

太径中空燃料を用いた 内部増殖炉心概念の設計研究

(研 究 報 告)

2003年8月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

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)

2003

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念の設計研究

(研究 報 告)

前 田 誠一郎¹⁾、高下 浩文¹⁾、大川 剛²⁾、
樋口 真史³⁾、安部 智之¹⁾

要 旨

技術開発が最も進み、燃料サイクルにおいてプルサーマルと共通した技術基盤を有する燃料オプションである MOX 燃料を前提とし、早期に実現可能な FBR 実用化段階の炉心・燃料候補として“太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念”の検討を進めている。本概念では、太径燃料を用いて燃料体積率を高めることによって炉心燃料部でのプルトニウム増殖（内部増殖）を可能とし、ブランケット装荷量を最小限まで低減することで、燃料サイクルに循環する物量を大幅に低減し、経済性を向上させている。

本検討では、実用化戦略調査研究におけるプラント設計等との取り合い条件を可能なかぎり満足させた 3500MWth 級の大型炉心に対して設計検討を行い、内部増殖炉心概念の特徴を把握した。被覆管材に ODS 鋼の使用を想定し、最大高速中性子照射量として約 $5 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ を条件として、ブランケットをも含む全炉心での取出平均燃焼度が約 130GWd/t（炉心部のみ；約 150GWd/t）と大幅な高燃焼度化が達成できることが示された。また、内部増殖炉心では燃焼に伴う反応度変化が小さく、容易に長期運転が可能であると共に空間的、時間的に出力分布が安定していることから冷却特性上も有利であることが確認された。ここで、中性子経済を向上するために比較的高い炉心高さを指向したことに対応して、Na プレナム等の Na ボイド反応度低減方策について検討を行った。

さらに、導入シナリオの多様性を考慮して、燃焼度を低下させて、増殖性能を追求した炉心像の可能性についても検討した。

なお、高燃料体積率、低比出力等の従来概念を超える特徴を有する本炉心概念に対して、炉心崩壊事故のような過酷な条件下での挙動についての知見が十分ではなく、今後、事象進展を把握した上で設計に反映する必要があるものと考えられる。

¹⁾東海事業所 プルトニウム燃料センター 製造加工部 設計評価グループ

²⁾同上、現 新型転換炉ふげん発電所 技術課

³⁾株式会社 NESI

Design Study on In-core Breeding Concept Using Annular Thick Fuel Pins

(Research Document)

Seiichiro Maeda^{*1}, Hirofumi Takashita^{*1}, Tuyoshi Okawa^{*2},
Masashi Higuchi^{*3}, Tomoyuki Abe^{*1}

Abstract

We are studying on an in-core breeding concept as a candidate for a practical FBR fuel cycle system attainable in an early stage on the premise that sodium coolant and mixed oxide fuel should be adopted, since the technical issues with the combination are most advanced and common with the fuel cycle for a LWR-MOX system. An enhancement of fuel volume fraction using thick fuel pins enables the in-core breeding. The fuel material flow can be greatly lessened by minimizing amount of the blanket with the in-core breeding core. The low material flow leads to significant reduction of the fuel cycle cost.

In this study, we investigated a 3500MWth large-scale core adjusting several conditions presented in JNC's feasibility study program for a commercialized FBR system.

Theses were shown in this study that a discharged burnup averaged over the core and the blanket could reach approximately 130GWd/t (core averaged about 150GWd/t) within the maximum fast neutron fluence about $5 \times 10^{23}/\text{cm}^2$, that the small reactivity loss with burnup easily enabled long operation and that stable power distribution during operation significantly improved hydraulic property in this type core.

We investigated measures to reduce sodium void reactivity, because core height enlargement to enhance neutron efficiency caused the increase of sodium void reactivity.

We also investigated feasibility of a high breeding type core with low burnup, considering a variety of FBR introducing scenarios and a trade-off correlation between breeding performance and burnup extension.

The performance in this core design at core disruption accidents is not revealed enough. Further investigation should be made in detail to confirm that the in-core breeding concept could be accepted in a safety aspect.

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

*2 The same as above, present; Technical Section, Fugen Nuclear Power Station

*3 Nuclear Energy System Incorporation

目 次

1. はじめに	1
2. 太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念について	3
3. 太径中空燃料を用いた内部増殖炉心案の設計検討	12
3.1 検討方針及び条件	12
3.2 炉心・燃料仕様の設定	17
3.3 核設計検討	30
3.3.1 解析手法	30
3.3.2 核特性解析結果（2次元 R Z 体系解析結果）	38
3.3.3 出力・燃焼度分布評価	61
3.3.4 制御棒反応度収支の推定	90
3.3.5 制御棒誤引き抜き時の出力歪	99
3.4 熱流力設計検討	107
3.4.1 被覆管 CDF 評価	107
3.4.2 熱流動サブチャンネル評価	117
3.4.3 ヒートバランス概略評価	135
3.5 まとめ	138
4. 増殖性能向上を目指した炉心案の検討	141
4.1 検討方針	141
4.2 燃焼度低減による効果把握	143
4.3 ペレットスミア密度増加による効果把握	146
4.4 Pu 富化度バランスによる効果把握	147
4.5 まとめ	148
5. Na ボイド反応度低減方策の検討	150
5.1 解析方法	150
5.2 炉心高さによる Na ボイド反応度に与える影響	151
5.3 Pu 富化度分布による Na ボイド反応度に与える影響	153
5.4 Na プレナム高さ等による Na ボイド反応度に与える影響	155
5.5 上部軸方向ブランケット高さによる Na ボイド反応度に与える影響	157
5.6 まとめ	159
6. 今後の課題及び予定	160

