネル冷却材流速	(m/s)	85.9	81.6	77.5	74.6	73.7	70.0	66.6
ノミナルチャネル熱伝達率	(W/m ² /K)	11650	11114	10609	10244	10131	9677	9244
冷却管内面熱流束	(kW/m ²)	1770	1666	1567	1496	1474	1385	1300
等価炉心径	(m)	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79	6.79

表 2.5-2 成立限界サーベイにおける変数、設定値及び制限条件

[illegible]

表 2.5-3 成立限界サーベイにおける感度評価

パラメータ	パラメータ 変更割合	実効燃料体積比 変化割合	実効燃料体積比1.0%増加 に対するパラメータの変更量
径方向ピーキング係数	0.1	-1.00%	-0.10
炉心高さ	-10cm	-0.64%	15.6cm
自然循環時冷却材炉心入口温度	-50℃	0.82%	-61.0℃

注：
実効燃料体積比の変化割合は径方向ピーキング係数1.44、炉心高さ90cm、自然循環時冷却材入口温度250℃を基準として算出した
また、実効燃料体積比1.0%増加に対するパラメータの変更割合は表に記載されているパラメータ変更割合と実効燃料体積比変化割合から比例配分で算出した

表2.5-4(1) 核特性サーベイ結果 (炉心高さ80cm)

項 目		冷却管径 -10%	基準冷却管仕様	冷却管径 +10%
基本条 件	原子炉熱出力	→	2,400MWt	←
	電気出力	→	1,124MWe	←
・炉心 構成	炉心形式	→	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	→	18.2ヵ月 (554日)	16.8ヵ月 (511日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	→	6 / 6 バッチ	←
	炉心高さ	→	80 cm	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	→	492(264/228)体	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	→	174体 (2層)	←
	制御棒本数	→	49体	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	→	198体 (2層)	←
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	→	30/30cm	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	23.2/13.0/44.5/19.2% 29.6/ 6.7/44.5/19.2% →	21.8/12.2/43.1/23.0% 27.7/ 6.3/43.1/23.0% 5.94m / 8.28m	20.2/11.3/41.4/27.1% 25.6/ 5.8/41.4/27.1% ←
主要炉心 特性	炉心等価直径 / 遮へい体外径 Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	23.8 / 26.5	24.6 / 27.6	25.5 / 29.0
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	122.8/21.4/2.5	122.1/21.7/2.7	121.1/21.9/3.0
	炉心/軸ブラ/径ブラ	52.4	52.4	52.2
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	1.58	1.63	1.67
	燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	1.161	1.147	1.130
	増殖比	0.648/0.431/0.082 156 / 154	0.627/0.433/0.087 153 / 153	0.603/0.435/0.093 150 / 152
	炉心/軸ブラ/径ブラ	平衡平均		
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	86.0/12.8/1.2	85.7/13.0/1.4	85.3/13.2/1.5
	出力分担率(%)	82.7/15.8/1.5	82.4/16.0/1.6	82.0/16.2/1.8
	炉心/軸ブラ/径ブラ	平衡初期 平衡末期		
	装荷時重金属インベントリ (t)	58.6/57.0/47.0	54.9/53.4/44.1	50.8/49.5/40.8
	炉心/軸ブラ/径ブラ	約1.8 8.0 0.23	約1.8 7.8 0.29	約1.8 7.5 0.35
	ブランケット対炉心重量比			
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)			
	減圧反応度 (\$) *2			
	ドップラ係数 (-1×10 ⁻³ Tdk/dT) *3			
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	9.6/2.5/2.0/0.2	9.4/2.6/2.1/0.3	9.2/2.8/2.2/0.3
	炉心/径方向ピーキング係数 *4	1.307[1.203] 1.349[1.245]	1.310[1.188] 1.332[1.226]	1.313[1.176] 1.318[1.208]
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ	1.084	1.089	1.093
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ	1.080	1.084	1.088

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。
 *2 制御棒領域 (フォロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、 $\beta=0.002951$ (H15検討値；原電殿提示)。
 *3 燃料物質の温度を500°C昇温。
 *4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。
 燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.5-4(2) 核特性サーベイ結果 (炉心高さ90cm)

項 目		冷却管径 -10%	基準冷却管仕様 (H15年度仕様)	冷却管径 +10%	← (富化度比調整前:参考)
基本 条件 ・ 炉心 構成	原子炉熱出力	→	2,400MWt	←	←
	電氣出力	→	1,124MWe	←	←
	炉心形式	→	均質2領域炉心	←	←
	運転サイクル長さ	→	19.7ヵ月 (599日)	←	←
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	→	6 / 6 バッチ	18.1ヵ月 (552日)	←
	炉心高さ	→	90 cm	←	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	→	492 (264/228) 体	←	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	→	174体 (2層)	←	←
	制御棒本数	→	49体	←	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	→	198体 (2層)	←	←
主要炉心特性	軸方向ブランケット厚 (上/下)	→	30/30cm	←	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	22.8/12.8/44.0/20.3%	21.3/11.9/42.4/24.3%	19.6/11.0/40.7/28.8%	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	29.0/ 6.6/44.0/20.3%	27.1/ 6.1/42.4/24.3%	24.9/ 5.6/40.7/28.8%	←
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	→	5.94m / 8.28m	←	←
	Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	22.8 / 25.6	23.6 / 26.6	24.6 / 28.0	24.7 / 27.8
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	122.5/21.6/2.7	121.7/22.0/2.9	121.3/22.5/3.2	121.3/22.6/3.1
	炉心/軸ブラ/径ブラ	54.4	54.3	54.5	54.5
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	1.55	1.61	1.68	1.69
	燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	1.154	1.139	1.120	1.118
	増殖比	0.679/0.390/0.084	0.657/0.394/0.088	0.630/0.395/0.094	0.630/0.396/0.092
主要炉心特性	炉心/軸ブラ/径ブラ	138 / 139	138 / 137	136 / 135	140 / 133
	最大出力密度 ^{*1} (W/cc) (内側/外側)	87.1/11.6/1.3	86.7/11.9/1.4	86.2/12.2/1.6	86.2/12.3/1.5
	出力分担率(%)	84.0/14.5/1.6	83.6/14.7/1.7	83.1/15.0/1.9	83.1/15.0/1.8
	炉心/軸ブラ/径ブラ	64.8/56.0/49.5	60.4/52.2/46.2	55.5/48.0/42.4	55.5/48.0/42.4
	装荷時重金属インベントリ (t)	約1.6	約1.6	約1.6	約1.6
	炉心/軸ブラ/径ブラ	8.5	8.2	7.9	7.9
	ブランケット対炉心重量比	0.26	0.32	0.39	-
	初装荷移分裂性Pu重量 (t/GWe)	10.2/2.2/1.8/0.2	10.0/2.4/1.9/0.3	9.8/2.6/2.0/0.3	-
	減圧反応度 (\$) ^{*2}	1.300 [1.187]	1.297 [1.197]	1.303 [1.194]	1.341 [-]
	ドップラ係数 (-1×10 ⁻³ Tdk/dT) ^{*3}	1.320 [1.229]	1.333 [1.233]	1.323 [1.218]	1.297 [-]
主要炉心特性	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	1.077	1.082	1.088	-
	炉心径径方向ビーキング係数 ^{*4}	1.073	1.078	1.083	-
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ				
	燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし [-] 内は未考慮時の値。				

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。
*2 制御棒領域 (フロアロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、β=0.002951 (H15検討値；原電殿提示)。
*3 燃料物質の温度を500℃昇温。
*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。
燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし [-] 内は未考慮時の値。

表2.5-4(3) 核特性サーベイ結果 (炉心高さ100cm)

項 目		冷却管径 -10%	基準冷却管仕様	冷却管径 +10%
基本条 件・炉 心構 成	原子炉熱出力	→	2,400MWt	←
	電気出力	→	1,124MWe	←
主要炉 心特 性	炉心形式	→	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	22.8ヵ月 (692日)	21.1ヵ月 (643日)	19.5ヵ月 (592日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	→	6 / 6 バッチ	←
	炉心高さ	→	100 cm	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	→	492(264/228)体	←
	径方向ブラケット燃料集合体数	→	174体 (2層)	←
	制御棒本数	→	49体	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	→	198体 (2層)	←
	軸方向ブラケット厚 (上/下)	→	30/30cm	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	22.4/12.6/43.5/21.5%	20.8/11.7/41.8/25.8%	19.0/10.6/39.9/30.5%
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	28.5/ 6.5/43.5/21.5%	26.4/ 6.0/41.8/25.8%	24.1/ 5.5/39.9/30.5%
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	→	5.94m / 8.28m	←
主要炉 心特 性	Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	22.0 / 24.8	22.9 / 25.8	23.9 / 27.3
	炉心取出平均燃焼度 (GWD/t)	122.0/21.7/2.8	121.7/22.4/3.1	122.1/23.2/3.5
	炉心/軸ブラ/径ブラ	56.1	56.3	56.8
	ブラケット込み全炉心平均燃焼度	1.51	1.60	1.70
	燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')	1.147	1.131	1.110
	増殖比	0.706/0.357/0.084	0.681/0.360/0.090	0.652/0.362/0.097
	炉心/軸ブラ/径ブラ	125 / 125	126 / 123	124 / 122
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	88.0/10.7/1.3	87.5/11.0/1.5	87.0/11.3/1.6
	出力分担率 (%)	85.1/13.3/1.6	84.6/13.6/1.8	84.1/13.9/2.0
	炉心/軸ブラ/径ブラ	70.7/55.0/51.9	65.5/51.0/48.1	57.9/46.5/43.9
	装荷時重金属インベントリ (t)	約1.5	約1.5	約1.5
	炉心/軸ブラ/径ブラ	9.0	8.6	8.3
主要炉 心特 性	ブラケット対炉心重量比	0.28	0.35	0.43
	初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	10.8/2.0/1.6/0.2	10.6/2.2/1.7/0.3	10.4/2.3/1.8/0.3
	減圧反応度 (\$) *2	1.276[1.192]	1.295[1.203]	1.298[1.196]
	ドップラ係数 ($-1 \times 10^{-3} Tdk/dT$) *3	1.324[1.240]	1.326[1.234]	1.320[1.220]
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	1.070	1.076	1.084
	炉心部径方向ピーキング係数 *4	1.067	1.073	1.080
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ			
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ			
	炉心部径方向ピーキング係数 *4			
	炉心部平均燃焼ミスマッチファクタ			
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ			
	炉心部径方向ピーキング係数 *4			

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。

*2 制御棒領域 (フォロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、 $\beta = 0.002951$ (H15検討値; 原電殿提示)。

*3 燃料物質の温度を500°C昇温。

*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。

燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.5-5 核特性サーベイ結果の比較

項 目	炉心高さ、冷却管径をパラメータとした計算									
	80cm炉心			90cm炉心			100cm炉心			
	冷却管径 -10% [A]	基準仕様 [B]	冷却管径 +10% [C]	冷却管径 -10% [D]	基準仕様 [E] (H15仕様)	冷却管径 +10% [F]	冷却管径 -10% [G]	基準仕様 [H]	冷却管径 +10% [I]	
基本 条件	原子炉熱出力	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	電気出力	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	炉心形式	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	運転サイクル長さ	19.5ヵ月	18.2ヵ月	16.8ヵ月	21.2ヵ月	18.1ヵ月	22.8ヵ月	21.1ヵ月	19.5ヵ月	
	燃料交換バッチ数	6 バッチ	←	←	←	←	←	←	←	
	炉心高さ	80 cm	←	←	90 cm	←	100 cm	←	←	
	炉心燃料集合体数(IC/OC)	264/228体	←	←	←	←	←	←	←	
	径プラ体数	174体	←	←	←	←	←	←	←	
	制御棒本数	49体	←	←	←	←	←	←	←	
	軸プラ厚(上/下)	30/30cm	←	←	←	←	←	←	←	
	冷却管内/外径	13.05/14.4mm	14.5/16.0mm	15.95/17.6mm	13.5/14.85mm	15.0/16.5mm	16.5/18.15mm	13.95/15.3mm	15.5/17.0mm	17.05/18.7mm
	外側炉心最外層 炉心等面直径	同上	←	←	←	←	←	←	←	←
主 要 炉 心 特 性	遮へい体外接円径	8.28m	←	←	←	←	←	←	←	←
	Pe富化度[Pa/HU] (wt%) (IC/OC)	23.8/26.5	24.6/27.6	25.5/29.0	22.8/25.6	23.6/26.6	24.6/28.0	22.0/24.8	22.9/25.8	23.9/27.3
	取出平均燃焼度 (GWd/t)	122.8/52.4	122.1/52.4	121.1/52.2	122.5/54.4	121.7/54.3	121.3/54.5	122.0/56.1	121.7/56.3	122.1/56.8
	炉心/全炉心平均	1.58	1.63	1.67	1.55	1.61	1.68	1.51	1.60	1.70
	燃焼欠損反応度(%Δk/kk')	1.161	1.147	1.130	1.154	1.139	1.120	1.147	1.131	1.110
	増殖比	156 / 154	153 / 153	150 / 152	138 / 139	138 / 137	136 / 135	125 / 125	126 / 123	124 / 122
	最大出力密度 ^{*1} (W/cc) (IC/OC)	0.23	0.29	0.35	0.26	0.32	0.39	0.28	0.35	0.43
	減圧反応度(\$) ^{*2}	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	炉心部ドップラ係数	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	(-1×10 ⁻³ Tdk/dT) ^{*3}	←	←	←	←	←	←	←	←	←
	炉心部径方向ビーキング係数 ^{*4} BOEC/EOEC	1.307/1.349	1.310/1.332	1.313/1.318	1.300/1.320	1.297/1.333	1.303/1.323	1.276/1.324	1.295/1.326	1.298/1.320
	炉心部平均燃焼ミスマッチ ^{*4} BOEC/EOEC	1.084/1.080	1.089/1.084	1.093/1.088	1.077/1.073	1.082/1.078	1.088/1.083	1.070/1.067	1.076/1.073	1.084/1.080

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。

*2 制御棒領域 (フォロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、β=0.002951 (H15検討値；原電殿提示)。

*3 燃料物質の温度を500℃昇温。

*4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力の最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。

燃焼ミスマッチファクタ考慮、ただし[]内は未考慮時の値。

表2.5-6 初装荷核分裂性Pu重量削減炉心の特長

項 目		H15年度仕様炉心 〔入口温度250℃相当 ギャップ改善未考慮 出力密度81.0W/cc想定〕	燃料物量削減炉心 〔入口温度200℃相当 ギャップ改善考慮 出力密度92.7W/cc想定〕
基本 条件 ・ 炉 心 構 成	原子炉熱出力	2,400MWt	←
	電気出力	1,124MWe	←
	炉心形式	均質2領域炉心	←
	運転サイクル長さ	19.7ヵ月 (599日)	18ヵ月 (548日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ	←
	炉心高さ	90 cm	←
	炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心)	492(264/228)体	432(234/198)体
	径方向ブランケット燃料集合体数	174体 (2層)	←
	制御棒本数	49体	43体
	径方向遮へい体数 (SiC)	198体 (2層)	←
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	30/30cm	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材) 炉心	21.3/11.9/42.4/24.3%	←
	ブランケット	27.1/ 6.1/42.4/24.3%	←
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	5.94m / 8.28m	5.56m / 7.63m
主要 炉 心 特 性	Pu富化度[Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	23.6 / 26.6	23.5 / 27.5
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ	121.7/22.0/2.9	126.3/23.0/3.1
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	54.3	54.4
	燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/k'$)	1.61	1.65
	増殖比 平衡平均	1.139	1.145
	炉心/軸ブラ/径ブラ	0.657/0.394/0.088	0.650/0.390/0.106
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	138 / 137	150 / 149
	出力分担率(%)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ 平衡初期	86.7/11.9/1.4	86.4/12.0/1.6
	平衡末期	83.6/14.7/1.7	83.2/14.8/2.0
	炉心平均出力密度 (W/cc) 平衡平均	81.9	93.2
	装荷時重金属インベントリ (t)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ	60.4/52.2/46.2	53.0/45.9/46.2
	ブランケット対炉心重量比	約1.6	約1.7
	初装荷核分裂性Pu重量(t/GWe)	8.2	7.3

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)

表2.5-7 実効燃焼度向上炉心特性

項 目		基準
基本条 件	原子炉熱出力 電気出力 炉心形式 運転サイクル長さ 燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ) 炉心高さ 炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心) 径方向ブラケット燃料集合体数 制御棒本数 径方向遮へい体数 (SiC) 軸方向ブラケット厚 (上/下) 体積比 (燃料/被覆材/構造物/冷却材)	2,400MWt 1,124MWe 均質2領域炉心 18.3ヵ月 (558日) 7 / 7 バッチ 100 cm 468(264/204)体 174体 (2層) 43体 198体 (2層) 30/30cm 21.1/11.9/42.2/24.8% 26.9/ 6.1/42.2/24.8% 5.90m / 8.06m 22.5 / 25.5
主要炉心特性	Pu富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側) 炉心取出平均燃焼度 (GWD/t) 炉心/軸ブラ/径ブラ ブラケット込み全炉心平均燃焼度 燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/k'$) 増殖比 炉心/軸ブラ [上/下]/径ブラ 最大出力密度 ^{*1} (W/cc) (内側/外側) 出力分担率 (%) 炉心/軸ブラ/径ブラ 装荷時重金属インベントリ (t) 炉心/軸ブラ/径ブラ ブラケット対炉心重量比 初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe) 減圧反応度 (\$) ^{*2} ドップブラ係数 ($\times 10^{-3} Tdk/dT$) ^{*3} 炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ 炉心部径方向ピーキング係数 ^{*4}	122.0/21.8/3.2 55.5 1.32 1.143 0.692/0.355[0.166/0.188]/0.097 122 / 120 87.5/10.9/1.6 85.0/13.1/1.9 66.3/51.6/51.2 約1.6 8.6 0.33 10.8/2.1/1.7/0.3 1.29[平衡末期]

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)。
 *2 制御棒領域 (フォロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、 $\beta = 0.002951$ (H15検討値; 原電殿提示)。
 *3 燃料物質の温度を500°C昇温。
 *4 2次元RZ計算値、メッシュ軸方向積分出力最大値[W/cm2]/平均値[W/cm2]。炉心部のみで算出。
 燃焼ミスマッチファクタ考慮。

表2.5-8 炉心等価直径削減炉心／実効燃焼度向上・Pu質量削減炉心の特性

項 目		炉心等価直径削減炉心	燃焼度向上・Pu 削減炉心
基本 条件	原子炉熱出力	←	←
	電気出力	←	←
・ 炉 心 構 成	炉心形式	←	←
	運転サイクル長さ	19.9ヵ月 (605日)	18ヵ月 (548日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	5 / 5 バッチ	6 / 6 バッチ
	炉心高さ	←	←
	炉心燃料集合体数 (内側炉心/外側炉心)	372 (198/174) 体	384 (210/174) 体
	径方向ブラケット燃料集合体数	←	162 体 (2層)
	制御棒本数	←	37 体
	径方向遮へい体数 (SiC)	←	188 体 (2層)
	軸方向ブラケット厚 (上/下)	←	←
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	20.9/11.7/42.0/25.4%	21.3/11.9/42.3/24.4%
主要 炉 心 特 性	炉心等価直径 / 遮へい体外径	26.6/ 6.0/42.0/25.4%	27.1/ 6.1/42.3/24.4%
	Pu 富化度 [Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	5.25m / 7.43m	5.41m / 7.55m
	炉心取出平均燃焼度 (GWD/t)	22.7 / 26.5	22.2 / 26.2
	炉心/軸ブラ/径ブラ	121.5/21.3/3.3	121.9/21.0/3.6
	ブラケット込み全炉心平均燃焼度	52.6	53.3
	燃焼欠損反応度 (%Δk/kk*)	1.83	1.49
	増殖比	1.148	1.155
	炉心/軸ブラ/径ブラ	0.679/0.352/0.116	0.689/0.349/0.117
	最大出力密度*1 (W/cc) (内側/外側)	155 / 155	142 / 141
	出力分担率 (%)	87.8/10.3/1.9	87.6/10.3/2.0
初装荷核分裂性Pu重量 (t/GWe)	炉心/軸ブラ/径ブラ	84.4/13.3/2.4	84.8/12.8/2.2
	炉心平均出力密度 (W/cc)	95.5	90.0
	装荷時重金属インベントリ (t)	51.5/40.1/46.5	55.8/43.4/48.9
	ブラケット対炉心重量比	約1.7	約1.7
*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)		6.9	7.3

*1 2次元RZ計算結果 (燃焼ミスマッチファクタ考慮)

表2.5-9 特性向上炉心の比較

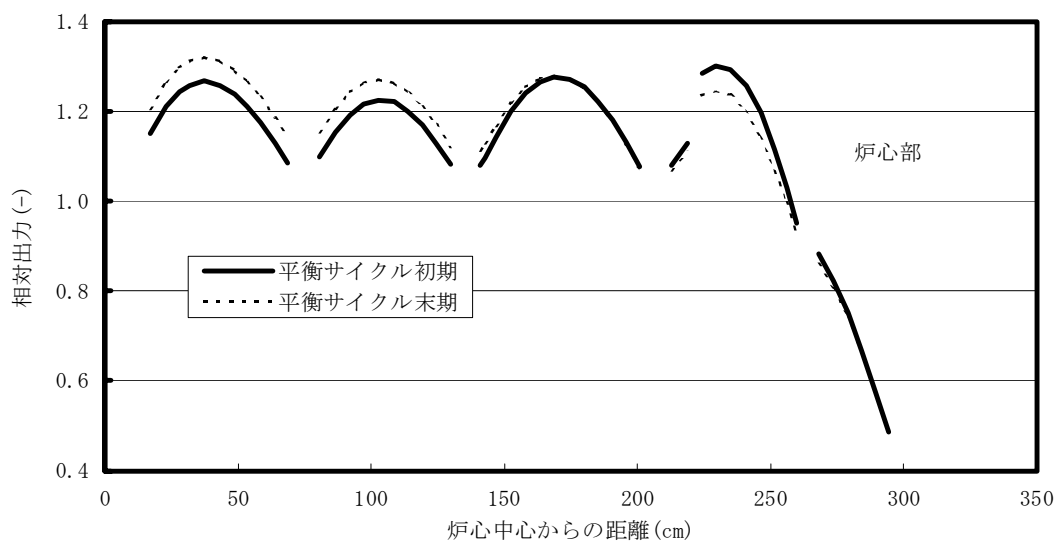
項目	単位	H15年度 基準炉心相当	核分裂性Pu 削減炉心	実効燃焼度 向上炉心	燃焼度向上・核分裂 性Pu削減炉心	等価直径 低減炉心
原子炉熱出力	MWth	2400	2400	2400	2400	2400
冷却材入口温度	°C	250	200	200	200	200
径方向出力ピーキング	—	1.44	1.50	1.50	1.50	1.50
平均発熱密度	W/cc	81.0	92.7	72.9	88.5	91.0
実効燃料体積比	%	19.90	19.90	20.87	20.21	19.84
炉心高さ	m	0.90	0.90	1.00	1.00	1.00
炉心等価直径	m	5.94	5.56	5.90	5.41	<u>5.25</u>
軸ブランクセット高さ(上/下部)	m	0.30/0.30	0.30/0.30	0.30/0.30	0.30/0.30	0.30/0.30
径方向ブランクセット	層	2	2	2	2	2
燃料集合体数	体	492	432	468	384	372
運転サイクル長さ	日	599	548	577	548	605
燃料交換バッチ数	バッチ	6	6	7	6	5
炉心部平均燃焼度	GWd/t	121.7	<u>126.3</u>	122.3	121.9	121.5
実効平均燃焼度	GWd/t	54.3	54.4	55.5	53.3	52.6
燃焼反応度	%Δk/k'	1.61	1.65	1.26	1.49	1.83
増殖比	—	1.139	1.146	1.155	1.155	1.149
炉心部平均発熱密度 [出力分担率考慮]	W/cc	81.9	93.2	75.7	90.0	95.5
初装荷核分裂性Pu重量	ton/GWe	8.2	<u>7.3</u>	8.6	<u>7.3</u>	6.9
実効平均燃焼度 [増殖比=1.139の場合の推定値]	GWd/t	[54.3]	[55.2]	<u>[58.3]</u>	<u>[55.7]</u>	[53.7]

表2.5-10 選定された炉心構成「燃焼度向上・Pu削減炉心」のAWS解析結果

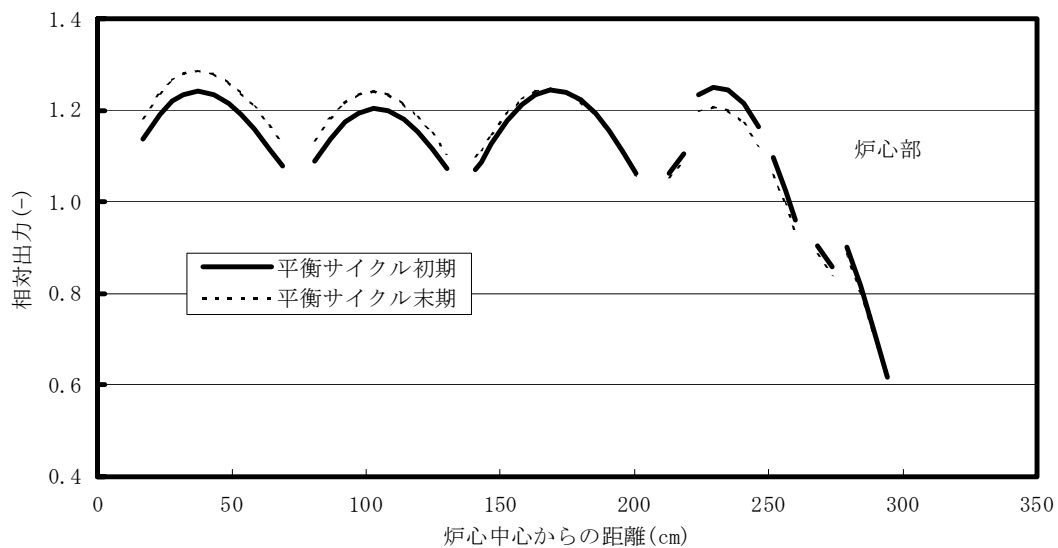
項目		単位	基準炉心
定格時	燃料最高温度	(°C)	1527
	冷却管最高温度	(°C)	1277
	ホットチャネル 流量増加率	-	13.7%
一次ピーク時	燃料最高温度	(°C)	1947
	冷却管最高温度	(°C)	1931
	到達時刻	(秒)	114
冷却管最高温度2200°C到達時刻		(秒)	8712
2次ピーク時	燃料最高温度	(°C)	2204
	冷却管最高温度	(°C)	2201
	到達時刻	(秒)	8891
36000秒 到達時	冷却管最高温度	(°C)	2159
	出力レベル	(%)	1.333
	炉心入口温度	(°C)	159
核特性 (解析使用値)	全遅発中性子割合 β	-	3.295E-03
	減圧反応度 (不確定性マージン10 ϕ 付加)	(%)	0.29
	ドップラ係数 ($\times 10^{-3}$) 径方向ピーキング係数	(Talk/dT)	10.7/2.0/1.6/0.5 1.5

表2.6-1 崩壊熱テーブル

時間 (sec)	崩壊熱相対値 (%)	評価幅 (%)
0	0.059	+10 -15
1	0.059	
2	0.056	
4	0.052	
6	0.05	
10	0.047	
20	0.043	
40	0.038	
60	0.036	
100	0.033	
200	0.029	
400	0.026	
600	0.024	
1000	0.022	
2000	0.018	
4000	0.015	
6000	0.013	
10000	0.012	
20000	0.0099	
40000	0.0084	
60000	0.0075	



(a) 径方向2領域炉心

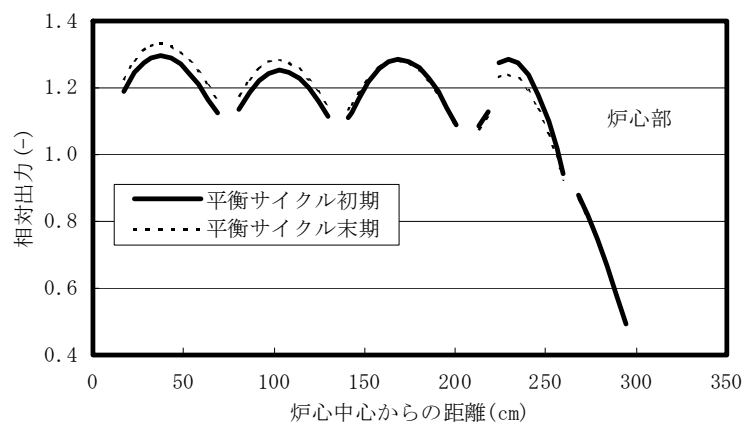


(b) Pu富化度による径方向3領域炉心

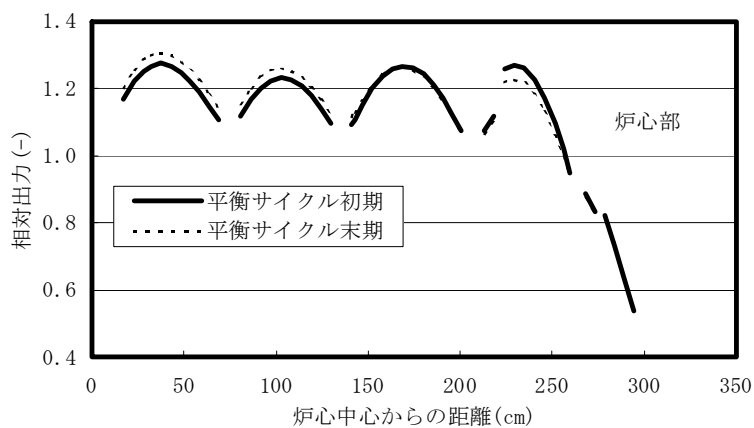
[注記]

- ・ 相対出力はメッシュ軸方向積分出力[W/cm²]を平均値で割った値。
炉心部のみで算出。
- ・ 燃焼ミスマッチファクタ考慮。

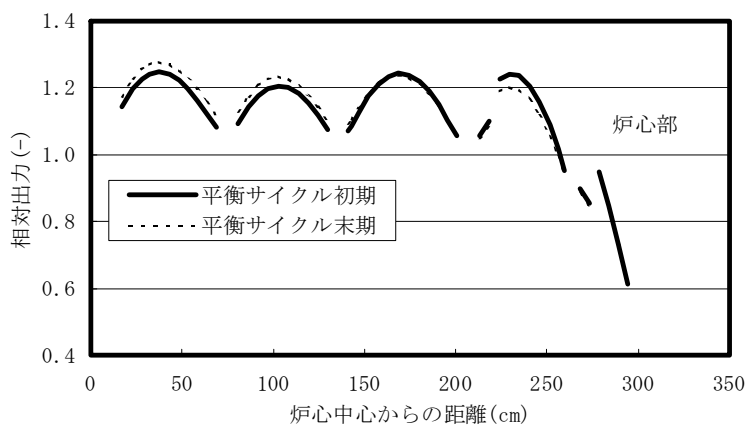
図2.4 - 1 Pu富化度 3 領域炉心の径方向出力分布
(炉心燃料集合体数492体、炉心高さ90cm)



(a) 基準冷却管仕様



(b) 外側炉心最外層 冷却管径 -10%



(c) 外側炉心最外層 冷却管径 -30%

図2.4 - 2 冷却管細径化3領域炉心の径方向出力分布
(炉心燃料集合体数492体、炉心高さ90cm)

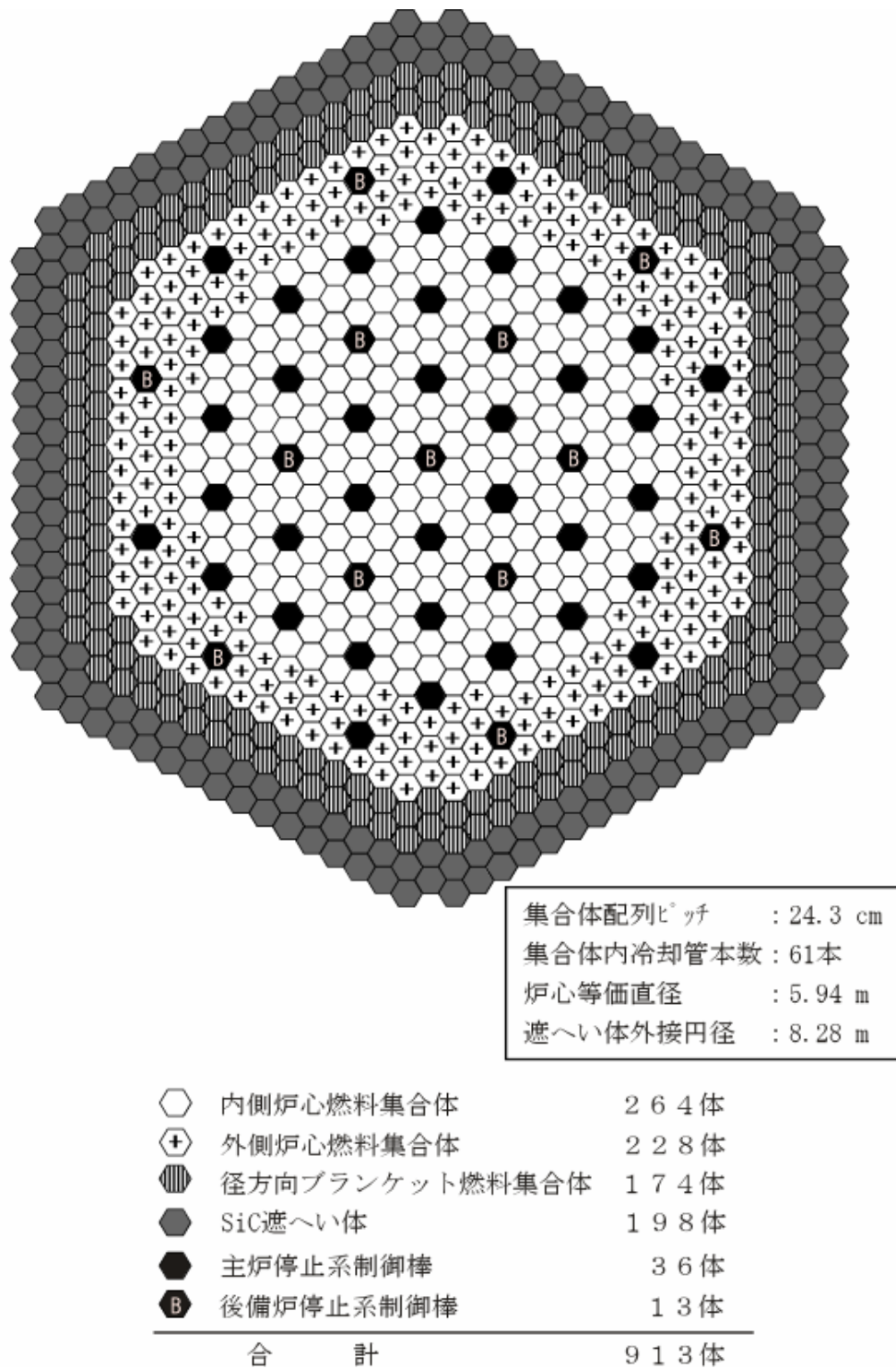


図2.4 - 3 制御棒49本配置型炉心構成図
(H15年度導入期基準炉心)

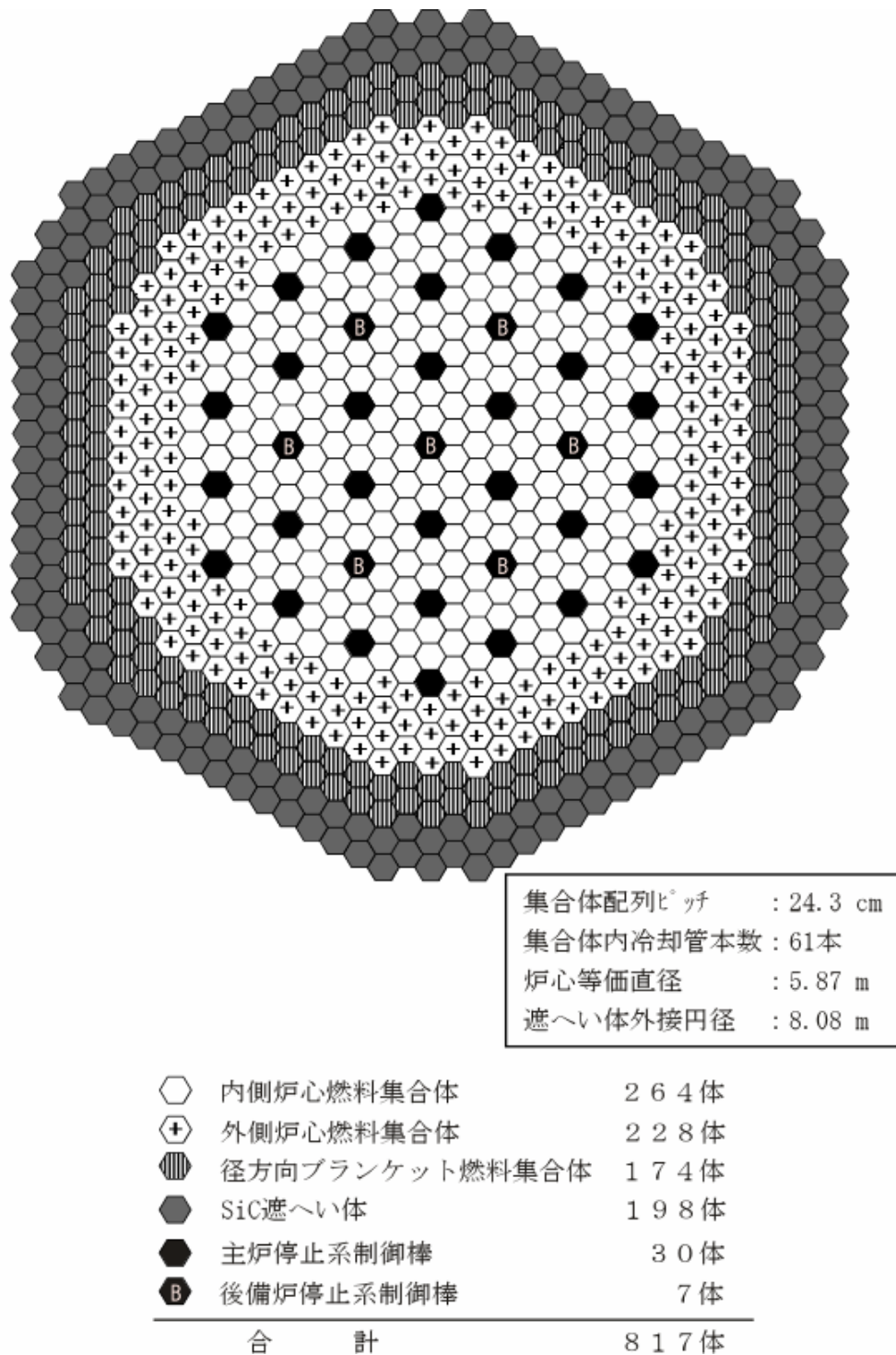
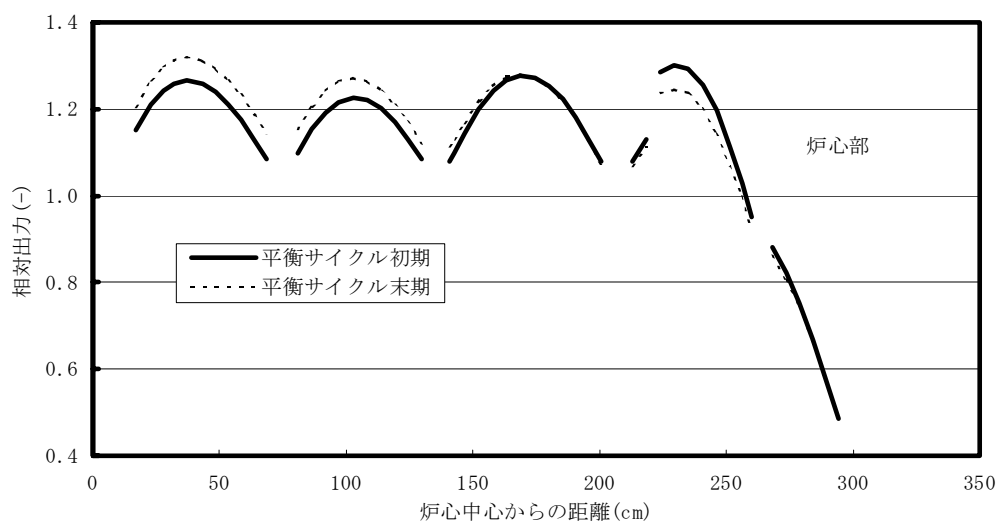
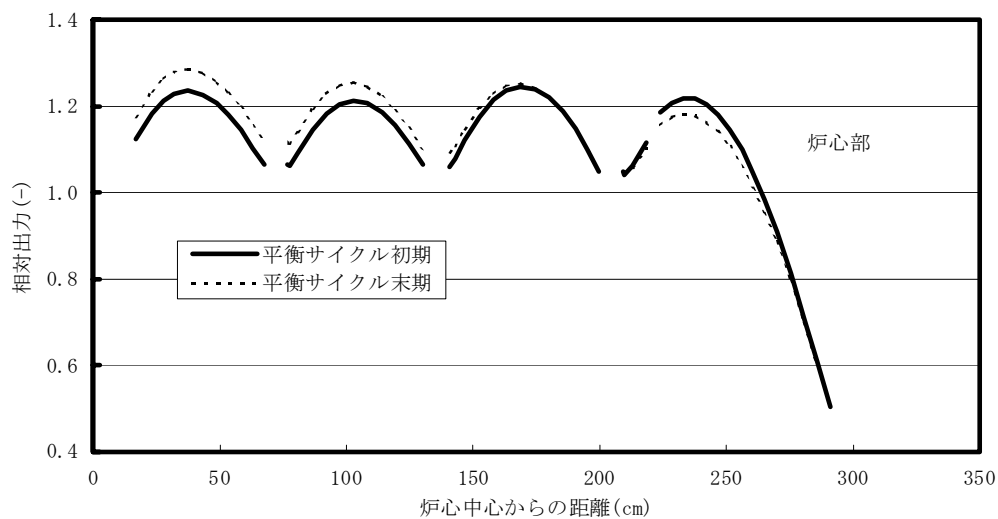


図2.4 - 4 制御棒37本配置型炉心構成図



(a) 制御棒49体炉心 (21.2ヶ月×6バッチ運転)