7. おわりに	162
参考文献	163
添付資料 統合炉定数 ADJ2000 を用いた場合の核特性について	164

表目次

表 3.1-1	実用化戦略調査研究での設計条件とその対応	16
表 3.2-1	内部増殖炉心の炉心主要仕様	22
表 3.2-2	内部増殖炉心の燃料集合体仕様	23
表 3.2-3	ワイヤ径をパラメータとした燃料集合体仕様検討	24
表 3.2-4	制御棒暫定仕様	25
表 3.2-5	ステンレス鋼反射体、 B_4C 中性子遮へい体、 上部中性子遮へい体の暫定仕様	26
表 3.3.1-1	実効断面積作成用領域温度	33
表 3.3.1-2	核分裂当たりの放出エネルギー	34
表 3.3.2-1	2次元 RZ 計算による核特性解析結果	43
表 3.3.2-2	平衡サイクル初期インベントリ	44
表 3.3.2-3	平衡サイクル末期インベントリ	45
表 3.3.2-4	平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(炉心部)	46
表 3.3.2-5	平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(ブランケット部)	47
表 3.3.2-6	平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支 (炉心部 + ブランケット部)	48
表 3.3.2-7	平衡サイクルにおける Na ボイド反応度	49
表 3.3.2-8	平衡サイクルにおける動特性パラメータ	50
表 3.3.3-1	平衡サイクルにおける包絡領域出力及び冷却上の炉出力	66
表 3.3.3-2	各流量領域における最大発熱集合体の集合体出力履歴	67
表 3.3.3-3	流量領域毎の最大線出力	68
表 3.3.3-4	流量領域毎の最大発熱集合体の燃焼度	69
表 3.3.4-1	反応度制御系の役割分担	93
表 3.3.4-2	2系統同時作動時における制御棒価値	94
表 3.3.4-3	1系統単独作動時における制御棒価値	95
表 3.3.4-4	各種補正を考慮した場合の制御棒価値の推定	96
表 3.3.4-5	制御棒反応度収支の推定	97
表 3.3.5-1	制御棒 1 本挿入時の出力変化率	102
表 3.3.5-2	制御棒誤引き抜き時の出力変化率	103
表 3.4.1-1	被覆管 CDF 評価用燃料要素仕様	110
表 3.4.1-2	各流量領域の被覆管温度履歴 (被覆管最高温度を 700 とした場合)	111
表 3.4.1-3	各流量領域の被覆管温度履歴 (被覆管最高温度を 695 とした場合)	111
表 3.4.1-4	各流量領域の被覆管温度履歴 (被覆管最高温度を 690 とした場合)	111

表 3.4.1-5	CDF 評価用被覆管温度履歴(被覆管最高温度:700 の場合)	112
表 3.4.1-6	CDF 評価用被覆管温度履歴(被覆管最高温度:695 の場合)	112
表 3.4.1-7	CDF 評価用被覆管温度履歴(被覆管最高温度:690 の場合)	112
表 3.4.1-8	各炉心領域の被覆管 CDF 評価結果	113
表 3.4.2-1	流量領域毎の軸方向出力分布	119
表 3.4.2-2	被覆管最高温度評価用工学的安全係数	120
表 3.4.2-3	流量領域毎の冷却材必要流量及びバンドル圧力損失	121
表 3.4.3-1	流量領域毎の流量、出力及び出口平均温度の関係	137
表 4.2-1	増殖性能向上を目指した炉心案(高増殖型炉心)の炉心・燃料仕様 ..	144
表 4.2-2	増殖性能向上を目指した炉心案の核特性解析結果	145
	(2次元 RZ 燃焼計算)	
表 5.2-1	炉心高さと Na ボイド反応度の関係	152
表 5.3-1	Pu 富化度分布と Na ボイド反応度の関係	154
表 5.4-1	Na プレナム高さ等と Na ボイド反応度の関係	156
表 5.5-1	上部軸方向ブランケット高さと Na ボイド反応度の関係	158
添付表 1	内部増殖炉心(高燃焼度型、高増殖型)の炉心・燃料仕様	167
添付表 2	統合炉定数 ADJ2000 を用いた内部増殖炉心の核特性	168
	(2次元 RZ 体系)	
添付表 3	統合炉定数 ADJ2000 を用いた場合の Na ボイド反応度	169
添付表 4	ADJ98 を用いた高燃焼度型炉心の平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)	170
添付表 5	ADJ2000 を用いた高燃焼度型炉心の平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)	171
添付表 6	ADJ98 を用いた高増殖型炉心の平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)	172
添付表 7	ADJ2000 を用いた高増殖型炉心の平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)	173
添付表 8	統合炉定数 ADJ2000 を用いた場合の初期インベントリ及び倍増時間 ...	174