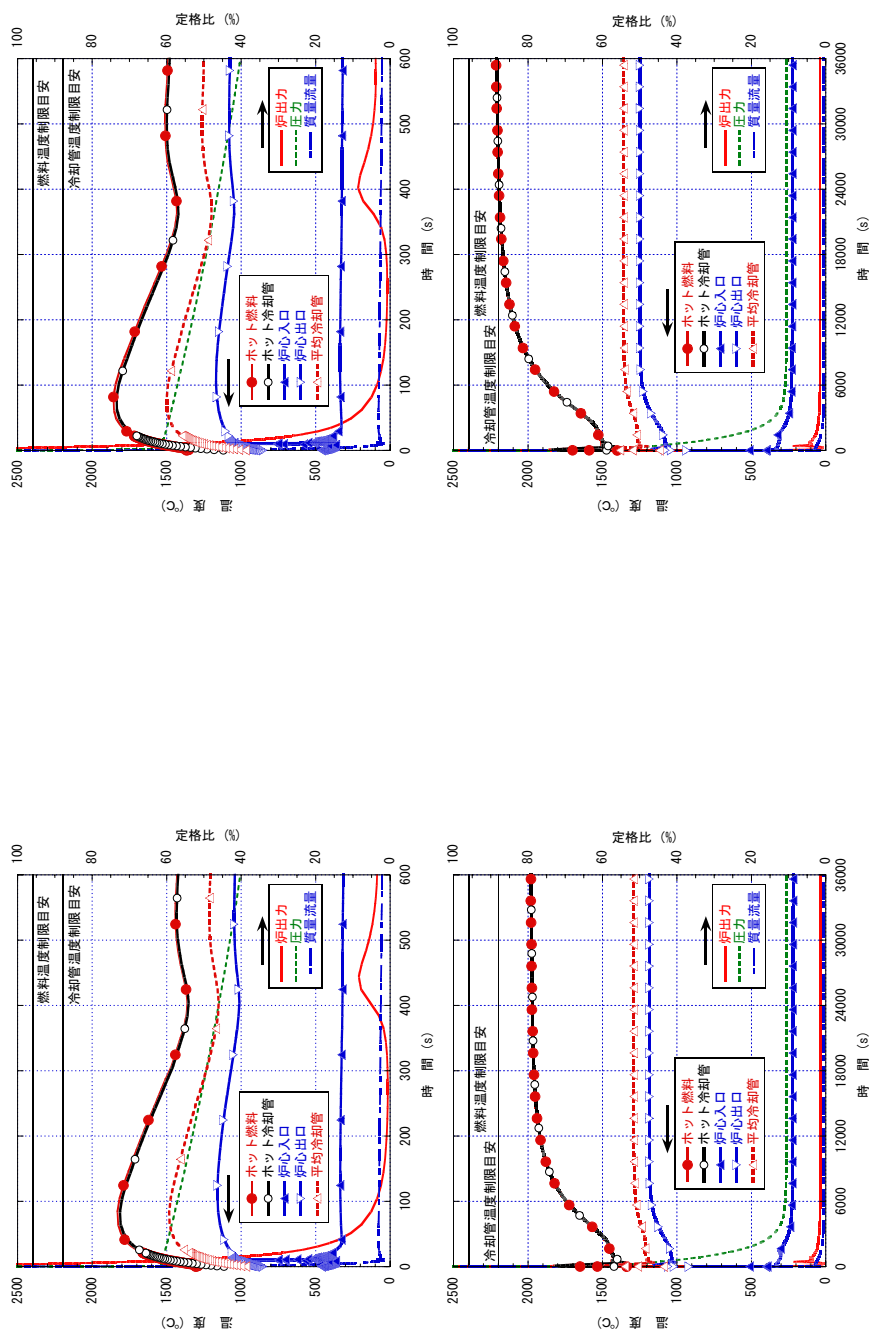


(b) 制御棒37体炉心 (18.1ヶ月×7バッチ運転)

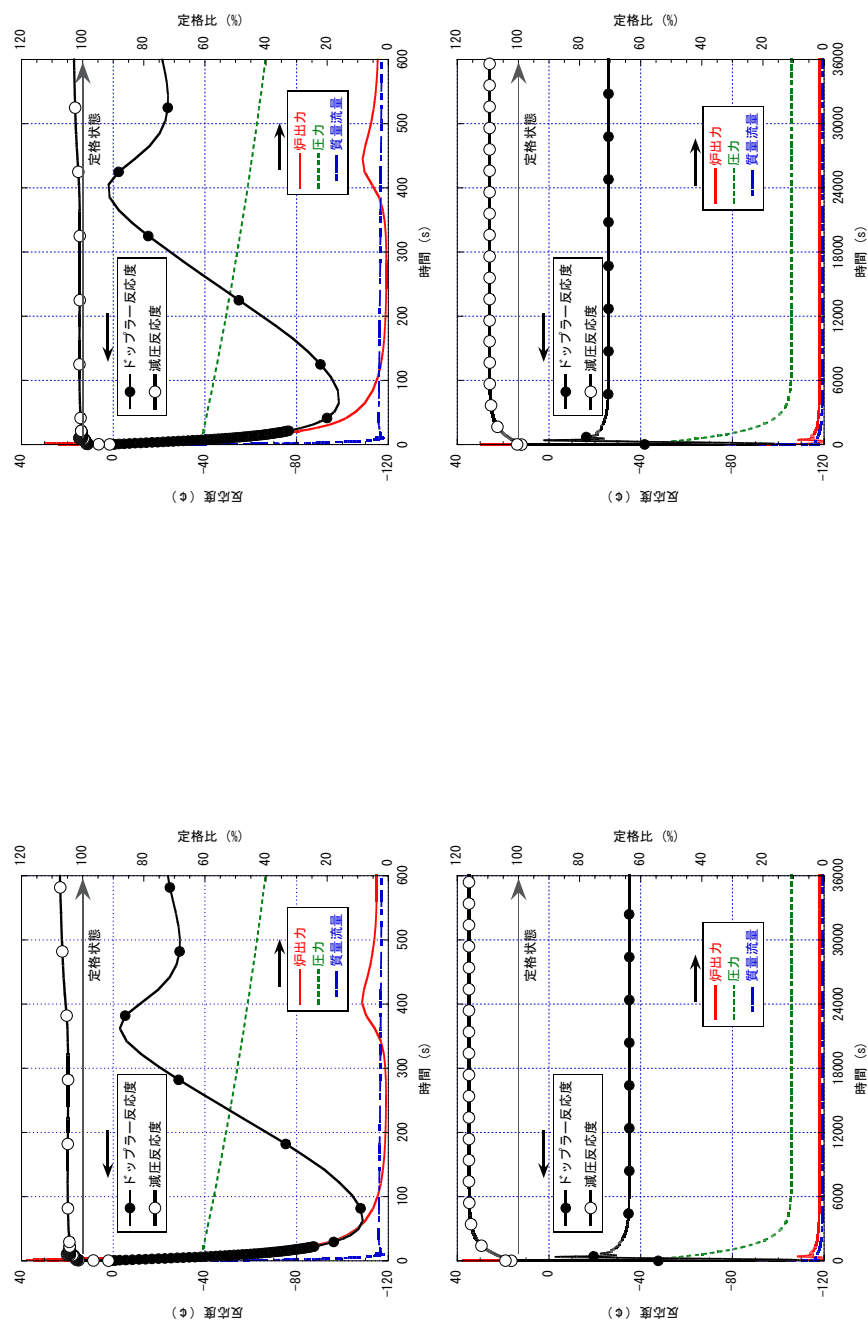
[注記]

- ・相対出力はメッシュ軸方向積分出力[W/cm²]を平均値で割った値。
炉心部のみで算出。
- ・燃焼ミスマッチファクタ考慮。

図2.4 - 5 制御棒本数合理化による径方向出力分布の変化
(炉心燃料集合体数492体、炉心高さ90cm)



接触熱抵抗合理化適用前
接触熱抵抗合理化適用後
図2.4-6 接触熱抵抗合理化によるAWS時炉心温度変化の差



接触熱抵抗合理化適用前
接触熱抵抗合理化適用後
図2.4-7 接触熱抵抗合理化によるAWS時反応度変化の差

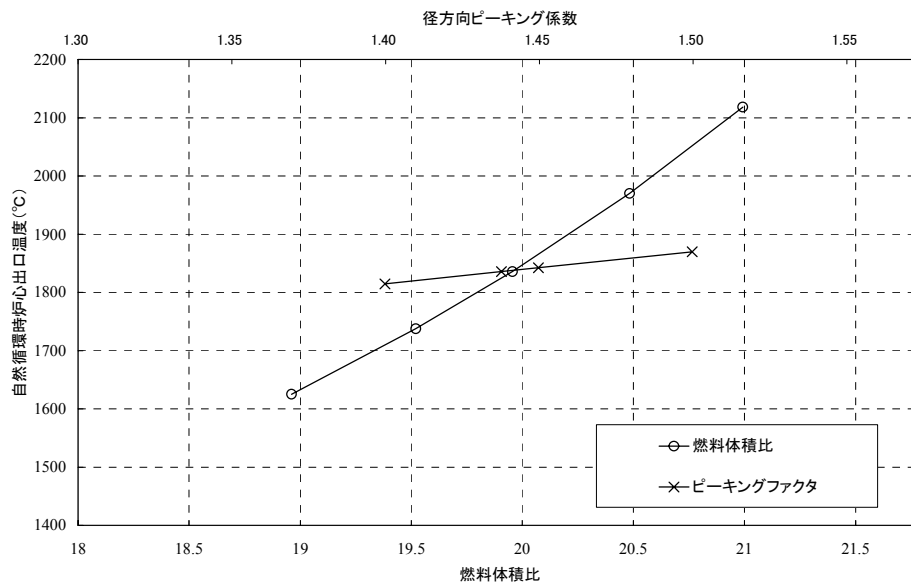


図2.4 - 8 AWS長期除熱時の燃料体積比、
径方向ピーキング係数と炉心出口温度の関係

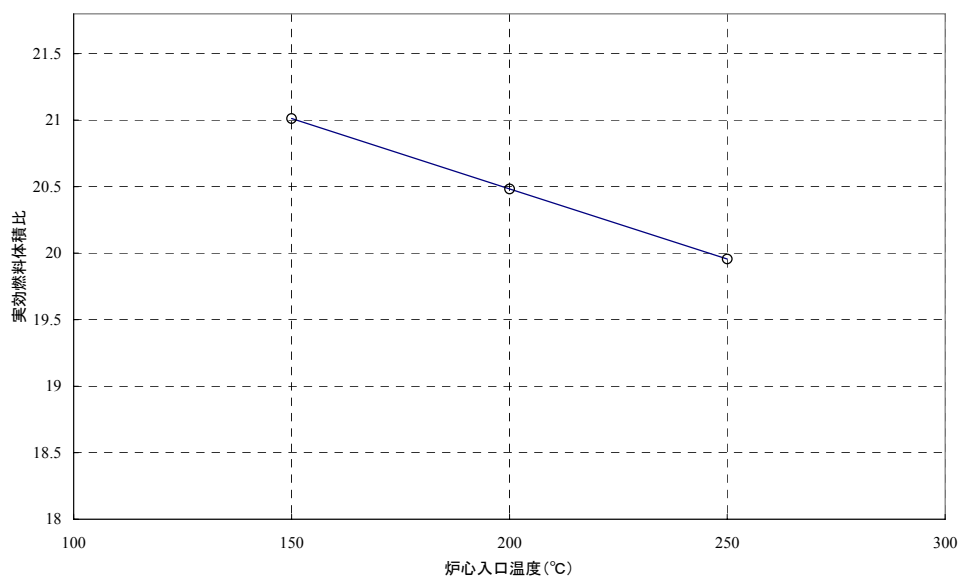
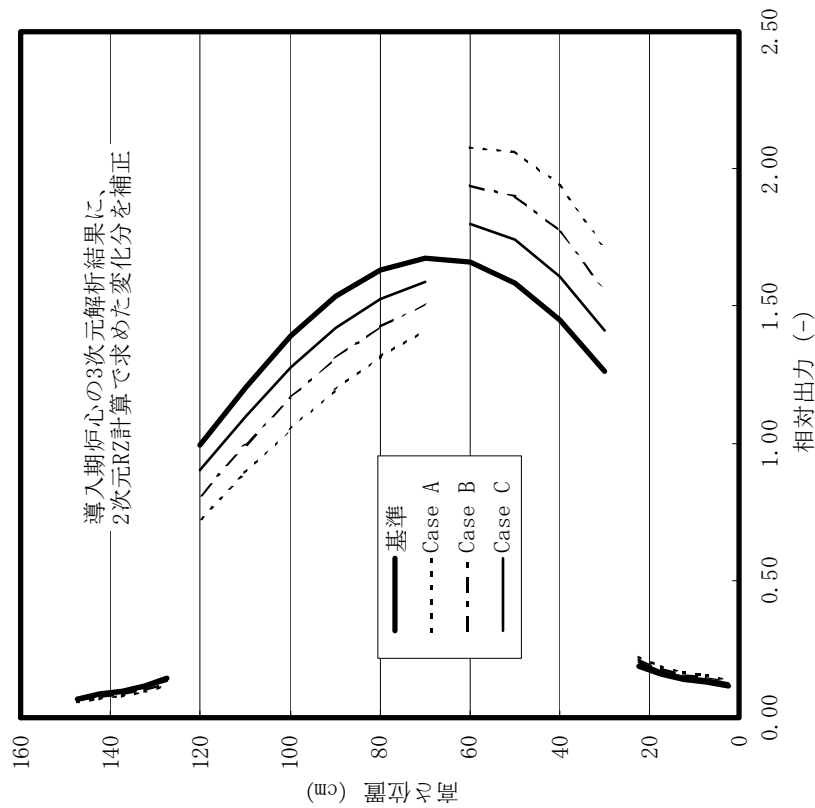


図2.4 - 9 AWS長期除熱時の炉心入口温度と燃料体積比の関係
(炉心出口温度一定条件)

軸方向高さ (cm)	相対出力			
	基準	軸方向2領域炉心		
		Case A	Case B	Case C
147.5	0.069	0.055	0.060	0.064
142.5	0.086	0.068	0.074	0.080
137.5	0.098	0.078	0.085	0.092
132.5	0.116	0.092	0.100	0.108
127.5	0.143	0.114	0.124	0.134
120.0	0.993	0.724	0.812	0.902
110.0	1.206	0.891	0.994	1.099
100.0	1.391	1.049	1.163	1.276
90.0	1.535	1.193	1.308	1.421
80.0	1.630	1.314	1.423	1.528
70.0	1.672	1.410	1.504	1.590
60.0	1.658	2.075	1.938	1.799
50.0	1.584	2.060	1.900	1.742
40.0	1.449	1.937	1.771	1.609
30.0	1.261	1.712	1.557	1.408
22.5	0.187	0.221	0.210	0.199
17.5	0.156	0.185	0.176	0.167
12.5	0.139	0.164	0.156	0.147
7.5	0.131	0.154	0.147	0.139
2.5	0.116	0.136	0.129	0.123



Pu 富化度 22.2 / 24.0wt%

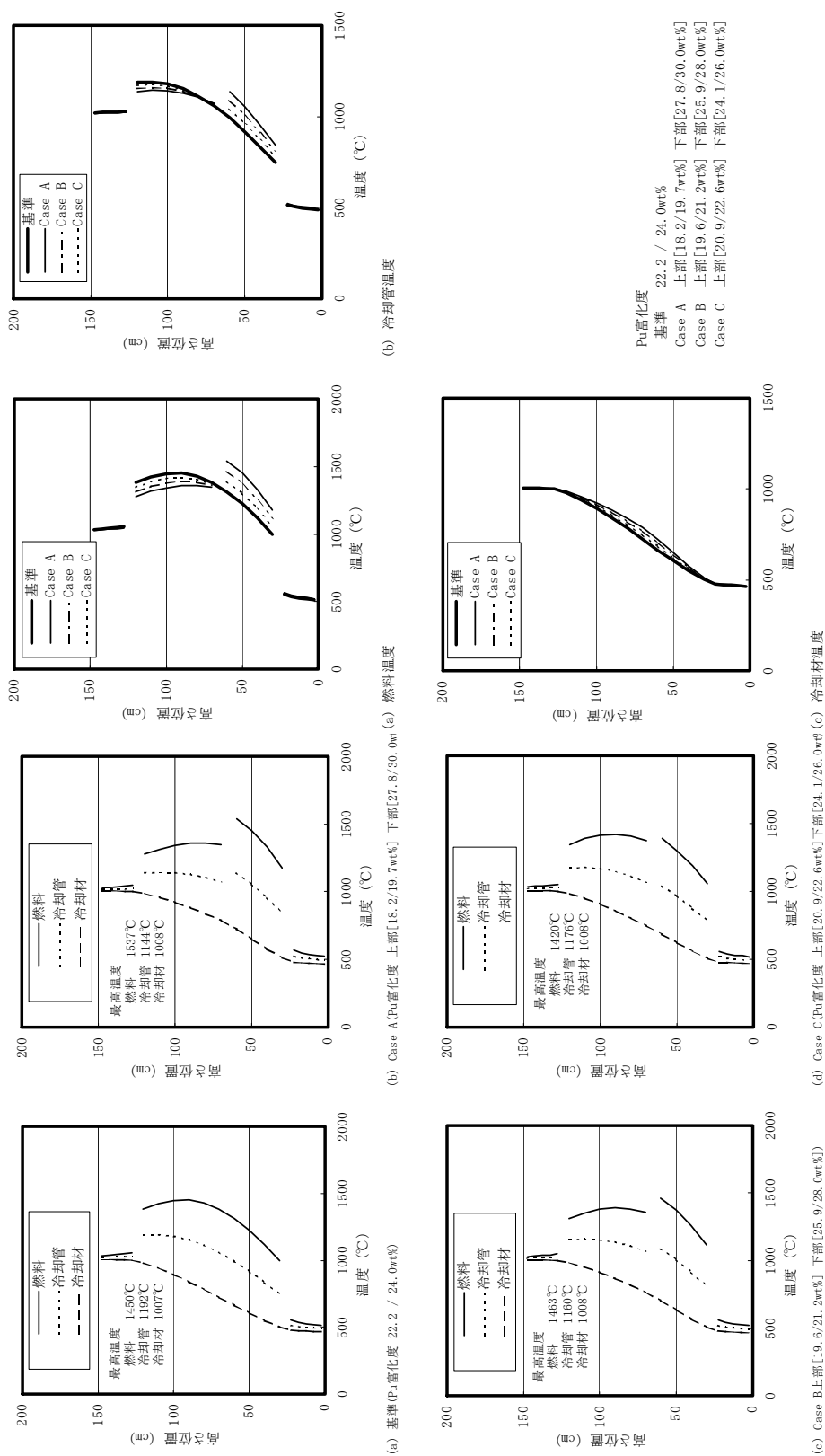
基準 22.2 / 24.0wt%

Case A 上部 [18.2/19.7wt%] 下部 [27.8/30.0wt%]

Case B 上部 [19.6/21.2wt%] 下部 [25.9/28.0wt%]

Case C 上部 [20.9/22.6wt%] 下部 [24.1/26.0wt%]

図2.4 - 10 軸方向2領域化炉心の軸方向出力分布



【評価条件】
径方向ピーキング係数 1.33、集合体流量 30.8kg/sで評価

評価条件] 径方向ピーキング係数 1.33、集合体流量 30.8kg/sで評価

図2.4-11 軸方向2領域化炉心の軸方向炉心温度分布

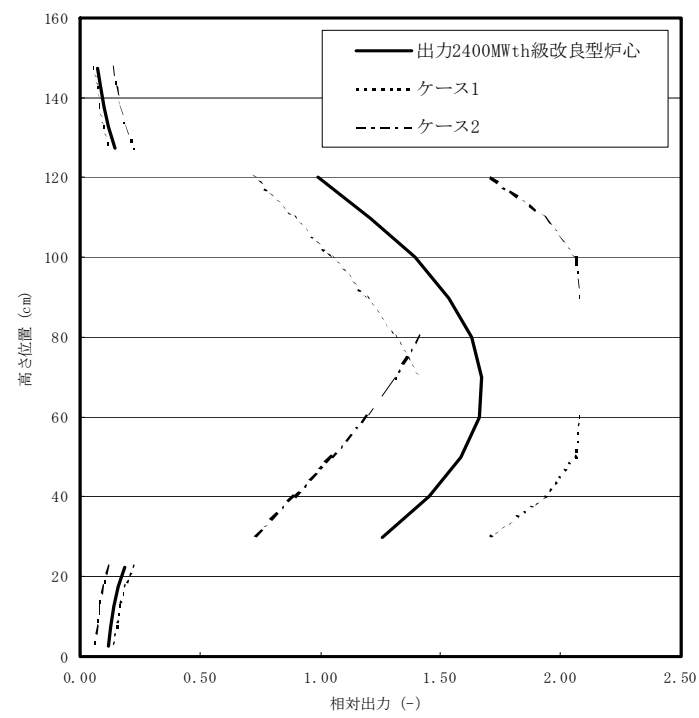
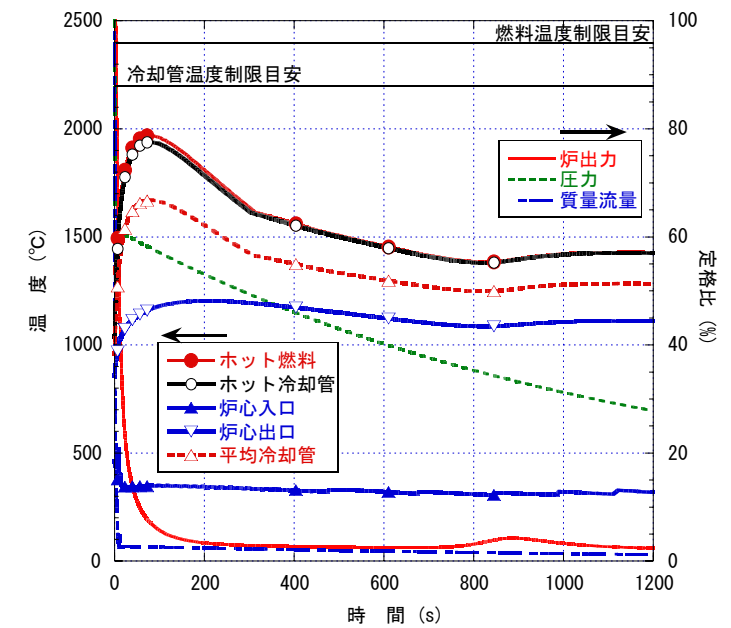
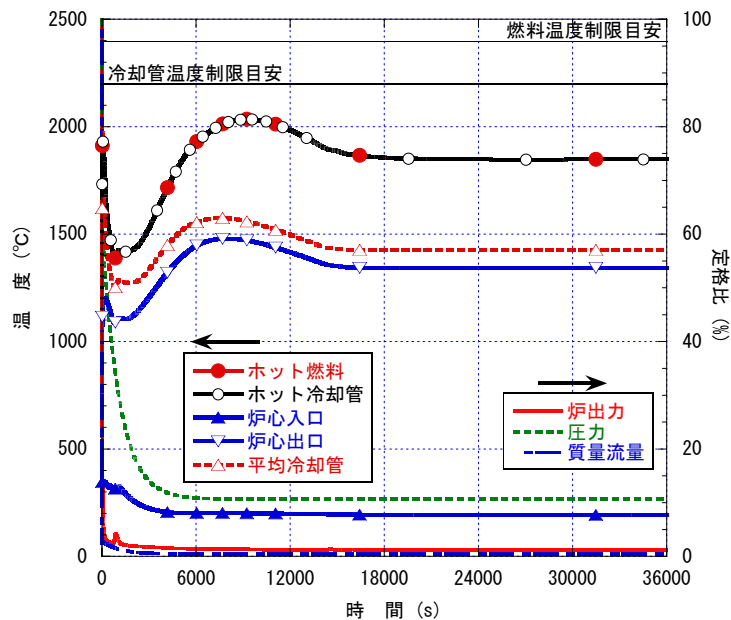


図2.4 - 12 軸方向 2 領域化炉心のAWS解析用軸方向出力分布

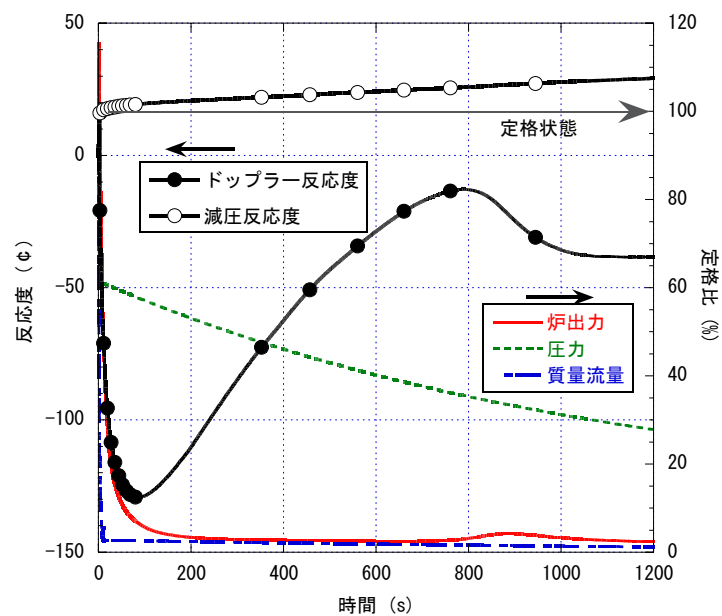


(a) 短期挙動

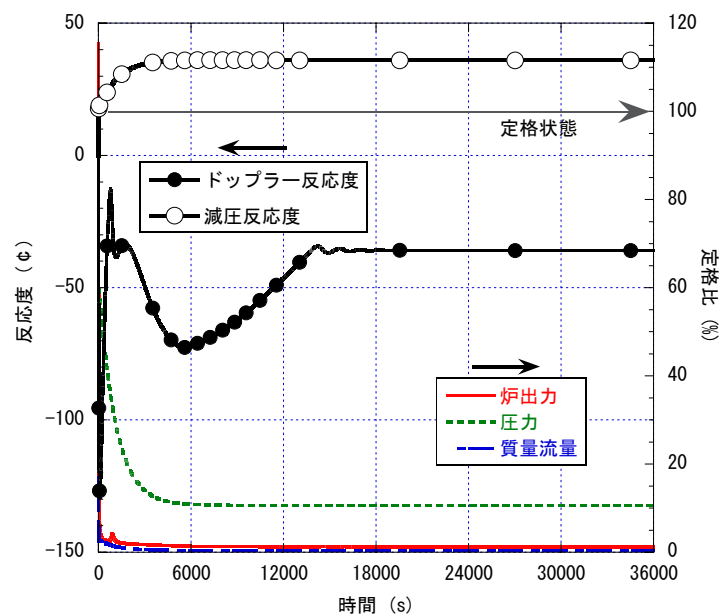


(b) 長期挙動

図2.4-13 AWS事象における炉内主要量の過渡挙動
(ケース1)

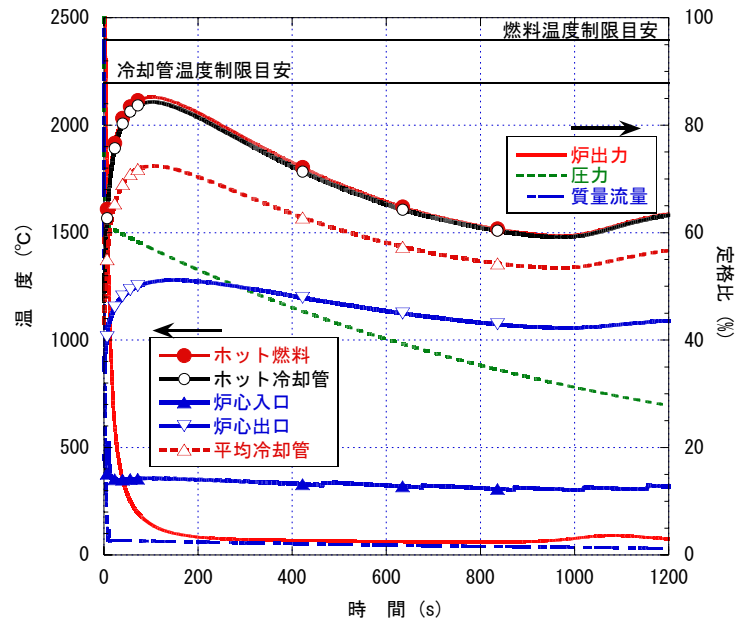


(a) 短期挙動

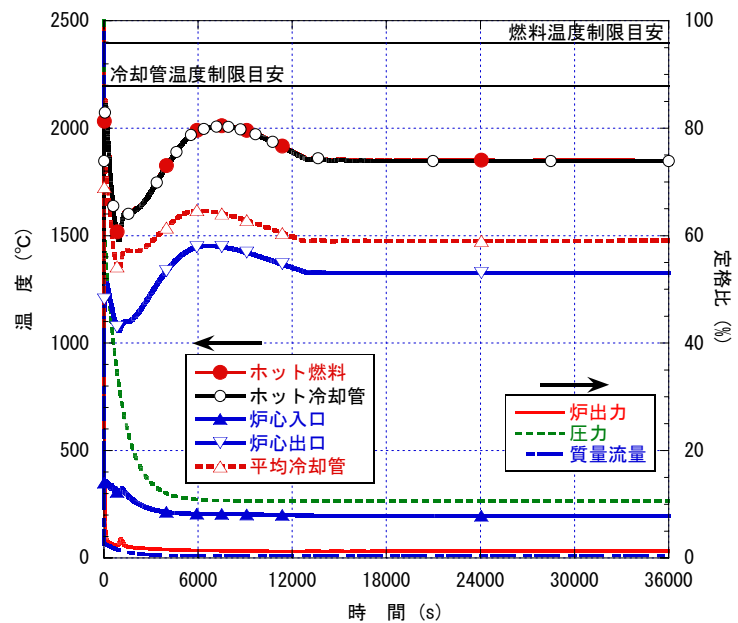


(b) 長期挙動

図2.4-14 AWS事象における反応度の過渡挙動
(ケース1)

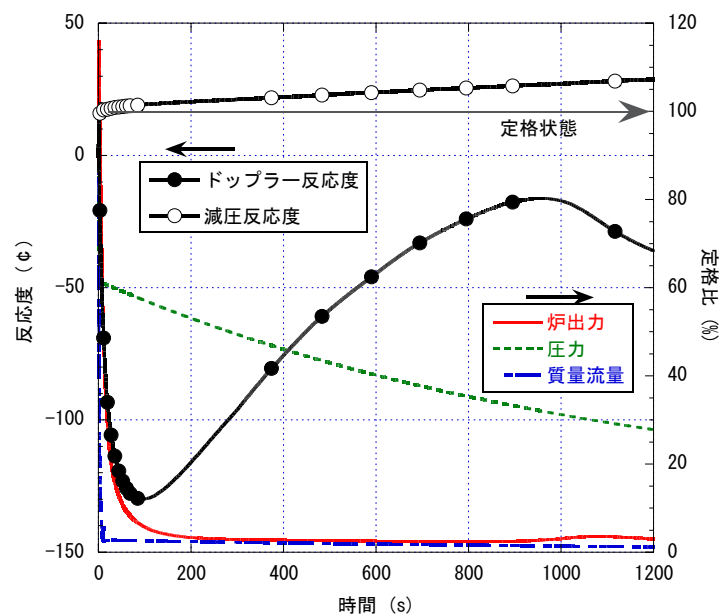


(a) 短期挙動

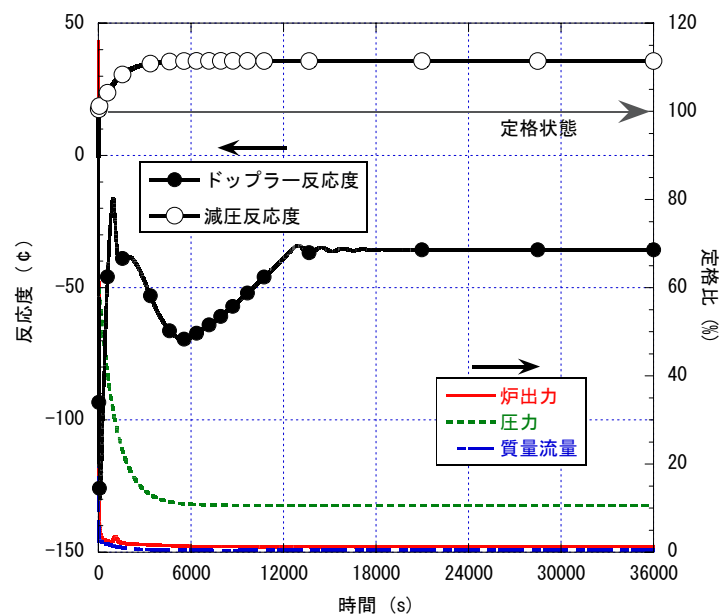


(b) 長期挙動

図2.4-15 AWS事象における炉内主要量の過渡挙動
(ケース2)



(a) 短期挙動



(b) 長期挙動

図2.4-16 AWS事象における反応度の過渡挙動
(ケース2)

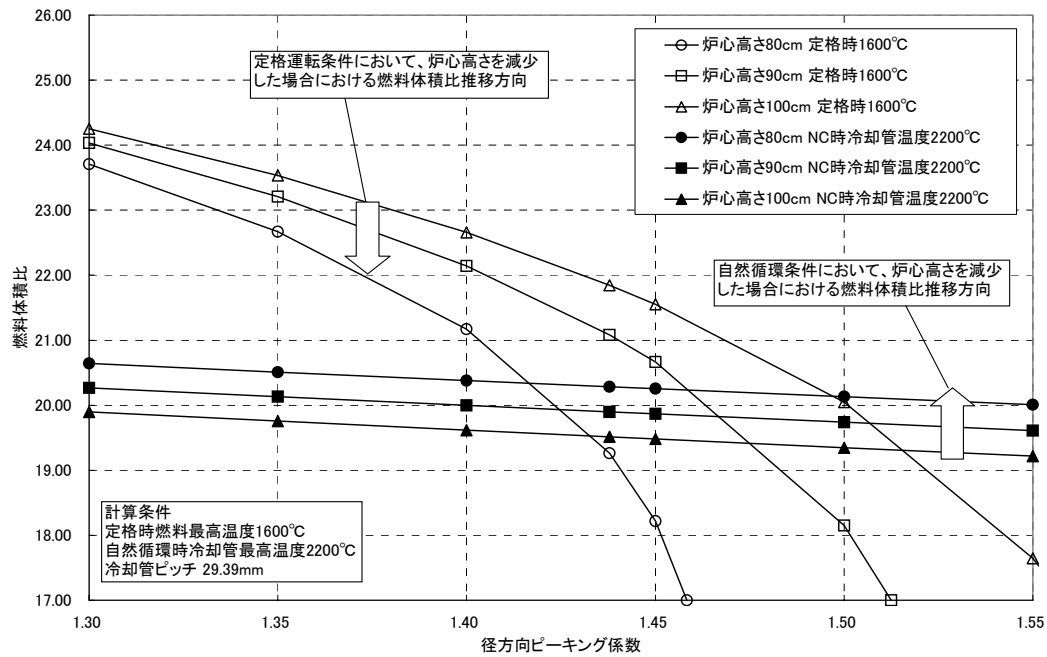


図2-5.1(1) 炉心熱特性評価・長期除熱簡易評価結果の概要
(集合体寸法を同一とし、炉心高さを変化させた場合)

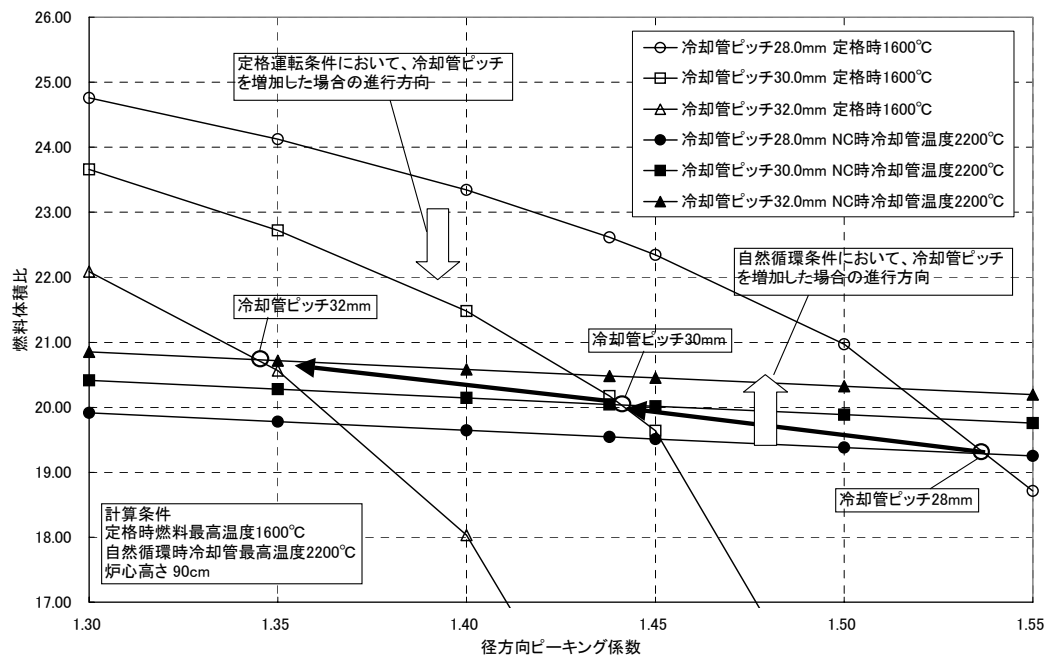


図2-5.1(2) 炉心熱特性評価・長期除熱簡易評価結果の概要
(炉心高さを同一とし、冷却管配列ピッチを変化させた場合)

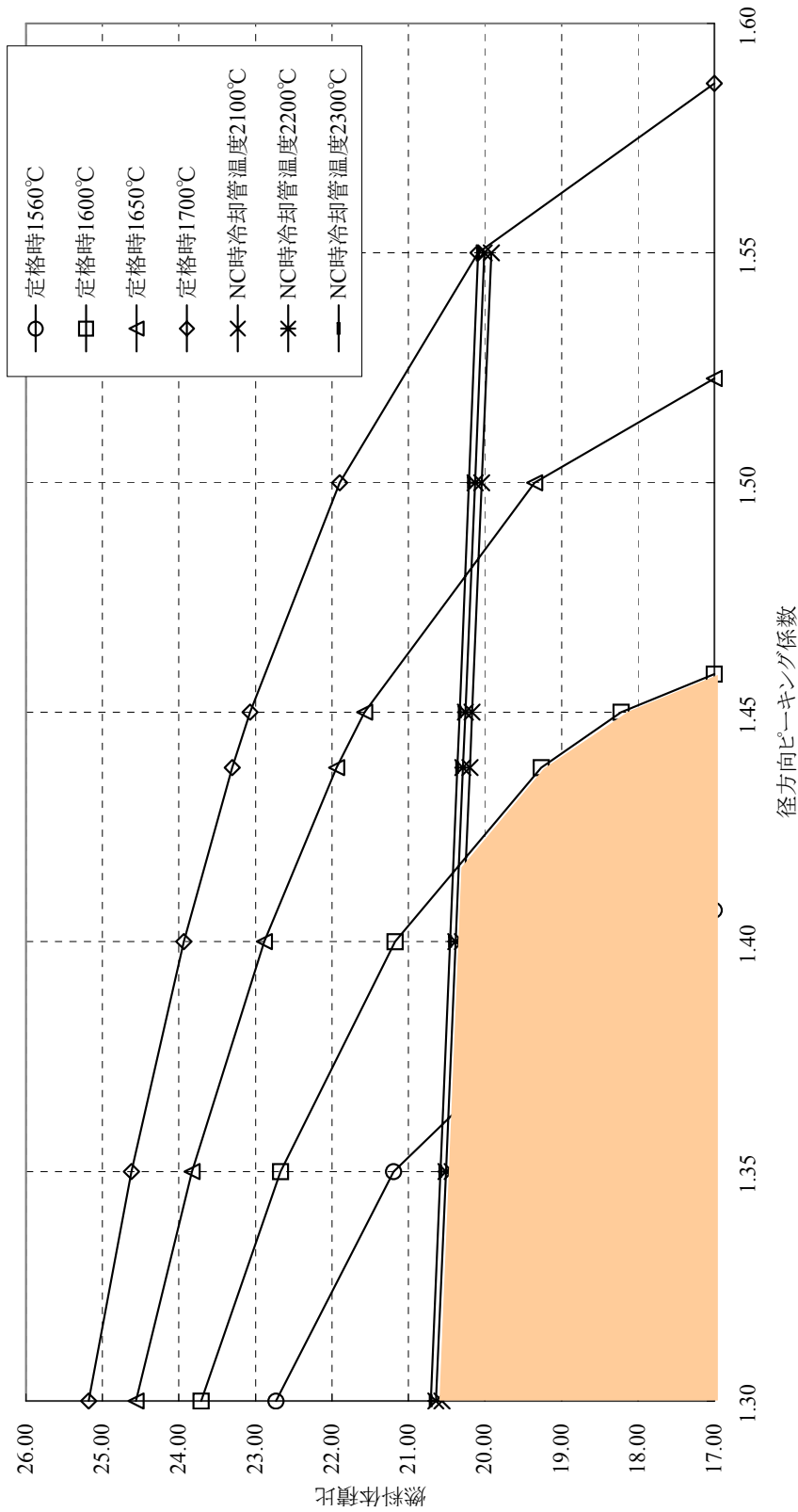


図2.5-2(1) 径方向ピッチング係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ80cm)
(定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)

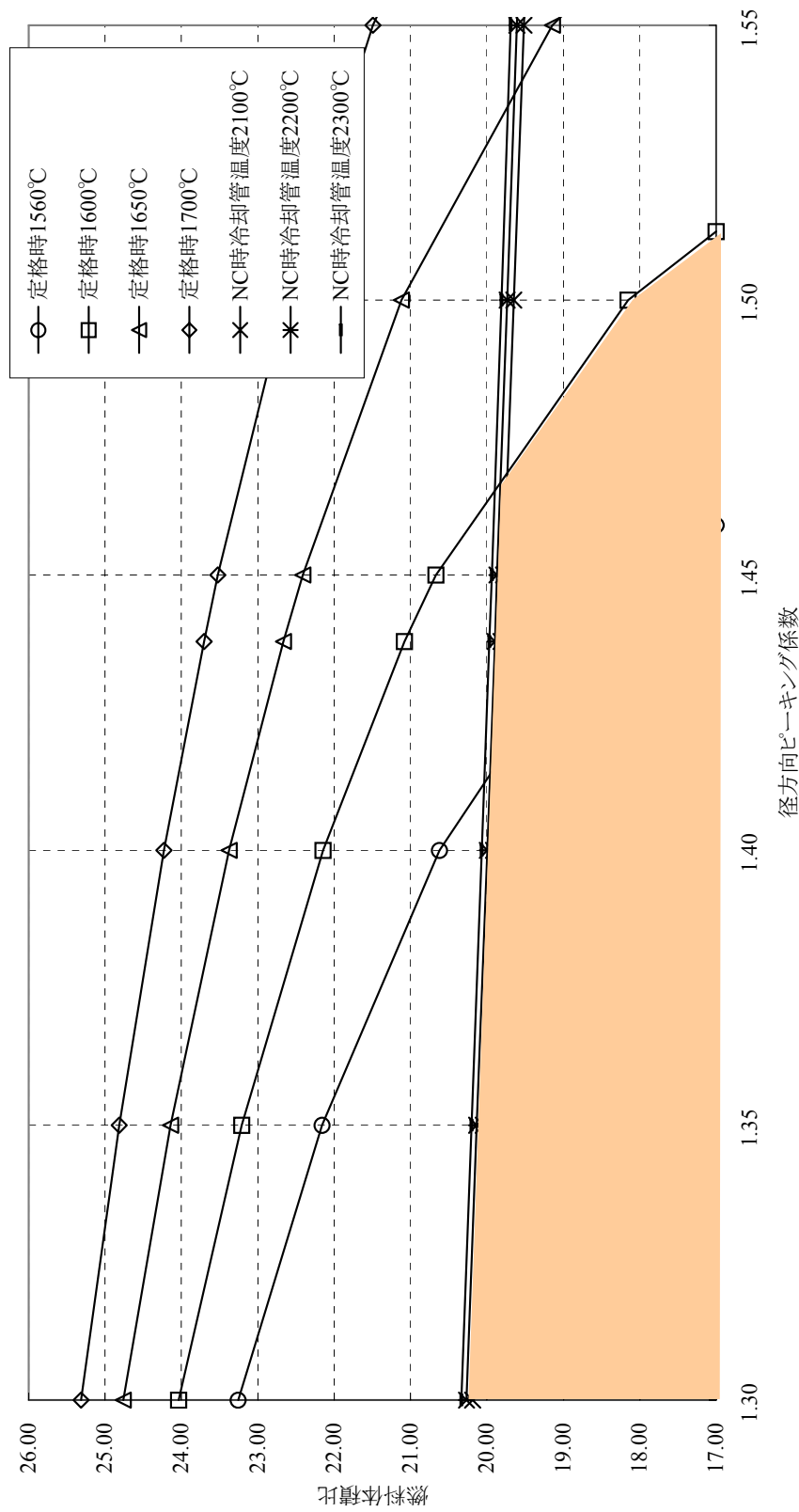


図2.5-2(2) 径方向ピッチ係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ90cm)
(定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)