図目次

図 2-1	高速増殖炉概念の見直し及び将来像 (太径中空燃料を用いた内部増殖炉心)の提案	9
図 2-2	内部増殖炉心の炉心・燃料基本体系の選定	10
図 2-3	内部増殖炉心の炉心構造(軸方向富化度分布、Na プレナム)	11
図 3.2-1	3500MWth 級内部増殖炉心の炉心配置	27
図 3.2-2	3500MWth 級内部増殖炉心の炉心構成(縦断面形状)	28
図 3.2-3	ワイヤ径と燃料体積率及びバンドル部圧損との関係	29
図 3.3.1-1	核設計計算のフロー	35
図 3.3.1-2	制御棒リングモデルの形状	36
図 3.3.1-3	内部増殖炉心の 2 次元 RZ 体系図	37
図 3.3.2-1	平衡サイクル初期における径方向出力分布	51
図 3.3.2-2	平衡サイクル末期における径方向出力分布	52
図 3.3.2-3	平衡サイクルにおける径方向出力分布変化(炉心部軸方向平均)	53
図 3.3.2-4	平衡サイクル初期における軸方向出力分布	54
図 3.3.2-5	平衡サイクル末期における軸方向出力分布	55
図 3.3.2-6	平衡サイクルにおける径方向高速中性子束分布 (炉心部軸方向中心面)	56
図 3.3.2-7	平衡サイクル初期における軸方向高速中性子束分布	57
図 3.3.2-8	平衡サイクル末期における軸方向高速中性子束分布	58
図 3.3.2-9	平衡サイクルにおける径方向高速中性子照射量分布 (炉心部軸方向中心面)	59
図 3.3.2-10	平衡サイクルにおける軸方向高速中性子照射量分布	60
図 3.3.3-1	平衡サイクル初期における集合体出力分布 -全制御棒 40cm 挿入、燃焼ミスマッチ考慮-	70
図 3.3.3-2	平衡サイクル末期における集合体出力分布 -全制御棒パーク位置、燃焼ミスマッチ考慮-	71
図 3.3.3-3	平衡サイクル時の径方向出力分布(燃焼ミスマッチ考慮)	72
図 3.3.3-4	平衡サイクル初期における集合体出力分布(制御棒 40cm 挿入)	73
図 3.3.3-5	平衡サイクル末期における集合体出力分布(制御棒パーク位置)	74
図 3.3.3-6	平衡サイクルにおける包絡集合体出力分布	75
図 3.3.3-7	内部増殖炉心の流量領域区分(暫定案)	76
図 3.3.3-8	各流量領域の最大発熱集合体に対する集合体出力履歴	77
図 3.3.3-9	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第1流量領域、集合体 No.54-	78

図 3.3.3-10	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 2 流量領域、集合体 No.128-	79
図 3.3.3-11	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 3 流量領域、集合体 No.217-	80
図 3.3.3-12	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 4 流量領域、集合体 No.271-	81
図 3.3.3-13	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 5 流量領域、集合体 No.331-	82
図 3.3.3-14	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 6 流量領域、集合体 No.379-	83
図 3.3.3-15	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 7 流量領域、集合体 No.450-	84
図 3.3.3-16	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 8 流量領域、集合体 No.449-	85
図 3.3.3-17	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 9 流量領域、集合体 No.544-	86
図 3.3.3-18	内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布 -第 10 流量領域、集合体 No.611-	87
図 3.3.3-19	集合体平均取出燃焼度の径方向分布	88
図 3.3.3-20	炉心領域毎の代表集合体に対する軸方向燃焼度分布	89
図 3.3.4-1	内部増殖炉心の制御棒配置	98
図 3.3.5-1	各制御棒 1 体挿入における出力変化率	104
図 3.3.5-2	各制御棒 1 体挿入における挿入反応度当たりの出力変化率	105
図 3.3.5-3	各制御棒 1 体誤引き抜き時の出力変化	106
図 3.4.1-1	内部増殖炉心の燃料集合体軸方向寸法	114
図 3.4.1-2	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (内側炉心、被覆管最高温度:700 の場合)	115
図 3.4.1-3	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (中間炉心、被覆管最高温度:700 の場合)	115
図 3.4.1-4	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (外側炉心、被覆管最高温度:700 の場合)	115
図 3.4.1-5	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (内側炉心、被覆管最高温度:695 の場合)	116
図 3.4.1-6	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (中間炉心、被覆管最高温度:695 の場合)	116
図 3.4.1-7	CDF 評価用被覆管温度履歴と各流量領域の被覆管温度 (内側炉心、被覆管最高温度:690 の場合)	116

図 3.4.2-1(a)	流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (内側炉心領域)	122
図 3.4.2-1(b)	流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (中間炉心領域)	123
図 3.4.2-1(c)	流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (外側炉心領域)	124
図 3.4.2-2	第1流量領域における最大発熱集合体 (No.38) の 径方向出力分布	125
図 3.4.2-3	第2流量領域における最大発熱集合体 (No.33) の 径方向出力分布	126
図 3.4.2-4	第3流量領域における最大発熱集合体 (No.203) の 径方向出力分布	127
図 3.4.2-5	第4流量領域における最大発熱集合体 (No.218) の 径方向出力分布	128
図 3.4.2-6	第5流量領域における最大発熱集合体 (No.380) の 径方向出力分布	129
図 3.4.2-7	第6流量領域における最大発熱集合体 (No.451) の 径方向出力分布	130
図 3.4.2-8	第7流量領域における最大発熱集合体 (No.450) の 径方向出力分布	131
図 3.4.2-9	第8流量領域における最大発熱集合体 (No.449) の 径方向出力分布	132
図 3.4.2-10	第9流量領域における最大発熱集合体 (No.526) の 径方向出力分布	133
図 3.4.2-11	第10流量領域における最大発熱集合体 (No.611) の 径方向出力分布	134
図 5.2-1	炉心高さと Na ボイド反応度の関係	152
図 5.3-1	Pu 富化度分布と Na ボイド反応度の関係	154
図 5.4-1	Na プレナム高さ等と Na ボイド反応度の関係	156
図 5.5-1	上部軸方向ブランケット高さと Na ボイド反応度の関係	158