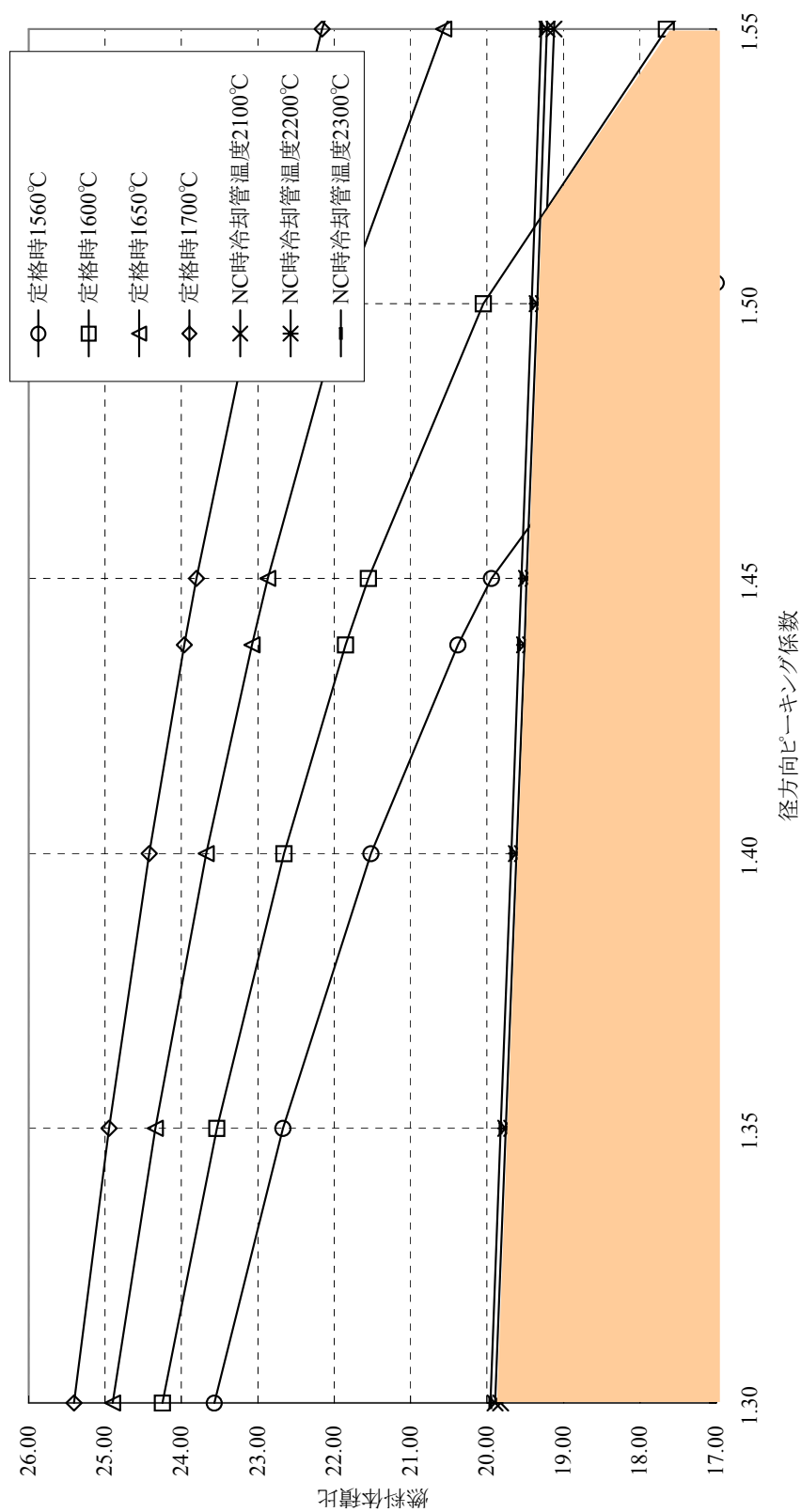


図2.5-2(3) 径方向ピーキング係数と燃料体積比の関係 (炉心高さ100cm)
(定格時温度、自然循環時冷却管温度を満たす場合)

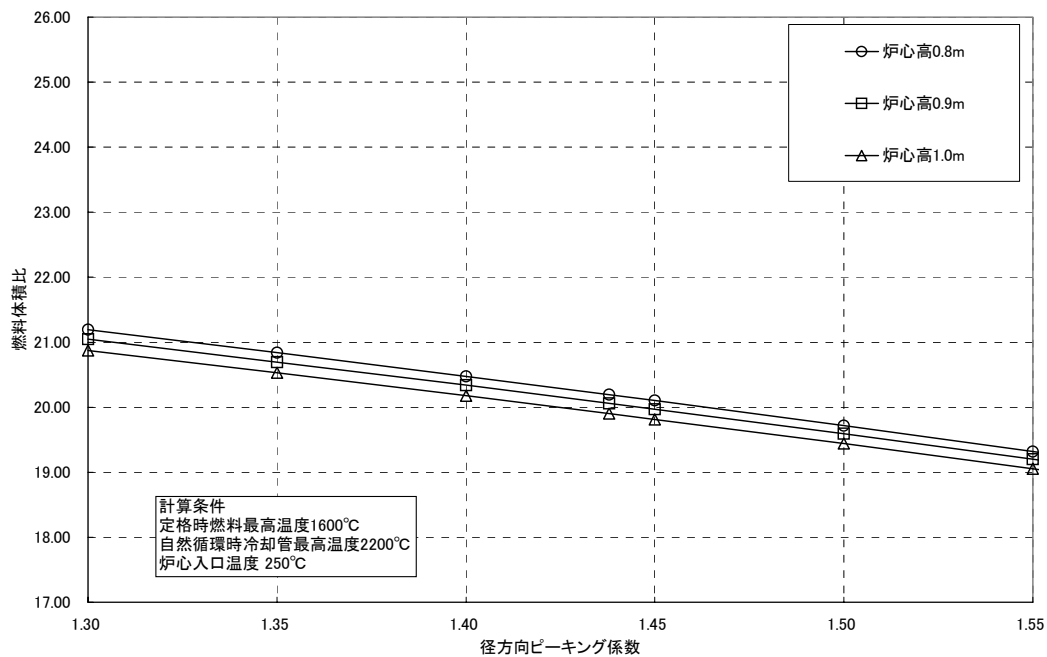


図2.5-3(1) 成立限界燃料体積比の推移
(炉心入口温度250°C)

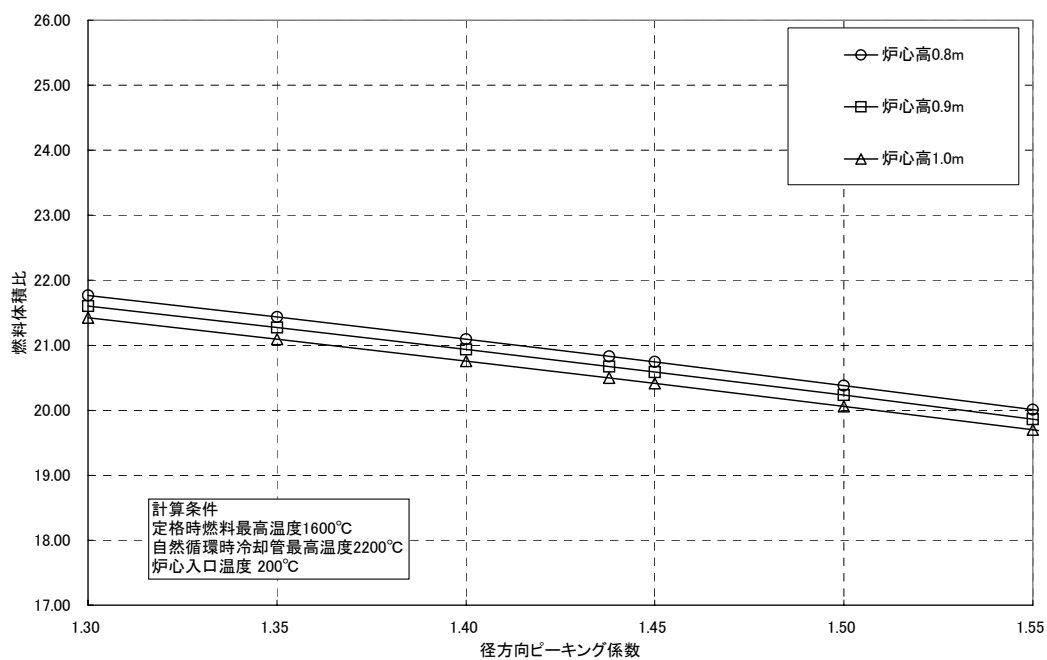


図2.5-3(2) 成立限界燃料体積比の推移
(炉心入口温度200°C)

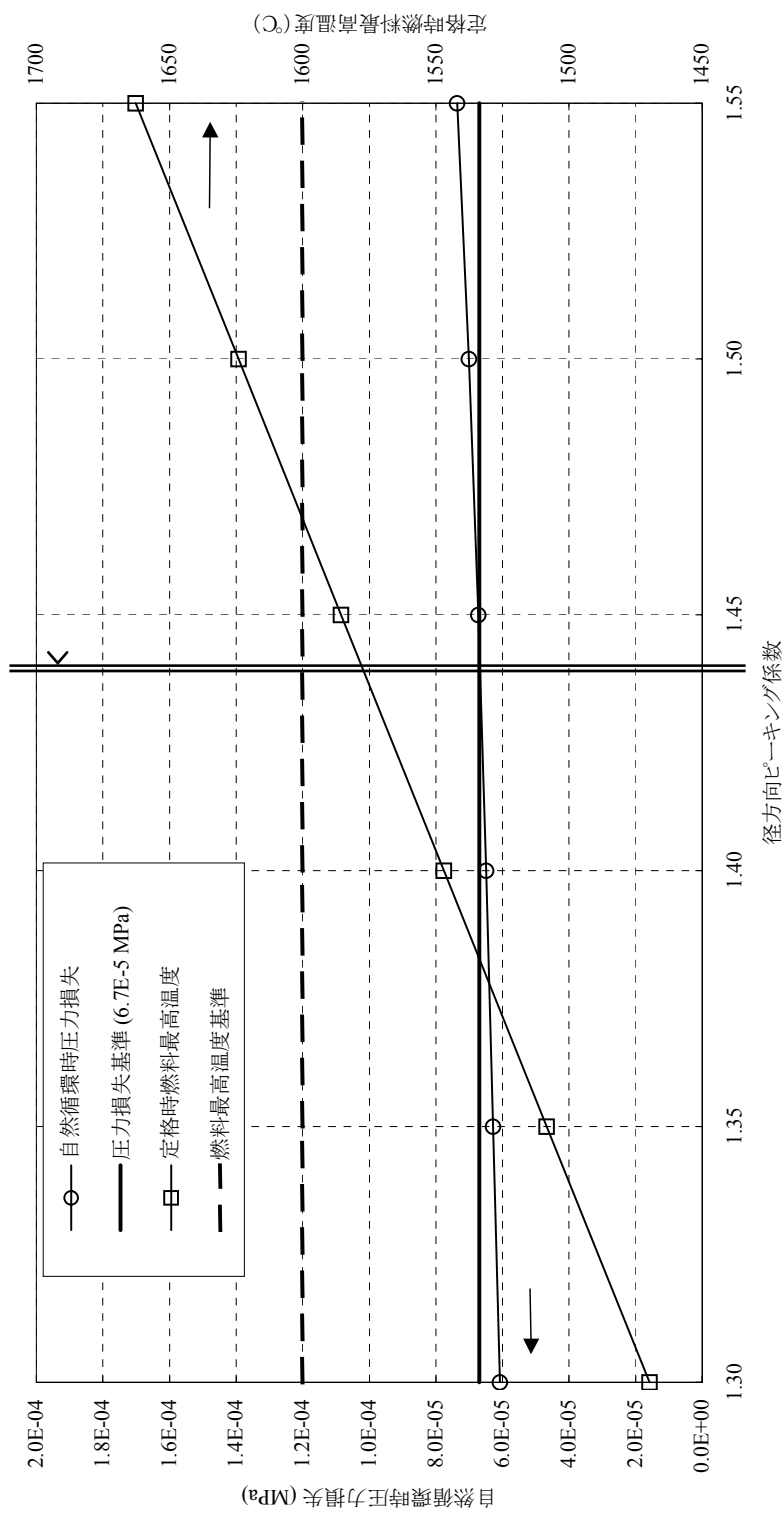


図2.5-4(1) 径方向ピーキング係数と自然循環時圧力損失、定格時燃料最高温度の関係
(炉心高さ90cm、実効燃料体積比19.9%)

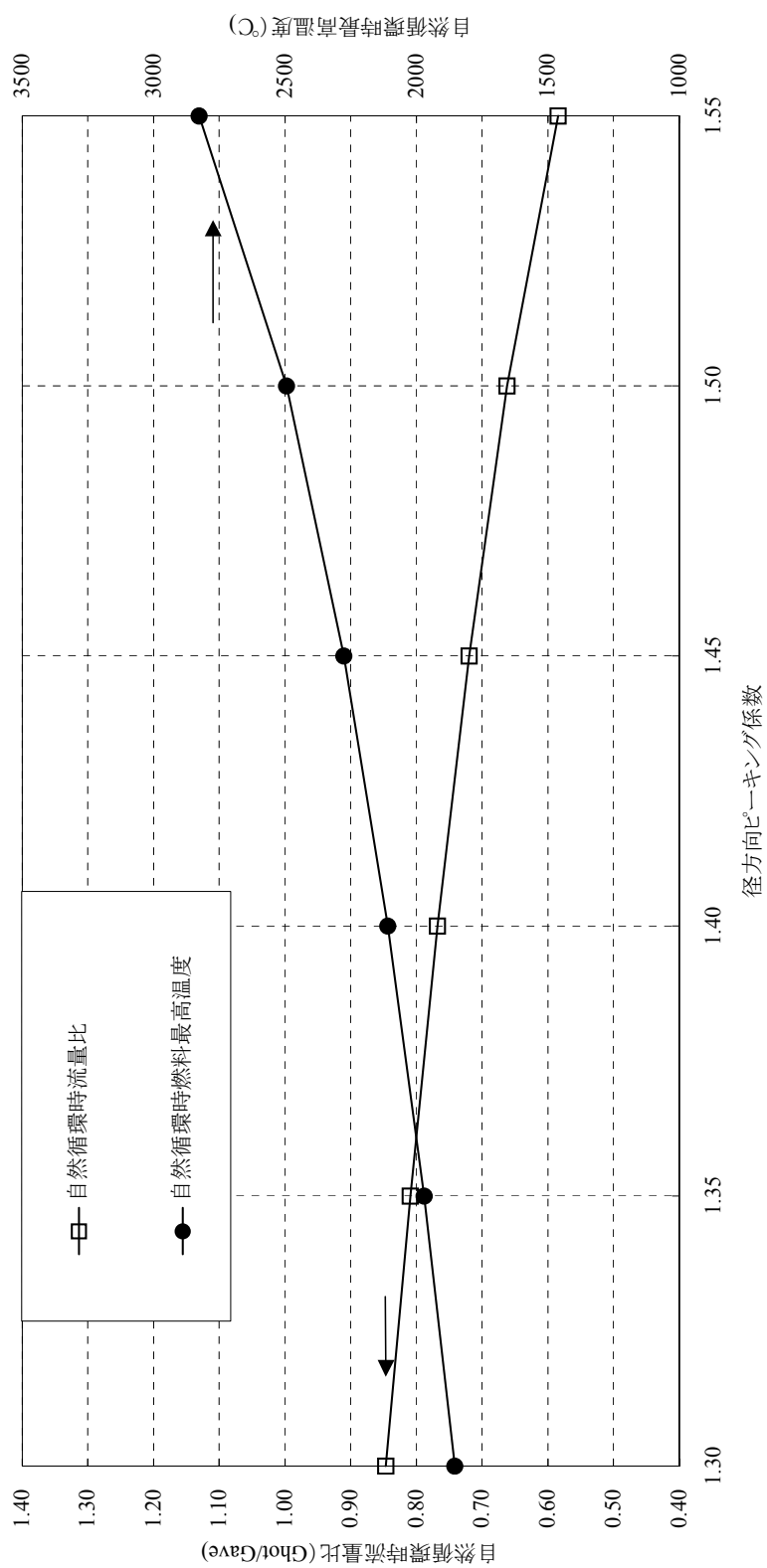


図2.5-4(2) 径方向ピッチ係数と自然循環時流量比、冷却管最高温度の関係
(炉心高さ90cm、実効燃料体積比19.9%)

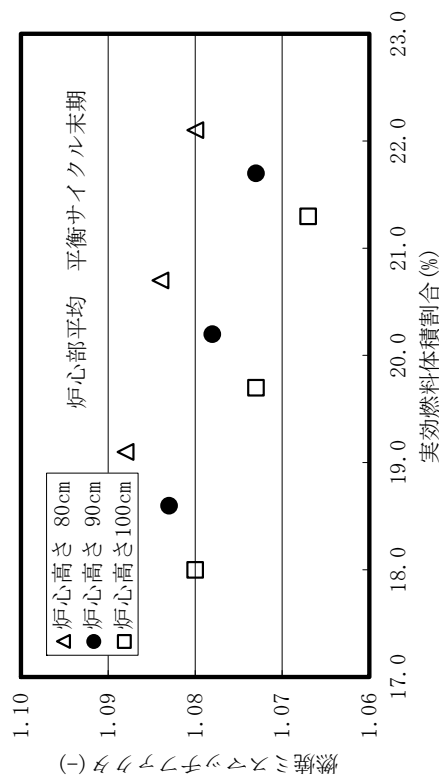
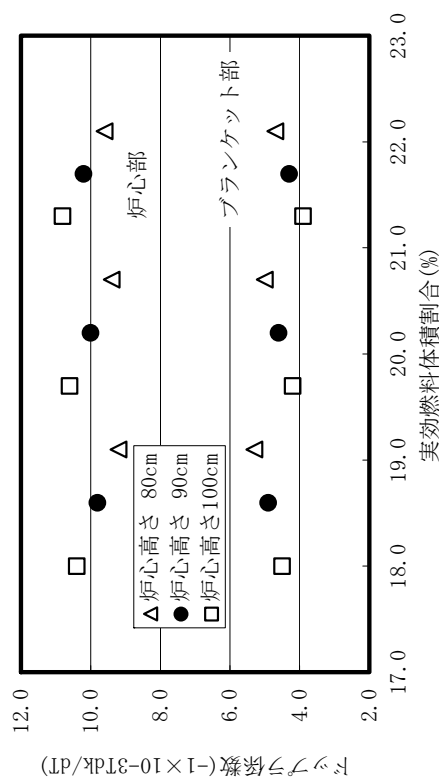
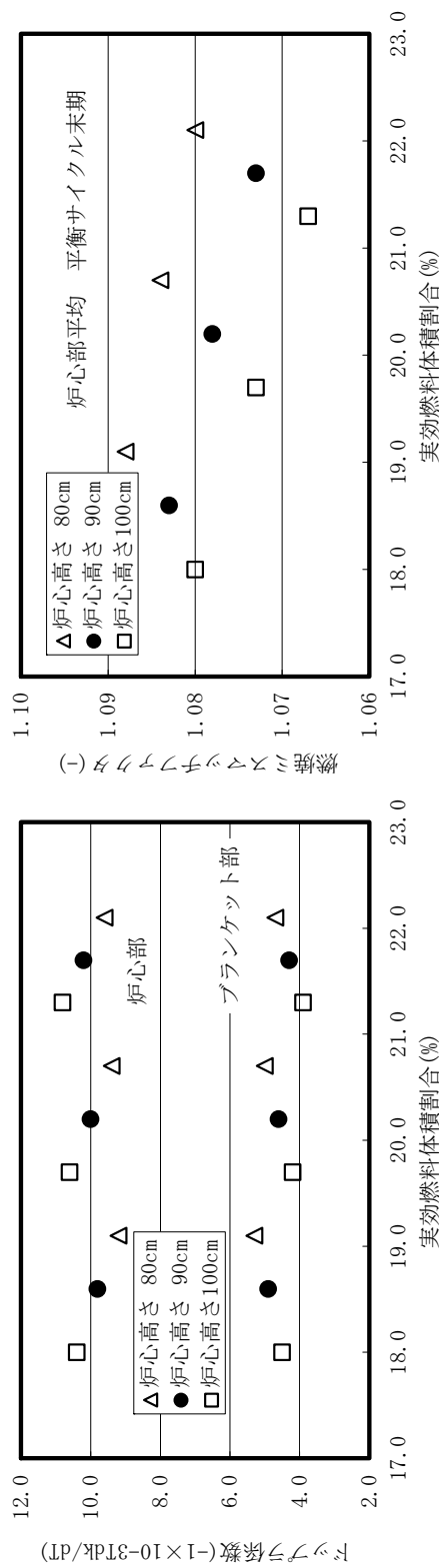
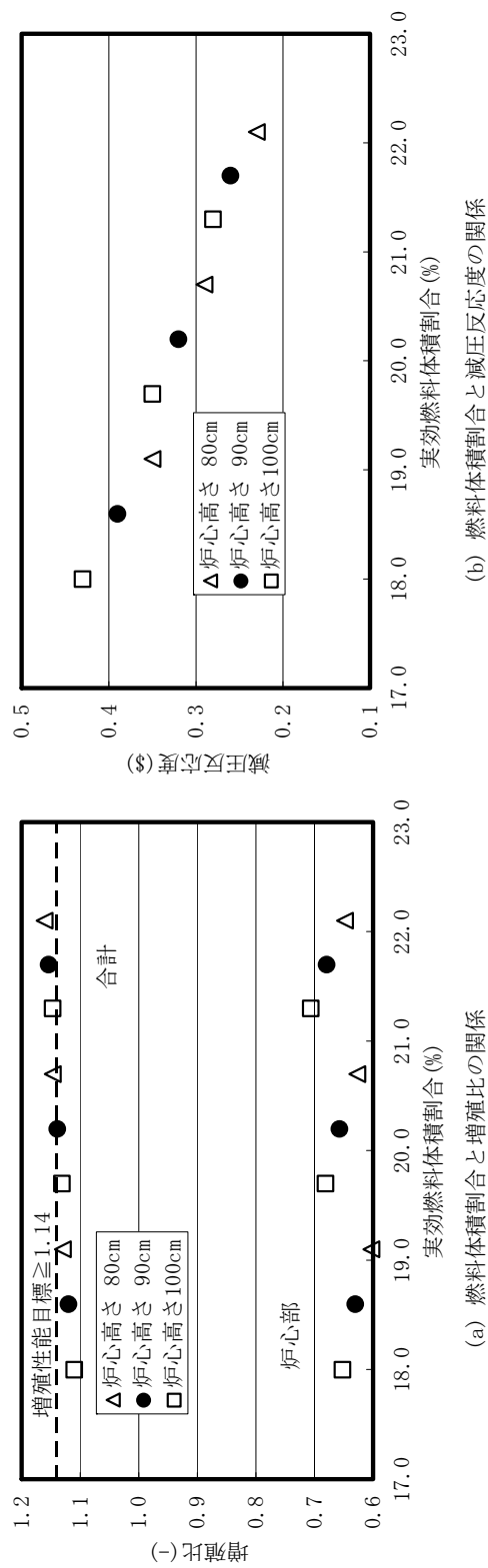


図2.5-5 実効燃料体積比と炉心特性の関係
(増殖比、減圧反応度、ドップラ係数、ミスマッチファクタ)

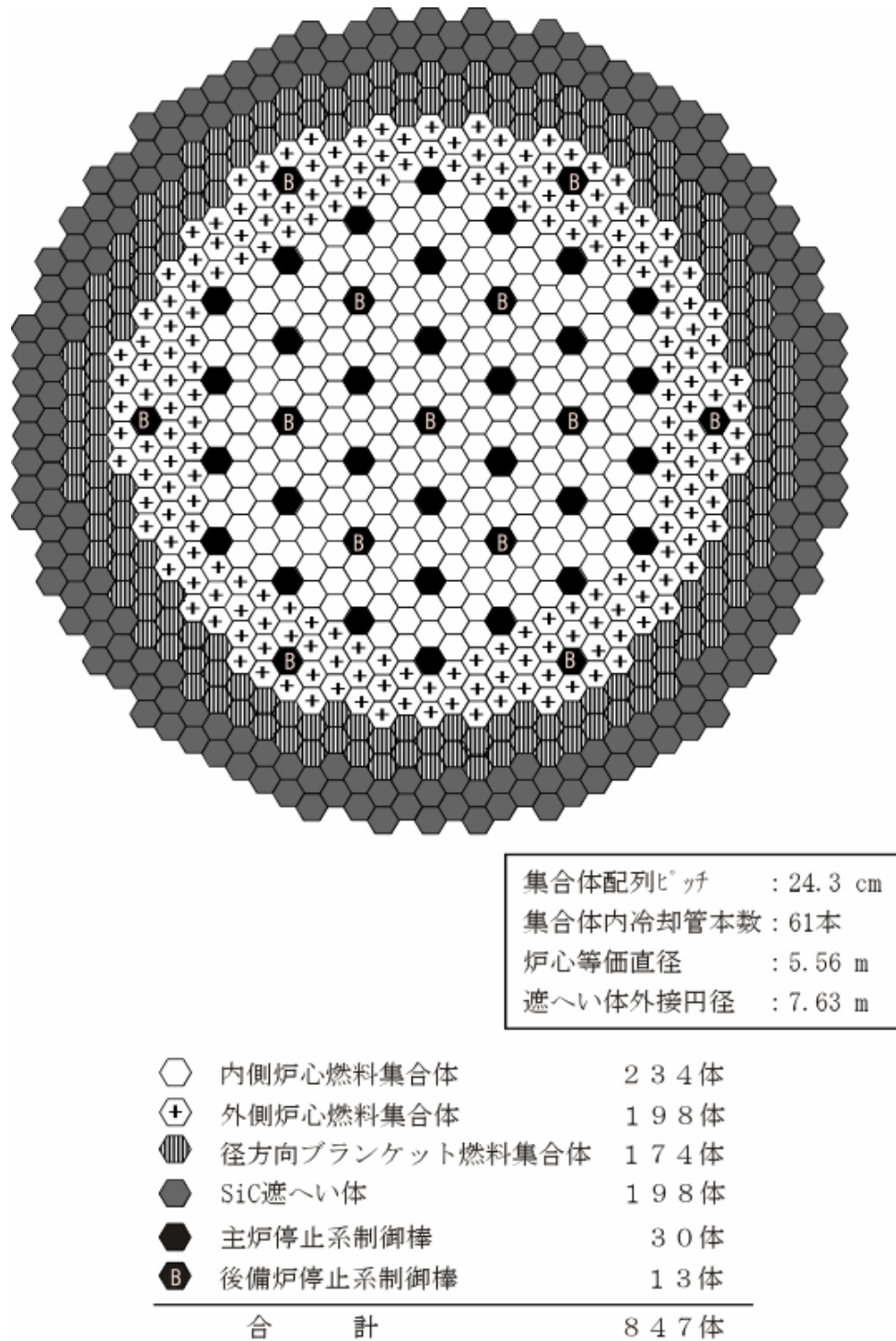


図2.5-6 核分裂性Pu重量削減炉心の炉心配置図
(炉心高さ90cm、AWS時入口温度200℃相当、
接触熱抵抗合理化を考慮)

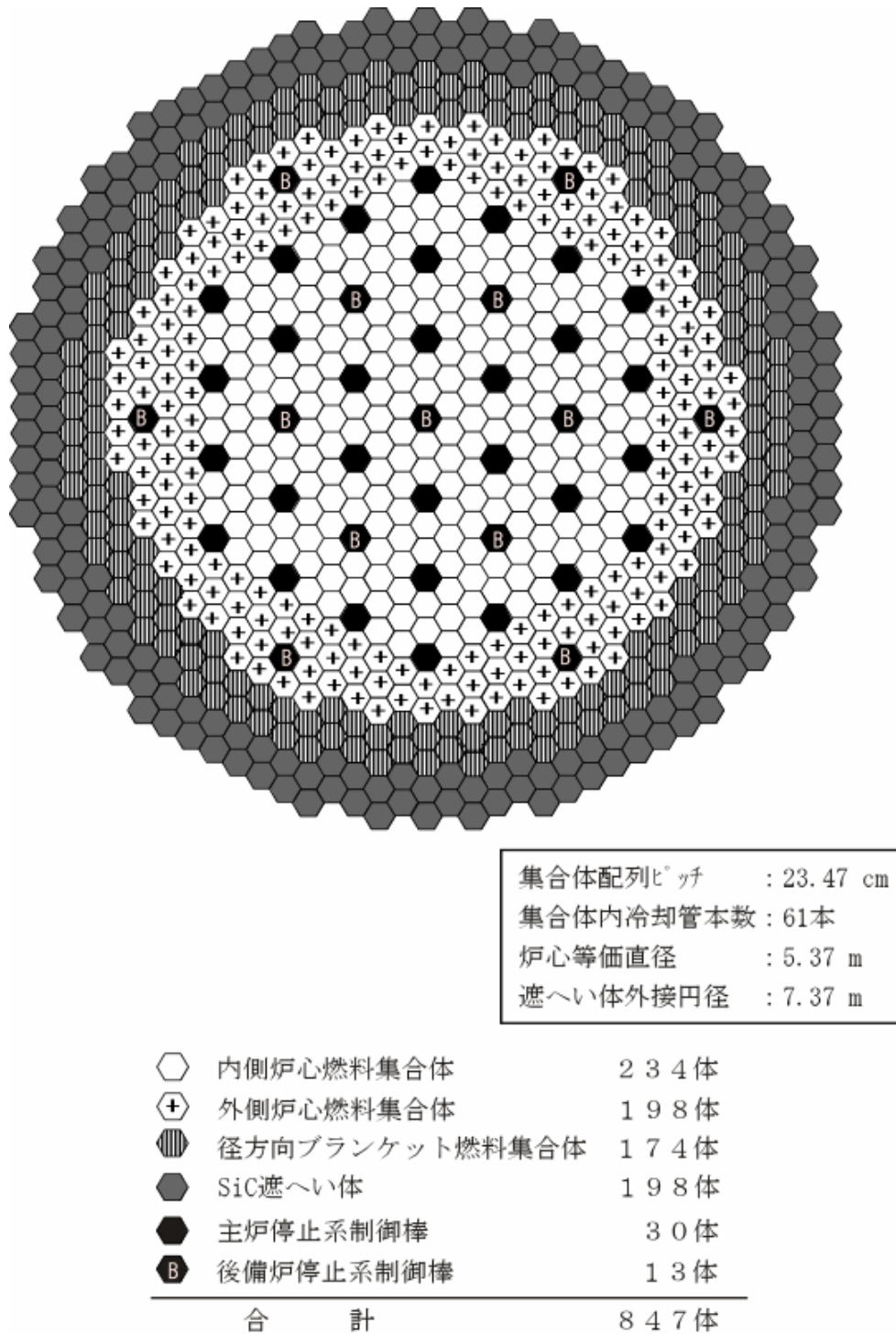


図2.5-7 実効燃焼度向上炉心の炉心配置図
(炉心高さ100cm、AWS時入口温度200℃相当)

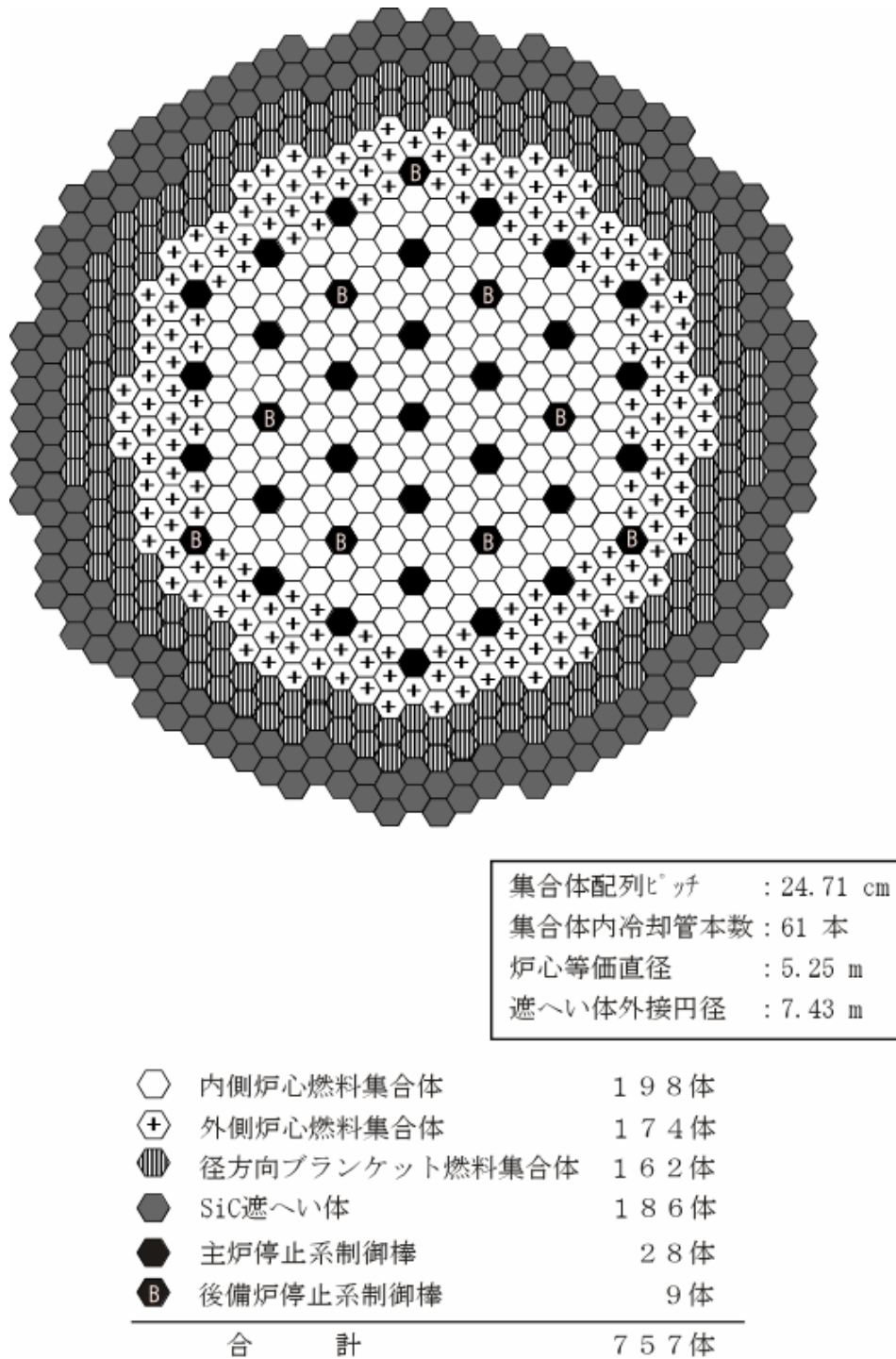


図2.5-8 炉心等価直径削減炉心の炉心配置図
 (炉心高さ100cm、AWS時入口温度200℃相当、
 接触熱抵抗合理化を考慮)

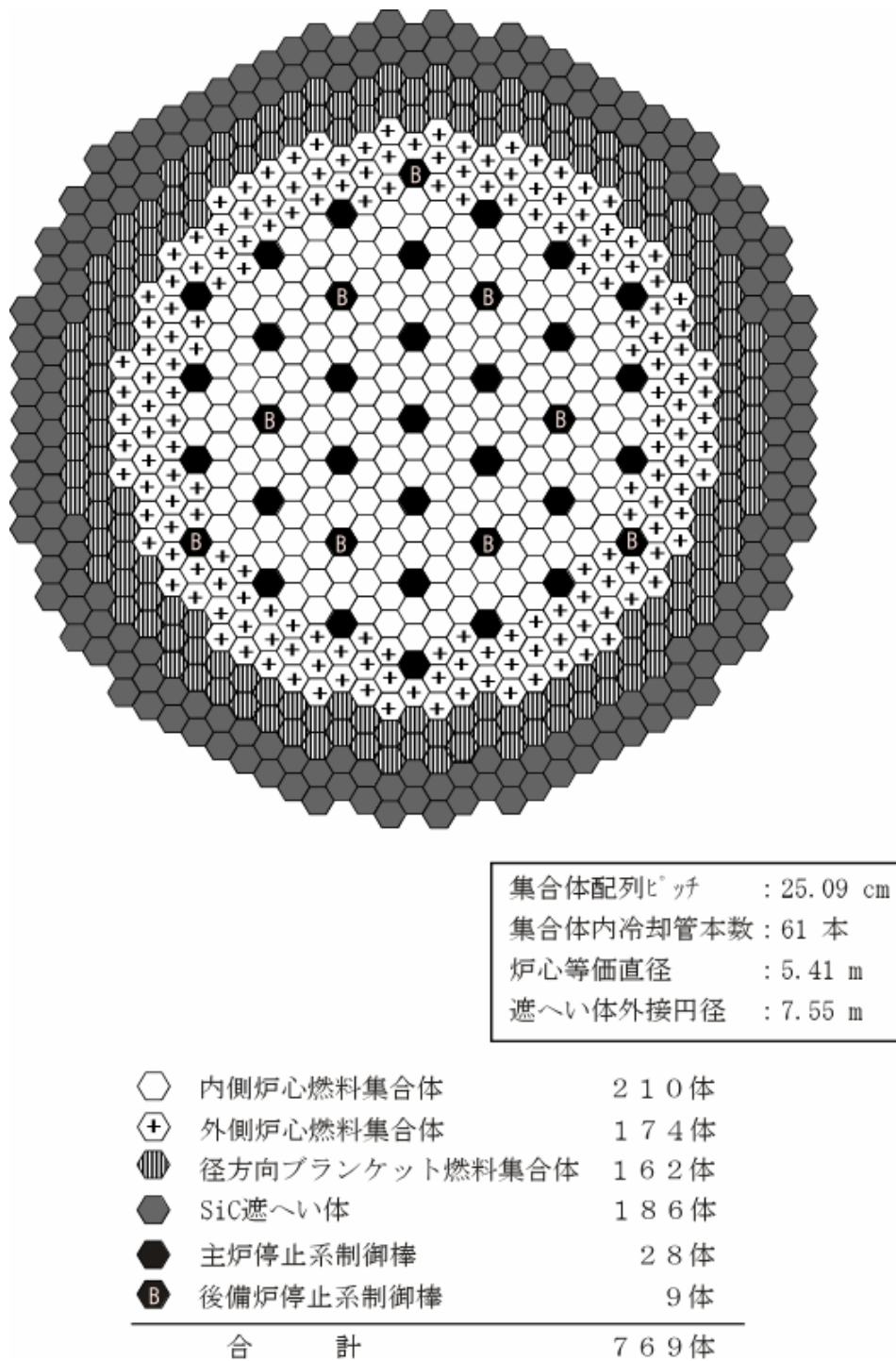
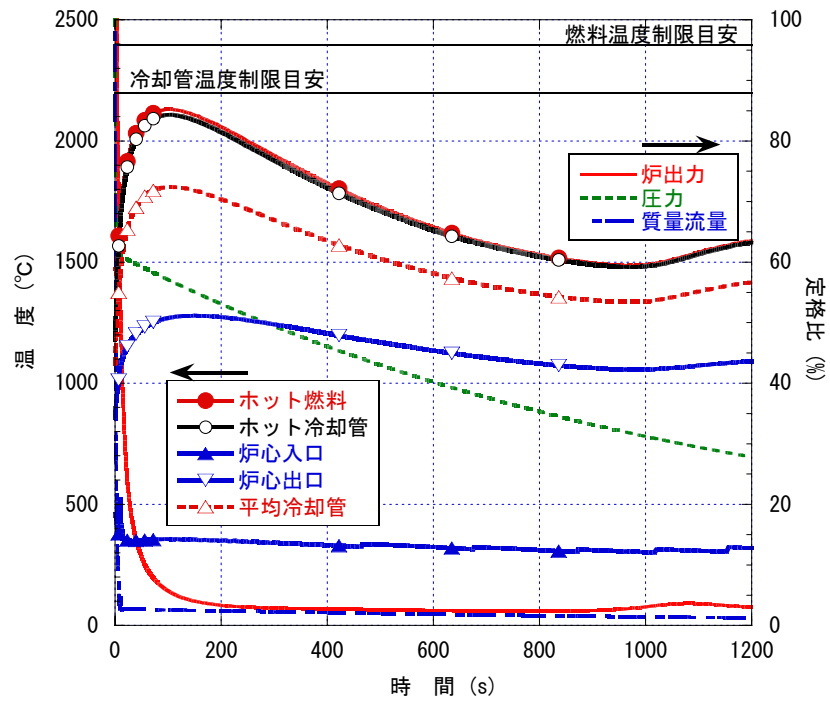
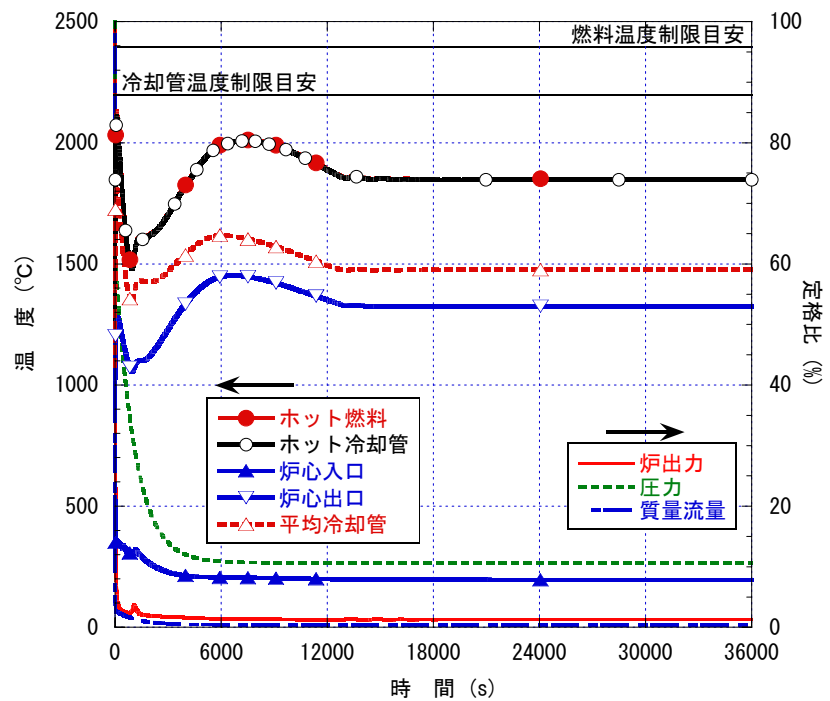


図2.5-9 実効燃焼度・Pu重量削減炉心の炉心配置図
 (炉心高さ100cm、AWS時入口温度200℃相当、
 接触熱抵抗合理化を考慮)