1. はじめに

21 世紀を通じて原子力を始め、天然ガス、石油、石炭、水力、風力、太陽光等の多様なエネルギー源が共存して利用されると考えられ、高速増殖炉（FBR）の実用化を図るためには、エネルギー源として比較優位である必要があり、実用化の鍵を握るのは「経済性」であると考えられる。

FBR 実用化時期は 2030 年以降であると想定されており、この時期までに軽水炉の使用済み燃料中に多量のプルトニウムが実質的に備蓄される。また、FBR の導入はプラント寿命に達した軽水炉を置き換えるように緩やかに進むと想定される。このため、従来追求されていた倍増時間（FBR プラントを増設するため、プルトニウムの量を 2 倍にするためにかかる時間）の短縮の必要性が薄れており、増殖性能への要求は燃料サイクルロスを補って持続的エネルギー供給が可能となる程度まで軽減することが可能となる。このような状況を考慮すると、燃料サイクルでの経済性を損なってまで、多量のブランケット燃料を装荷する必要性は乏しくなる。

燃料の高燃焼度化は燃料サイクルコストを低減する経済性面だけでなく、燃料サイクルでの核物質ロスの低減及び TRU 廃棄物発生量の抑制、炉内でのマイナーアクチニド（MA）の燃焼によって、資源利用率の向上及び環境負荷の低減の観点でも重要性を持つと考えられる。また、軽水炉に比べて内部転換比が格段に大きい FBR の核的潜在能力を生かす意味でも高燃焼度化を追求すべきである。

このような 21 世紀における状況に合致し、経済性及び高燃焼度化を重視した FRR 炉心・燃料象として“太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念”を創案している。¹⁾

この炉心概念は、太径燃料を用いることで燃料体積比を高め、炉心の内部転換比を 1 近傍までに向上させている特長を有している。この内部転換比の改善により、ブランケット装荷量が抑制され、ブランケットまで含めた全炉心での高燃焼度化が可能となると共に安定した炉内出力分布で燃焼する良好な炉心特性が発揮できる。この炉心・燃料概念について 2 章で紹介する。

平成 11 年度においては、実証炉規模（1600MWth 級）での炉心・燃料像の検討を実施しており、この検討を受け、平成 12 年度においては、核燃料サイクル開発機構を中心に電力、メーカー、研究機関等の合同で実施されている実用化戦略調査研究²⁾（略称；FS Feasibility Study）で想定されている大型炉規模（3500MWth 級）での炉心・燃料像を対象に検討した。この大型炉の設計検討の内容を 3 章に示す。

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念では、持続的エネルギー供給が可能となる 1 を僅かに越える（1+燃料サイクルロス分）程度の増殖性能を要求条件としているが、FBR 導入シナリオでの多様性を確保する観点から増殖性向上を目指した炉心案の可能性についても検討しており、その内容を 4 章に示す。

また本炉心概念では内部転換比を向上させるために炉心高さを比較的高く設定していることに伴って Na ボイド反応度が高くなる課題があることから、Na ボイド反応度低減方策について検討しており、その内容を 5 章に示す。

平成 11、12 年度の FS 研究においては、核データとして JENDL-3.2 を基に JUPITER 臨界実験データを中心に調整された統合炉定数 (ADJ98)³⁾ が標準的に使用されており、平成 12 年度に実施した本検討においてはこの核データを使用した。しかしながら、その後、「常陽」の燃焼欠損反応度等をも含めたより広いデータベースが考慮された統合炉定数 (ADJ2000) が整備されており⁴⁾、平成 13 年度では、この見直された炉定数が使用されている。この ADJ2000 を用いた場合での核特性を添付資料に示す。

なお、内部転換比向上を重視して安定した炉内出力分布が得られる炉心概念としてロシアにおける“BREST”概念⁵⁾があるが、BREST 炉心では冷却材として鉛を用いると共に燃料形態として高い重金属密度を有する窒化物燃料が採用されている。

本検討では、早期に実現することが可能な組み合わせとして、燃料形態として酸化物 (MOX: Mixed Oxide) を、冷却材として Na を用いることを前提とした。

酸化物燃料は窒化物燃料に比べて重金属密度が低く、内部転換比の向上に関しては不利となるものの、同じく酸化物燃料を用いた軽水炉の燃料サイクルシステムと相乗効果が発揮できることから FBR システムを導入する際に有利であり、また、「常陽」、「もんじゅ」を始めとした多くの技術的蓄積がある特長を有する。

Na は高速中性子スペクトルを維持する核的条件を満たし、低比重、高熱伝導度、低粘性等の優れた伝熱特性を有し、また、構造材 (ステンレス鋼) との共存性に優れ、更に、使用実績が豊富な冷却材である。