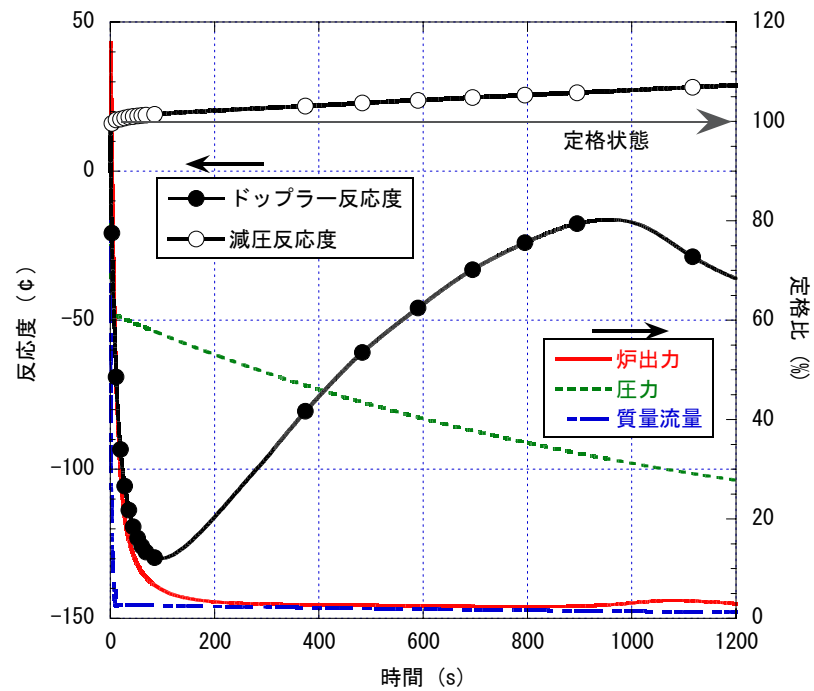


(a) 短期挙動

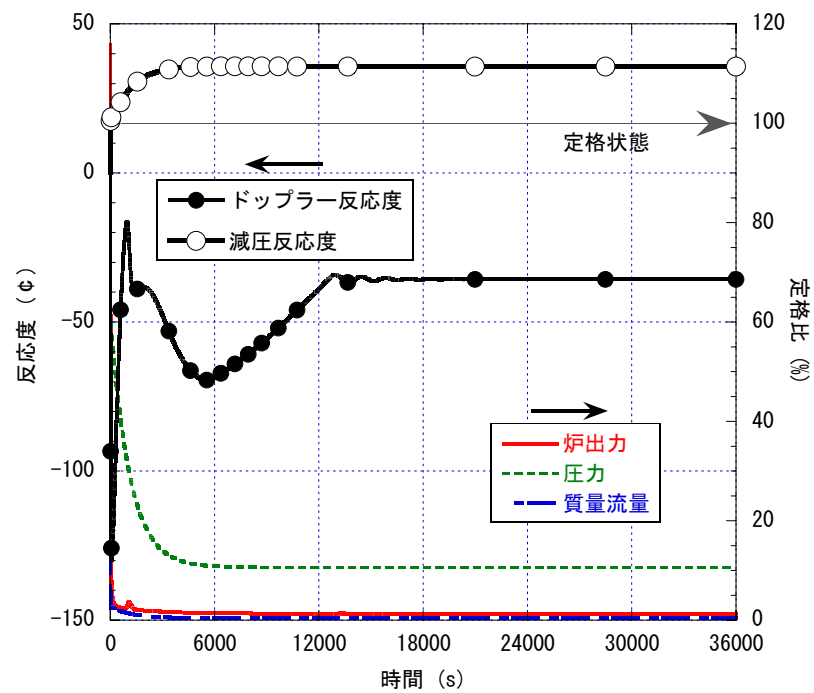


(b) 長期挙動

図2.5-10(1) 選定炉心構成に対するAWS過渡挙動評価結果
(炉心主要パラメータ)



(a) 短期挙動



(b) 長期挙動

図2.5-10(2) 選定炉心構成に対するAWS過渡挙動評価結果
(反応度パラメータ)

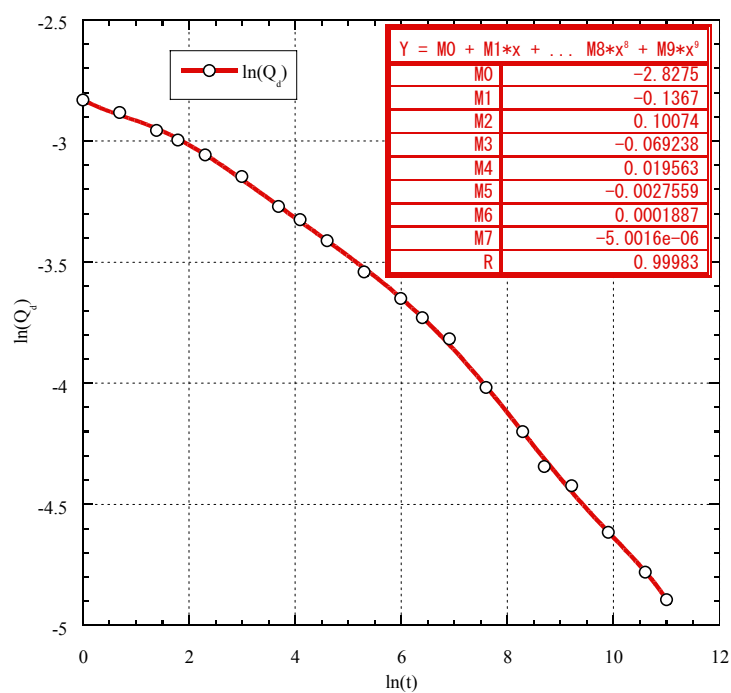


図2.6-1 崩壊熱の7次多項フィッティング式

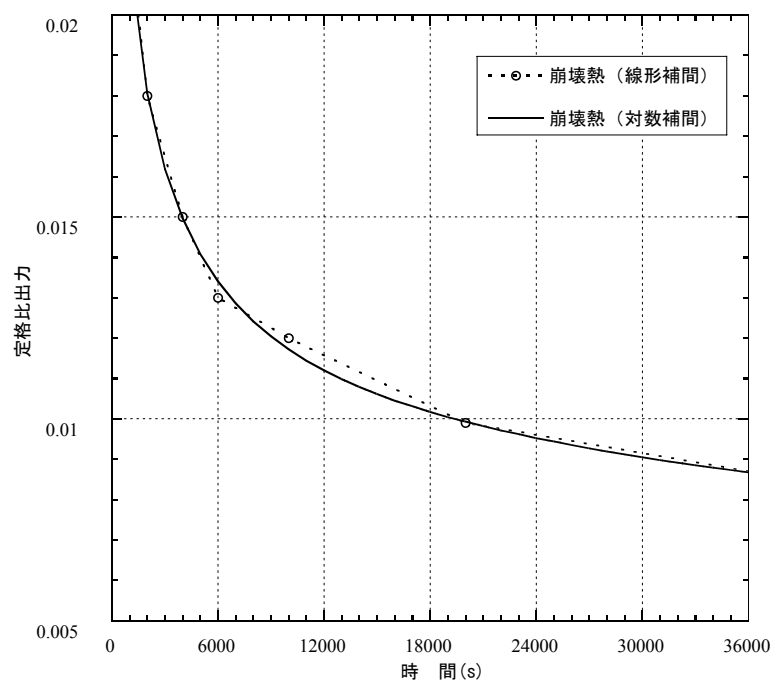


図2.6-2 線形補完および7次多項フィッティング式の差

3. レファレンス炉心特性

前章において選定候補となった炉心燃料構成に対し、ヘリウムガス冷却高速炉としての基準炉心概念設計を行う。基準炉心としては、高速炉が軽水炉に置き換わって導入される時期において高い増殖性と燃焼度を両立する炉心(以降、導入期炉心とする)、高速炉導入が完了し高速炉自体の置き換えが主となる時期において維持増殖ながら高い燃焼度を達成し経済性を向上させる炉心(以降、平衡期炉心)を構築する。出力規模は、プラント設計上の基準である 2400MWth/1124MWe(以降、110 万 kW 級)を基準とし、大出力化：3203MWth/1500MWe(以降、150 万 kW 級)の可能性検討も行う。またこれらの炉心では、燃料重金属組成として高速炉リサイクル条件のものを想定するが、多様な燃料組成に対する適応性評価の観点から、軽水炉の UO_2 使用済燃料、プルサーマル使用済燃料及びそれらの混合物から取出された TRU 組成に対し、110 万 kW 級導入期炉心を対象に、燃焼特性と動特性を評価し、設計対応可能性を評価する。炉心・安全に関する設計仕様及び達成目標を、以下に再記する。

- 炉心・プラント

- 原子炉出力 : 1124MWe、2400 MWt (熱効率 47%)
- 原子炉出入口温度 : 850°C/460°C
- 冷却材圧力 : 6 MPa
- 炉心取出平均燃焼度 : 120GWd/t
- 増殖比 : 1.1 (導入期)、1.03 (平衡期)
- 運転サイクル長さ : 18 ヶ月以上
- 炉心等価直径 : 5 m 程度 (遮へい体外接円直径で約 8m 以下)

- 安全

- DBE 時に炉心除熱性が確保されること(燃料温度 1600°C 以下)
- ATWS(UTOP 及び ULOF)において、炉心冷却が可能なこと

また設計要求事項では無いが、ガス高速炉の炉心設計を進める上で着目している

- AWS「減圧事故で能動スクラム・強制循環除熱が失敗した状況」で、自然循環により炉心が冷却されること

についても過渡解析を行い、炉心温度評価を行うこととする。

3.1. 110 万 kW 級導入期炉心及び平衡期炉心の検討

炉心形式は均質 2 領域炉心とし軸方向・径方向ブランケットを用いた設計とする。導入期炉心の概念構築を行い、その径方向ブランケットを遮へい体に置換することにより平衡期炉心を構築する。

3.1.1. 導入期炉心の構築

FBR 導入期を想定し Pu 増殖性能に比重を置いた炉心構築を目指す。炉心構成を図 3.1-1 に示す。均質 2 領域炉心で内側炉心および外側炉心からなり、周囲を径方向ブランケット 1 層、SiC 製可動反射体 1 層、 B_4C 製可動反射体 2 層が取り巻く構成である。制御棒は主炉停止系および後備炉停止系からなる。

燃料仕様を表 3.1-1 に、炉心核特性を表 3.1-2 に、動特性パラメータを表 3.1-3 にまとめた。

運転サイクル長さは18ヶ月で設計目標値を満足する。燃料交換は6バッチで、ブランケットも同様に6バッチ交換である。炉心高さ1.0mに対し炉心等価直径5.43mであり、炉心体積は約23m³、炉心平均出力密度は89MW/m³となる。燃焼集合体は内側炉心222体、外側炉心192体の合計414体である。軸方向ブランケットは上下とも厚さ25cmとH15基準炉心の30cmより低減され、本構成で増殖比要件は満足される。径方向ブランケット1層、遮へい体3層(SiC製1層、B₄C製2層)を設置した場合の遮へい体外接円径は7.59mと目標の約8m以下を満足する。即発中性子寿命は1.0x10⁻⁶sとNa炉の約3倍、遅発中性子割合は0.327%とNa炉の1割増となっているが、これらは中性子束エネルギースペクトルがNa炉より軟化していることに由来する。集合体包絡出力値を図3.1-2に、さらに局所ピーキング係数を考慮した出力値を図3.1-3に示す。内側炉心部で包絡出力が高くなっている。

制御棒は主系30体、後備系13体であり、各々冷態停止、高温待機が可能な反応度価値を有する。本炉心は、AWSでSASSを用いずに高温静定する特性を目差しているものの、後備系制御棒に対しては受動的炉停止系(SASS)設置を基本とする。制御棒反応度価値を表3.1-4に、反応度収支成立性を表3.1-5に示す。また、ワンロッドスタック評価制御棒位置を図3.1-4に、制御棒反応度価値曲線を図3.1-5に示す。制御棒吸収体スタック長は、炉心長に上下軸方向ブランケット部も加えた高さ1.5mになっている。冷態停止に要する必要反応度3.43%Δk/kk'に対し、主炉停止系反応度(ワンロッドスタック時)4.65%Δk/kk'より、(4.65-3.43)=1.22%Δk/kk'、(1.22/[β_{eff}]=0.33%)=3.7\$の余裕を持ち、1\$以上の炉停止余裕を有している。後備炉停止系(全数挿入)による制御反応度1.66%Δk/kk'は、燃焼補償・運転余裕を除く必要反応度1.55%Δk/kk'を上回っており、主系とは独立に冷態停止可能である。また高温待機に要する必要反応度0.61Δk/kk'に対し後備炉停止系反応度(ワンロッドスタック時)1.38Δk/kk'を有している。よって、制御棒反応度収支が成立していることが確認できる。制御棒リング数がH15年度設計での4から3と減少しているが、制御棒反応度収支は満足されている。この理由は、炉心が高くなり制御棒1本あたりの価値が増加したこと、燃焼欠損反応度が1.4%Δk/kk'へ減少したことによる。また制御棒吸収体スタック長150cmを炉心燃料部高さ100cmへ合理化することを考えた場合、制御棒反応度価値曲線から、1本あたりの価値は1→0.976-0.043=0.933となる。この時主系制御棒価値は4.65x0.933=4.34%Δk/kk'程度と見積もられるが、この場合でも炉停止余裕\$1以上が確保される。一方、後備系(全数挿入)では、1.66→1.55%Δk/kk'と見積もられ、必要制御棒価値もかろうじて満たされる。例えば、主系制御棒30→27本、後備系13→16本など構成を工夫することにより、主系・後備系ともにスタック長を短くしても停止余裕を確保できる可能性があり、今後の最適化検討事項と認識される。

炉心燃料仕様は、被覆粒子の燃料核直径0.86mmに対しバッファ層を含む直径1.00mmであり、それらが固相マトリクスに内蔵されている。固相マトリクス内部での被覆粒子充填率は50%としている。定常運転時のヘリウム流速100m/s以下を満足している。なお冷却管肉厚は0.76mmで、燃料集合体ピッチは241.9mmを用いている。燃料集合体内の体積比は、燃料21.0%(実効20.0%)、構造材(11.8%+42.2%=)54.0%、冷却材25.0%であり、SiC固相マトリクスにより、構造体積比が高く、冷却材体積比が低くなっている。

炉心物質収支を表 3.1-6～10 に示す。Pu 富化度は内側炉心で 22.2wt%、外側炉心で 24.0wt%となっている。炉心部取出燃焼度は 121GWd/t と設計目標 120GWd/t を満たしており、この時の全炉心取出平均燃焼度は 69GWd/t となっている。最高集合体出力は 7.31 MWt(局所ピーキング係数を考慮した場合で 7.54MWt)であり、集合体平均出力($2400\text{MWt} \times 0.981 / 414$)=5.69MWt であることから、出力ピーキング係数は 1.33 となっている。初装荷核分裂性 Pu 重量は 7.0t/GWe であり、複合システム倍増時間は 99 年と比較的長くなっている。ドップラ係数は $-11.2 \times 10^{-3} \Delta k / \Delta T$ と大きく、減圧反応度は 0.30\$と低いことから、安全上良好な特性を有することになる。

流量配分区分を図 3.1-6 に示す。炉心部への流量配分を 1 次系流量の 93% (径方向ブランケットに 5%、遮蔽体部と制御棒部に 2%を想定) とした場合の冷却材・冷却管・燃料ホットスポット温度を表 3.1-11 に示す。冷却管温度は 1193℃、燃料温度は 1468℃となる。本流配は冷却管温度を均等にするよう配分したものであるが、これは炉心設計を進める上で着目している状況(AWS)において、燃料温度ではなく冷却管温度が制限目安に達しやすいためである。UTOP など出力上昇事象では、冷却管温度とともに燃料温度に対する制限目安も着目されること、1 次系・2 次系プラント構成機器に対してはヘリウム温度が重要なことから、燃料もしくは冷却材温度分布の均等化に着目した流量配分計画も考えられ、今後の最適化検討方策の 1 つとして挙げられる。

最大発熱燃料集合体の軸方向出力分布を図 3.1-7 に示す。軸方向ブランケットを含む軸方向ピーキング係数は 1.769 となる。内側炉心および外側炉心での最大発熱集合体における軸方向温度分布を図 3.1-8 に示す。内側炉心の冷却管温度分布は炉心上端近傍で最大値に達しているが、外側炉心ではブランケット下端から高さ 100cm 近傍にピークがある。燃料温度についてはいずれも高さ 90cm にピークを持つ。

本炉心の中性子束分布(炉心中央高さ位置、上部軸ブランケット上端位置、下部軸ブランケット下端位置)を図 3.1-9 に示す。炉心中央高さ位置で生じた中性子が、制御棒フォロア一部を通り、下部および上部軸ブランケット部で集合体内部へ流れ込む様子がわかる。

本炉心については第 4 章にて、代表的な DBE 事象(減圧事故)を対象に、各種反応度係数の核的不確かさの積み重ねを考慮した上で燃料温度制限 1,600℃以下を満足することを確認する。また苛酷事象 ATWS(UTOP、ULOF)および AWS に対しても核的不確かさを考慮した解析を実施し、SASS を用いずとも燃料・被覆管温度制限目安 2,800℃、2,200℃以下を満足することを確認する。

3.1.2. 平衡期炉心の構築

導入期炉心に対し、径方向ブランケットを削減し実効平均燃焼度の向上を図った炉心構築を目指す。炉心構成を図 3.1-10 に、核計算で用いる RZ2 次元計算体系を図 3.1-11 に示す。導入期炉心に対してブランケット燃料を SiC 製可動反射体に置換えており、内側炉心および外側炉心からなる均質 2 領域炉心の周囲を、SiC 製可動反射体 2 層、B₄C 製可動反射体 2 層が取り巻く構成である。外側炉心と隣接する反射体における SiC 体積比は、炉心部と同等の 42%と設定した。

燃料仕様を表 3.1-12 に、主要な炉心核特性を表 3.1-13 に、物質収支を表 3.1-14～18 にまとめた。軸方向ブランケット厚さは上部 20cm、下部 25cm と導入期炉心に対し 5cm 削減される。これは増殖比に対する要件 1.03 が満足されるよう設定されている。運転サイクル長さ、燃料交換バッチ、炉心高さ、炉心燃料集合体数、炉心等価直径、遮へい体外接円径は導入期炉心と同じである。

炉心主要特性として、Pu 富化度は内側炉心で 22.2wt%、外側炉心で 24.0wt% となっている。炉心平均出力密度は 91MW/m³ となる。炉心部取出燃焼度は 123GWd/t と設計目標 120GWd/t を満たしている。径方向ブランケット削減により、実効平均燃焼度は 89GWd/t と導入期炉心と比較し大幅に向上している。燃焼反応度は 1.5%Δk/k' である。ドップラ係数は $-11.5 \times 10^{-3} T \Delta k / \Delta T$ 、減圧反応度は 0.30\$ と、導入期炉心と同様に良好な安全特性を示す。

3.1.3. 炉心特性改善効果の分析

H15 年度導入期炉心に対し、本検討における導入期炉心(H16 年度導入期炉心)は、炉心特性を高めながら炉心は小型化されたため、実効平均燃焼度の向上、Puf 量低減が可能となった。この特性を生じた要因について評価・分析を行う。

分析は、H15 年度炉心に対し、炉心高さを 90→100cm として H/D を改善した場合 (CaseA)、自然循環時の炉心入口温度 250℃→200℃低減方策の導入 (CaseB)、CaseB に対し出力密度の増加を図った場合 (CaseC)、CaseC に対しギャップ熱伝達の改善効果方策を導入した場合 (CaseD) とさらに炉心出力密度を高めた場合 (CaseE)、最後に増殖比を 1.14→1.10、燃料中の随伴 FP 量を 2.0→0.2%とした場合 (すなわち H16 年度導入期炉心相当) の炉心特性の変化を表 3.1-19 に示す。

これらの結果を、炉心出力密度および炉心部内部転換比との関係でまとめたものが図 4.1-12 である。炉心出力密度は炉心寸法と Pu 量に関連し、内部転換比は径ブランケット量、実効炉心燃焼度に関連していることが分かる。定量的には、炉心高さに増加による H/D 改善により、内部転換率は約 3%上昇している。自然循環時の炉心入口温度低減方策により約 2%、ギャップ熱伝達改善効果により約 2%の効果がある。これらの方策検討により、合わせて約 7%もの改善が図られたことになる。高速炉導入シナリオ検討を踏まえた増殖比設定(1.10)、および燃料再処理における FP 除去特性評価の検討結果反映(FP 混入率 2→0.2%)によっても約 3%の改善が図られている。以上の効果を合わせた約 10%の効果、炉心体積の削減および径方向ブランケットを削減に活用することにより、優れた炉心特性が生まれたこととなる。なお炉心高さの増加は、接触熱抵抗合理化と AWS 時入口温度低減の複合効果による炉心冷却特性の向上により実現したものである。

3.2. 150 万 kW 級大出力化炉心の構築

3.2.1. 導入期炉心の構築

1124MWe 級導入期炉心に対し、炉心出力密度を保ったまま、集合体数を増加させて出力増大を図る。炉心構成を図 3.2-1 に示す。1124MWe 級炉心に対し、内側炉心集合体：222→294 体、外側炉心 192→254 体、径方向ブランケット：84→96 体としており、炉心集合体数

はほぼ出力比例となっている。径方向ブランケット体数は、比例した場合の 112 体と比べ約 14%少ないが、炉心全体での増殖比は 1.1 を保っている。

燃料仕様は 1124MWe 級と同等である(図 3.2-2 参照)。主要な炉心核特性を表 3.2-1 にまとめた。軸方向ブランケット厚さは上下 25cm で同一である。制御棒本数は、炉心集合体数の増加率を若干上回る体数としており、燃焼欠損反応度：1.44%と同等なことから、反応度収支成立性は問題ないと考えられる。運転サイクル長さ、燃料交換バッチ、炉心高さは 1124MWe 級炉心と同等である。また、Pu 富化度は内側炉心、外側炉心ともに 1124MWe 級炉心と同一としているが、EOC 時の臨界性に若干の余裕があることから、Pu 富化度の合理化が可能で、これは増殖比向上に繋がる。炉心等価直径は 6.29m、遮へい体外接円径は 8.48m となる。全炉心燃焼度は、径ブランケット削減効果もあり、71GWd/t と若干向上する。新燃料集合体中の FP 重量を表 3.2-2 に、取出燃料集合体を 4 年冷却した後の重金属重量、崩壊熱、放射能を表 3.2-3、表 3.2-4、表 3.2-5 に示す。

即発中性子寿命 1.003×10^{-6} s、遅発中性子割合 0.335%は同等ながら、ドップラ係数 $-12 \times 10^{-3} \text{ T}\Delta k / \Delta T$ 、減圧反応度 0.29%は若干向上し、過渡特性の改善も見られる。

3.2.2. 平衡期炉心の構築

1500MWe 級導入期炉心に対し、ブランケット燃料を SiC 製可動反射体に置換えた構成である。炉心構成を図 3.2-3 に示す。内側炉心および外側炉心からなる均質 2 領域炉心の周囲を、SiC 製可動反射体 2 層、B₄C 製可動反射体 2 層が取り巻く構成である。

燃料仕様は 1124MWe 級平衡期炉心と同等である(図 3.2-4)。主要な炉心核特性を表 3.2-6 にまとめた。Pu 富化度、運転サイクル長さ、燃料交換バッチ、炉心高さ、軸ブランケット厚さは 1124MWe 級炉心と、炉心燃料集合体数、炉心等価直径、遮へい体外接円径は 1500MWe 級導入期炉心と同じである。実効取出燃焼度は 69GWd/t と 1124MWe 級炉心と同等であるが、これは導入期炉心とは異なり径方向ブランケット削減効果を生じないためである。

3.3. TRU 燃焼炉心の構築

FBR 導入時期に、軽水炉使用済燃料を再処理して利用する場合、MA 混入率は上記炉心特性評価で用いた高速炉多重リサイクル組成より大きくなり、核特性に影響を与える可能性が考えられる。そこで、軽水炉使用済燃料を運用する FBR 導入シナリオを想定し、TRU 組成変動に対する核特性の影響を評価し、本炉心の TRU 組成に対する柔軟性を評価する。

軽水炉燃料回収の TRU 組成ケースは、FBR 導入シナリオに基づき 3 ケースを想定した。組成 A は、軽水炉プルサーマル運用を FBR 本格導入前に中断するシナリオで、30 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料から回収した TRU と、20 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料から回収した TRU を 9:1 で混合した燃料である(以下、2050 年 L 再とする)。組成 B は、40 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料から回収した TRU と FBR 使用済燃料から回収した TRU を 1:1 で混合した燃料である(以下、2060 年 F 再とする)。組成 C は、軽水炉プルサーマル運用を JMOX 廃止まで継続するシナリオで、110 年貯蔵したプルサーマル使用済燃料と 90 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料と 40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料から回収した

TRU を 0.5:1.9:7.6 で混合した燃料である(以下、2150 年 L 再とする)。検討対象とした TRU 組成条件を表 3.3-1 にまとめる。

3 つの TRU 組成ケースについて、核特性の影響を評価した結果を、高速炉多重リサイクル組成と比較の場合と比較して表 3.3-2 に示した。

燃焼反応度評価結果については、高速炉多重リサイクルケース(MA 混入率 1.1 %) で 1.4 % $\Delta k/k'$ であるのに対し、軽水炉燃料回収の TRU 組成では 0.1~0.6 % $\Delta k/k'$ に減少した。増殖比は、高速炉多重リサイクルの 1.11 に対し、軽水炉燃料回収の TRU 組成では 1.11~1.15 と、若干ながら高速炉多重リサイクルより向上した。減圧反応度については、高速炉多重リサイクルの 0.3 \$ に対し、軽水炉燃料回収の TRU 組成では 0.35~0.40 \$ となった。なお遅発中性子割合は、遅発中性子親核種を TRU 全核種(16 種)とし摂動計算により求めている。ドップラ係数(Tdk/dT)については、高速炉多重リサイクルケースの -11.2×10^{-3} に対し、軽水炉燃料回収の TRU 組成では -7.4×10^{-3} ~ -8.8×10^{-3} と絶対値が減少している。

以上より、MA 組成比が増加した場合の燃焼特性に対する影響は有意ながら、その程度は小さく、炉心設計の設計対応により成立性を確保可能な範囲にあると考えられる。一方、安全特性(ボイド反応度、ドップラ係数)は若干厳しくなる傾向を有しており、詳細な過渡解析を通じた対応可能性評価が必要ではあるが、炉心特性の改善や安全保護系での対応が見込める範囲にある。すなわち、本炉心は様々な TRU 組成燃料の受入に関し柔軟性を有すると考えられる。

3.4. 炉心検討のまとめ

炉心特性の改善方策を採りこんだ炉心・燃料構成に対し、110 万 kW 級および 150 万 kW 級の導入期炉心、平衡期炉心を構築した。実効取出燃焼度が H15 年度炉心(55GWd/t)から 69~71GWd/t と大幅に改善するとともに、Puf 量が 8→7t/GWe と低減されており、FBR 導入シナリオにおいてより魅力を高めた炉心概念が構築できた。なお H15 年度 110 万 kW 級炉心から H16 年度 150 万 kW 級炉心に大型化した場合でも、諸改善策適用により、遮蔽体外接円径は約 8.2→約 8.5m の増加に収まっている。また TRU 組成変動に対する適応性を評価し、設計対応可能な範囲にある見通しが得られた。

表 3.1- 1 導入期炉心の燃料仕様

項 目			炉心	軸ブラ	径ブラ
燃 料	被覆粒子燃料形態		(U,TRU)N 核 TiN バッファ層	UN 核 ←	← ←
	燃料核外径		0.86mm	0.93mm	←
	バッファ層外径		1.00mm	←	←
	バッファ層肉厚		0.07mm	0.035mm	←
	被覆粒子充填率		50%	←	←
	スミア密度（燃料核/バッファ層）		95/50%TD	←	←
	ブロック燃料体形態		SiC 固相マトリ クス/SiC 冷却管	←	←
	固相マトリクス充填率		50%	←	←
	冷却管内径		15.17mm	←	←
	冷却管外径		16.69mm	←	←
	冷却管肉厚		0.76mm	←	←
	スミア密度（固相マトリクス/冷却管）		100/100%TD	←	←
	燃料要素全長		1500mm	←	←
	燃料スタック長		1000mm	250mm×2	1500mm
集 合 体	冷却管本数		61 本	←	←
	冷却管配列ピッチ		29.75mm	←	←
	冷却管配列ピッチ/内径比		1.96	←	←
	ラップ管材料		SiC	←	←
	ラップ管外対面距離		237.9mm	←	←
	ラップ管内対面距離		231.9mm	←	←
	ラップ管肉厚		3.0mm	←	←
	ラップ管間ギャップ		4.0mm	←	←
	集合体配列ピッチ		241.9mm	←	←
	体積割合	燃料	21.0%	26.7%	←
		(実効)	20.0%	25.4%	←
		被覆材	11.8%	6.1%	←
		構造材	42.2%	←	←
		冷却材	25.0%	←	←
		(流路面積)	21.8%	←	←

表 3.1- 2 導入期炉心の主要核特性

項 目		基準炉心
基本条件・炉心構成	原子炉熱出力	2,400MWt
	電気出力	1,124MWe
	炉心形式	均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ	18 ヶ月 (548 日)
	燃料交換バッチ数 (炉心/径ブラ)	6 / 6 バッチ
	炉心高さ	100 cm
	炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心)	414(222/192)体
	径方向ブランケット燃料集合体数	84 体 (1 層)
	制御棒本数	43 体
	径方向遮へい体数 (SiC)	288 体 (3 層)
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	25/25cm
	体積比 (燃料/被覆材/構造材/冷却材)	炉心 21.0/11.8/42.2/25.0%
	ブランケット	26.7/ 6.1/42.2/25.0%
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	5.43m / 7.59m
主要炉心特性	Pu 富化度[Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	22.2 / 24.0
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)	
	炉心/軸ブラ/径ブラ	121.0/26.7/6.2
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	69.3
	燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/k'$)	1.44
	増殖比	平衡平均 1.107
	炉心/軸ブラ/径ブラ	0.709/0.326/0.072
	最大出力密度 *1 (W/cc) (内側/外側)	166 / 161
	出力分担率(%)	
	炉心/軸ブラ/径ブラ	平衡初期 87.5/10.9/1.5
		平衡末期 84.8/13.3/1.9
	炉心平均出力密度 (W/cc)	平衡平均 89.3
	装荷時重金属インベントリ (t)	
	炉心/軸ブラ/径ブラ	56.2/35.8/21.8
	ブランケット対炉心重量比	約 1.0
	初装荷核分裂性 Pu 重量(t/GWe)	7.0
	減圧反応度(\$)*2	平衡末期 0.30
	ドップラ係数($-1 \times 10^{-3} Tdk/dT$)*3	平衡末期
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	11.2/2.2/1.6/0.3
	原子炉倍增時間/複合システム倍增時間(年)*4	76.9 / 88.8

*1 燃焼ミスマッチファクタ考慮した 3 次元 Tri-Z 計算結果。

*2 制御棒領域 (フォロア、吸収体) を除く全ての領域をボイド化、 $\beta = 0.003275$ 。

*3 燃料物質の温度を 500℃昇温。

*4 炉外滞在期間 5 年、燃交・定検期間 45 日。

表 3.1- 3 導入期炉心の動特性パラメータ

項 目		平衡サイクル末期
即発中性子寿命 (10^{-6} sec)		0.955
遅発中性子割合 *	$\beta 1$	7.48E-05
	$\beta 2$	6.89E-04
	$\beta 3$	6.06E-04
	$\beta 4$	1.19E-03
	$\beta 5$	5.50E-04
	$\beta 6$	1.60E-04
	$\beta \text{ eff}$	3.27E-03
遅発中性子崩壊定数 (s^{-1})	$\lambda 1$	1.30E-02
	$\lambda 2$	3.13E-02
	$\lambda 3$	1.35E-01
	$\lambda 4$	3.47E-01
	$\lambda 5$	1.40E+00
	$\lambda 6$	3.81E+00

(注記)炉心部及びブランケットの合計値

* 遅発中性子割合内訳

炉心部	2.96E-03
軸方向ブランケット部	2.89E-04
径方向ブランケット部	2.67E-05
合計	3.27E-03

表 3.1- 4 導入期炉心の制御棒価値

[単位：%Δk/kk']

項 目	主炉停止系 (1 ロッド`スタック) *3	後備炉停止系	全数挿入
		1 ロッド`スタック *3	
ノミナル値 *1	5.11	1.52	1.83
予測誤差考慮 *2	4.65	1.38	1.66

*1 下記の補正係数を考慮した値

群縮約効果	0.97
ランピング(吸収体中心偏在)効果	0.77
輸送効果	0.96
メッシュ補正	1.07
合 計	0.77

Na 冷却高速炉・実証炉
最適化設計研究
に適用した値

*2 制御棒価値予測誤差(3σ) 9 %

*3 ワンロッドスタック時の反応度は、全数挿入時の解析値が補正係数を考慮したノミナル値と一致するように B₄C を希釈（主炉停止系 46.1%、後備炉停止系 43.0%）した条件で評価

表 3.1- 5 導入期炉心の制御反応度収支

[単位：％ $\Delta k/kk'$]

項 目	主炉停止系 (1 ロット [※] スタック)	後備炉停止系	
		1 ロット [※] スタック	全数挿入
(1) 計画余剰反応度	3.73	0.41	1.19
a. 出力補償 ^{*1}	1.19	0.41	1.19
b. 燃焼補償 ^{*2}	1.64	—	—
c. 運転余裕	0.20	—	—
(2) 余剰反応度の不確かさ (2 σ)	0.40	0.08	0.24
a. 臨界性予測誤差	0.00	-	-
b. 出力補償予測誤差	-	0.08	0.24
c. 燃料製作公差	0.32	-	-
d. 燃料交換余裕	0.20	-	-
(3) 事故時投入反応度 ^{*3}	—	0.12	0.12
(4) 必要制御反応度 [(1)+(2)+(3)]	3.43	0.61	1.55
(5) 制御棒価値	4.65	1.38	1.66
(6) 反応度停止余裕 [(5)-(4)]	1.22	0.77	0.11

^{*1} 炉心領域温度（燃料、構造材、冷却材）が 757℃から 110℃（低温停止）、460℃（温態待機）に変化した場合のドップラ反応度

^{*2} 燃料組成変動等燃焼反応度の不確かさとして 0.2% $\Delta k/kk'$ を考慮
（燃焼反応度の不確かさは実証炉最適化設計研究を参考に燃焼反応度の 10%で設定）

^{*3} 制御棒中途挿入（定格）状態から最大価値制御棒を 1 本誤引抜したときの評価値

表 3.1- 6 導入期炉心の燃料インベントリ
[初装荷炉心]

核種	重 量 (kg)					
	炉心部			軸方向 ブランケット	径方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
U-235	69.4	58.6	128.0	107.4	65.4	300.8
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	23061.9	19461.6	42523.5	35706.8	21734.6	99964.9
U 合計	23131.3	19520.2	42651.5	35814.2	21800.0	100265.7
Pu-238	77.1	72.0	149.1	0.0	0.0	149.1
Pu-239	3790.2	3540.8	7330.9	0.0	0.0	7330.9
Pu-240	2248.8	2100.9	4349.7	0.0	0.0	4349.7
Pu-241	301.2	281.4	582.7	0.0	0.0	582.7
Pu-242	273.2	255.2	528.5	0.0	0.0	528.5
Pu 合計	6690.5	6250.3	12940.8	0.0	0.0	12940.8
Am-241	140.1	130.9	271.0	0.0	0.0	271.0
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	70.1	65.4	135.5	0.0	0.0	135.5
Am 合計	210.2	196.3	406.5	0.0	0.0	406.5
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	70.1	65.4	135.5	0.0	0.0	135.5
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	70.1	65.4	135.5	0.0	0.0	135.5
Np-237	35.0	32.7	67.8	0.0	0.0	67.8
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np 合計	35.0	32.7	67.8	0.0	0.0	67.8
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	0.0	59.9
ランプ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	32.1	27.8	59.9	0.0	0.0	59.9
合 計	30169.2	26092.7	56261.9	35814.2	21800.0	113876.1

表 3.1- 7 導入期炉心の燃料インベントリ
[平衡初期炉心]

核種	重 量 (kg)					
	炉心部			軸方向 ブランケット	径方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
U-235	42.6	44.0	86.6	77.6	56.7	220.9
U-236	5.6	3.2	8.7	7.0	2.2	17.9
U-238	21384.6	18653.8	40038.4	34422.3	21458.8	95919.5
U 合計	21432.8	18700.9	40133.7	34506.9	21517.7	96158.3
Pu-238	92.9	83.7	176.6	0.8	0.1	177.5
Pu-239	3398.7	3257.4	6656.1	886.1	224.3	7766.5
Pu-240	2270.0	2113.5	4383.5	86.7	11.0	4481.2
Pu-241	344.0	290.8	634.8	13.3	2.0	650.0
Pu-242	265.6	249.2	514.8	0.9	0.1	515.7
Pu 合計	6371.3	5994.5	12365.8	987.7	237.4	13591.0
Am-241	132.6	143.2	275.7	1.0	0.2	276.9
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	7.2	5.1	12.3	0.0	0.0	12.3
Am-243	73.1	67.2	140.3	0.1	0.0	140.4
Am 合計	212.9	215.5	428.3	1.1	0.2	429.6
Cm-242	6.4	3.9	10.3	0.1	0.0	10.4
Cm-243	0.6	0.2	0.8	0.0	0.0	0.8
Cm-244	78.2	69.7	147.9	0.0	0.0	147.9
Cm-245	9.1	5.4	14.5	0.0	0.0	14.5
Cm 合計	94.2	79.3	173.5	0.1	0.0	173.6
Np-237	28.3	28.5	56.7	3.0	0.5	60.3
Np-239	2.9	1.4	4.3	2.4	0.5	7.3
Np 合計	31.2	29.9	61.1	5.4	1.1	67.6
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	0.0	59.9
ランプ化FP	1984.1	1040.4	3024.5	314.8	44.5	3383.8
FP合計	2016.2	1068.2	3084.3	314.8	44.5	3443.6
合 計	30158.5	26088.3	56246.8	35816.1	21800.9	113863.8

表 3.1- 8 導入期炉心の燃料インベントリ
[平衡末期炉心]

核種	重 量 (kg)					
	炉心部			軸方向 ブランケット	径方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
U-235	34.1	38.9	73.0	67.6	53.5	194.0
U-236	7.2	4.2	11.4	9.2	3.0	23.6
U-238	20737.4	18338.6	39076.0	33917.7	21348.9	94342.6
U 合計	20778.7	18381.7	39160.4	33994.5	21405.3	94560.2
Pu-238	98.6	88.6	187.2	1.4	0.1	188.8
Pu-239	3258.0	3154.4	6412.4	1177.1	305.8	7895.3
Pu-240	2268.8	2114.3	4383.1	132.3	17.2	4532.6
Pu-241	356.2	293.5	649.7	22.5	3.5	675.7
Pu-242	263.4	247.0	510.4	1.7	0.1	512.2
Pu 合計	6244.9	5897.9	12142.8	1335.0	326.8	13804.6
Am-241	130.9	147.8	278.7	1.9	0.3	281.0
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	9.2	6.9	16.1	0.1	0.0	16.2
Am-243	74.1	67.8	141.9	0.3	0.0	142.2
Am 合計	214.3	222.5	436.7	2.3	0.3	439.4
Cm-242	7.7	4.8	12.5	0.1	0.0	12.6
Cm-243	0.8	0.3	1.1	0.0	0.0	1.1
Cm-244	81.2	71.3	152.5	0.1	0.0	152.6
Cm-245	12.1	7.3	19.4	0.0	0.0	19.4
Cm 合計	101.8	83.7	185.5	0.2	0.0	185.7
Np-237	26.0	27.0	53.0	4.1	0.8	57.9
Np-239	3.4	1.7	5.1	2.9	0.7	8.7
Np 合計	29.5	28.7	58.2	7.0	1.4	66.5
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	0.0	59.9
ランプ化FP	2752.4	1444.0	4196.4	477.5	67.2	4741.1
FP合計	2784.5	1471.8	4256.3	477.5	67.2	4801.0
合 計	30153.5	26086.3	56239.8	35816.4	21801.1	113857.4

表 3.1- 9 導入期炉心の燃料インベントリ
[平衡サイクル取替燃料 (1 バッチ)]

核種	重 量 (kg)					
	炉心部			軸方向 ブランケット	径方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
U-235	11.6	9.8	21.3	17.9	10.9	50.1
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	3843.7	3243.6	7087.3	5951.1	3622.4	16660.8
U 合計	3855.2	3253.4	7108.6	5969.0	3633.3	16710.9
Pu-238	12.8	12.0	24.8	0.0	0.0	24.8
Pu-239	631.7	590.1	1221.8	0.0	0.0	1221.8
Pu-240	374.8	350.1	724.9	0.0	0.0	724.9
Pu-241	50.2	46.9	97.1	0.0	0.0	97.1
Pu-242	45.5	42.5	88.1	0.0	0.0	88.1
Pu 合計	1115.1	1041.7	2156.8	0.0	0.0	2156.8
Am-241	23.4	21.8	45.2	0.0	0.0	45.2
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	11.7	10.9	22.6	0.0	0.0	22.6
Am 合計	35.0	32.7	67.8	0.0	0.0	67.8
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	11.7	10.9	22.6	0.0	0.0	22.6
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	11.7	10.9	22.6	0.0	0.0	22.6
Np-237	5.8	5.5	11.3	0.0	0.0	11.3
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np 合計	5.8	5.5	11.3	0.0	0.0	11.3
随伴FP(Nd)	5.3	4.6	10.0	0.0	0.0	10.0
ランプ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	5.3	4.6	10.0	0.0	0.0	10.0
合 計	5028.2	4348.8	9377.0	5969.0	3633.3	18979.4

表 3.1-10 導入期炉心の燃料インベントリ
[平衡サイクル取出燃料 (1 バッチ)]

核種	重 量 (kg)					
	炉心部			軸方向 ブランケット	径方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計			
U-235	3.0	4.7	7.7	7.8	7.7	23.3
U-236	1.6	1.0	2.7	2.2	0.8	5.7
U-238	3196.5	2928.4	6124.9	5446.5	3512.5	15083.9
U 合計	3201.1	2934.2	6135.3	5456.6	3521.0	15112.8
Pu-238	18.5	16.9	35.4	0.6	0.1	36.1
Pu-239	491.0	487.1	978.1	291.0	81.5	1350.6
Pu-240	373.5	351.0	724.5	45.6	6.2	776.3
Pu-241	62.4	49.6	112.0	9.3	1.6	122.8
Pu-242	43.3	40.4	83.7	0.8	0.1	84.5
Pu 合計	988.7	945.0	1933.7	347.3	89.4	2370.4
Am-241	21.7	26.5	48.2	0.9	0.2	49.3
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	2.1	1.8	3.8	0.0	0.0	3.9
Am-243	12.7	11.5	24.2	0.1	0.0	24.3
Am 合計	36.4	39.8	76.2	1.1	0.2	77.5
Cm-242	1.3	0.9	2.1	0.1	0.0	2.2
Cm-243	0.2	0.1	0.3	0.0	0.0	0.3
Cm-244	14.7	12.5	27.3	0.1	0.0	27.3
Cm-245	3.0	1.9	4.9	0.0	0.0	4.9
Cm 合計	19.2	15.4	34.6	0.1	0.0	34.7
Np-237	3.6	4.0	7.6	1.1	0.2	8.9
Np-239	0.5	0.3	0.8	0.5	0.1	1.4
Np 合計	4.1	4.2	8.4	1.6	0.3	10.3
随伴FP(Nd)	5.3	4.6	10.0	0.0	0.0	10.0
ランプ化FP	768.3	403.6	1171.9	162.7	22.7	1357.3
FP合計	773.6	408.2	1181.9	162.7	22.7	1367.3
合 計	5023.2	4346.8	9370.0	5969.4	3633.6	18973.0