2. 太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念について

実用化段階での FBR 炉心・燃料象を検討するに当たり、将来の FBR を取り巻く状況について考察を行い、以下の方向性を想定した。

- ・ 21 世紀を通じて多様なエネルギー源（石油、石炭、天然ガス、原子力、水力、風力、太陽光等）が共存して利用される。これら多様なエネルギー源のうち時期に応じて、経済性、環境への影響、エネルギー安全保障等を考慮して総合的に優位性を示すものから優先的に使用される。ここで、経済性がエネルギー源の選択において最も影響が大きい因子となると考えられる。
- ・ 原子力発電コストのうち、金利負担を含めたプラント建設コストが大きな割合を占めているため、中期的に天然ウラン価格が高騰したとしても、寿命が残っている軽水炉を廃止してまで FBR が導入されることは考え難い。このため、寿命に達した軽水炉の置き換えとして FBR が導入されると想定され、FBR 導入速度は比較的緩やかなものと予想される。ここで、軽水炉の置き換えとして FBR が導入される場合においても FBR が軽水炉と比肩する経済性を有することが前提となる。
- ・ 軽水炉が利用される期間が長期化し、また、相当な期間において軽水炉と FBR が共存する。このため、FBR の本格利用に先立って、軽水炉の使用済み燃料中に多量のプルトニウムが実質的に備蓄される。
- ・ 燃料の高燃焼度化は燃料サイクルにおける核物質フローを低減し、燃料サイクルコストの低減に寄与する。また、取扱量、処理量の低減に伴ってサイクルロスが低減し、資源利用率も向上する。さらに、燃料サイクルに伴う TRU 廃棄物発生量が低減されると共に炉内の高速中性子スペクトル場での核分裂等により MA (Minor Actinide) が減少するため、発電量当たりの MA 発生量は高燃焼度化により低減する。
- ・ 燃焼欠損反応度が小さく高燃焼度化が比較的容易である（炉心材料の開発を前提として）特長を生かし、FBR において、経済性の向上、環境負荷の低減のために高燃焼度化が指向される。
- ・ FBR の本来的意義はプルトニウムを経由してウラン資源の 99.3% を占める ^{238}U を効率よく利用することで、軽水炉体系に比べて飛躍的に多くのエネルギーを長期に亘り持続的に取り出し得ることである。このため、長期的にはウラン資源が逼迫する時期に備えて軽水炉体系から FBR 体系に切り替わると考えられる。

- ・ 海水中ウランの回収技術開発において何らかのブレイクスルーが達成され、海水中ウラン資源の利用が実質的に可能となった場合には軽水炉体系の持続的利用が可能となるが、FBR が軽水炉に比肩する経済性を有していれば、その導入は妨げられない。
- ・ FBR においては中性子吸収当たりの中性子発生数 が高いことから、余剰の中性子により MA 燃焼、LLFP (Long Life Fission Product ; 長半減期核分裂生成物) 消滅を行って環境負荷を低減できる潜在的可能性を有している。しかしながら、MA、LLFP を分離回収し、核燃料サイクルに取り込むシステムを構築するには長期の開発期間がかかることから、初期段階としてプルトニウムのリサイクルが優先される。

このような実用化段階で予想される状況に合致した FBR 像は図 2-1 に示すように従来の FBR 像から大きく見直されると想定する。

従来の FBR 概念においては、軽水炉と独立した体系で速やかにその規模を拡大させるため、初期プルトニウムインベントリを小さく、増殖利得を大きくすることにより、倍增時間を短くすることが求められていた。初期プルトニウムインベントリを小さくするために出力密度及び Pu 富化度を高く設定して炉心サイズを小さくし、また、増殖利得を稼ぐために炉心周辺に多量のブランケット燃料を装荷する必要があった。出力密度が高く、炉心燃料を頻繁に交換する必要があること、ブランケット燃料の装荷量が大きいことから燃料サイクル内に循環する核物質量が大きくなり、再処理及び燃料製造への負荷が大きく、燃料サイクルでの経済性が損なわれていた。

前述のように将来の FBR 実用化段階で想定される状況は、従来の FBR 概念で考慮していたものと大きく変化している。軽水炉利用の長期化に伴い多量のプルトニウムが使用済み燃料中に蓄積していくことが予想され、このプルトニウムを利用して相当の規模の FBR が導入可能となる。また、FBR は軽水炉の置き換えに伴って導入されると予想され、その導入速度は緩やかなものとなることが想定される。これらのため、FBR に要求される増殖性能は、 ^{238}U 資源を利用して持続的なエネルギー供給が可能となるレベル (燃料サイクルロス分を補う程度) までに低減できる。また、内部増殖炉心概念では炉心部の内部転換比を 1 近傍までに引き上げることが想定しており、ブランケット燃料の装荷は最小限度まで抑制できる。

FBR 実用化においては、核物質重量当たりのエネルギー発生量で定義される燃焼度を増加させることで燃料サイクルコストを低減することを指向している。

ここで、従来概念では炉心部の高燃焼度化を図っても、燃焼度が極めて低いブランケット燃料が多量に存在するため、炉心部及びブランケット部を合わせて平均した燃焼度 (以下、「全炉心平均の取出平均燃焼度」と称する) の進展は抑制され、燃料サイクルにおける核物質フローの低減は限定的となる。

一方、内部増殖炉心概念では径方向ブランケットを廃止し、僅かな下部軸方向ブランケットのみを装荷することとしており、炉心部の高燃焼度化が直接的に全炉心平均の取出平均燃焼度の進展に結びつき、発電量当たりの核物質フローが大幅に低減し、燃料サイクルコストが低減できる。また、核物質フローの低減は、燃料製造加工、再処理における核物質ロスも低減され、資源利用率の向上に寄与する。同時に、燃料サイクルにおける TRU 廃棄物の発生量低減にも結びつくことになる。

ここで、高燃焼度化は高い高速中性子照射量に耐えられる炉心材料の開発が前提となるが、内部増殖炉心概念では、同一の最大高速中性子照射量に対して全炉心平均の取出平均燃焼度を高く設定できることから、同一材料で達成できる実質的な燃焼度を高くできることは注目に値する。

従来概念ではプルトニウムインベントリを削減するために出力密度を高く設定しており、高燃焼度化を図った場合に新旧燃料の出力差が拡大し、最大集合体出力の増加、冷却材必要流量の増大を招く問題があった。また、同一の運転サイクル期間を条件とした場合に燃焼欠損反応度が増加し、サイクル初期及び末期の制御棒挿入深度の差が拡大し、炉内の出力分布の変動が大きくなる。一方、内部増殖炉心では、内部転換比が 1 近傍であり、fissile 核種の消滅と生成が拮抗するため燃焼に伴う出力変化及び反応度変化が小さく、新旧燃料の出力差及び炉内出力分布変動幅が低減する。このように内部増殖炉心では、時間的及び空間的に出力分布が安定する特長があり、これは冷却材流量配分において大きな利点となり、炉心流量の低減等が可能となる。

また、径方向ブランケットを削除したことは、 ^{239}Pu の含有率が高い いわゆる核兵器級プルトニウムが通常の使用条件では生成されないことを示している。また、軸方向ブランケットについても長期の照射により核変換が進み、相当量の ^{240}Pu の蓄積が生じる特徴がある。このように、内部増殖炉心概念では核拡散抵抗性の面でも優れた特徴を有している。

内部転換比 1 近傍を達成する炉心・燃料像を検討した経緯を概略的に図 2-2 に示す。

図 2-2(a)は、各 Pu 富化度レベルの燃料の燃焼に伴う等価反応度価値の変化を示したものである。ここで、等価反応度価値 (E_{keff}) は下記のように定義され、反応度に対する寄与の指標となるものである。

$$E_{keff} = \frac{\sum_j (\eta_j \cdot N_j)}{\sum_j N_j}$$

η_j ; 核種 j の反応度保存等価 fissile 係数 (-)

N_j ; 核種 j の原子数密度

一般に、Pu 富化度が高いほど初期の反応度価値は高いが、燃焼に伴う反応度価値の変動も大きくなる。fissile 核種の消滅と生成を拮抗させるためには、fissile 核種の割合を減らし、fertile 核種の割合を増やすこと、つまり Pu 富化度を低下させることが必要である。Pu 富化度 15wt% 程度では等価反応度価値の燃焼度変化が一定に近づき、内部転換比 1 が達成できる可能性があることが示される。

ロシアの BREST 概念では、重金属割合が高い窒化物燃料を用いることで Pu 富化度を低下させ、内部増殖を達成している。しかしながら、本検討では、酸化物燃料を用いている軽水炉体系との共存性、連続性及び「常陽」、「もんじゅ」等を通じた技術的蓄積を重視して酸化物 (MOX) 燃料の使用を前提としている。この重金属密度が相対的に小さい MOX 燃料を用いて、過去の設計例に比べて低い Pu 富化度 15wt% で臨界を達成するには、抜本的な中性子経済の改善が必要となる。

中性子漏洩を抑制するためには大型炉心で炉心高さを高くすることが有利となり、図 2.-2(b)は、下記の簡略化した条件で実効燃料体積率と実効増倍率との関係を示したものである。

- ・ 解析コード ; CITATION コード (2 次元 RZ 体系)
- ・ 炉心等価直径 ; 4m
- ・ 炉心高さ ; 120cm
- ・ 反射体厚さ ; 40cm (径方向及び軸方向)
- ・ Pu 富化度 ; 15wt%、13wt% (1 領域 ; 富化度領域区分無し)
- ・ Pu 同位体組成 ($^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$);
3/ 52/ 27/ 9.5/ 7/ 1.5 (wt%)

この図に示すように Pu 富化度 15wt% で臨界を達成するためには、炉心高さを高めに設定した大型炉心においても実効燃料体積率 (燃料の理論密度に換算した場合での燃料体積率) を 40% 程度まで引き上げることが必要となる。

実効燃料体積率を向上させるためにはスミア密度 (被覆管内面までの範囲で均質化した場合での燃料密度) を上げることが有効であるが、スミア密度を増加させた場合には、高燃焼度化に伴う固体状 FP の蓄積によりペレットが膨れ、FCMI (燃料ペレットと被覆管の機械的相互作用) が顕著となる問題が生じる。取出平均燃焼度を 150GWd/t 程度とした場合には、FCMI 破損を防止するためにスミア密度を 82% T.D. 程度まで低減する必要があると推定されている。

また、スペーサワイヤ径の調整により冷却材流路面積を保持した状態で燃料要素径を太くすると燃料体積が増加するため、実効燃料体積率が向上できる。図 2-2(c)は、スミア密度を 82% T.D. とし、更に同一冷却材流量でのバンドル部圧損を一定とした条件で燃料要素径と実効燃料体積率との関係を示したものである。燃料要素径を 12mm 程度まで太くした場合に、実効燃料体積率が 40% 程度まで増加できることが示される。

以上をまとめると大型炉心で太径燃料要素を用いて実効燃料体積率 40%程度を確保して、Pu 富化度 15wt%程度の炉心を組むことで、MOX 燃料でも内部転換比 1 近傍を達成できることが示される。

一方、このような炉心においては、下記に示すような幾つかの課題が惹起される。

溶融の防止の観点で設定される許容線出力は、燃料要素径にあまり依存せず一定に近いために、燃料要素径を太くすると大幅な出力密度の低下を招く。これは、同一炉出力条件での炉心サイズの増加につながり、原子炉容器径の増加の原因になり得る。

中性子経済の向上のため、大型炉で炉心高さを 120cm とすると Na ボイド反応度が増加する。

この 課題に対して、中空ペレット及び軸方向富化度分布の採用により平均出力密度の嵩上げを測ると共に炉心高さの延長、径方向ブランケットの削除により、径方向寸法の増加を抑制する。