表 3.1-11 導入期炉心の炉心流量配分及び熱流特性

領域	流量領域		出力		流量配分*1		各部最高温度(°C;ホットスポット)		
	No.	集合体数	対象集合体 出力(MW)	集合体内 ピーキング	集合体流量 (kg/s)	領域流量 (kg/s)	冷却材	冷却管 (肉厚中心)	燃料
内側炉心	1	96	7.34	1.027	3.08	295.7	1007	1192	1450
	2	54	6.71	1.068	2.88	155.5	1015	1191	1468
	3	48	6.54	1.031	2.71	130.1	1017	1193	1456
	4	24	6.37	1.004	2.57	61.7	1018	1193	1444
	小計	222	—	—	—	643.0	—	—	—
外側炉心	5	90	6.68	1.025	2.79	251.1	1010	1192	1454
	6	48	4.63	1.193	2.28	109.4	1005	1191	1387
	7	18	3.93	1.245	1.95	35.1	1019	1193	1390
	8	36	3.16	1.300	1.70	61.2	1005	1193	1327
	小計	192	—	—	—	456.8	—	—	—
合計		414	—	—	—	456.8	—	—	—

*1:炉心燃料集合体に配分可能な流量=1102.2kg/s(1 次系全流量の 93%)

表 3.1- 12 平衡期炉心の燃料仕様

項 目		炉心	軸ブラ
燃 料	被覆粒子燃料形態	(U,TRU)N 核 TiN バッファ層	UN 核 ←
	燃料核外径	0.86mm	0.93mm
	バッファ層外径	1.00mm	←
	バッファ層肉厚	0.07mm	0.035mm
	被覆粒子充填率	50%	←
	スミア密度 (燃料核/バッファ層)	95/50%TD	←
	ブロック燃料体形態	SiC 固相マトリクス /SiC 冷却管	←
	固相マトリクス充填率	50%	←
	冷却管内径	15.17mm	←
	冷却管外径	16.69mm	←
	冷却管肉厚	0.76mm	←
	スミア密度 (固相マトリクス/冷却管)	100/100%TD	←
	燃料要素全長	1500mm	←
	燃料スタック長	1000mm	200/250mm
集 合 体	冷却管本数	61 本	←
	冷却管配列ピッチ	29.75mm	←
	冷却管配列ピッチ/内径比	1.96	←
	ラッパ管材料	SiC	←
	ラッパ管外対面距離	237.9mm	←
	ラッパ管内対面距離	231.9mm	←
	ラッパ管肉厚	3.0mm	←
	ラッパ管間ギャップ	4.0mm	←
	集合体配列ピッチ	241.9mm	←
	体積割合	燃料	21.0%
		(実効)	20.0%
		被覆材	11.8%
		構造材	42.2%
		冷却材	25.0%
		(流路面積)	21.8%
			←
			←

表 3.1- 13 平衡期炉心の主要核特性

項 目		平衡期炉心	導入期炉心
基本条件・炉心構成	原子炉熱出力	2,400MWt	←
	電気出力	1,124MWe	←
	炉心形式	均質 2 領域炉心	←
	運転サイクル長さ	18 ヲ月 (548 日)	←
	燃料交換バッチ数	6 バッチ	←
	炉心高さ	100 cm	←
	炉心燃料集合体数(内側炉心/外側炉心)	414(222/192)体	←
	径方向ブランケット燃料集合体数	-	84 体 (1 層)
	制御棒本数	43 体	←
	径方向遮へい体数 (SiC)	372 体 (4 層)	288 体 (3 層)
	軸方向ブランケット厚 (上/下)	20/25cm	25/25cm
	体積比 炉心 (燃料/被覆材/構造材/冷却材) ブランケット	21.0/11.8/42.2/25.0% 26.7/ 6.1/42.2/25.0%	← ←
	炉心等価直径 / 遮へい体外接円径	5.43m / 7.59m	←
主要炉心特性	Pu 富化度[Pu/HM] (wt%) (内側/外側)	22.1 / 23.6	22.2 / 24.0
	炉心取出平均燃焼度 (GWd/t)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ	123.4/29.7/-	121.0/26.7/6.2
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	89.2	69.3
	燃焼欠損反応度 (% Δ k/k')	1.49	1.44
	増殖比 平衡平均	1.033	1.107
	炉心/軸ブラ/径ブラ	0.723/0.310/-	0.709/0.326/0.072
	最大出力密度 *2 (W/cc) (内側/外側)	165 / 162	166 / 161
	出力分担率(%)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ 平衡初期	89.0/11.0/-	87.5/10.9/1.5
	平衡末期	86.7/13.3/-	84.8/13.3/1.9
	炉心平均出力密度 (W/cc) 平衡平均	91.1	89.3
	装荷時重金属インベントリ (t)		
	炉心/軸ブラ/径ブラ	56.2/32.2/-	56.2/35.8/21.8
	ブランケット対炉心重量比	約 0.6	約 1.0
	初装荷核分裂性 Pu 重量(t/GWe)	7.0	7.0
	減圧反応度 (\$) *3 平衡末期	0.30	0.30
	ドップラ係数(-1×10 ⁻³ Tdk/dT) *4 平衡末期		
	炉心/下部軸ブラ/上部軸ブラ/径ブラ	11.5/2.2/1.5/-	11.2/2.2/1.6/0.3

*1 外側炉心隣接径遮へい体の SiC 割合を 42.2%(径ブラ燃料と同じ)に変更

*2 3 次元計算結果、ただし平衡期炉心は導入期炉心の 3 次元効果を用い 2 次元 RZ 計算結果を補正した値

*3 制御棒領域(フォロア、吸収体)を除く全ての領域をボイド化、β=0.003275(導入期炉心の値)

*4 燃料物質の温度を 500℃昇温

表 3.1- 14 平衡期炉心の燃料インベントリ
[初装荷炉心]

核種	重 量 (kg)				
	炉心部			軸方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計		
U-235	69.5	58.9	128.4	96.7	225.1
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-238	23084.1	19578.5	42662.6	32136.2	74798.8
U 合計	23153.6	19637.4	42791.0	32232.9	75023.9
Pu-238	76.8	70.7	147.5	0.0	147.5
Pu-239	3778.3	3477.3	7255.5	0.0	7255.5
Pu-240	2241.8	2063.2	4305.0	0.0	4305.0
Pu-241	300.3	276.4	576.7	0.0	576.7
Pu-242	272.4	250.7	523.0	0.0	523.0
Pu 合計	6669.5	6138.2	12807.8	0.0	12807.8
Am-241	139.7	128.5	268.2	0.0	268.2
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	69.8	64.3	134.1	0.0	134.1
Am 合計	209.5	192.8	402.3	0.0	402.3
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	69.8	64.3	134.1	0.0	134.1
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	69.8	64.3	134.1	0.0	134.1
Np-237	34.9	32.1	67.1	0.0	67.1
Np-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Np 合計	34.9	32.1	67.1	0.0	67.1
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	59.9
ランプ化FP	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FP合計	32.1	27.8	59.9	0.0	59.9
合 計	30169.4	26092.6	56262.1	32232.9	88495.0

表 3.1- 15 平衡期炉心の燃料インベントリ
[平衡初期炉心]

核種	重 量 (kg)				
	炉心部			軸方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計		
U-235	42.6	43.4	85.9	67.9	153.8
U-236	5.6	3.4	9.0	6.7	15.7
U-238	21397.7	18724.1	40121.8	30910.9	71032.7
U 合計	21445.8	18770.9	40216.7	30985.5	71202.2
Pu-238	92.7	83.7	176.4	0.9	177.3
Pu-239	3390.8	3180.1	6570.9	824.4	7395.3
Pu-240	2263.7	2080.4	4344.1	86.3	4430.4
Pu-241	343.5	292.3	635.7	14.7	650.4
Pu-242	264.8	244.1	508.9	1.0	509.9
Pu 合計	6355.4	5880.6	12236.1	927.3	13163.4
Am-241	131.9	138.1	270.0	1.1	271.1
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	7.2	5.4	12.5	0.0	12.6
Am-243	72.9	66.8	139.7	0.1	139.9
Am 合計	212.0	210.3	422.3	1.3	423.6
Cm-242	6.4	4.2	10.6	0.1	10.7
Cm-243	0.6	0.3	0.9	0.0	0.9
Cm-244	78.0	69.3	147.3	0.0	147.4
Cm-245	9.1	5.9	15.0	0.0	15.0
Cm 合計	94.1	79.7	173.8	0.1	173.9
Np-237	28.2	27.6	55.8	2.9	58.7
Np-239	2.9	1.5	4.4	2.3	6.8
Np 合計	31.1	29.1	60.2	5.2	65.4
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	59.9
ランプ化FP	1988.2	1089.5	3077.7	315.0	3392.7
FP合計	2020.3	1117.3	3137.6	315.0	3452.6
合 計	30158.8	26088.0	56246.7	32234.4	88481.1

表 3.1- 16 平衡期炉心の燃料インベントリ
[平衡末期炉心]

核種	重 量 (kg)				
	炉心部			軸方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計		
U-235	34.0	38.0	72.0	58.2	130.2
U-236	7.2	4.5	11.7	8.8	20.6
U-238	20746.4	18390.8	39137.2	30429.5	69566.7
U 合計	20787.6	18433.3	39220.9	30496.6	69717.5
Pu-238	98.3	89.1	187.5	1.5	189.0
Pu-239	3251.2	3072.4	6323.7	1091.3	7415.0
Pu-240	2262.7	2082.5	4345.2	131.0	4476.2
Pu-241	355.7	297.1	652.9	24.8	677.7
Pu-242	262.6	241.9	504.4	1.9	506.3
Pu 合計	6230.6	5783.0	12013.6	1250.5	13264.1
Am-241	130.2	141.9	272.1	2.1	274.2
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242m	9.2	7.2	16.4	0.1	16.5
Am-243	73.9	67.7	141.6	0.3	141.9
Am 合計	213.3	216.8	430.1	2.5	432.6
Cm-242	7.7	5.1	12.9	0.1	13.0
Cm-243	0.8	0.4	1.2	0.0	1.2
Cm-244	81.0	71.3	152.4	0.1	152.5
Cm-245	12.1	7.9	20.0	0.0	20.0
Cm 合計	101.6	84.8	186.4	0.3	186.7
Np-237	25.9	26.0	52.0	3.9	55.9
Np-239	3.5	1.8	5.3	2.7	8.0
Np 合計	29.4	27.8	57.2	6.7	63.9
随伴FP(Nd)	32.1	27.8	59.9	0.0	59.9
ランプ化FP	2759.1	1512.4	4271.5	477.9	4749.4
FP合計	2791.2	1540.2	4331.4	477.9	4809.3
合 計	30153.7	26085.9	56239.6	32234.5	88474.1

表 3.1- 17 平衡期炉心の燃料インベントリ
[平衡サイクル取替燃料 (1 バッチ)]

核種	重 量 (kg)				
	炉心部			軸方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計		
U-235	11. 6	9. 8	21. 4	16. 1	37. 5
U-236	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
U-238	3847. 4	3263. 1	7110. 4	5356. 0	12466. 5
U 合計	3858. 9	3272. 9	7131. 8	5372. 1	12504. 0
Pu-238	12. 8	11. 8	24. 6	0. 0	24. 6
Pu-239	629. 7	579. 5	1209. 3	0. 0	1209. 3
Pu-240	373. 6	343. 9	717. 5	0. 0	717. 5
Pu-241	50. 1	46. 1	96. 1	0. 0	96. 1
Pu-242	45. 4	41. 8	87. 2	0. 0	87. 2
Pu 合計	1111. 6	1023. 0	2134. 6	0. 0	2134. 6
Am-241	23. 3	21. 4	44. 7	0. 0	44. 7
Am-242	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Am-242m	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Am-243	11. 6	10. 7	22. 4	0. 0	22. 4
Am 合計	34. 9	32. 1	67. 1	0. 0	67. 1
Cm-242	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Cm-243	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Cm-244	11. 6	10. 7	22. 4	0. 0	22. 4
Cm-245	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Cm 合計	11. 6	10. 7	22. 4	0. 0	22. 4
Np-237	5. 8	5. 4	11. 2	0. 0	11. 2
Np-239	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Np 合計	5. 8	5. 4	11. 2	0. 0	11. 2
随伴FP(Nd)	5. 3	4. 6	10. 0	0. 0	10. 0
ランプ化FP	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
FP合計	5. 3	4. 6	10. 0	0. 0	10. 0
合 計	5028. 2	4348. 8	9377. 0	5372. 1	14749. 2

表 3.1- 18 平衡期炉心の燃料インベントリ
[平衡サイクル取出燃料 (1 バッチ)]

核種	重 量 (kg)				
	炉心部			軸方向 ブランケット	合 計
	内側炉心	外側炉心	合計		
U-235	3. 0	4. 5	7. 5	6. 5	14. 0
U-236	1. 6	1. 1	2. 7	2. 1	4. 8
U-238	3196. 1	2929. 8	6125. 8	4874. 6	11000. 5
U 合計	3200. 7	2935. 4	6136. 0	4883. 2	11019. 2
Pu-238	18. 5	17. 2	35. 7	0. 6	36. 3
Pu-239	490. 1	471. 9	962. 0	266. 9	1228. 9
Pu-240	372. 6	345. 9	718. 6	44. 7	763. 3
Pu-241	62. 3	50. 9	113. 3	10. 1	123. 4
Pu-242	43. 2	39. 5	82. 7	0. 9	83. 6
Pu 合計	986. 7	925. 4	1912. 2	323. 2	2235. 4
Am-241	21. 5	25. 2	46. 7	1. 0	47. 8
Am-242	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0	0. 0
Am-242m	2. 1	1. 8	3. 9	0. 0	3. 9
Am-243	12. 7	11. 6	24. 3	0. 2	24. 4
Am 合計	36. 2	38. 6	74. 9	1. 2	76. 1
Cm-242	1. 3	0. 9	2. 2	0. 1	2. 3
Cm-243	0. 2	0. 1	0. 3	0. 0	0. 3
Cm-244	14. 7	12. 7	27. 4	0. 1	27. 4
Cm-245	3. 0	2. 1	5. 1	0. 0	5. 1
Cm 合計	19. 2	15. 8	34. 9	0. 1	35. 1
Np-237	3. 6	3. 8	7. 4	1. 1	8. 4
Np-239	0. 5	0. 3	0. 8	0. 4	1. 3
Np 合計	4. 1	4. 1	8. 2	1. 5	9. 7
随伴FP(Nd)	5. 3	4. 6	10. 0	0. 0	10. 0
ランプ化FP	770. 9	422. 9	1193. 8	162. 9	1356. 7
FP合計	776. 2	427. 5	1203. 7	162. 9	1366. 7
合 計	5023. 2	4346. 7	9369. 9	5372. 2	14742. 2

表 3.1-19 各種要因と主要核特性の関係

項目	H15 リアレンス炉心	Case A	Case B	Case C	Case D	Case E	H16 リアレンス炉心
基本条件・炉心構成	白熱循環時入口温度(°C)	←	200	←	←	←	←
	ギャップ熱通過率の改善効果	←	←	←	考慮	←	←
	随伴 FP 量(vol%)	←	←	←	←	←	0.2
	炉心高さ(cm)	100	←	←	←	←	←
	軸方向ブランケット厚[上/下](cm)	←	←	←	←	←	25/25
	炉心燃料集合体数[内側/外側]	468[264/204]	←	432[234/98]	384[210/74]	372[198/174]	414[222/192]
	径方向ブランケット燃料集合体数	174 (2 層)	←	←	162 (2 層)	←	84 (1 層)
主要炉心特性	炉心燃料体積比(vol%)	21.1	22.0	20.6	21.3	20.9	21.0
	炉心等価直径(m)	5.90	5.88	5.37	5.41	5.25	5.43
	運転サイクル長さ(ヵ月)	18.3	19	20.6	18	19.9	18
	バッチ	7	←	5	6	5	6
	Pu 富化度[内側/外側](wt%)	22.5/25.5	22.0/24.9	22.9 / 27.0	22.2 / 26.2	22.7/26.5	22.2/24.0
	取出平均燃焼度(GWd/t) 炉心全体	122.0	122.3	121.4	121.9	121.5	121.0
	炉心平均出力密度(W/cc)	55.5	55.5	54.0	53.3	52.6	69.3
	燃焼欠損反応度(%△k/kk')	75.7	76.3	91.1	90.0	95.5	89.3
	増殖比[炉心/合計]炉心全体	1.32	1.26	1.87	1.49	1.83	1.44
		0.692	0.705	0.671	0.689	0.679	0.709
		1.143	1.155	1.139	1.155	1.148	1.107
	初値荷核分裂性 Pu 重量(t/GWe)	8.6	8.7	7.2	7.3	6.9	7.0

表 3.2- 1 大出力化・導入期炉心の主要特性

項 目			仕 様
炉心基本仕様	電気出力 (MWe)		1500
	熱出力 (MWt)		3203
	炉心型式		均質2領域炉心
	運転サイクル長さ(ヶ月)		18
	燃料交換バッチ数 [炉心/径方向ブランケット]		6 / 6
	炉心高さ (cm)		100
	軸方向ブランケット厚さ [上部/下部] (cm)		25/25
	炉心燃料集合体数	内側炉心	294
		外側炉心	258
		合計	552
	径方向ブランケット燃料集合体数		96
	制御棒本数	主炉停止系	42
		後備炉停止系	19
	集合体配列ピッチ (mm)		241.9
	炉心等価直径 (cm)		629
炉心主要特性	炉心燃料HM組成 [内側炉心/外側炉心] (wt%)	Pu富化度(Pu/HM)	22.2 / 24.0
		TRU富化度(TRU/HM)	23.2 / 25.1
		MA含有率(MA/HM)	1.0 / 1.1
	燃料FP混入率[内側炉心/外側炉心] (vol.%)		0.2 / 0.2
		(FP/HM; wt%)	0.11 / 0.11
	取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心	121
		軸方向ブランケット	26.7
		炉心・軸ブラ平均	84.3
		径方向ブランケット	6.2
		全炉心	69.3
	燃焼反応度 (% $\Delta k/kk'$)		1.44
	増殖比(全体/炉心/軸ブラ/径ブラ)		1.10/0.71/0.33/0.06

表 3.2- 2 大出力化・導入期炉心の新燃料 FP 重量

元素	内側炉心		外側炉心		炉心合計	
	重量 (g)	放射能 (Bq)	重量 (g)	放射能 (Bq)	重量 (g)	放射能 (Bq)
Y	207	9. 5E+14	182	8. 3E+14	389	1. 8E+15
La	48	2. 1E+00	42	1. 9E+00	90	4. 0E+00
Ce	88	2. 3E+12	77	2. 0E+12	165	4. 3E+12
Pr	44	2. 3E+12	38	2. 0E+12	82	4. 3E+12
Nd	743	0. 0E+00	652	0. 0E+00	1395	0. 0E+00
Pm	129	4. 4E+15	114	3. 9E+15	243	8. 3E+15
Sm	4983	4. 9E+14	4373	4. 3E+14	9357	9. 2E+14
Eu	491	1. 9E+15	431	1. 7E+15	922	3. 6E+15
Gd	738	4. 6E+10	648	4. 1E+10	1386	8. 7E+10
Tb-Yb	80	1. 7E+09	70	1. 5E+09	150	3. 2E+09
TOTAL	7551	7. 8E+15	6626	6. 9E+15	14177	1. 5E+16

[注記] 1 バッチ当たり、冷却期間6年（冷却期間5年と同等）

表 3.2- 3 大出力化・導入期炉心の取出燃料重金属・FP 重量

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	合計
U合計	4, 240. 01	3, 943. 44	8, 183. 46	7, 275. 51	4, 024. 01	19, 482. 97
U -234	0. 52	0. 48	1. 01	0. 02	0. 00	1. 03
U -235	4. 07	6. 38	10. 45	10. 49	8. 78	29. 73
U -236	2. 28	1. 54	3. 82	2. 96	0. 90	7. 68
U -238	4, 233. 14	3, 935. 04	8, 168. 17	7, 262. 04	4, 014. 32	19, 444. 54
Pu合計	1, 302. 74	1, 264. 59	2, 567. 33	462. 13	102. 03	3, 131. 49
Pu-238	25. 80	23. 85	49. 65	0. 86	0. 06	50. 57
Pu-239	650. 88	654. 92	1, 305. 81	388. 58	93. 28	1, 787. 67
Pu-240	496. 48	473. 24	969. 72	60. 81	7. 07	1, 037. 60
Pu-241	72. 22	58. 34	130. 56	10. 80	1. 55	142. 91
Pu-242	57. 36	54. 24	111. 60	1. 08	0. 07	112. 74
MA合計	85. 05	89. 59	174. 63	4. 57	0. 68	179. 88
Np-237	5. 41	6. 47	11. 88	1. 46	0. 25	13. 59
Am-241	36. 46	42. 75	79. 21	2. 80	0. 42	82. 42
Am-242m	1. 96	1. 86	3. 82	0. 05	0. 00	3. 87
Am-243	19. 73	19. 48	39. 21	0. 19	0. 00	39. 40
Cm-242	0. 02	0. 02	0. 05	0. 00	0. 00	0. 05
Cm-243	0. 25	0. 13	0. 37	0. 00	0. 00	0. 38
Cm-244	17. 51	16. 07	33. 58	0. 06	0. 00	33. 64
Cm-245	3. 71	2. 82	6. 53	0. 01	0. 00	6. 54
HM合計	5, 627. 80	5, 297. 62	10, 925. 42	7, 742. 20	4, 126. 72	22, 794. 35
FP	1, 024. 55	548. 58	1, 573. 14	216. 96	25. 93	1, 816. 03

※単位：kg/バッチ

表 3.2- 4 大出力化・導入期炉心の取出燃料崩壊熱

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	合計
U合計	0.13	0.12	0.26	0.07	0.04	0.37
U -234	0.09	0.09	0.18	0.00	0.00	0.18
U -235	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
U -236	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
U -238	0.04	0.03	0.07	0.06	0.03	0.17
Pu合計	19,653.71	18,343.71	37,997.42	1,698.07	268.92	39,964.41
Pu-238	14,645.02	13,536.89	28,181.91	487.02	34.97	28,703.91
Pu-239	1,247.54	1,255.28	2,502.82	744.79	178.80	3,426.40
Pu-240	3,523.95	3,359.03	6,882.98	431.64	50.19	7,364.81
Pu-241	230.73	186.39	417.12	34.50	4.96	456.58
Pu-242	6.47	6.12	12.59	0.12	0.01	12.72
MA合計	57,377.53	53,398.59	110,776.12	630.66	57.72	111,464.51
Np-237	0.12	0.14	0.26	0.03	0.01	0.29
Am-241	4,158.44	4,875.28	9,033.72	318.93	47.81	9,400.46
Am-242m	7.53	7.13	14.65	0.21	0.02	14.88
Am-243	126.47	124.88	251.35	1.19	0.02	252.57
Cm-242	3,029.55	2,634.84	5,664.39	129.75	8.60	5,802.74
Cm-243	469.71	238.30	708.01	7.85	0.19	716.05
Cm-244	49,564.59	45,501.94	95,066.53	172.66	1.08	95,240.26
Cm-245	21.13	16.08	37.21	0.04	0.00	37.25
HM合計	77,031.38	71,742.42	148,773.80	2,328.81	326.68	151,429.29
FP	41,982.96	22,534.93	64,517.88	7,761.81	895.96	73,175.66

※単位：W/バッチ

表 3.2- 5 大出力化・導入期炉心の取出燃料放射能

核種	内側炉心	外側炉心	炉心合計	軸ブラ	径ブラ	合計
U合計	4.85E+00	4.47E+00	9.31E+00	2.76E+00	1.43E+00	1.35E+01
U -234	3.27E+00	3.03E+00	6.30E+00	1.06E-01	0.00E+00	6.40E+00
U -235	8.81E-03	1.38E-02	2.26E-02	2.27E-02	1.90E-02	6.43E-02
U -236	1.47E-01	9.99E-02	2.47E-01	1.92E-01	5.83E-02	4.97E-01
U -238	1.42E+00	1.32E+00	2.75E+00	2.44E+00	1.35E+00	6.54E+00
Pu合計	8.04E+06	6.57E+06	1.46E+07	1.17E+06	1.68E+05	1.59E+07
Pu-238	4.42E+05	4.08E+05	8.50E+05	1.47E+04	1.06E+03	8.66E+05
Pu-239	4.05E+04	4.07E+04	8.12E+04	2.42E+04	5.80E+03	1.11E+05
Pu-240	1.13E+05	1.08E+05	2.21E+05	1.39E+04	1.61E+03	2.37E+05
Pu-241	7.44E+06	6.01E+06	1.35E+07	1.11E+06	1.60E+05	1.47E+07
Pu-242	2.19E+02	2.07E+02	4.26E+02	4.11E+00	2.55E-01	4.31E+02
MA合計	1.66E+06	1.55E+06	3.21E+06	1.88E+04	1.75E+03	3.23E+06
Np-237	3.82E+00	4.56E+00	8.38E+00	1.03E+00	1.78E-01	9.58E+00
Am-241	1.25E+05	1.47E+05	2.72E+05	9.60E+03	1.44E+03	2.83E+05
Am-242m	1.91E+04	1.80E+04	3.71E+04	5.20E+02	4.06E+01	3.77E+04
Am-243	3.93E+03	3.88E+03	7.82E+03	3.71E+01	7.47E-01	7.86E+03
Cm-242	8.22E+04	7.15E+04	1.54E+05	3.52E+03	2.33E+02	1.57E+05
Cm-243	1.28E+04	6.50E+03	1.93E+04	2.14E+02	5.21E+00	1.95E+04
Cm-244	1.42E+06	1.30E+06	2.72E+06	4.94E+03	3.08E+01	2.72E+06
Cm-245	6.37E+02	4.85E+02	1.12E+03	1.18E+00	2.09E-03	1.12E+03
HM合計	9.70E+06	8.12E+06	1.78E+07	1.18E+06	1.70E+05	1.92E+07
FP	1.25E+07	6.70E+06	1.92E+07	2.91E+06	3.49E+05	2.24E+07

※単位：Ci/バッチ

表 3.2- 6 大出力化・平衡期炉心の主要特性

項 目			仕 様
炉心基本仕様	電気出力 (MWe)		1500
	熱出力 (MWt)		3203
	炉心型式		均質 2 領域炉心
	運転サイクル長さ (ヶ月)		18
	燃料交換バッチ数 [炉心]		6
	炉心高さ (cm)		100
	軸方向ブランケット厚さ [上部/下部] (cm)		20 / 25
	炉心燃料集合体数	内側炉心	294
		外側炉心	258
		合計	552
	径方向ブランケット燃料集合体数		無し
	制御棒本数	主炉停止系	42
		後備炉停止系	19
集合体配列ピッチ (mm)		241.9	
炉心等価直径 (cm)		629	
炉心主要特性	炉心燃料 HM 組成 [内側炉心/外側炉心] (wt%)	Pu 富化度(Pu/HM)	22.1 / 23.6
		TRU 富化度(TRU/HM)	23.2 / 24.7
		MA 含有率(MA/HM)	1.0 / 1.1
	燃料 FP 混入率 [内側炉心/外側炉心] (vol.%)		0.2/0.2
	(FP/HM ; wt%)		0.11 / 0.11
	取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心	123
		軸方向ブランケット	29.7
		全炉心	89.2
	燃焼反応度 (% Δ k/k')		1.49
増殖比		1.03	

表 3.3- 1 TRU 組成変動条件

(単位：wt%)

核種	TRU 組成			高速炉多重 リサイクル TRU 組成(基準)
	組成 A ^{*1}	組成 B ^{*2}	組成 C ^{*3}	
Pu-238	1.9	1.8	2.1	1.1
Pu-239	47.2	41.6	43.4	54.1
Pu-240	24.0	32.4	24.3	32.1
Pu-241	2.4	3.2	1.2	4.3
Pu-242	7.0	8.5	8.1	3.9
Pu 合計	82.5	87.5	79.1	95.5
Np-237	6.4	0.9	7.4	0.5
Np 合計	6.4	0.9	7.4	0.5
Am-241	9.4	8.4	11.4	2.0
Ain-242m	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-242	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	1.5	2.5	2.0	1.0
Am 合計	10.9	10.9	13.4	3.0
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	0.2	0.7	0.1	1.0
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm 合計	0.2	0.7	0.1	1.0
合計	100	100	100	100
Fissile*4 合計	49.6	44.8	44.6	58.4
Fertile*5 合計	50.4	55.2	55.4	41.6
MA 合計	17.5	12.5	20.9	4.5

*1:組成 A 30 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料(45～49GWd/t)から回収した TRU と、20 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料(60GWd/t)から回収した TRU を 9:1(再処理量比例)で混合

*2:組成 B 40 年貯蔵した Pu サーマル使用済燃料(45～49GWd/t)から回収した TRU と、FBR 使用済燃料から回収した TRU を 5:5(再処理量比例)で混合

*3:組成 C 110 年貯蔵した Pu サーマル使用済燃料(45～49GWd/t)から回収した TRU と、90 年貯蔵した LWR 使用済ウラン燃料(45～49GWd/t)から回収した TRU と、40 年貯蔵した ALWR 使用済ウラン燃料(60GWd/t)から回収した TRU を 0.5:1.9:7.6(再処理量比例)で混合

*4:fissile 核種は Pu-239,Pu-241, Am-242m, Am-242, Cm-243, Cm-245 とした。

*5:fertile 核種は Pu-238, Pu-240, Pu-242, Np-237, Am-241, Am-243,Cm-242, Cm-244 とした。

表 3.3-2 導入期炉心における TRU 組成変動時の主要核特性変化

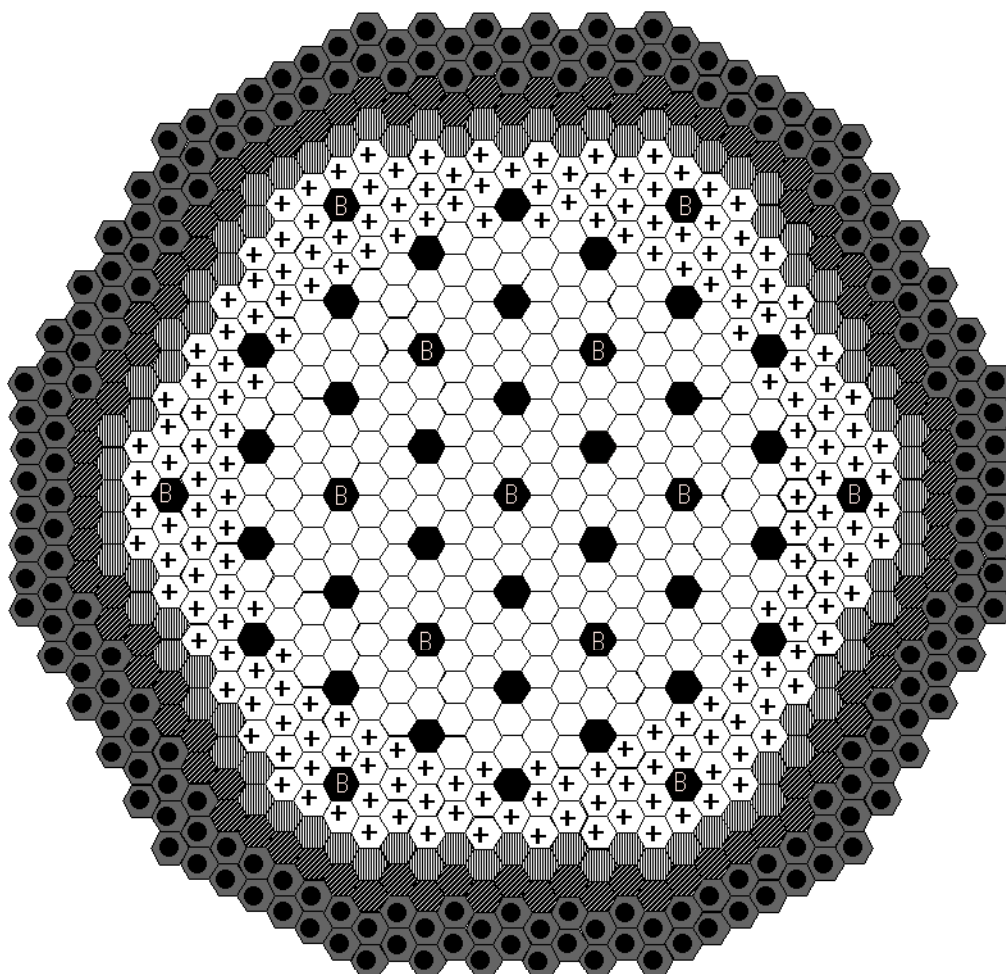
項目		基準組成 (導入期炉心)	TRU 組成変更ケース		
			組成 A	組成 B	組成 C
基本条 件・炉 心構 成	原子炉熱出力／電気出力 (MWt/MWe)	2,400 / 1,124	←	←	←
	炉心形式	均質 2 領域炉心	←	←	←
	運転サイクル長さ	18 カ月(548 日)	←	←	←
	燃料交換バッチ数(炉心/径プラ)	6/6 バッチ	←	←	←
	炉心高さ	100 cm	←	←	←
	炉心総和・集合体数(内側/外側)	414(222/192)体	←	←	←
	径方向ブランケット総和・集合体数	84 体(1 層)	←	←	←
	制御棒本数	43 体	←	←	←
	径方向遮へい体数(SiC)	288 体(3 層)	←	←	←
	軸方向ブランケット厚(上/下)	25/25cm	←	←	←
主要炉 心特 性	体積比(燃料/被覆材/構造材/冷却材) 炉心 ブランケット	21.0/11.8/42.2/25.0% 26. II 6.1/42.2/25.0%	←	←	←
	炉心等価直径/遮へい体外径円径	5.43m / 7.59m	←	←	←
	Pu 富化度*1(wt%)(内側/外側)	22.2 / 24.0	22.2 / 24.4	24.4 / 26.8	22.9 / 25.4
	MA 混入率*1(wt%)	1.1	4.9	3.6	6.4
	Fertile 含有率*1 (wt%)	86.1	85.8	86.7	86.2
	炉心取出平均燃焼度(GWD/t)				
	炉心/軸ケラ/径プラ	121.0/26.7/6.2	121.6/25.9/5.9	121.4/26.3/5.9	121.8/25.7/5.7
	ブランケット込み全炉心平均燃焼度	69.3	69.3	69.3	69.3
	燃焼欠損反応度(%Δk/kk')	1.44	0.6	0.55	0.12
	増殖比 平衡平均	1.107	1.112	1.152	1.135
	炉心/軸プラ/径プラ	0.709/0.326/0.072	0.694/0.343/0.075	0.730/0.347/0.075	0.705/0.354/0.076
	最大出力密度*2 (W/cc) (内側/外側)	166 / 161	165 / 160	164 / 158	164 / 158
	初装荷核分裂性 Pu 重量(t/GWe)	7.0	7.0	6.5	6.8
	遅発中性子割合(beta)	0.003275	0.0032	0.00323	0.00311
	減圧反応度*3(\$)	0.3	0.36	0.35	0.40
	炉心郎ドップラ係数(-1 × 103Tdk/dT)平衡末期	11.2	8.3	8.8	7.4
	複合システム倍増時間*4(年)	88.8	90	62.2	75.1

*1 Pu 富化度:Pu/HM、MA 混入率:HA/HM、Fertile 含有率:Fertile/HM

*2 燃焼ミスマッチファクタを考慮、基準組成は 3 次元 Tri-Z 計算結果、TRU 組成変更ケースは 2 次元 RZ 計算値に基準組成での 3 次元効果考慮

*3 制御棒領域(ワロア、吸収体)を除く全ての領域をポイント化、TRU 組成 A は組成 B と C からの換算値

*4 炉外滞在期間 5 年、燃交一定検期間 45 日



○	内側炉心燃料集合体	2 2 2 体
+	外側炉心燃料集合体	1 9 2 体
▨	径方向ブランケット燃料集合体	8 4 体
▩	径方向遮へい体 (SiC割合95.0%)	9 0 体
●	B4C遮へい体	1 9 8 体
■	主炉停止系制御棒	3 0 体
⬢	後備炉停止系制御棒	1 3 体

合 計 8 2 9 体

図 3.1- 1 110 万 kW 級導入期炉心の炉心構成

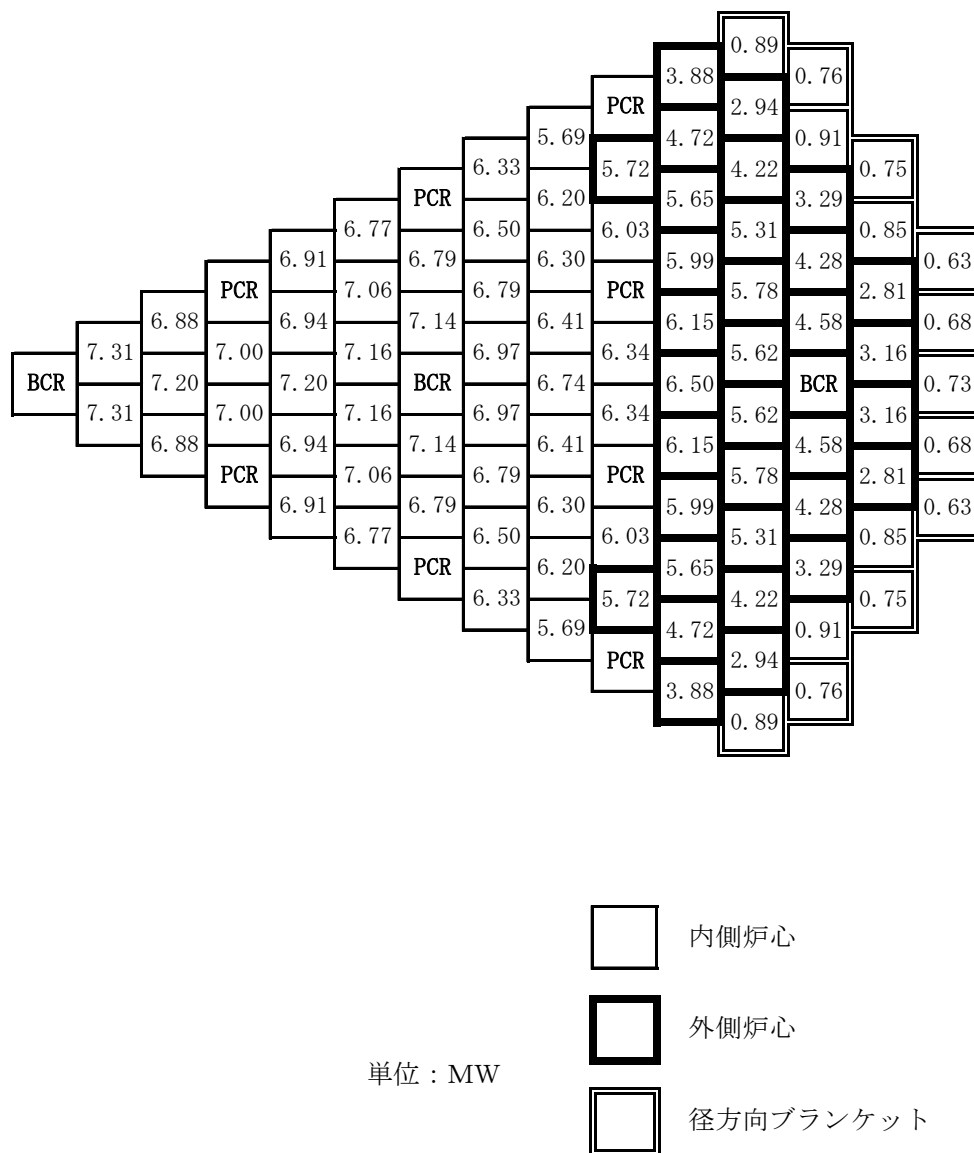


図 3.1- 2 導入期炉心の集合体出力分布
(平衡サイクル包絡値)

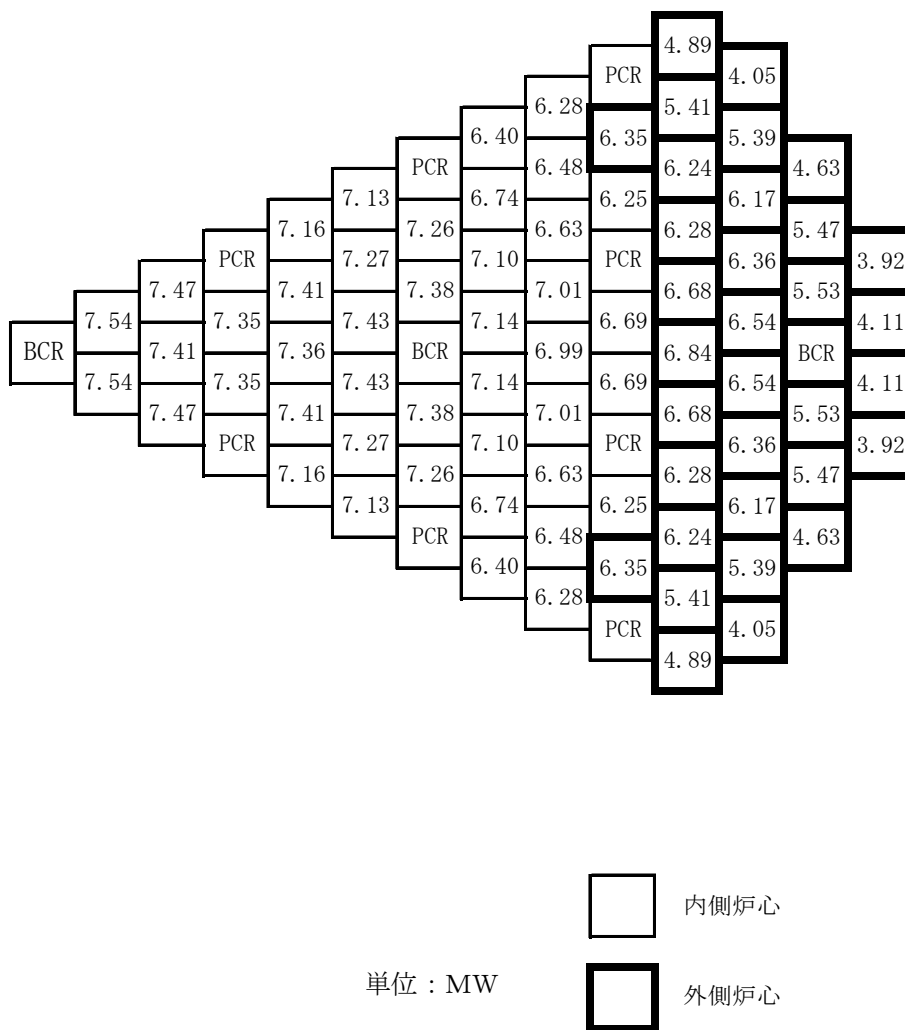
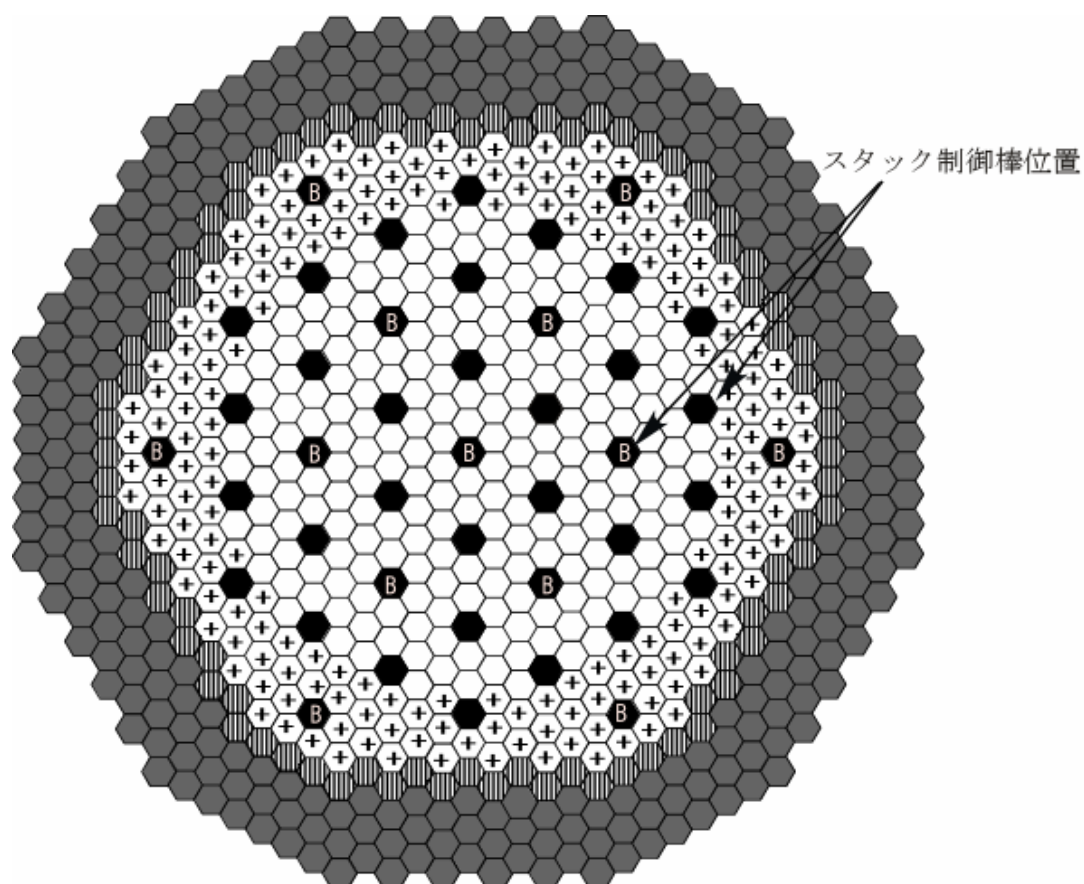


図 3.1-3 導入期炉心の流量領域区分用出力分布
(平衡サイクル包絡値)
[各領域出力に局所ピーキング係数を乗じた値]



○	内側炉心燃料集合体	2 2 2 体
+	外側炉心燃料集合体	1 9 2 体
▨	径方向ブランケット燃料集合体	8 4 体
■	SiC遮へい体	2 8 8 体
●	主炉停止系制御棒	3 0 体
⊙	後備炉停止系制御棒	1 3 体
合 計		8 2 9 体

図 3.1- 4 導入期炉心制御棒価値評価時の
スタック制御棒位置

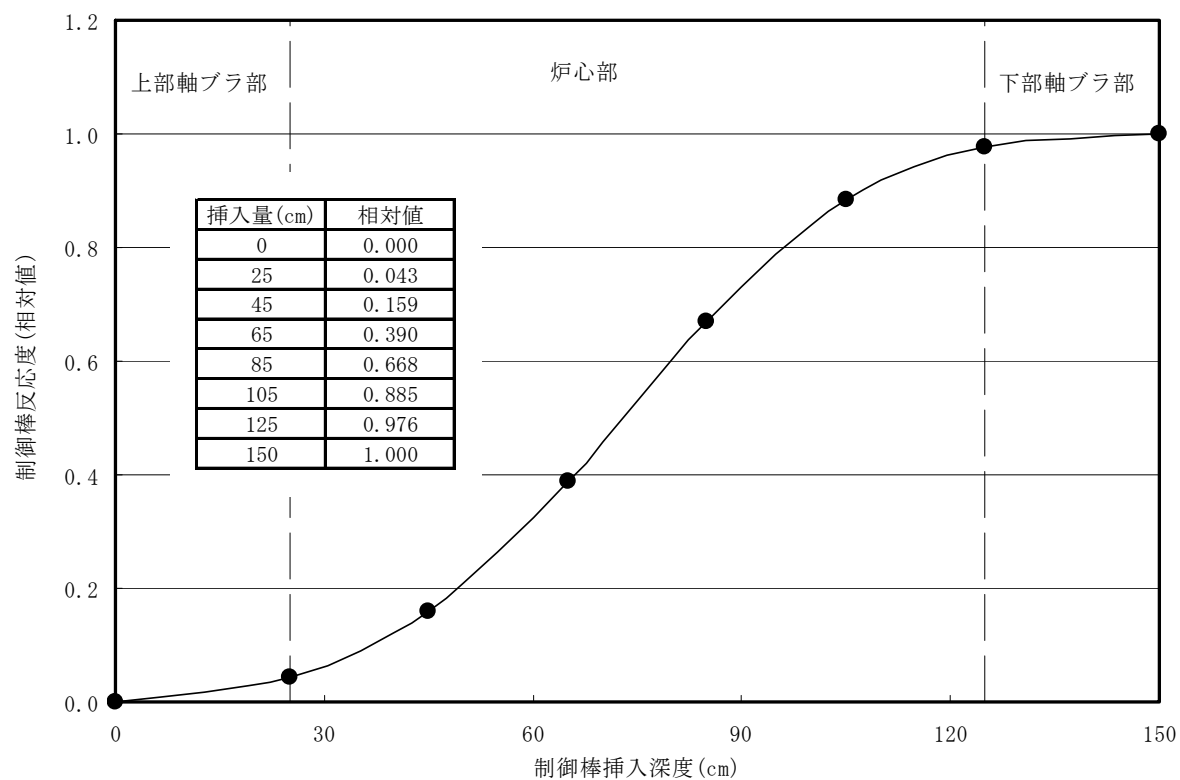


図 3.1-5 主炉停止系制御棒の反応度価値曲線
(全反応度 16.2\$)

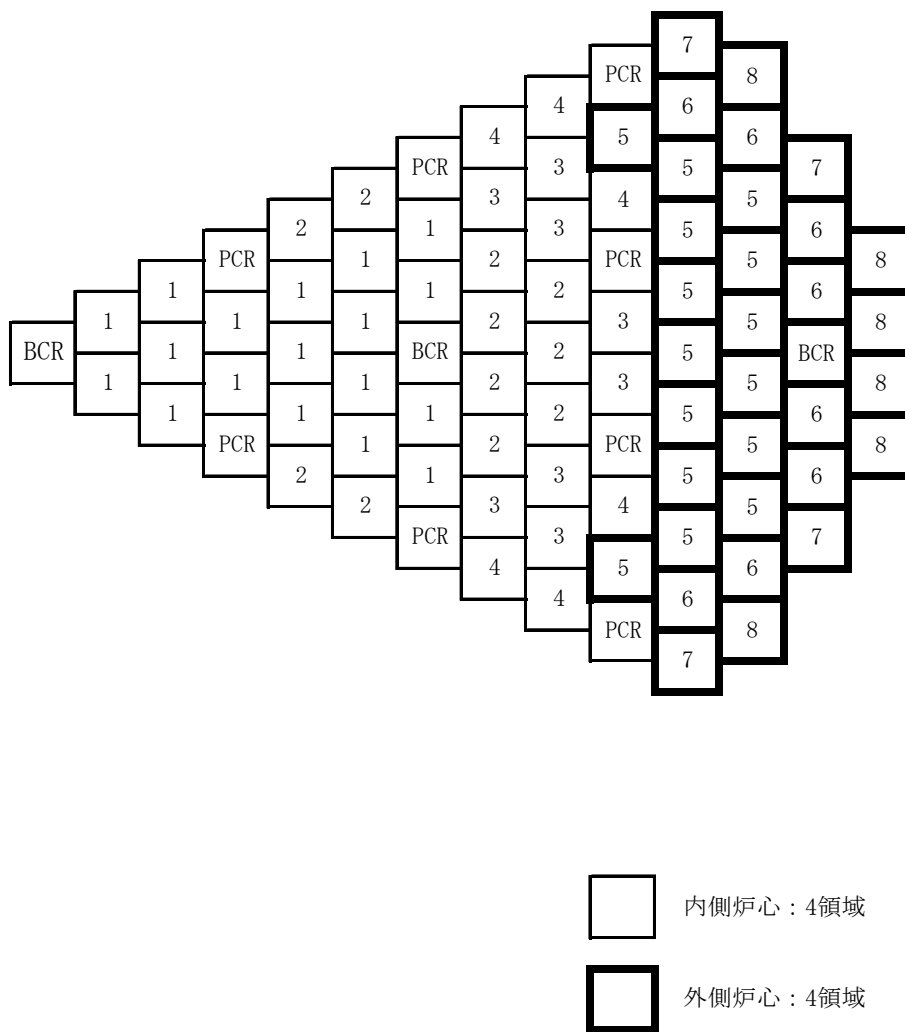
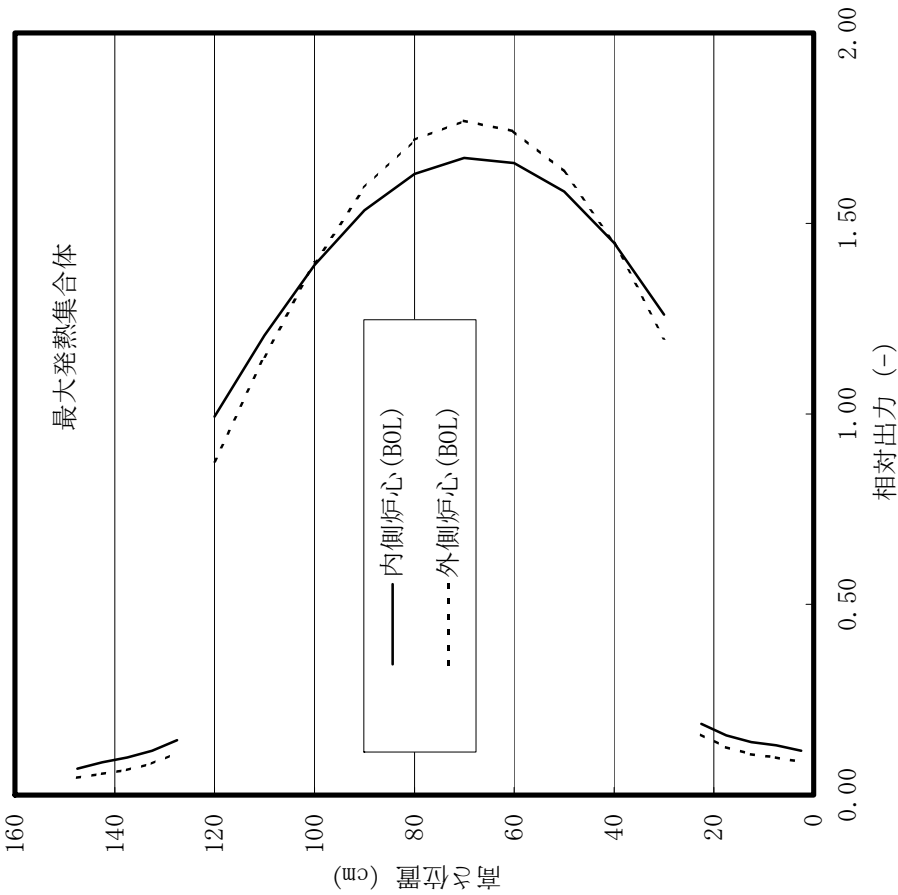


図 3.1- 6 導入期炉心の流量領域区分



軸方向高さ (cm)	相対出力	
	内側炉心	外側炉心
147.5	0.069	0.045
142.5	0.086	0.055
137.5	0.098	0.065
132.5	0.116	0.083
127.5	0.143	0.110
120.0	0.993	0.877
110.0	1.206	1.151
100.0	1.391	1.398
90.0	1.535	1.593
80.0	1.630	1.719
70.0	1.672	1.769
60.0	1.658	1.742
50.0	1.584	1.635
40.0	1.449	1.450
30.0	1.261	1.198
22.5	0.187	0.158
17.5	0.156	0.125
12.5	0.139	0.107
7.5	0.131	0.098
2.5	0.116	0.087

図 3.1-7 導入期炉心代表燃料集合体の軸方向出力分布 (平均 1.0 に規格化)

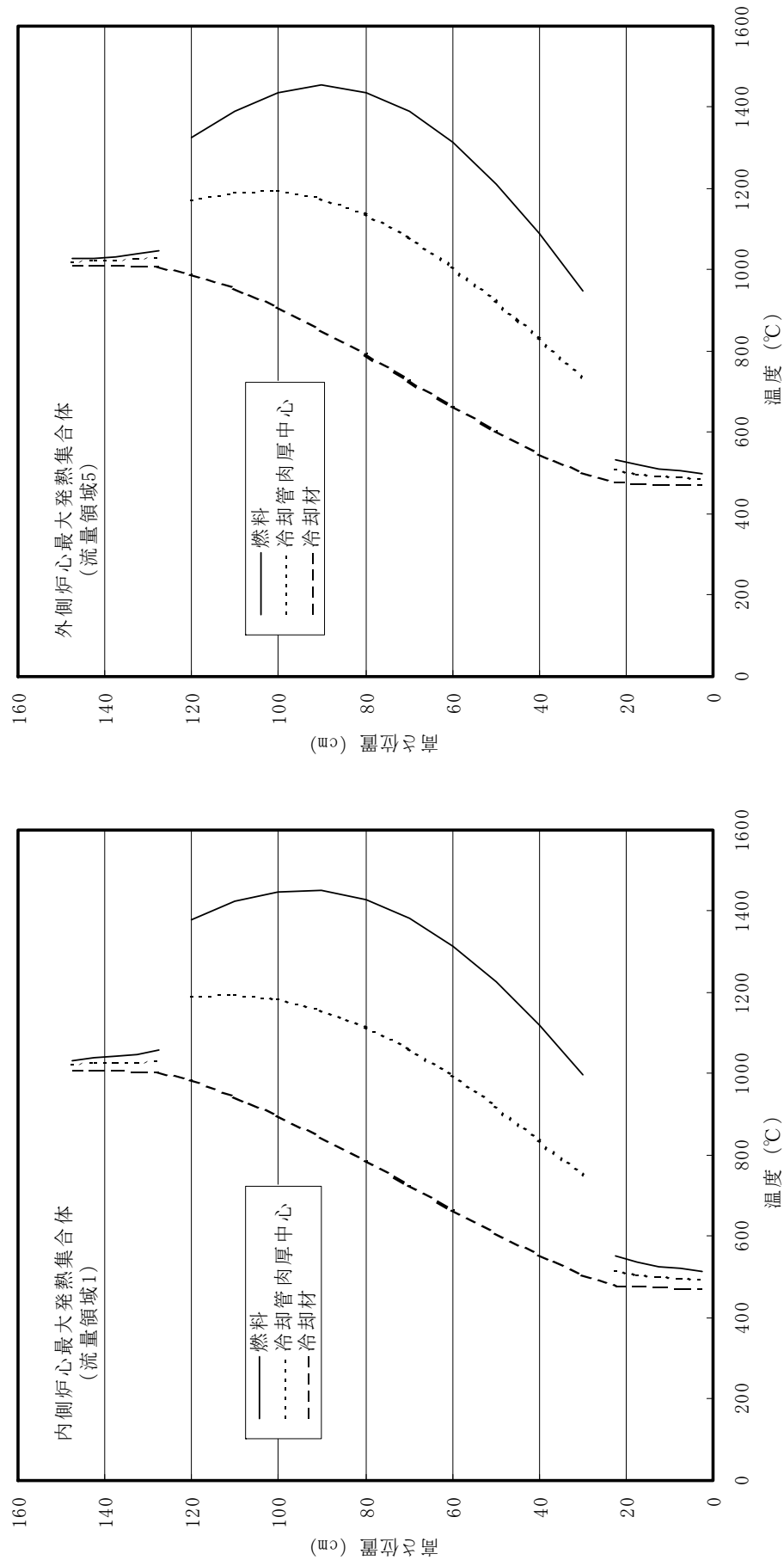
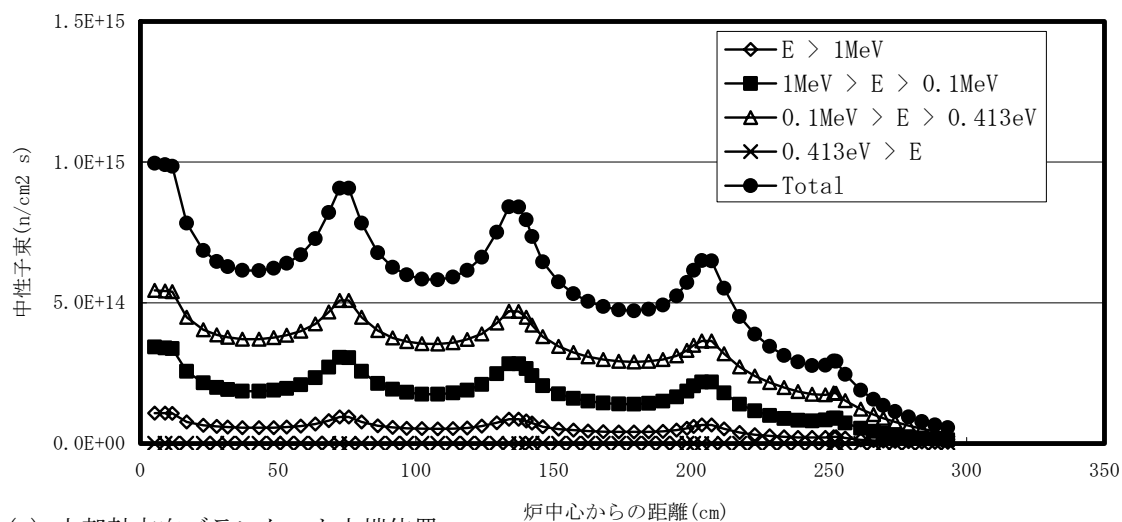
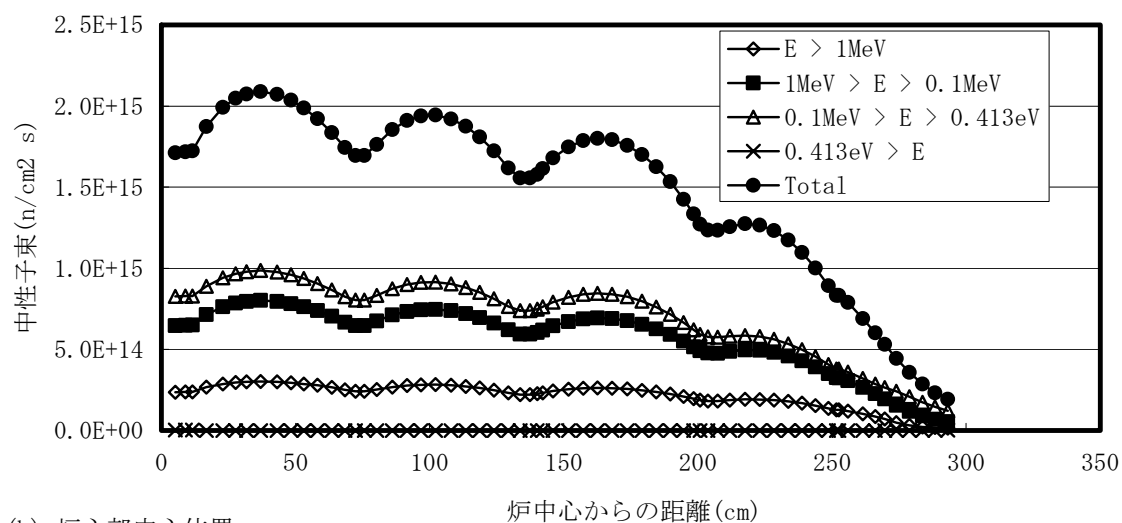


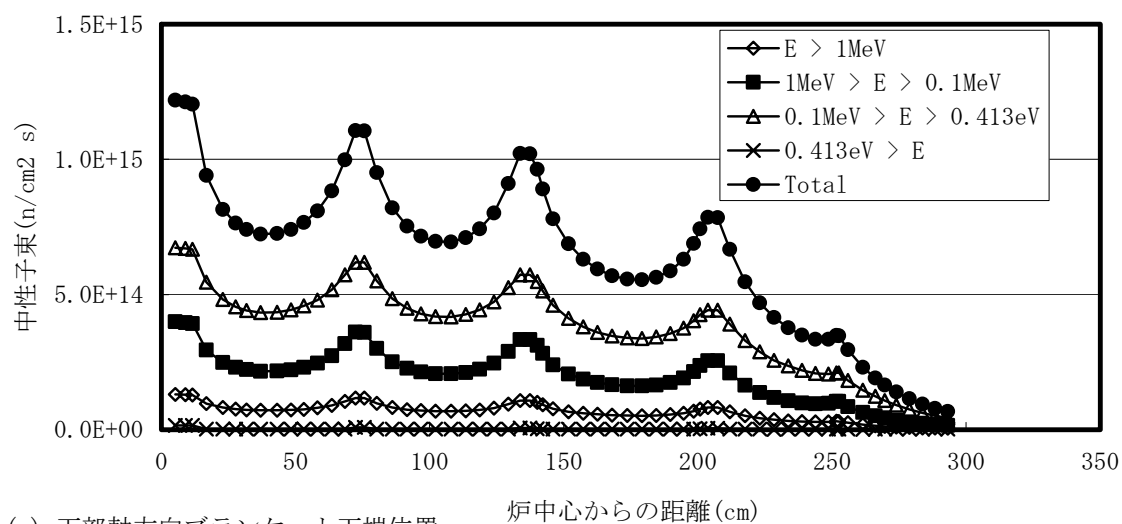
図 3.1- 8 導入期炉心代表燃料集合体の軸方向温度分布



(a) 上部軸方向ブランケット上端位置

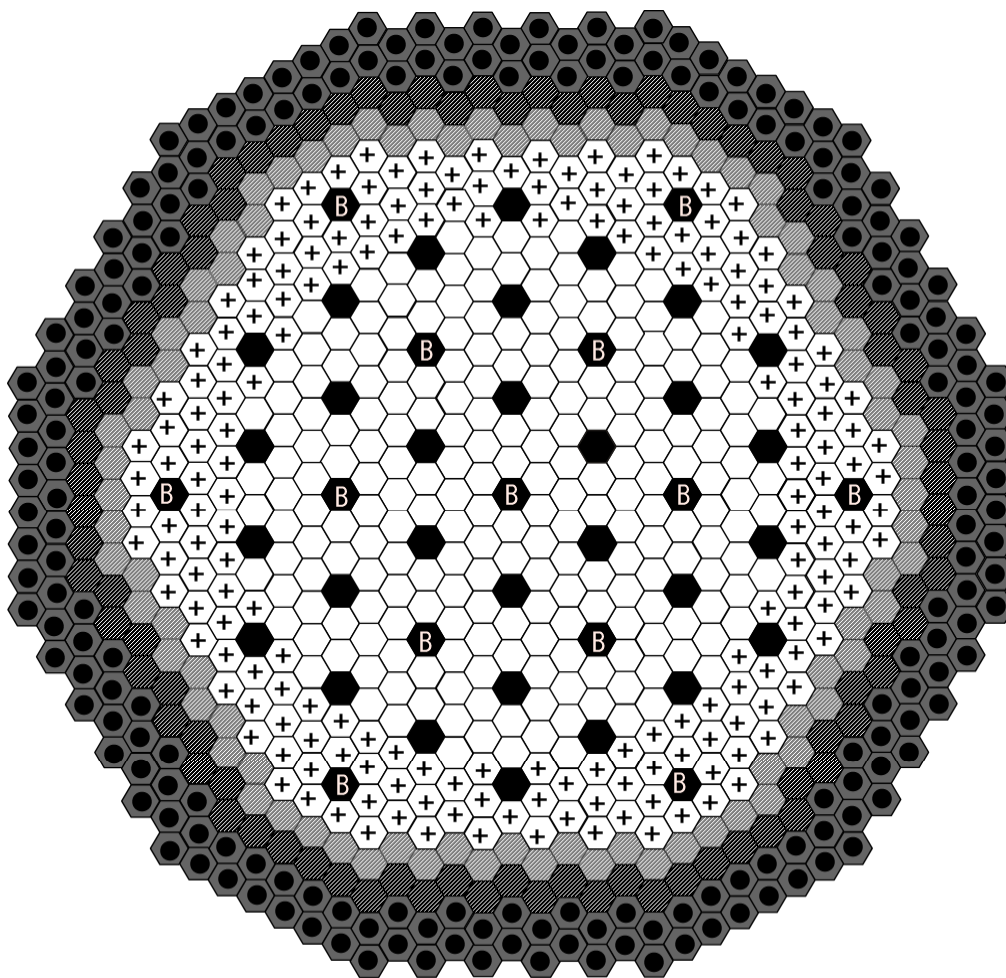


(b) 炉心部中心位置



(c) 下部軸方向ブランケット下端位置

図 3.1-9 導入期炉心の径方向中性子束分布



○	内側炉心燃料集合体	2 2 2 体
⊕	外側炉心燃料集合体	1 9 2 体
▨	径方向遮へい体 (SiC割合42.2%)	8 4 体
▩	径方向遮へい体 (SiC割合95.0%)	9 0 体
●	B4C遮へい体	1 9 8 体
■	主炉停止系制御棒	3 0 体
⬢	後備炉停止系制御棒	1 3 体
合 計		8 2 9 体

図 3.1- 10 110 万 kW 級平衡期炉心の炉心構成

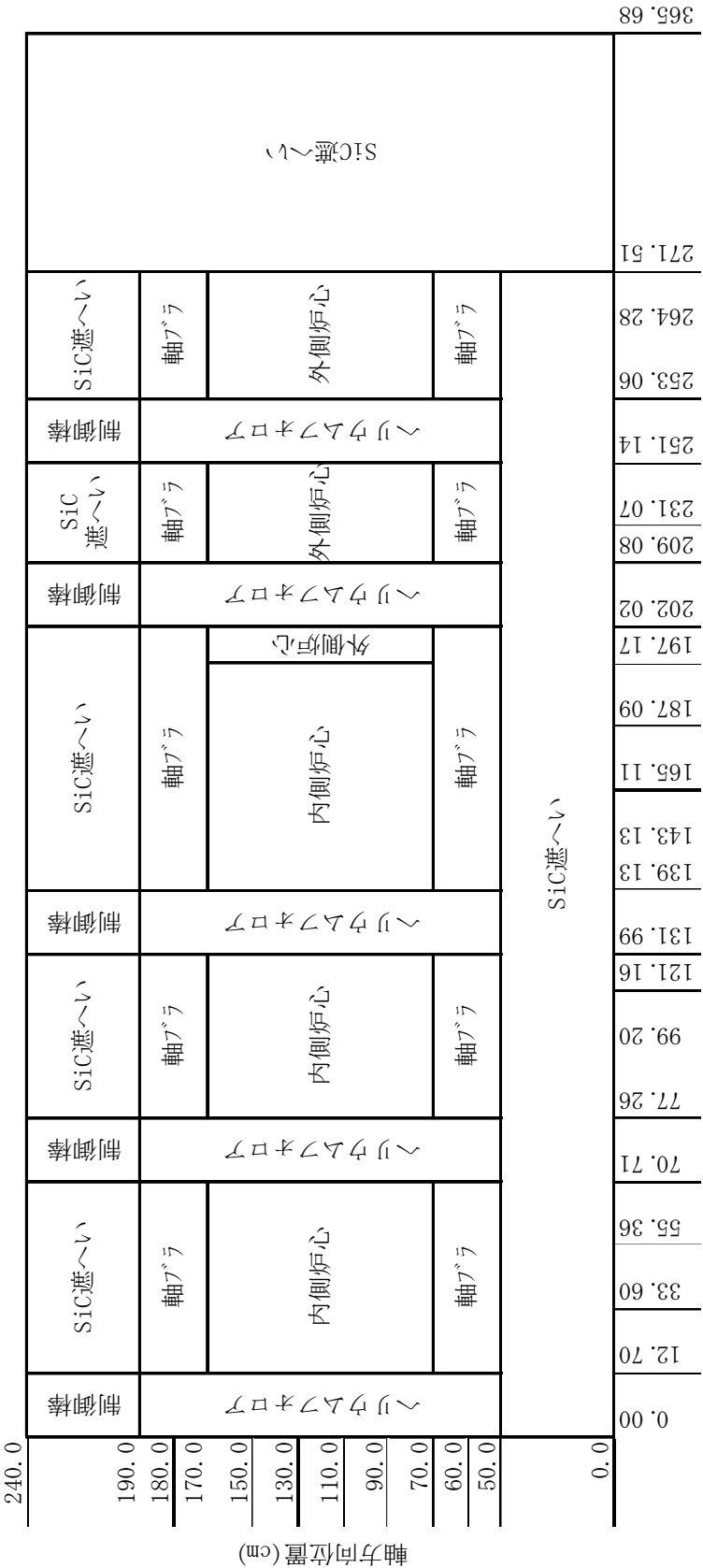


図 3.1-11 平衡期炉心の2次元RZ解析体系図

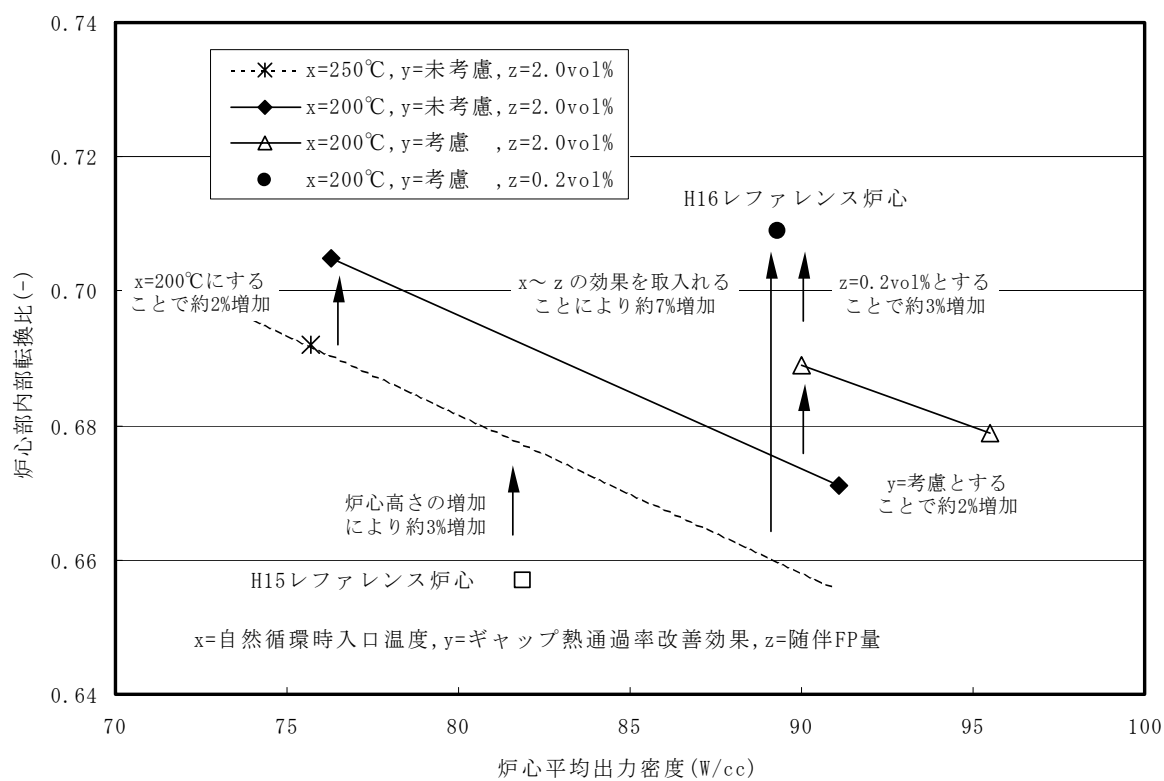
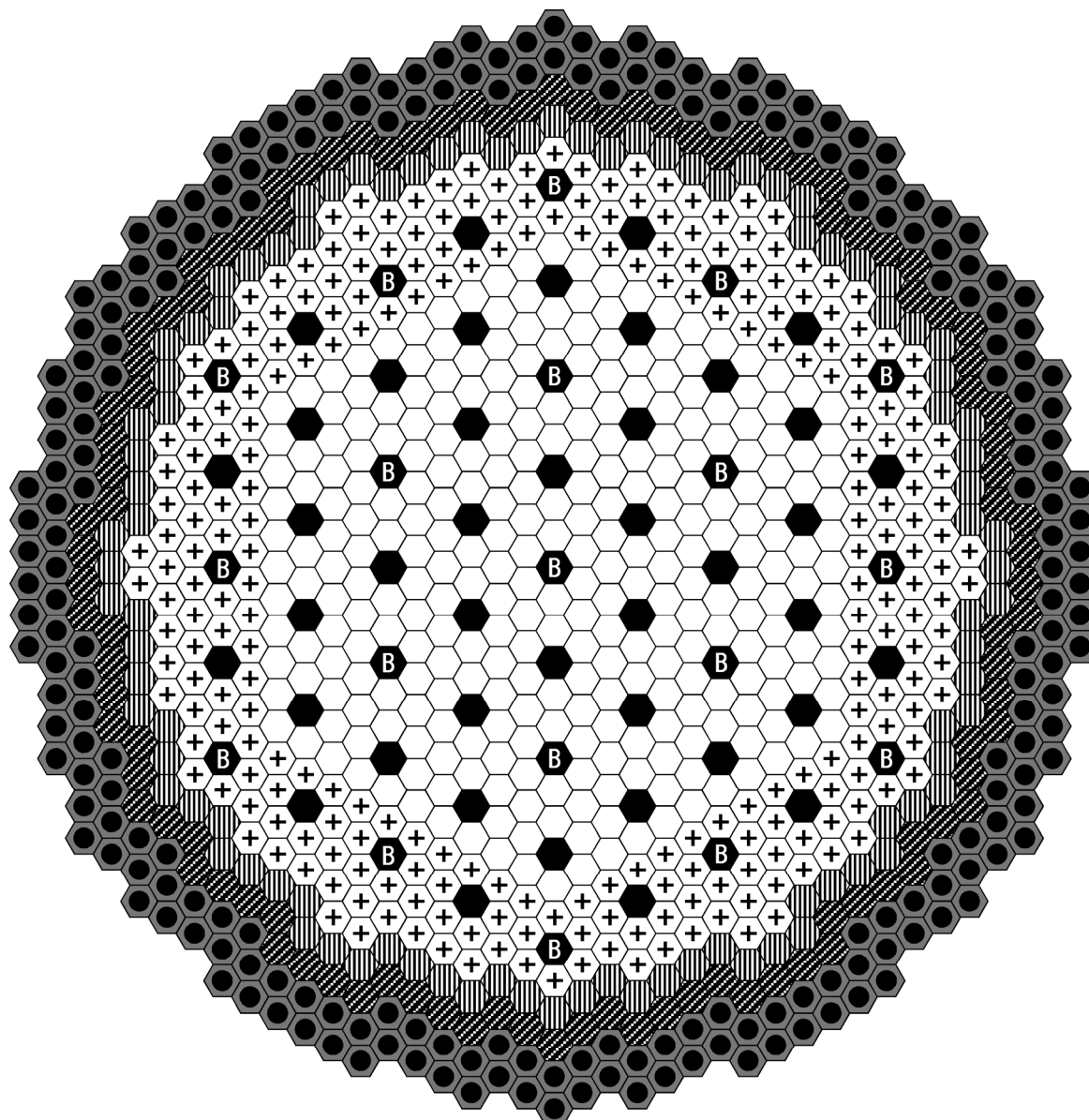


図 3.1- 12 各種要因と炉心部内部転換比の関係



○	内側炉心燃料集合体	294体
+	外側炉心燃料集合体	258体
	径方向ブランケット燃料集合体	96体
▨	SiC遮へい体	102体
●	B ₄ C遮へい体	222体
●	主系制御棒	42体
●	後備系制御棒	19体

合 計 1033体

図 3.2- 1 150 万 kW 級導入期炉心の炉心構成

燃料集合体概略寸法・構造材重量

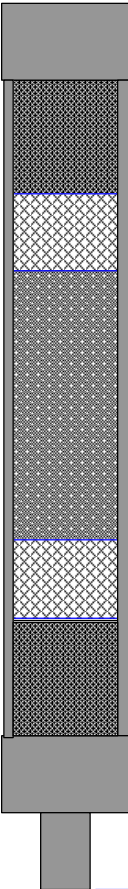
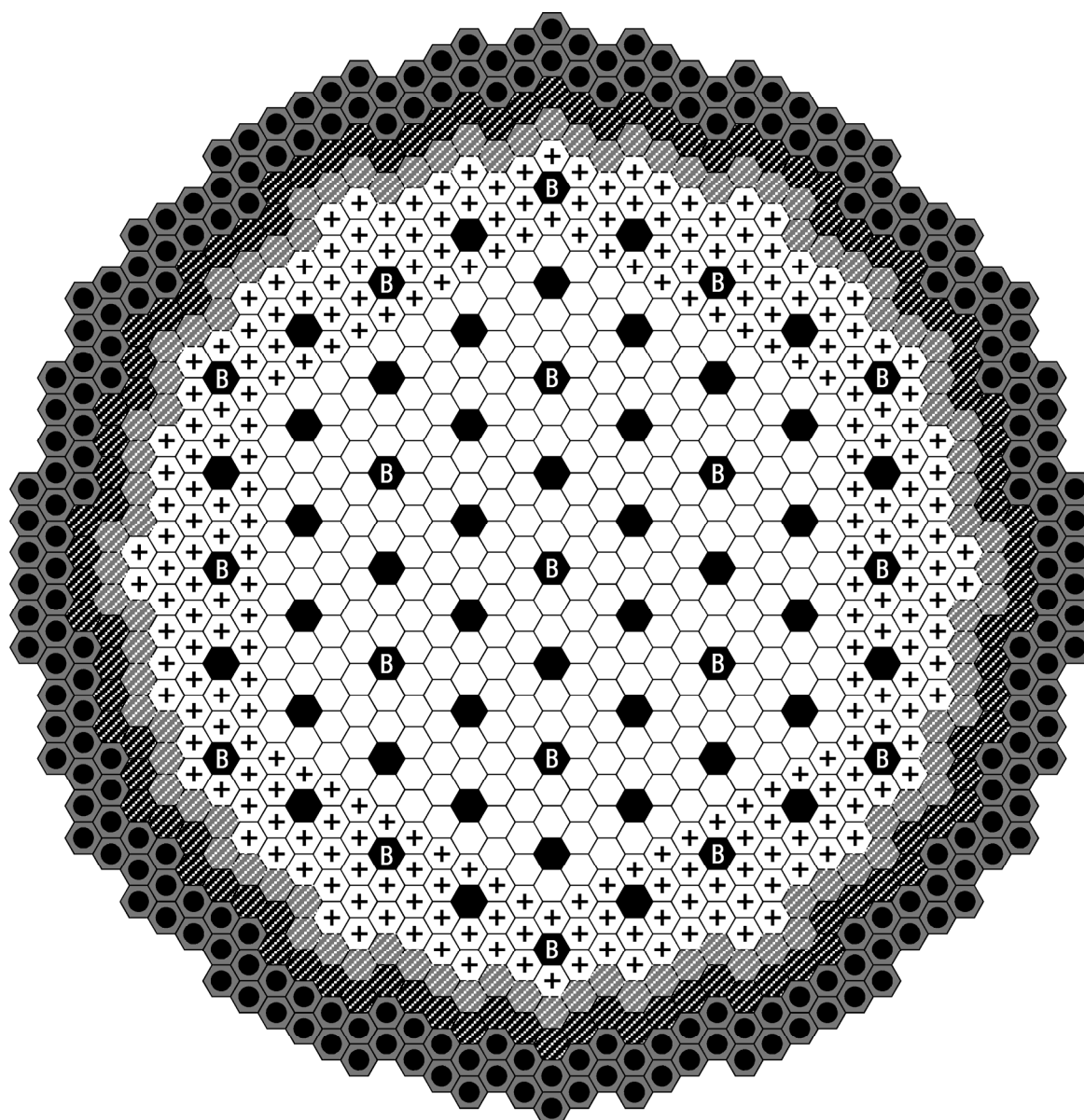
	部位名称	部位長さ (cm)	重量 (kg)	
			炉心燃料	径ブランケット燃料
	ハントリングヘッド	12	SiC: 24.4 B4C: 68.6	SiC: 24.4 B4C: 68.6
	上部遮へい体	145		
	上部軸ブランケット	25	SiC: 11.4 TiN: 1.4	SiC: 68.6 TiN: 8.3
	炉心	100	SiC: 45.7 TiN: 10.8	
	下部軸ブランケット	25	SiC: 11.4 TiN: 1.4	
	下部遮へい体	79	SiC: 19.8 B4C: 32.4	SiC: 19.8 B4C: 32.4
	エントランスノズル	50		

図 3.2- 2 導入期炉心燃料の構成



○	内側炉心燃料集合体	2 9 4 体
+	外側炉心燃料集合体	2 5 8 体
▨	SiC遮へい体 (SiC 42.2%)	9 6 体
▩	SiC遮へい体 (SiC 95.0%)	1 0 2 体
●	B ₄ C遮へい体	2 2 2 体
■	主系制御棒	4 2 体
■	後備系制御棒	1 9 体

合 計 1 0 3 3 体

図 3.2- 3 150 万 kW 級平衡期炉心の炉心構成。

燃料集合体概略寸法・構造材重量

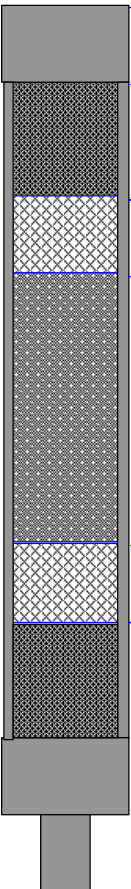
	部位名称	部位長さ (cm)	重量 (kg)	
			炉心燃料	径ブランケット燃料
	ハントリングヘッド	12	SiC: 24.4 B4C: 68.6	
	上部遮へい体	145		
	上部軸ブランケット	20	SiC: 9.1 TiN: 1.1	
	炉心	100	SiC: 45.7 TiN: 10.8	
	下部軸ブランケット	25	SiC: 11.4 TiN: 1.4	
	下部遮へい体	79	SiC: 19.8 B4C: 32.4	
	エントランスノズル	50		

図 3.2- 4 平衡期炉心燃料の構成

- 安全系信号：
 - スクラム信号： 1次系冷却材圧力低 90%
- 崩壊熱除去系動作：
 - DBE時： 強制循環ブロワー4系統中2系統稼働
(1系統故障、1系統不作動を想定)
 - ATWS/AWS時： 自然循環除熱4系統
(強制循環ブロワー4系統起動失敗を想定)
- 系統保護系動作：
 - タービン・圧縮機のトリップ： 外部電源喪失、制御棒スクラム
 - 制御棒全挿入時間： 0.55 秒
 - フローコストダウン： 650 秒
- 安全系統作動遅れ時間：
 - トリップ後の発電機解列、タービンバイパス弁開開始、フローコストダウンバイパス弁開： 0.5 秒
 - 制御棒デラッチ遅れ： 0.2 秒
 - 崩壊熱除去系空気冷却器ダンパ開： 60 秒