スミア密度 82% T.D. とするためには、「もんじゅ」のような低密度ペレットや最近注目を集めている振動充填燃料を用いる場合が考えられるが、いずれも溶融限界線出力が低くなる問題がある。なお、振動充填燃料の場合、金属ウラン粉末を混合することで溶融限界線出力が改善できるとの報告がロシアからあるが現段階では詳細が不明である。一方、中空ペレットを用いた場合では燃料部の熱伝導度の改善等により溶融限界線出力が高くなる特長があり、出力密度の増加に対して最大線出力が制限因子となる本炉心では、中空ペレットを採用することが有利となる。

通常の FBR の軸方向出力分布は端部が切り取られたコサイン形状をしており、中央部の線出力が高くなる。このため、軸方向中央部の Pu 富化度を低下させた軸方向富化度分布を用いた場合に軸方向出力ピーキングが低減し、最大線出力を増加させずに平均出力密度を増加させることが可能となる。この軸方向富化度分布を最大線出力が発生する径方向の内側領域について設置する。ここで、内側領域上下部の相対的に高い Pu 富化度レベルと外側領域の Pu 富化度レベルを合わせることで Pu 富化度種類を増やすことなく、軸方向及び径方向の出力平坦化が可能となる。これらを考慮すると図 2-3 に示すように Pu 富化度が低い領域(低富化領域)の上下部及び外周部を Pu 富化度が高い領域(高富化領域)が取り囲んだ炉心構成となる。また、出力分布を、より適性化するために、低富化領域の軸方向長さを調整して 2 種類(内側炉心、中間炉心)設置している。

このような方策により内部増殖炉心の炉心等価直径は、従来概念での炉心及び径方向ブランケットを含めた場合での等価直径程度に収まることとなる。

の課題に関連して、内部増殖炉心では燃料体積率が高く、逆にラッパ管内の Na 体積率が小さい特徴があり、従来設計で単に炉心高さを延長した場合よりも Na ボイド反応度の増加は抑制される。さらに、上部軸方向ブランケットを削除し、かつ、その上部に Na プレナム (Na のみで占められる空間) を設置することで、Na がボイド化 (沸騰による Na 蒸気化、燃料破損に伴う FP ガスの噴出) した際に上方への中性子漏洩を積極的に促進することで、実質的な Na ボイド反応度を低減する方策を採用する。Na ボイド反応度は、従来、炉心部のみをボイド化した場合での値で議論されてきた。しかしながら、上部側で高くなる Na 温度分布、水頭圧による沸点への効果、ポンプ慣性力により残留する冷却材流れにより、Na のボイド化が炉心上端付近から開始して上下方に拡大していくことから、炉心部と同時に上部側の Na プレナム部もボイド化すると考えられる。

ここで、Na ボイド反応度は ULOF (Unprotected Loss of Flow; 流量喪失型スクラム失敗事象) 事象を想定した CDA (Core Disruptive Accident; 炉心崩壊事故) において、原子炉容器の健全性に影響を与え得る機械的エネルギーの発生の有無を決める安全上の重要な因子とされている。

なお、多重性を有する制御棒のスクラム失敗を前提とする ULOF 事象は従来設計基準外事象と見なされていたが、近年、原子炉の潜在的危険性を評価する観点で重要性が増しており、実用化段階での社会的受容性を高めるためには設計的な対応も実質的に要求されている状況にある。