また炉心動特性に対し、以下の不確定性マージンを加味する。

- 減圧反応度：
 - DBE： 50 ¢
 - ATWS/AWS時： 10 ¢
- ドップラ係数：
 - DBE： -15%
 - ATWS/AWS時： -15%

DBEでは減圧反応度とドップラ係数の両方に対しマージンを重ねる。ただし ATWS/AWS に対しては、結果が厳しくなる一方に対しマージンを設定する。

4.2. DBE 事象：減圧事故

本事故は、原子炉容器－タービン間の配管1系統の破断・破損により1次系圧力が低下し、それに伴い炉心流量が低下していく事象である。破断孔面積は想定最大値 50cm²を用いる。

炉心主要目の過渡変化を図 4.2-1 に、反応度の過渡変化を図 4.2-2 に示す。事象発生（図中 0 秒時点）後の減圧反応度投入により、原子炉出力は徐々に上昇する。一方、圧力減少によるヘリウム密度低下により、炉心冷却材流量は圧力低下に合わせて低下してゆく。この間、炉心熱出力－炉心流量の不整合が生じ、燃料温度は徐々に上昇する。事象発生後、約 131.6 秒で“圧力低下 90%”のスクラム信号が発生し、時間遅れ約 1 秒の後に制御棒が挿入される。スクラム信号と同時に生じるタービントリップ信号により、この時点でタービン 4 機がトリップし炉心流量は低下する。タービントリップ直前（約 131.6 秒時点）で原子炉出力は最高値(定格比約 103%)になるが、トリップに伴う 1 次系統内均圧化（減圧）→反応度投入によるプロンプト・ジャンプにより、出力は定格の約 110%まで一時的に上昇するものの、時間遅れ 1 秒後の制御棒挿入により、急速に出力は低下する。安全保護系もスクラム信号により起動

し、4 系統中 2 系統のブロワー作動により、炉心は強制循環除熱が行われ、その後炉心は静定に至ることとなる。冷却材温度、燃料温度共に事象開始直後に上昇するが、燃料最高温度は 1518℃、冷却管最高温度は 1271℃であり、判断基準 1600℃は満足されている。

4.3. ATWS : UTOP 事象

本事象は、制御棒誤引抜き事象(過渡事象に分類)において、スクラムが挿入されない状態で高温静定に至る事象である。炉心入口温度・圧力および流量は定格状態に維持される。本事象は、過渡事象に対しスクラム失敗を仮定する仮想的な状況であり、高速炉の潜在的・絶対的安全性を示すという意味で先行 Na 冷却高速炉において従来解析されてきた事象である。本事象における除熱性確保の判断目安としては、燃料温度 2,800℃以下、被覆温度 2,200℃以下を用いる。また反応度評価の誤差を見込むため、ドップラ反応度を 15%減じた。

投入反応度として導入期炉心における事故時投入反応度に相当する 37¢、投入速度に 3¢/s、SASS は不作動とした場合の炉心主要目過渡変化を図 4.3-1 に、反応度過渡変化を図 4.3-2 に示す。反応度投入量は 12.3 秒後に最大値 37¢に達する。そのとき炉心出力は最大値：定格比 151%に至るが、その後はドップラ効果による反応度減少により出力は低下し、約 128%出力で高温静定に至る。燃料最高温度は約 1,835℃、冷却管温度 1,490℃で静定する。これらの温度は制限目安値 2,800℃、2,200℃に対し大きな余裕を有していることから、当炉心に対し、SASS 作動による炉心出力低下に依存せずに炉心冷却性が維持される見通しを得た。

また、UTOP での投入反応度の限界を確認するために、燃料最高温度が制限目安値に到達するまで反応度を投入する解析を実施した。投入反応度 57¢の場合の炉心主要目過渡変化を図 4.3-3 に、反応度過渡変化を図 4.3-4 に示す。反応度投入に伴い出力は上昇し、19 秒後に最大値(定格比 170%)に至る。その後出力は低下し、約 144%で高温静定に至る。燃料最高温度は約 2,396℃、冷却管温度 1,852℃で静定する。

4.4. ATWS : ULOF 事象

本事象は、タービントリップによる炉心流量低下事象(過渡)において、スクラムが挿入されず、かつ強制循環除熱が行われない状態で高温静定に至る事象である。炉心入口温度・圧力は維持され、自然循環による崩壊熱除去が仮定される。本事象は、過渡事象に対してスクラム失敗を仮定する仮想的な想定である。本事象において除熱性確保の判断目安として、燃料温度 2,800℃以下、被覆温度 2,200℃以下を用いる。

炉心主要目過渡変化を図 4.4-1 に、反応度過渡変化を図 4.4-2 に示す。本現象は、タービントリップ後の均圧化に伴う減圧反応度投入と出力上昇を伴い、事象開始後の流量低下と重なることから大きな出力／流量間不整合が生じる。これにより冷却材・燃料温度は上昇し、その後ドップラ効果による負の反応度投入により、出力は減少に転じる。ピーク温度は燃料：1,897℃、冷却管：1,877℃と、制限目安値に対して余裕を持った値となった。

事象発生後 2000 秒で原子炉出力 4.9%、自然循環流量 2.8%となる。1 次系統は高圧に維持されており、自然循環流量は確保され、燃料最高温度～1386℃で高温静定に至る。当炉心では、SASS 作動による炉心出力低下に依存せずに、炉心冷却性が維持される見通しを得た。

4.5. 設計検討用過渡挙動解析(AWS)

本事象は、減圧事故においてスクラムが挿入されず、かつ、強制循環系起動も4系統全てで失敗したとする仮想的な状況で、事故に対し多重故障を重畳したこととなる。本過渡では、崩壊熱除去系の自然循環除熱(4系統)により、崩壊熱と除熱がバランスし高温静定に至る。除熱性確保の判断目安としては、燃料温度／被覆温度に対し2,800℃以下／2,200℃以下とする条件を用いる。また減圧反応度ノミナル値：0.30\$に対し0.10\$の誤差を見込む。

炉心主要目過渡変化を図4.5-1に、反応度過渡変化を図4.5-1に示す。定格時、1次ピーク時、2次ピーク時、および長期除熱時の燃料・冷却管温度等を表4.5-1にまとめる。事象発生(0秒時点)後の減圧に伴い約16¢の反応度投入が生じている。これにより、原子炉出力は急上昇し、燃料温度上昇に伴うドップラ効果による反応度低下(-127¢)から、原子炉出力低下が始まる時点(110秒)で、原子炉出力ピーク(定格比約116%)が生ずる。減圧に伴う流量低下のため、その後も出力ー流量間の不整合が生じており、燃料温度及び冷却管温度は約110秒時点で1次ピーク：燃料温度1867℃、冷却管温度1848℃を示す。その後は、原子炉出力の低下と自然循環系統による除熱開始により、約900秒時まで一端温度は低下してゆく。しかし、冷却材温度低下とそれに伴う燃料温度低下によるドップラ効果の減少、および、自然循環流量の微減により、再び温度が上昇し、8492秒で2次ピーク：燃料温度2014℃、冷却管温度2011℃を示す。その後温度は緩やかに低下し、約18,000秒以降に高温静定状態：冷却管温度1809℃、炉出力定格比1.72%となる。これは崩壊熱と自然循環除熱が熱的にバランスし、かつ、ドップラ効果により減圧反応度が抑制された状態である。

SASS作動による炉心出力低下を伴わずに炉心燃料を目安温度以下とすることが可能となる結果であり、当概念で炉心冷却性が維持される見通しが得られたことになる。

4.6. 過渡解析のまとめ

基準炉心(導入期炉心)に対し、DBE(減圧事故)解析を行い、時間遅れや核的不確かさ重畳条件で、燃料・被覆制限温度1,600℃以下となる結果が得られた。また苛酷事象(ATWS)や炉心設計で着目している過渡状況(AWS)でも、制限目安(燃料2,800℃、冷却管2,200℃)を満たす結果が得られた。以上より、ガス冷却高速炉でも、安全保護系の適切な設計による安全確保、及び、炉心形状・動特性に応じた炉心冷却を可能とする炉心設計が可能なことを示した。

表 4.5-1 設計検討用過渡挙動解析結果(AWS)

項目		単位	解析結果
定格時	燃料最高温度	℃	1450
	ホットチャンネル流量	kg/s	3.08
	炉心圧力損失	MPa	0.18
一次ピーク時	燃料最高温度	℃	1867
	冷却管最高温度	℃	1848
	到達時刻	秒	101
2次ピーク時	燃料最高温度	℃	2014
	冷却管最高温度	℃	2011
	到達時刻	秒	8492
36000秒 到達時	冷却管最高温度	℃	1809
	出力レベル	%	1.27
	炉心入口温度	℃	192

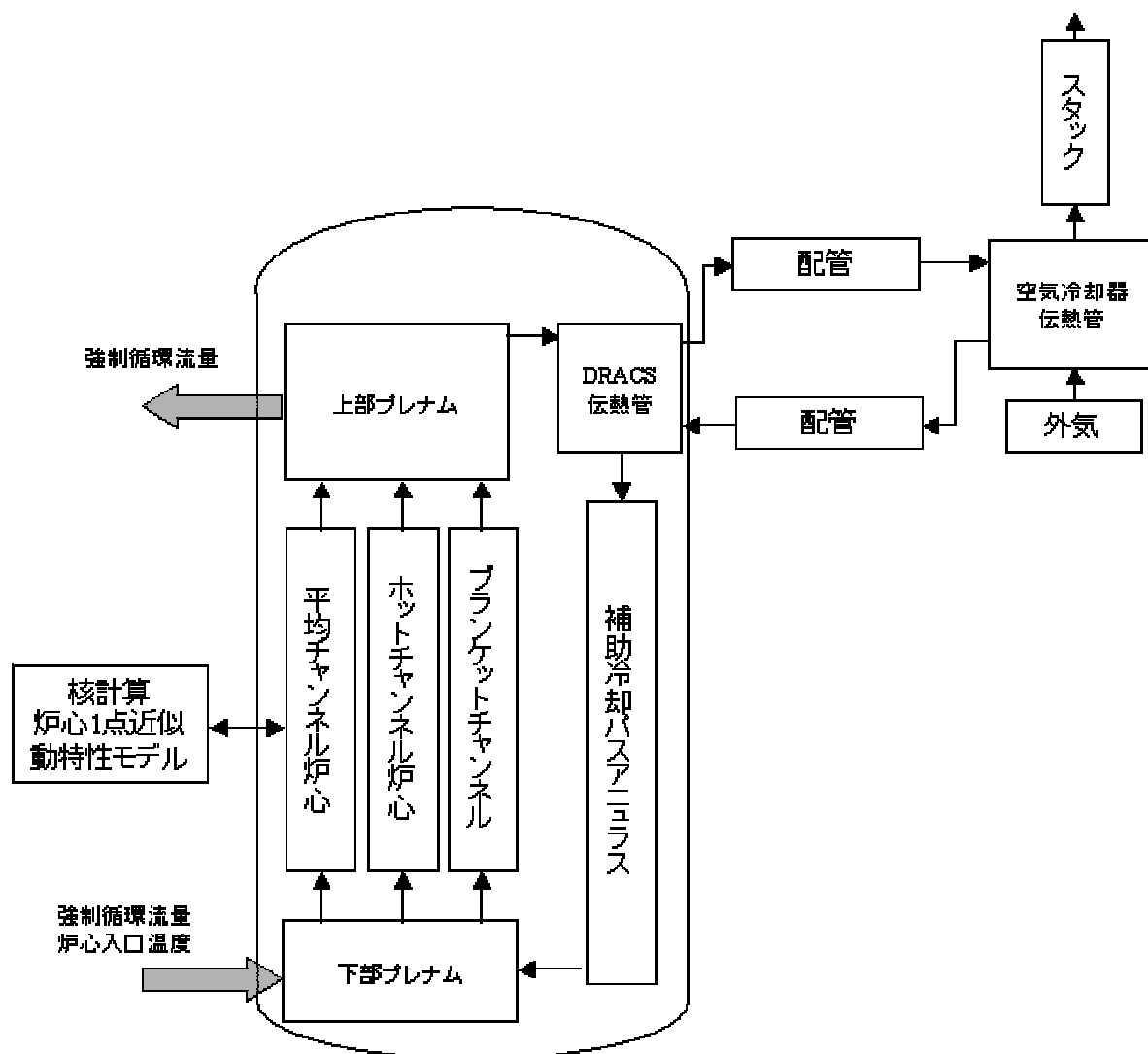


図 4.1-1 炉心 1 次元核-熱動特性解析モデル
(フローネットワーク過渡解析体系)

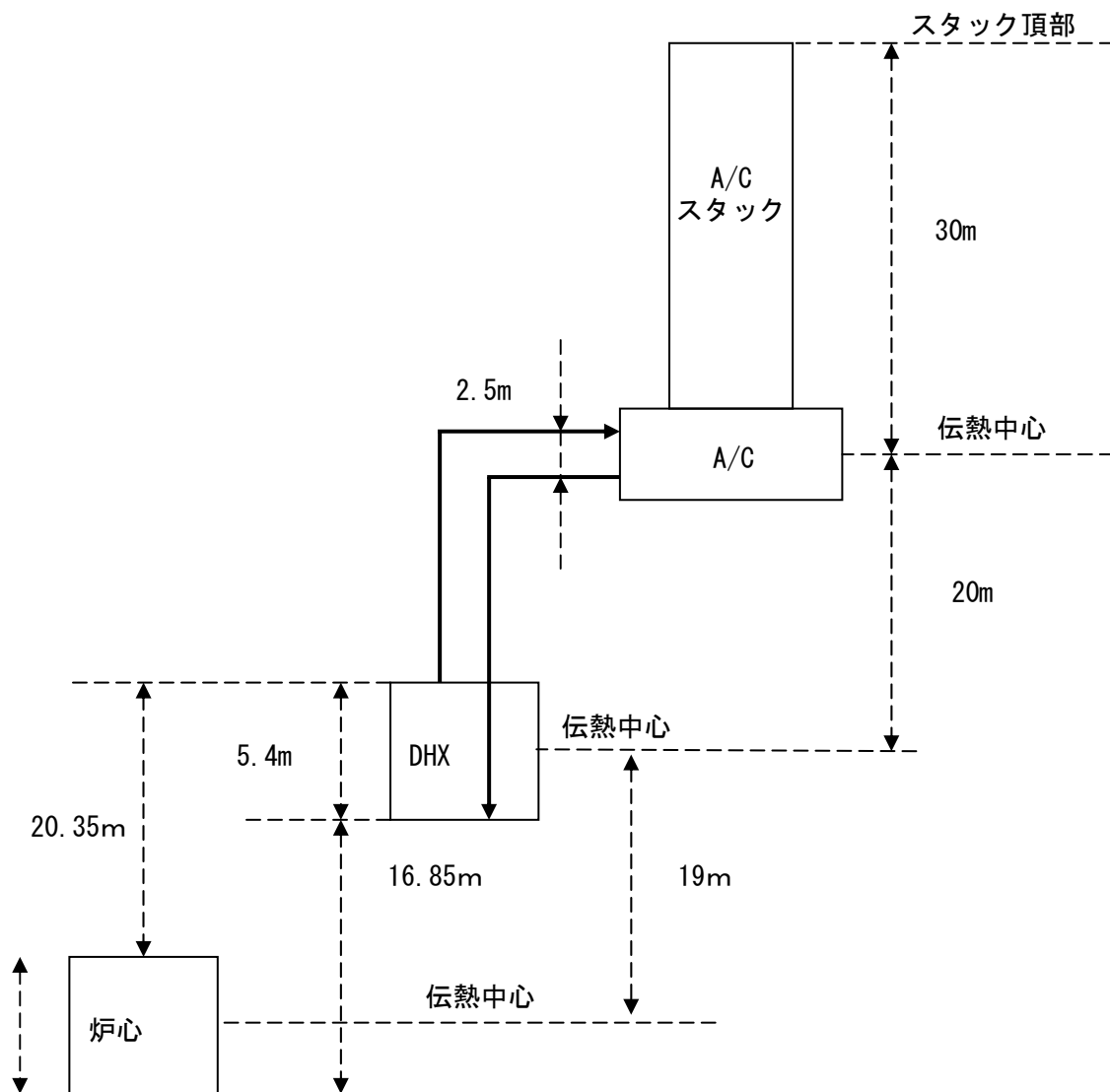
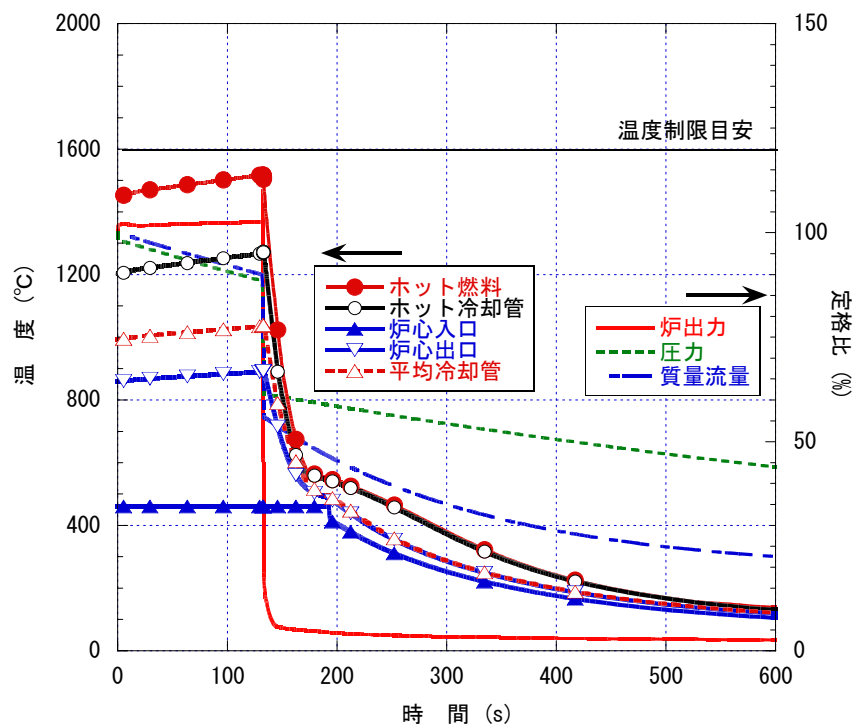
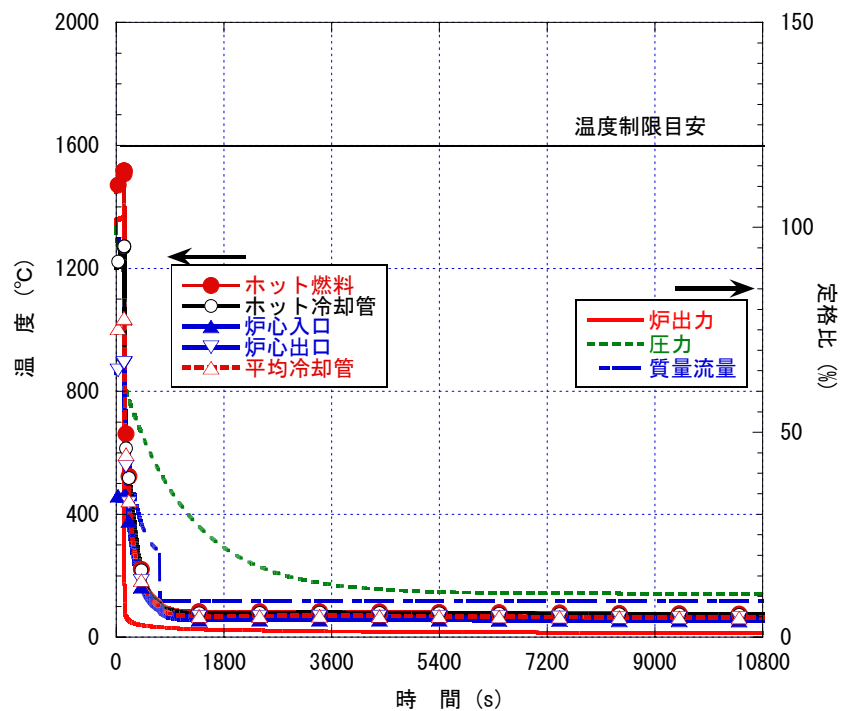


図 4.1-2 炉心及び崩壊熱除去系伝熱中心高さ関係

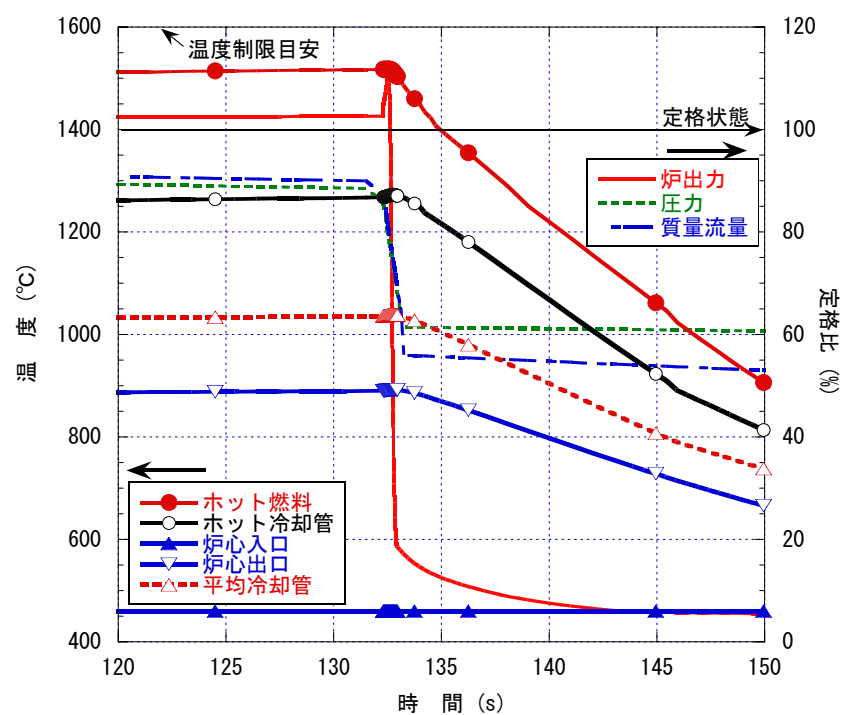


(a) 短期挙動



(b) 長期挙動

図 4.2-1(1) 減圧事故：炉内主要量の過渡挙動
(短期挙動・長期挙動)



(c) 制御棒挿入時の挙動

図 4.2-1(2) 減圧事故：炉内主要量の過渡挙動
(制御棒挿入時)

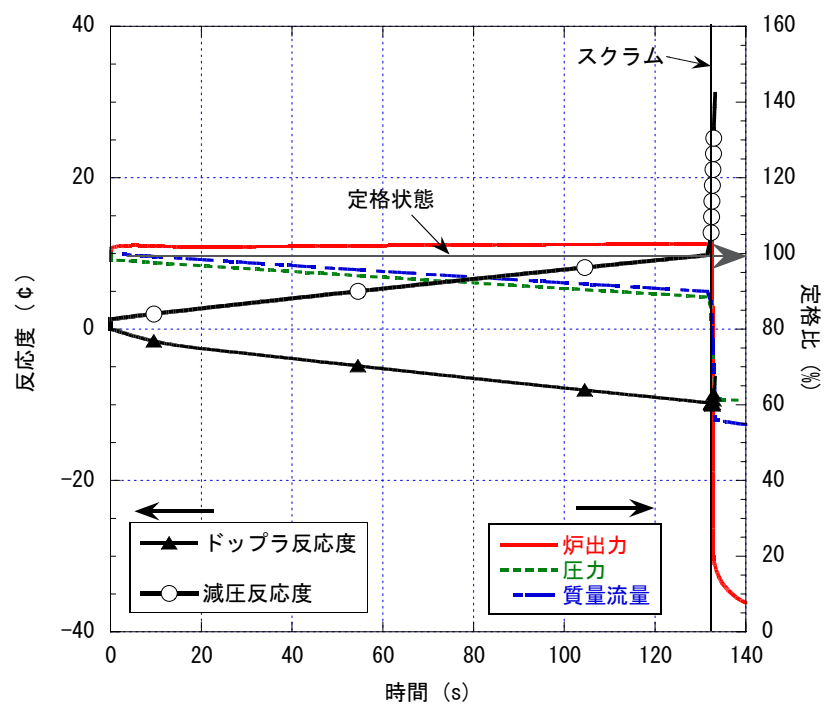
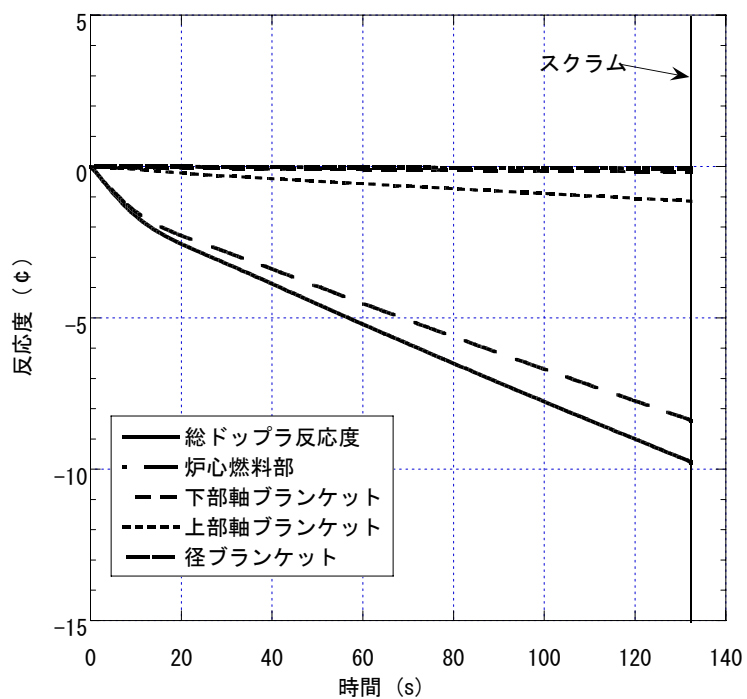
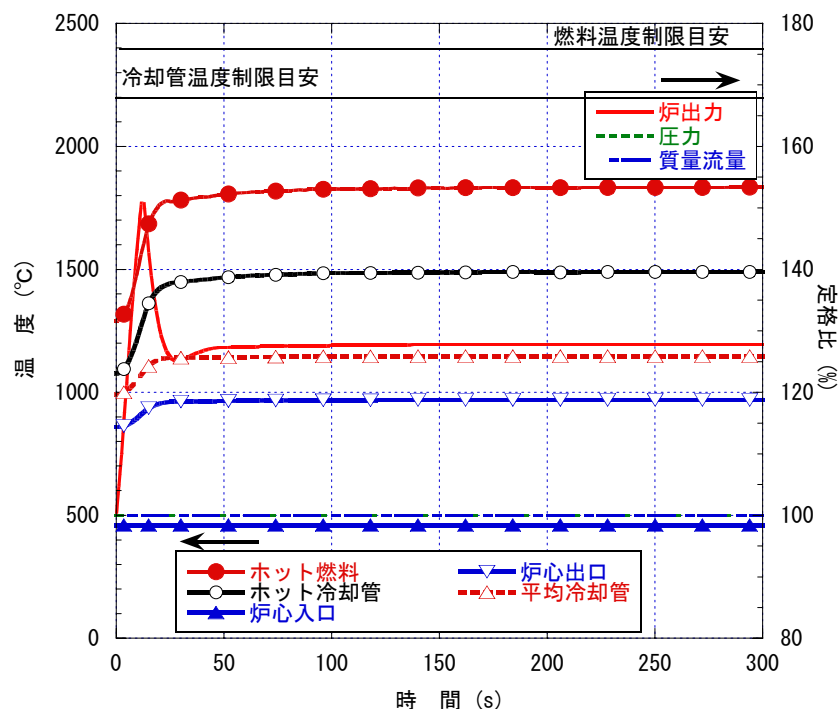
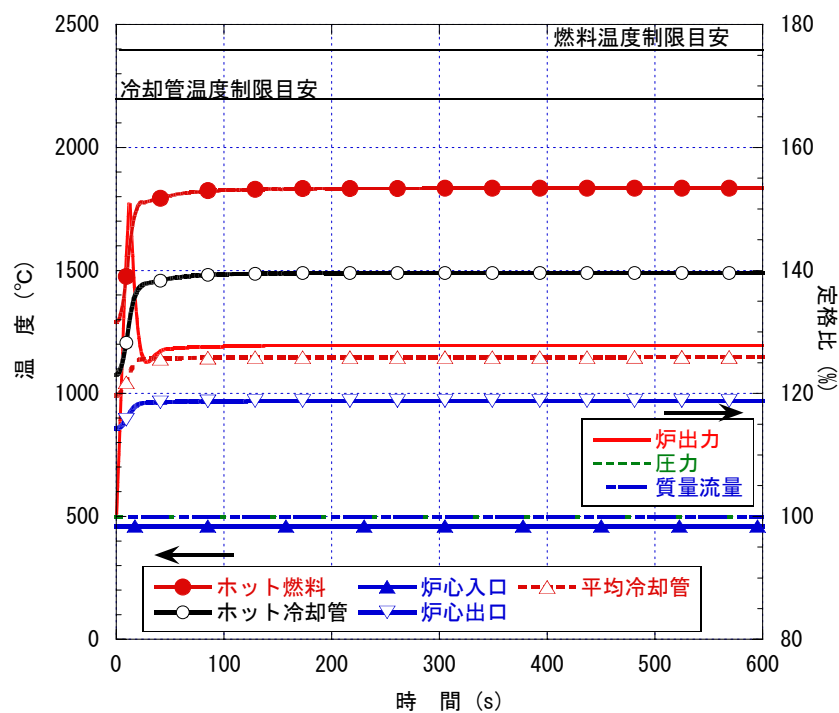


図 4.2-2(1) 減圧事故：反応度の過渡挙動

図 4.2-2(2) 減圧事故：反応度の過渡挙動
(ドップラ反応度の内訳)

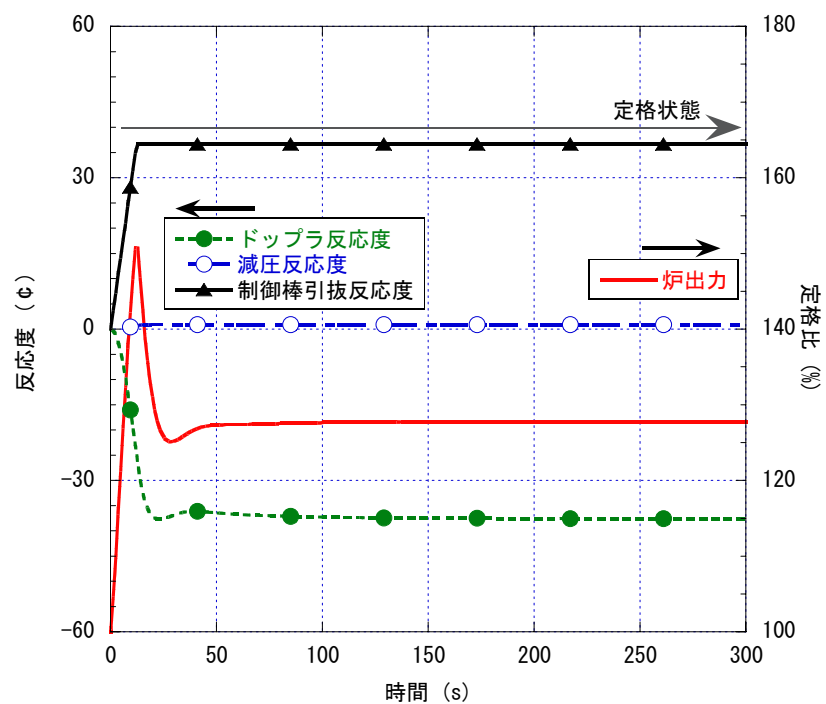


(a) 短期挙動

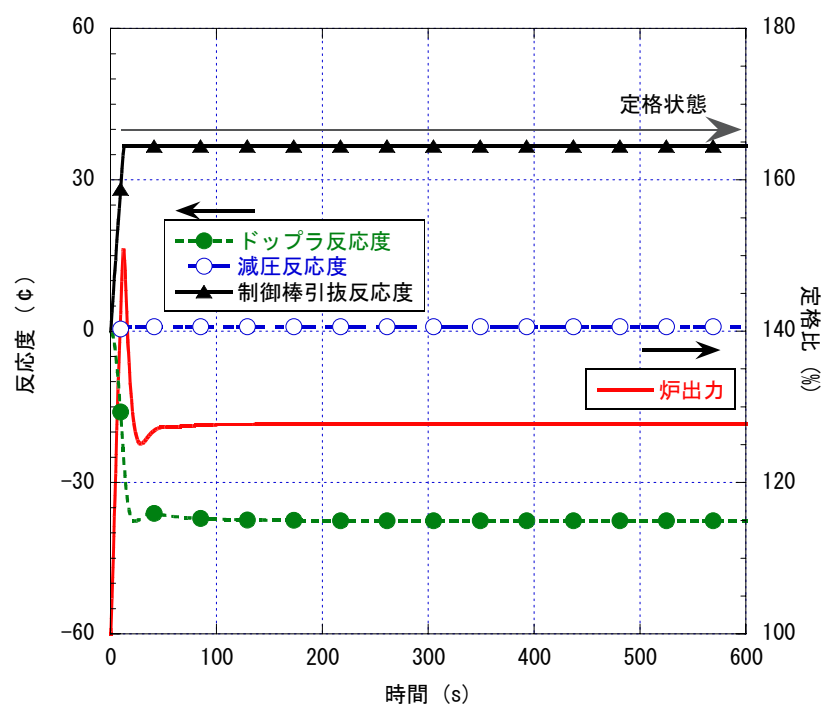


(b) 長期挙動

図 4.3-1 UTOP : 炉内主要量の過渡挙動
(37¢ 投入条件)

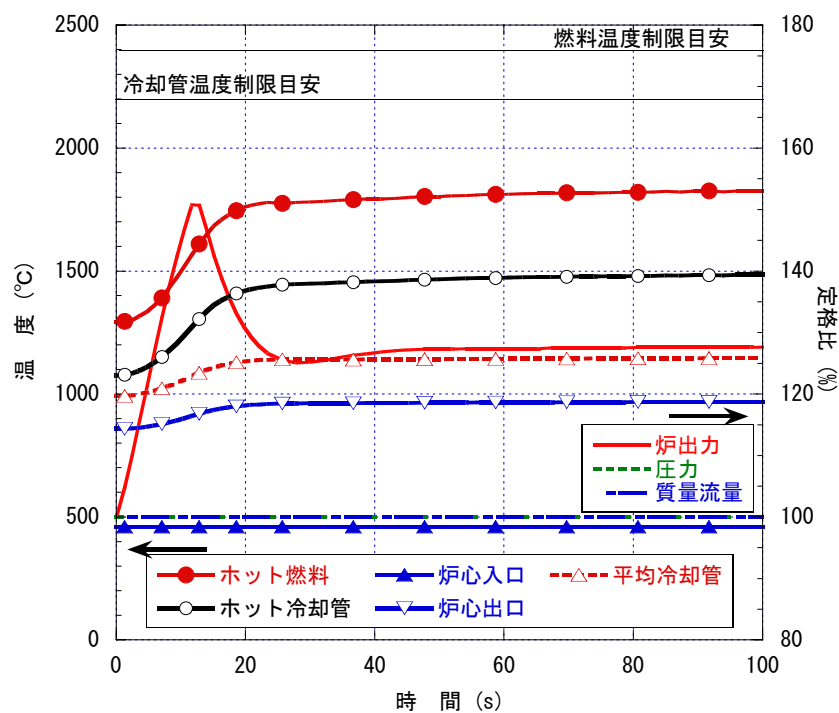


(a) 短期挙動

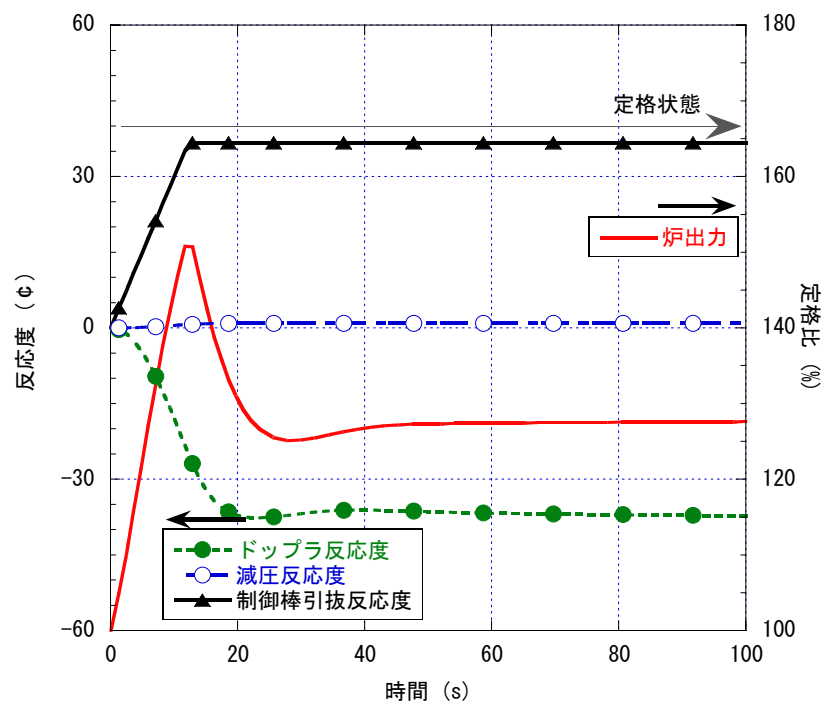


(b) 長期挙動

図 4.3-2(1) UTOP：反応度の過渡挙動
(37 ϕ 投入条件)



(a) 主要温度、炉出力等



(b) 反応度及び炉出力

図 4.3-2(2) UTOP : 反応度の過渡挙動
(事象初期での過渡挙動)
(37 ϕ 投入条件)

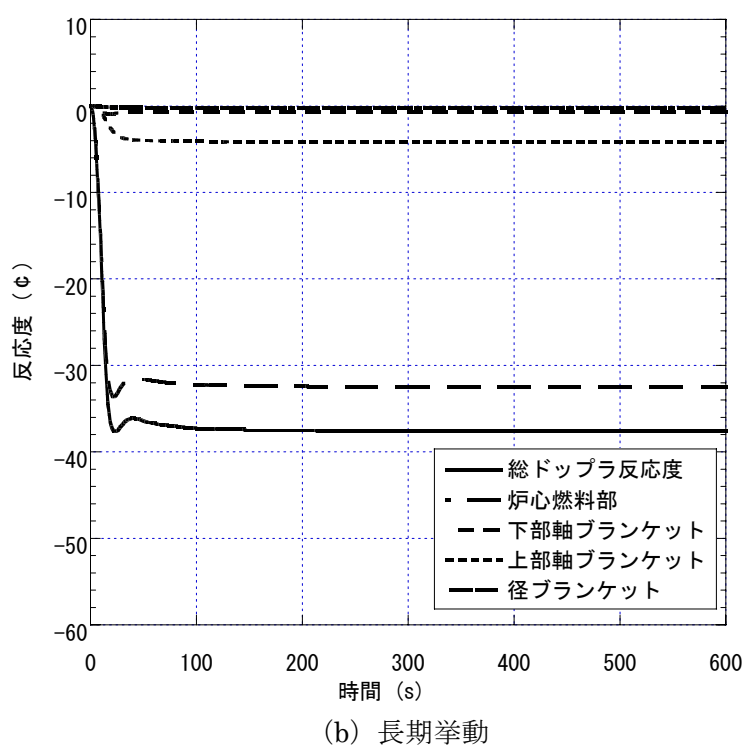
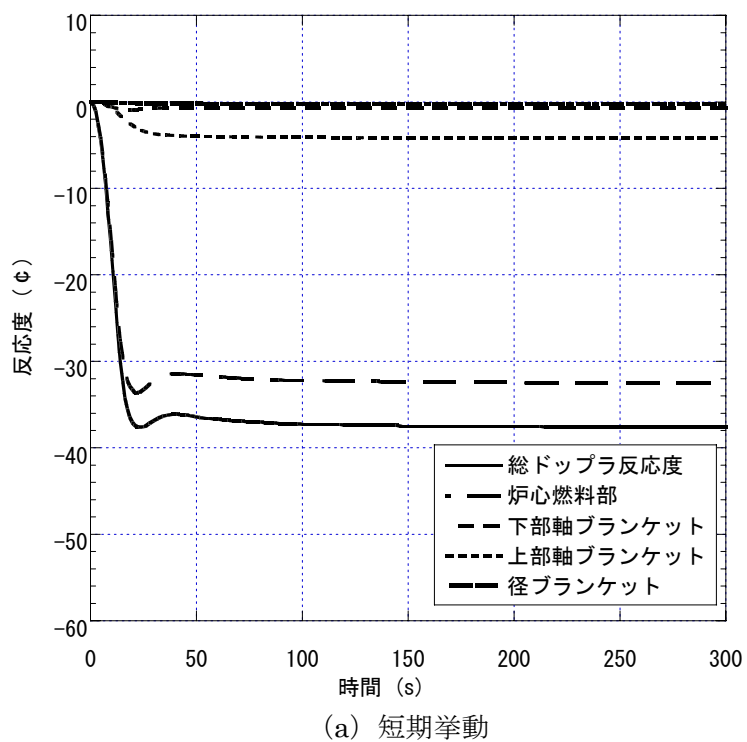


図 4.3-2(3) UTOP：反応度の過渡挙動
(ドップラ反応度の内訳)
(37φ投入条件)

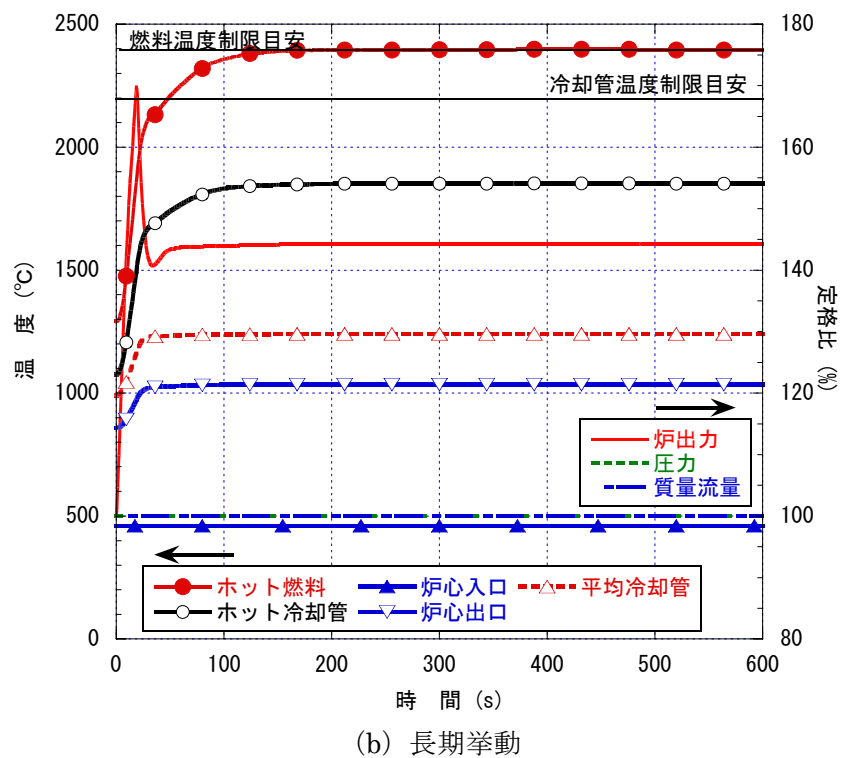
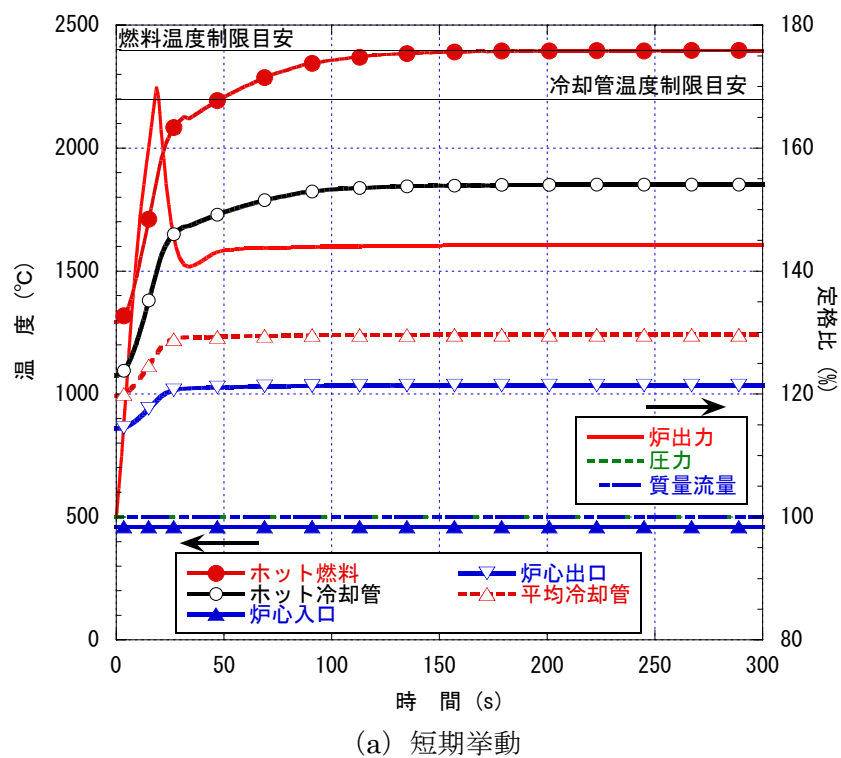
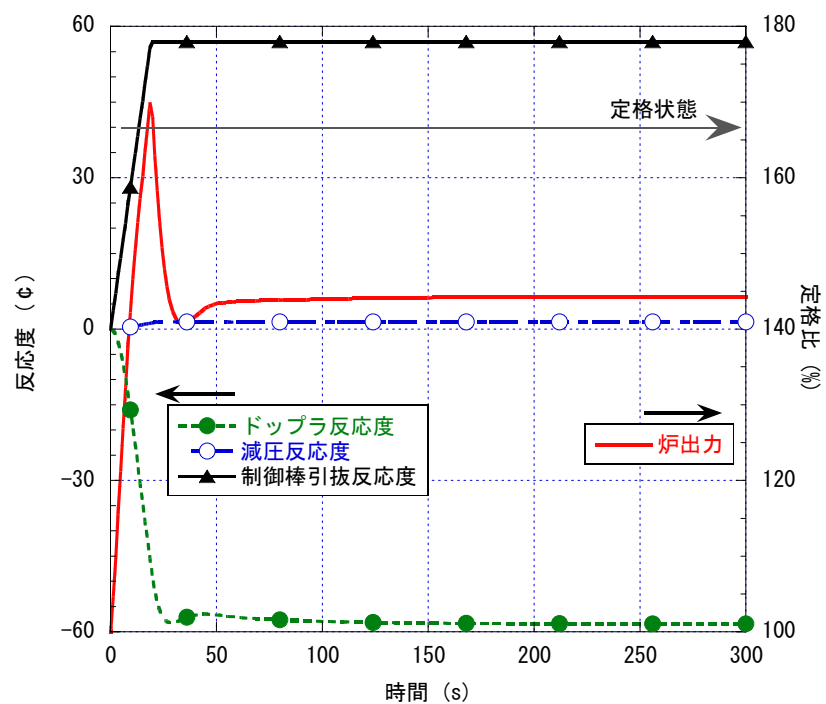
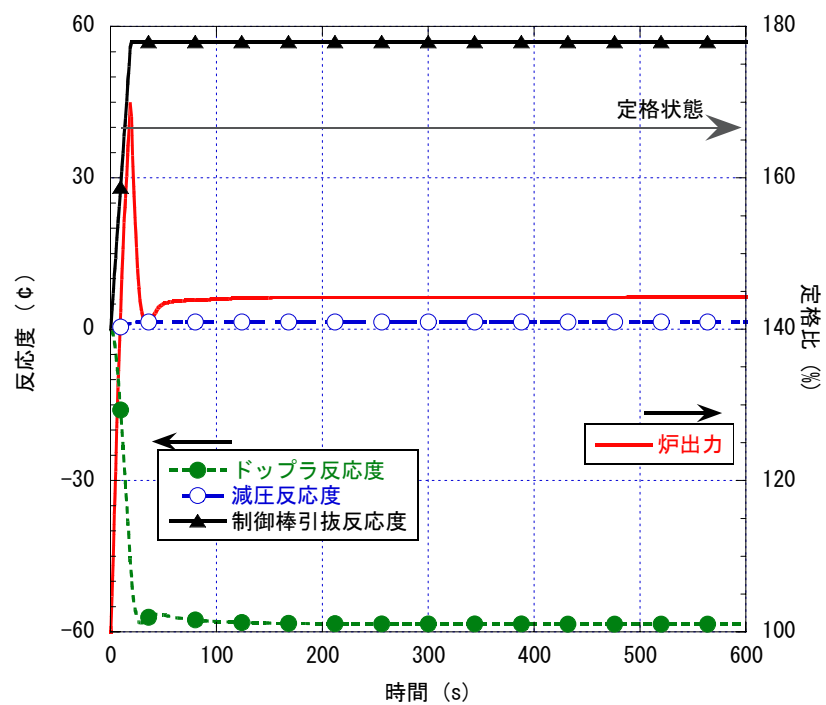


図 4.3-3 UTOP：炉内主要量の過渡挙動
(57¢ 投入条件)

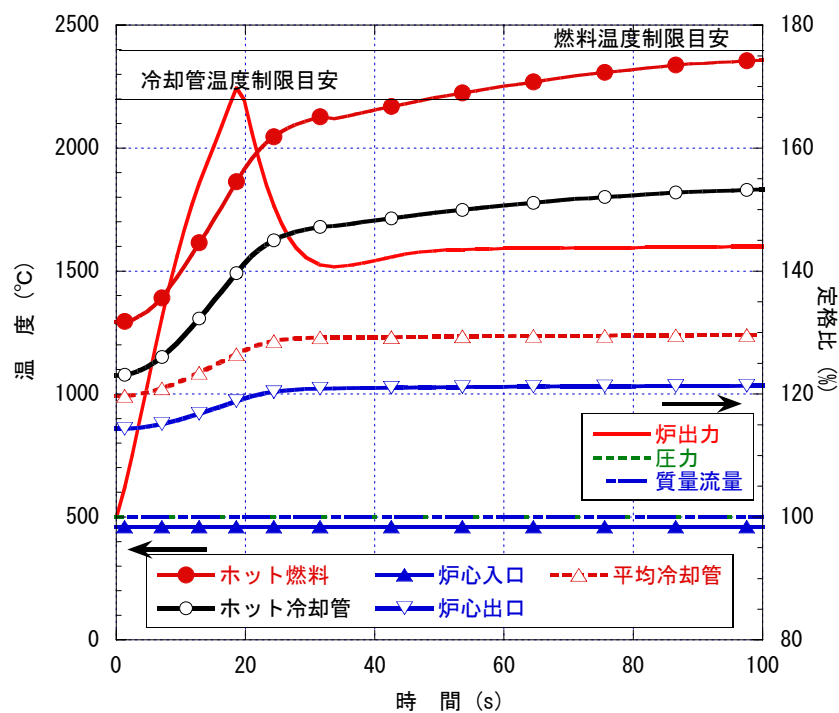


(a) 短期挙動

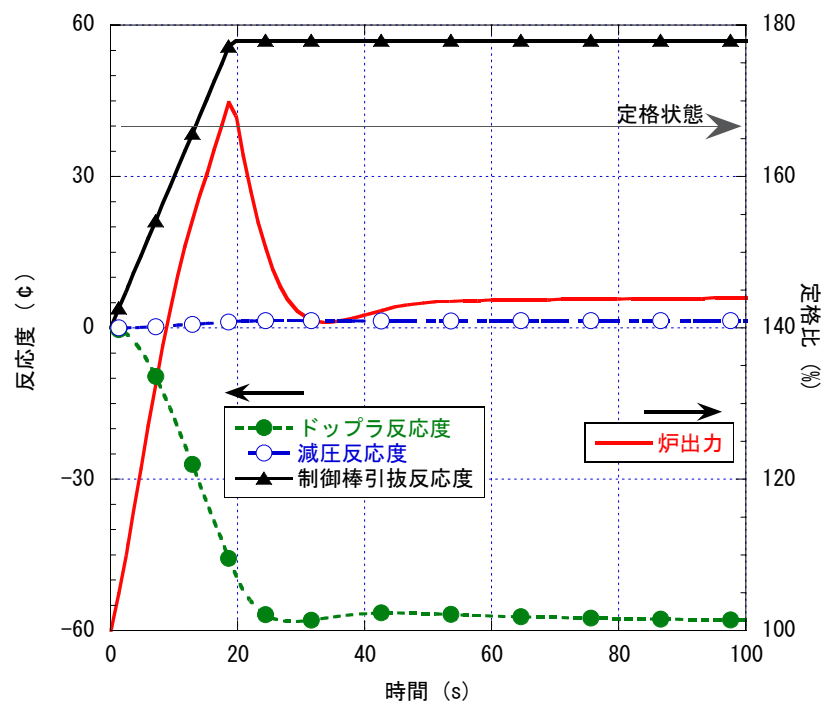


(b) 長期挙動

図 4.3-4(1) UTOP : 反応度の過渡挙動
(57 ϕ 投入条件)



(a) 主要温度、炉出力等



(b) 反応度及び炉出力

図 4.3-4(2) UTOP : 反応度の過渡挙動
(事象初期での過渡挙動)
(57 ϕ 投入条件)

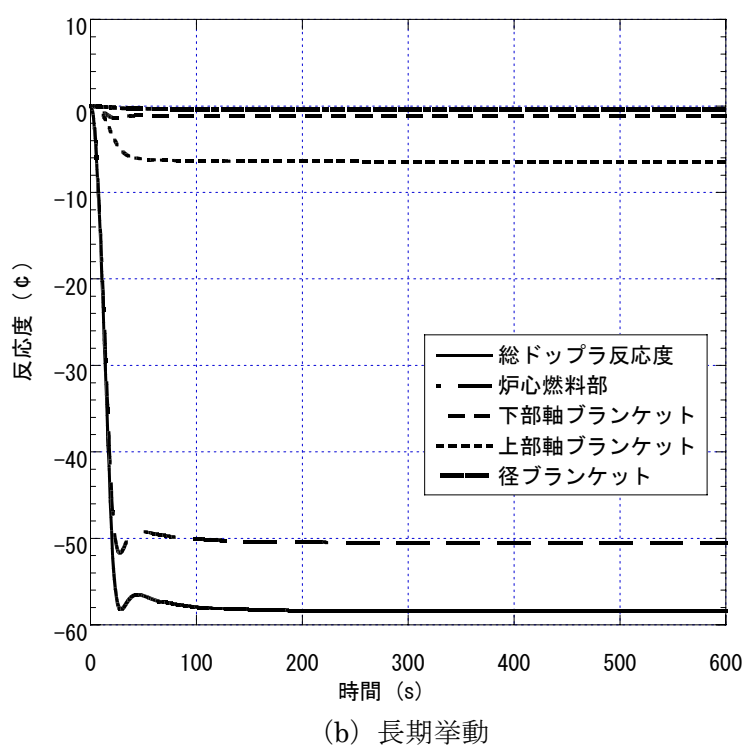
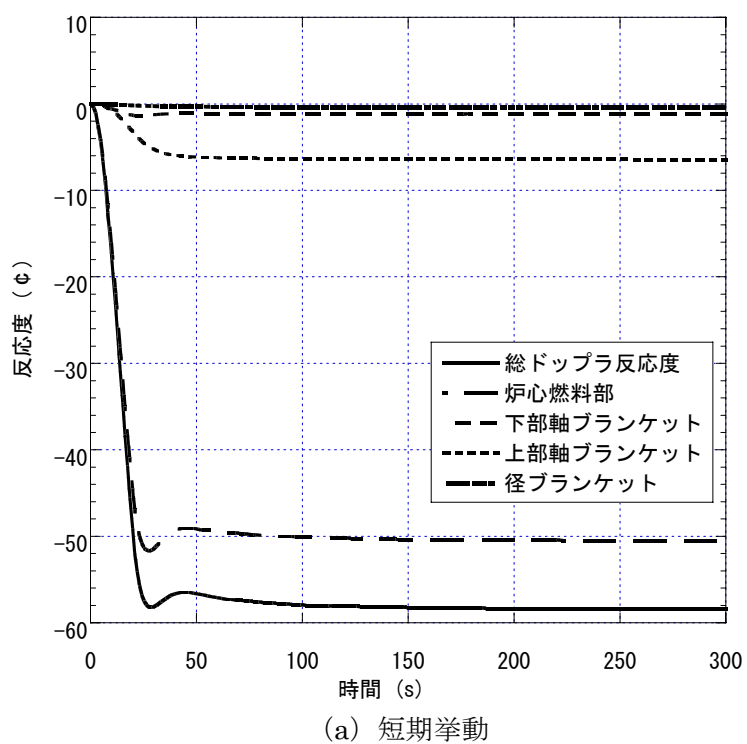


図 4.3-4(3) UTOP：反応度の過渡挙動
 (ドップラ反応度の内訳)
 (57 ϕ 投入条件)

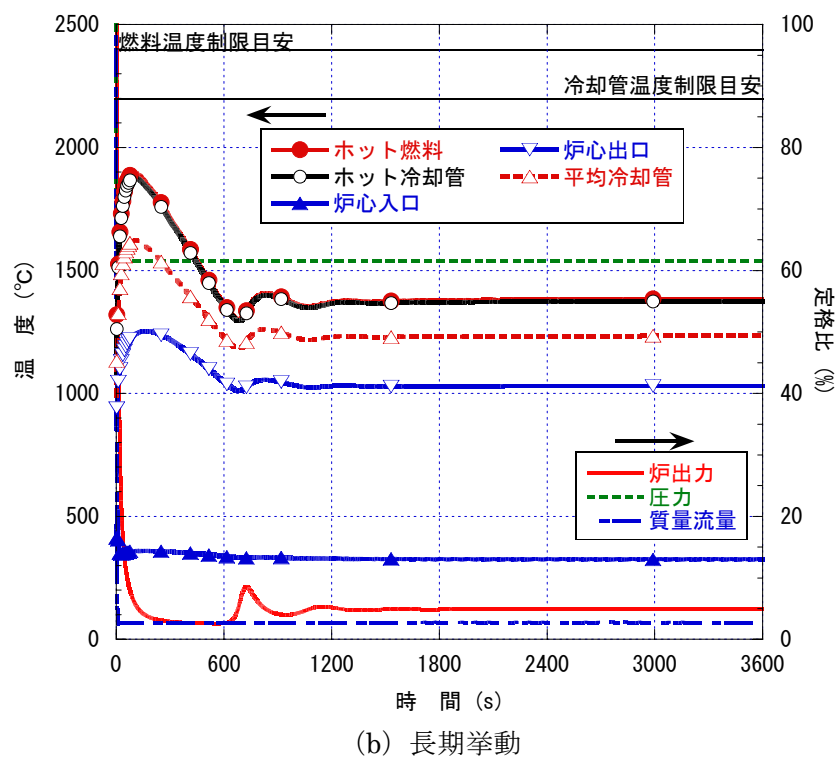
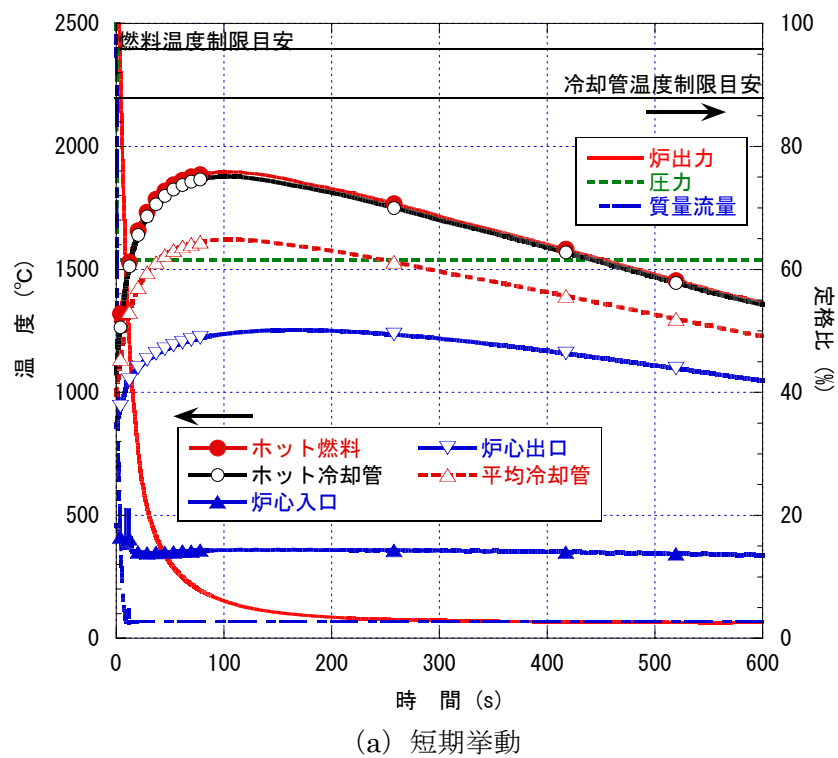
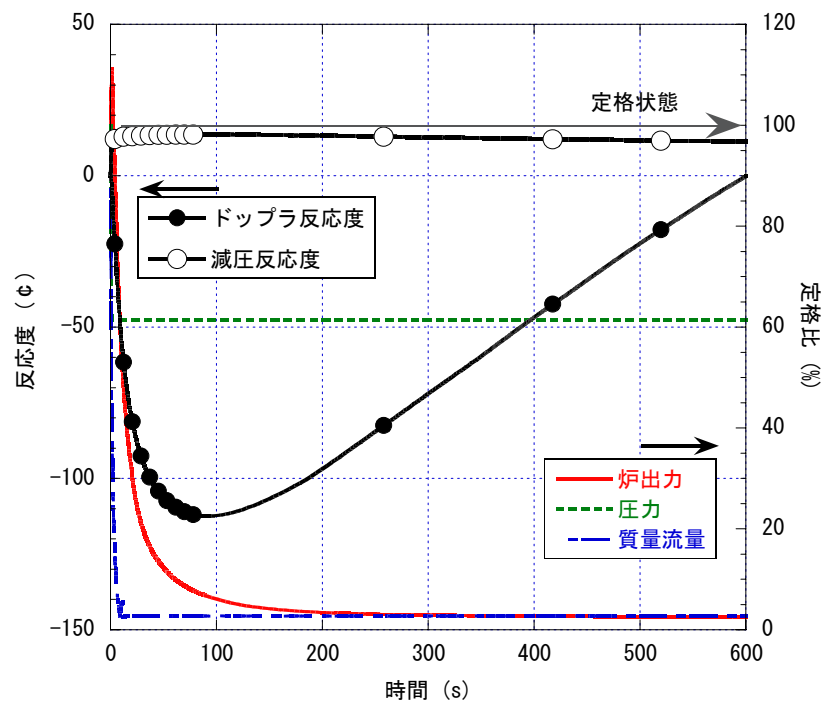
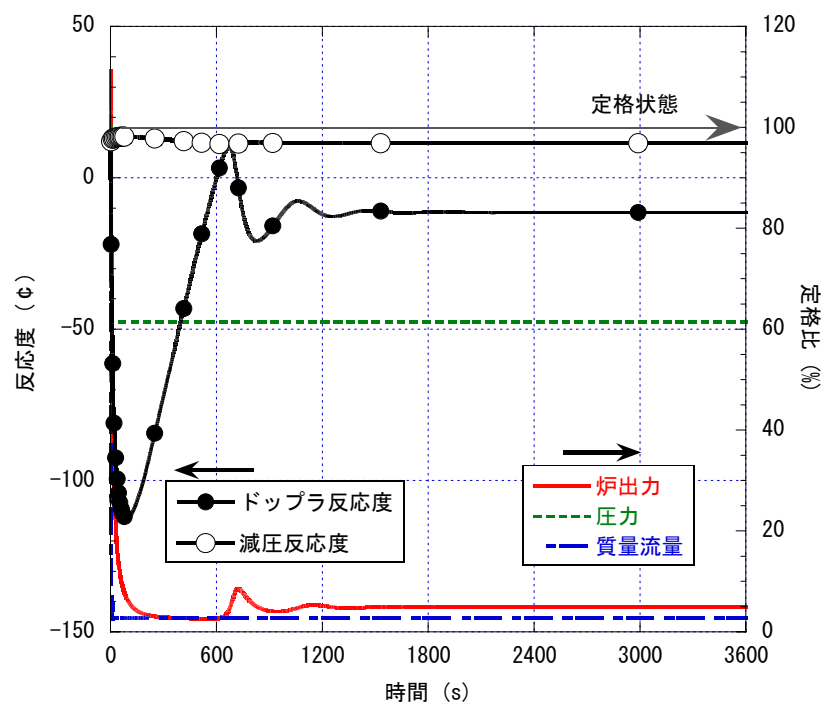


図 4.4-1 ULOF : 炉内主要量の過渡挙動



(a) 短期挙動



(b) 長期挙動

図 4.4-2(1) ULOF：反応度の過渡挙動

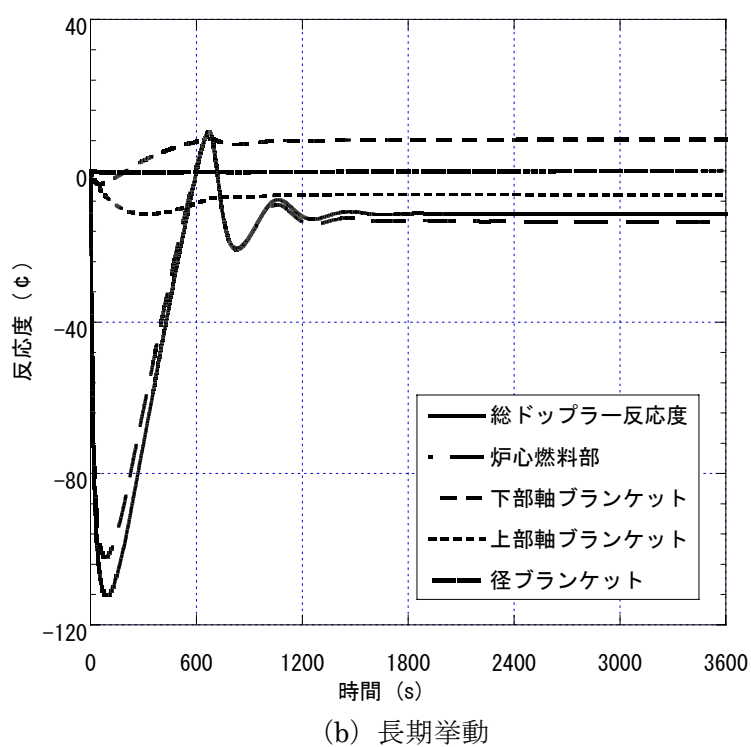
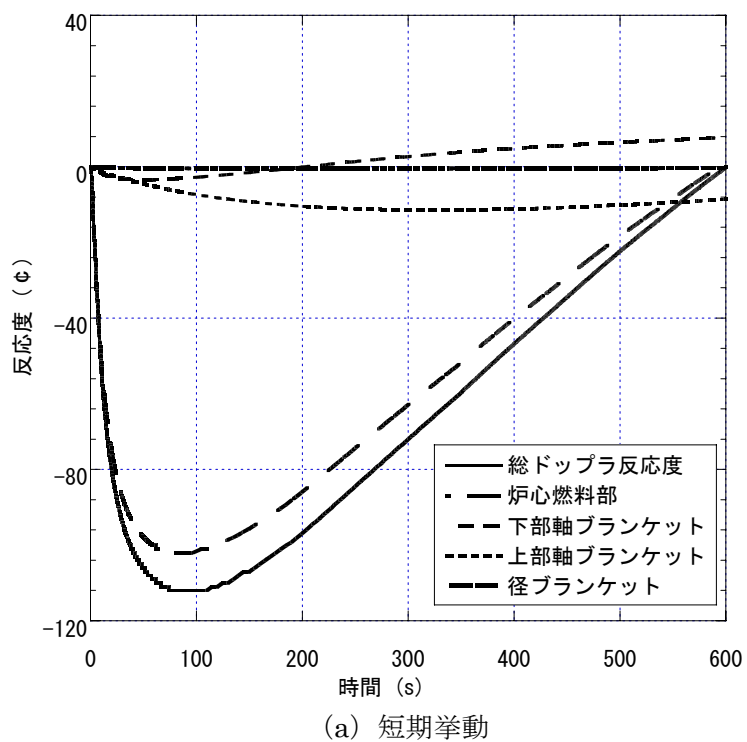


図 4.4-2(2) ULOF：反応度の過渡挙動
 (ドップラ反応度の内訳)

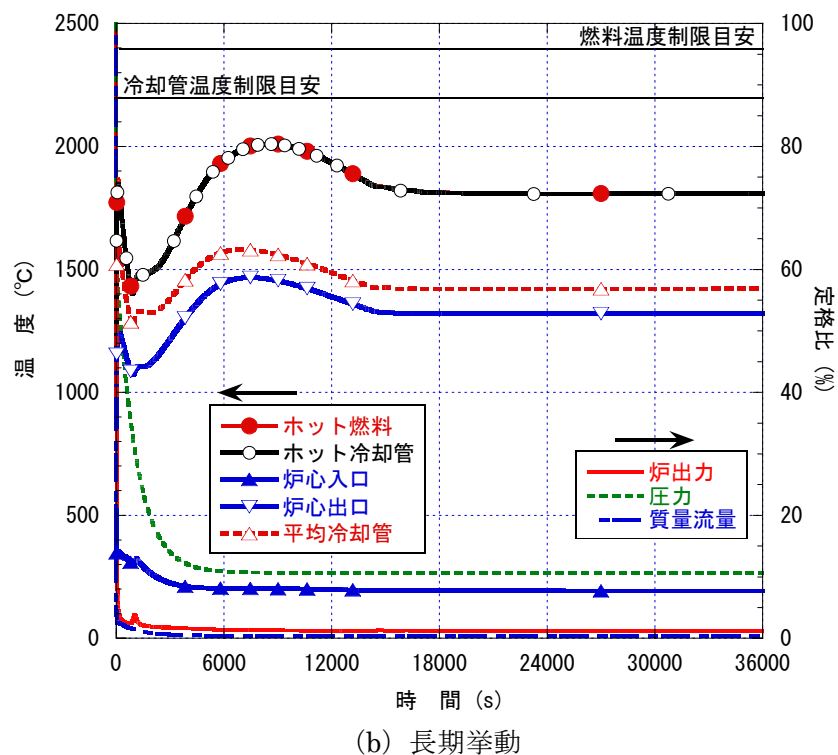
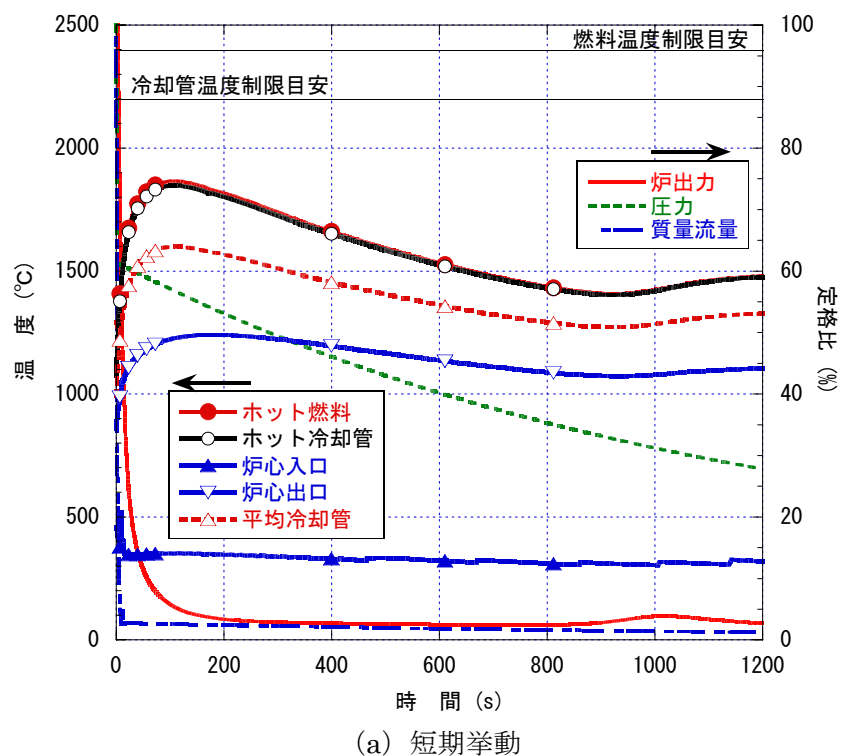
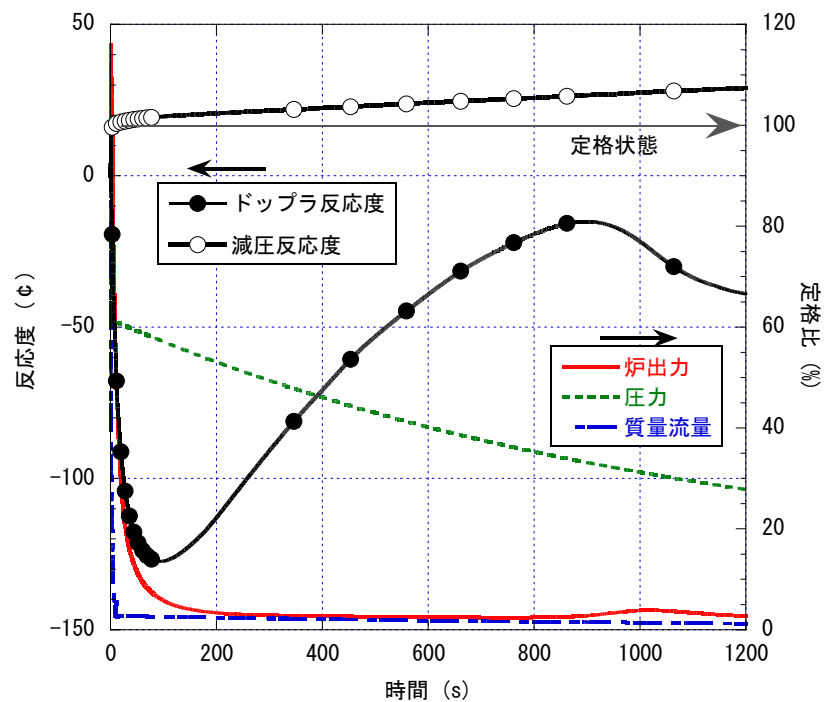
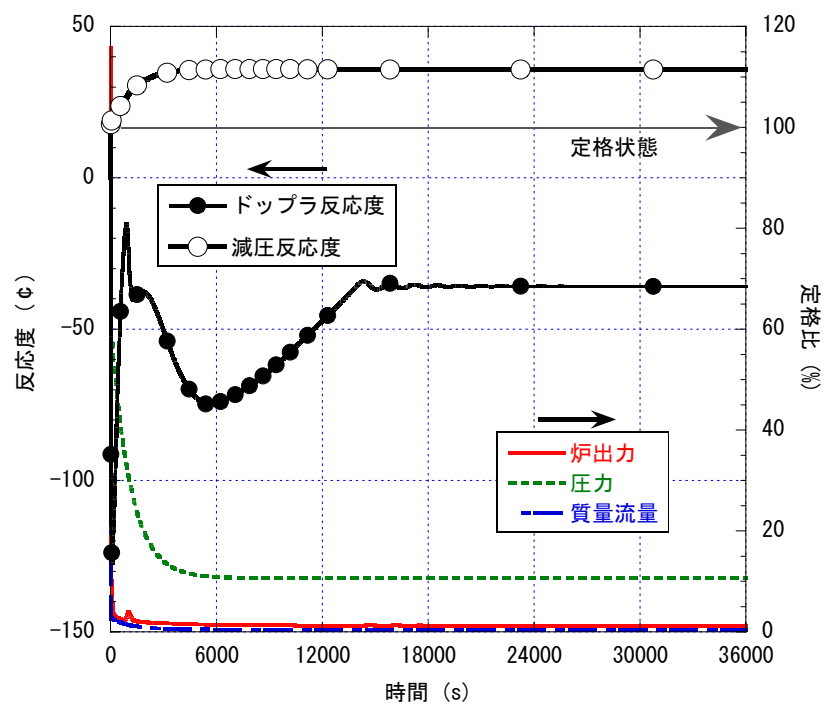


図 4.5-1 設計検討用過渡挙動解析(AWS)
炉内主要量の過渡挙動



(a) 短期挙動



(b) 長期挙動

図 4.5-2(1) 設計検討用過渡挙動解析(AWS)
反応度の過渡挙動

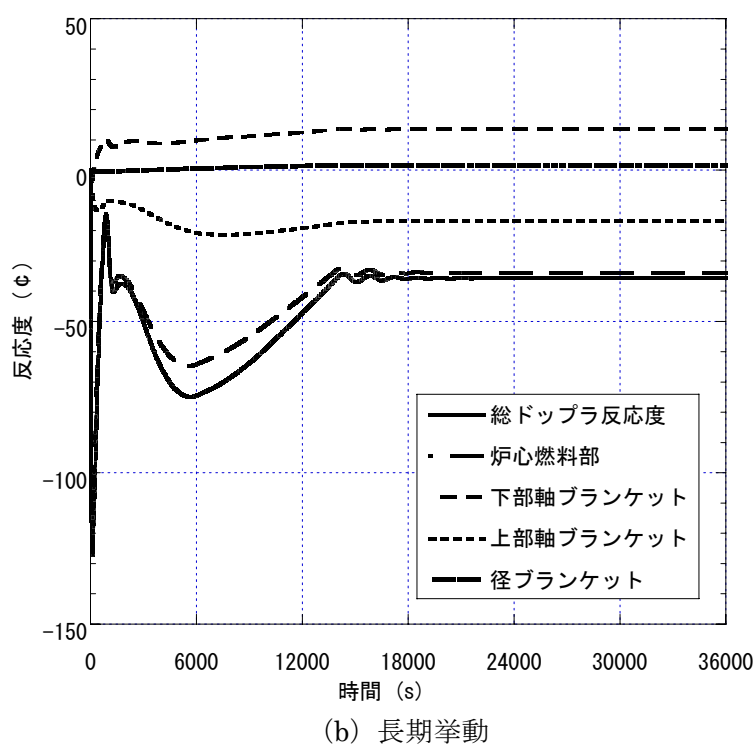
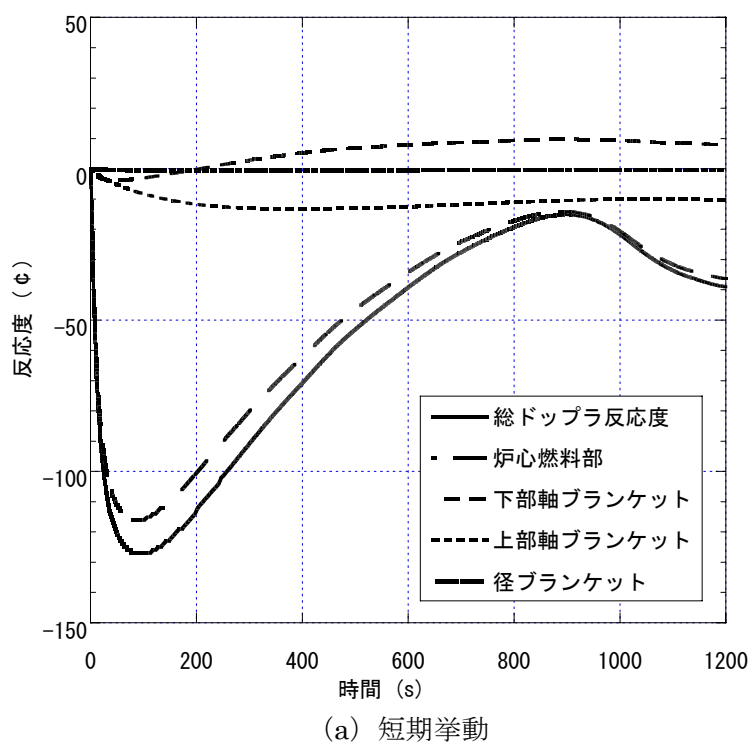


図 4.5-2(2) 設計検討用過渡挙動解析(AWS)
反応度の過渡挙動
(ドップラ反応度の内訳)

5. おわりに

被覆粒子燃料を固相マトリクスからなるブロックに内蔵し、縦方向流により間接冷却する六角ブロック型炉心概念について、除熱特性向上方策の検討と、FS フェーズ II 取り纏めに向けた基準炉心の構築および過渡解析による安全性・炉心除熱性評価を実施した。

H15 基準炉心概念の特性要因分析を行い、その核特性・除熱特性を高めるために有効な着眼点として、*径方向出力ピーキング係数の低減、*燃料体積比の向上、*燃料・冷却管の温度低減、*炉心圧力損失の低減を抽出し、さらに、これらの特性向上を図る諸方策を幅広く検討し、*接触熱抵抗適正化による実効熱伝達の改善、および、*AWS 時炉心入口温度の低減を見いだした。

これらの方策を反映した炉心形態として、*核分裂性 Pu 重量低減を主として目差す炉心、*実効取出燃焼度の向上を主として目差す炉心、*炉心熱出力を高めて小型化することを主として目差す炉心について、それらの利害得失を定量的に比較し、「実効取出燃焼度と初装荷核分裂性 Pu 重量低減が両立可能な炉心」を有望概念として選定し、基準炉心を構築した。

基準炉心としては、増殖性を確保し実効燃焼度の向上も図る導入期炉心と、維持増殖ながら径ブランケットを削減し実効燃焼度の向上を図る平衡期炉心を構築した(共に 1124MWe 級)。また大出力化炉心 (1500MWe 級、導入期及び平衡期炉心)、TRU 燃焼炉心を検討し、炉心形態の柔軟性を示した。

導入期炉心(1124MWe 級)に対しては、過渡解析を実施し、減圧事故時には炉心温度制限値(1600℃)を満たすこと、ATWS(UTOP、ULOOF)時および AWS(減圧事故でスクラムが失敗し自然循環除熱される状況)でも炉心冷却が可能な見通しであることを示した。

本年度の設計研究により構築された炉心(導入期炉心)の特性を下記にまとめる。H15 基準炉心 ([]内の値)と比較し、核特性及び除熱性能の大幅な向上が確認できる。

*導入期炉心の炉心特性・過渡特性主要値

炉心部取出燃焼度 (炉心部のみ)	:	121GWd/t	[120GWd/t]
実効取出燃焼度 (ブランケット含む)	:	69GWd/t	[55GWd/t]
増殖比	:	1.11	[1.14]
初装荷核分裂性 Pu 重量	:	7.0t/GWe	[7.8t/GWe]
減圧反応度	:	0.30\$	[0.29\$]
AWS 時炉心部温度			
1 次ピーク	:	1867℃	[1850℃]
2 次ピーク	:	2011℃	[約 7 時間後まで 2200℃以下]
長期除熱時	:	1809℃	[2200℃超]

実用化戦略調査研究フェーズ II のまとめに向け、今後、平衡期炉心の過渡解析、炉心構成要素 (遮蔽体) の構造検討などを実施する予定である。

謝 辞

ヘリウムガス冷却高速炉の炉心設計および過渡解析を実施するにあたり、多くの方々の協力を得ました。

炉心設計および遮蔽特性評価に関し、(株)三菱重工業の大久保 良幸氏、(株)日立製作所の山館 恵氏、黒澤 典史氏、(株)NESI の曾我 彰氏、(株)ISA の青柳 成美氏、菰田 宏氏の御協力を得ました。過渡解析に関し、(株)川崎重工業の前川 勇氏、佐藤 学氏、西村 元彦氏の御協力を頂きました。

上記の方々には、核燃料サイクル開発機構・大洗工学センターにおいて立案したヘリウムガス冷却高速炉の炉心設計方針および検討方法を理解した上で、諸作業にあたって頂きました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] 核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ I 報告書」、JNC TN1400 2001-006 (2001).
- [2] 核燃料サイクル開発機構、日本原子力発電、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 報告書」、JNC TN1400 2004-004 (2004).
- [3] 核燃料サイクル開発機構、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 中間報告 ―原子炉プラントシステム技術検討書―」、JNC TN9400 2004-035 (2004).
- [4] 核燃料サイクル開発機構、「特集：高速増殖炉サイクル実用化戦略調査研究フェーズ II 中間取りまとめ」、サイクル機構技報、JNC TN1340 2004-003、No.24 別冊、ISSN 1344-4239 (2004).
- [5] 永沼 正行, 杉野 和輝, 水野 朋保 他、「ヘリウムガス冷却高速炉の炉心・燃料設計検討 (被覆粒子型燃料炉・ピン型燃料炉)―2001 年度報告―」、JNC TN9400 2002-074 (2002).
- [6] 森部剛志、久保重信、三枝利家 他、「ガス炉のプラント概念に関する研究」、JNC TY9400 2003-007 (2003).
- [7] 森部剛志、久保重信、三枝利家 他、「ガス炉のプラント概念に関する研究」、JNC TY9400 2004-007 (2004).
- [8] 岡野 靖、高木 直行、三田敏男 他、「ヘリウムガス冷却高速炉・被覆粒子窒化物燃料炉心の設計検討 (横方向流冷却型概念／縦方向流ブロック型概念炉心) ―2003 年度報告―」、JNC TN9400 2004-027 (2004).
- [9] 塩谷洋樹、大滝 明、小野 清 他、「高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ II 中間報告 ―総合評価技術検討書―」、JNC TN9400 2004-052 (2004).
- [10] 高木直行、永沼正行、水野朋保、「Na 炉、Pb-Bi 炉、ガス炉における元素分離 LLFP の核変換特性 (その 2)」、TN9400 2004-028 (2004).
- [11] 永沼 正行、水野 朋保、「高速炉用被覆粒子型燃料の被覆層材特性に関する検討 (その 1)」、JNC TN9400 2002-032 (2002).
- [12] 永沼 正行、水野 朋保、「高速炉用被覆粒子型燃料の被覆層材特性に関する検討 (その 2) ―TiN の高温特性・厚膜化検討―」、JNC TN9400 2002-051 (2002).
- [13] 杉野 和輝、「ガス冷却高速炉の炉心核特性の非均質効果・輸送効果の評価」、JNC TN9400 2002-050 (2002).
- [14] 羽様 平, 千葉 豪, 沼田 一幸, 佐藤 若英、「高速炉用統合炉定数 ADJ2000R の作成」、JNC TN9400 2002-064 (2002).
- [15] 京都大学、「高効率・環境調和型超高温ガス冷却高速炉 炉心構造体の先進材料システム開発」、文部科学省 革新的原子力システム技術開発公募事業 H15 年度成果報告書、(2005).
- [16] http://www.jsup.or.jp/shiryo/pdf2/h14/h14_chapter2_150.pdf など (2004/2 時点).