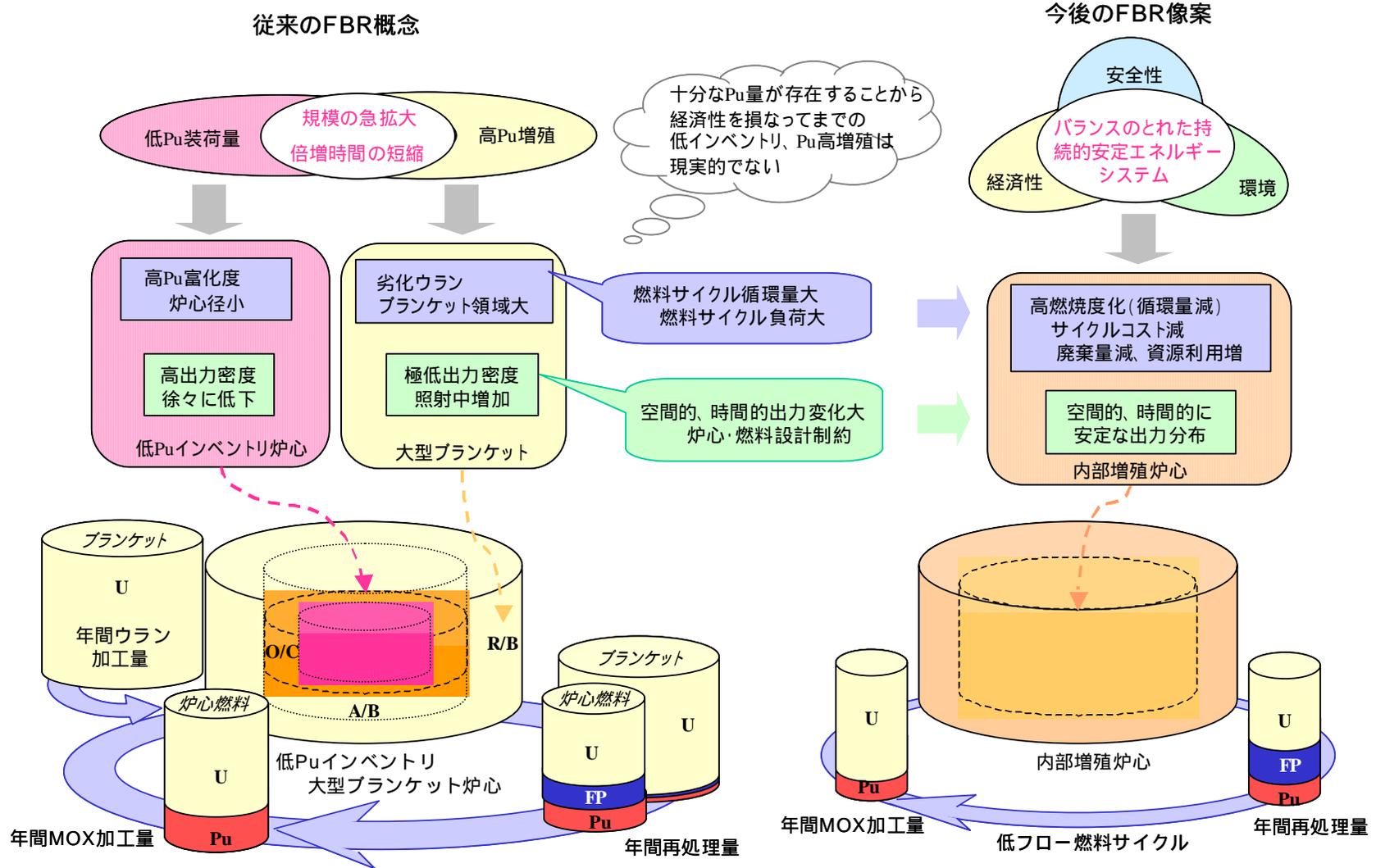


図 2-1 高速増殖炉概念の見直し及び将来像（太径中空燃料を用いた内部増殖炉心）の提案

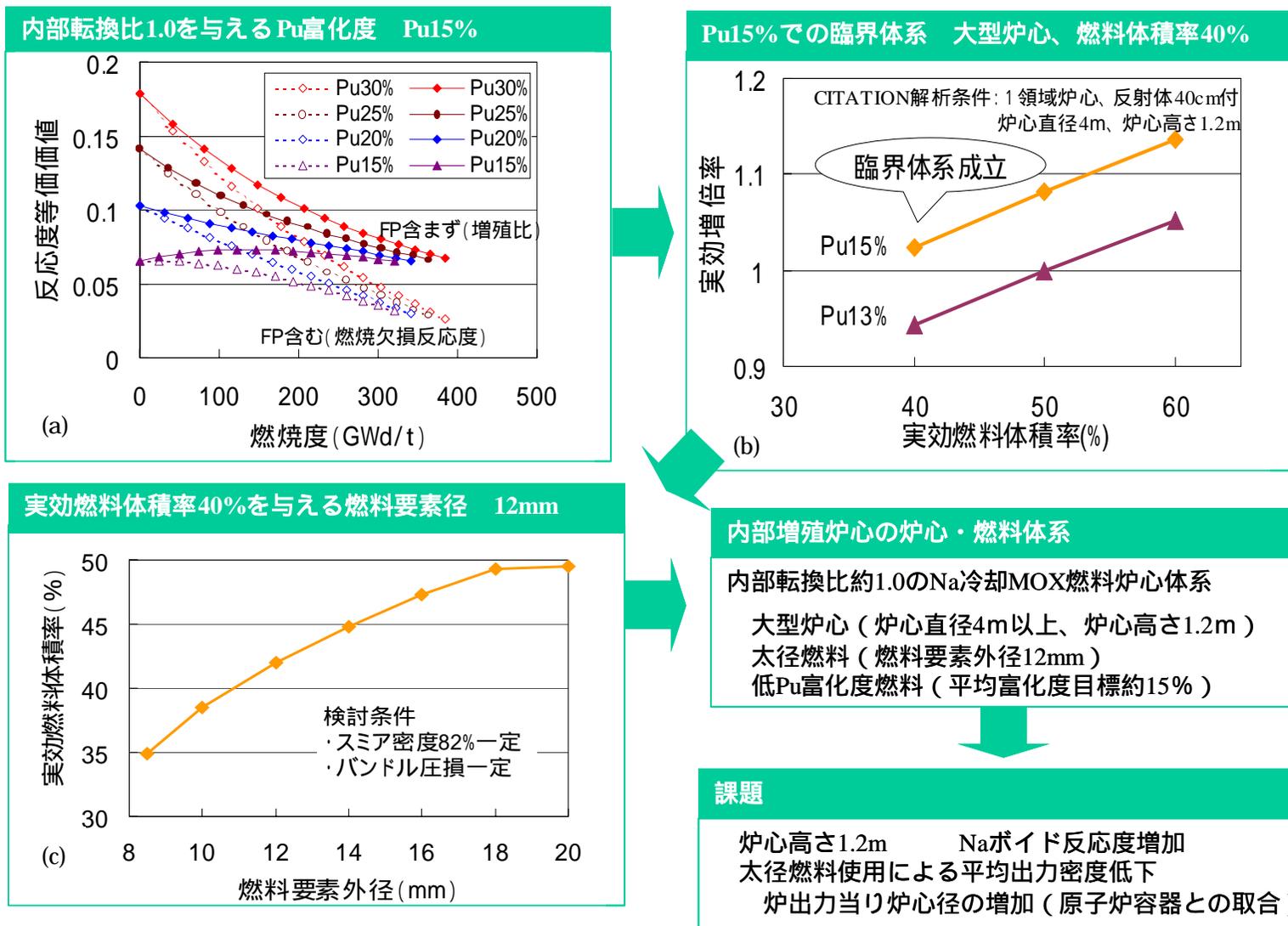


図 2-2 内部増殖炉心の炉心・燃料基本体系の選定

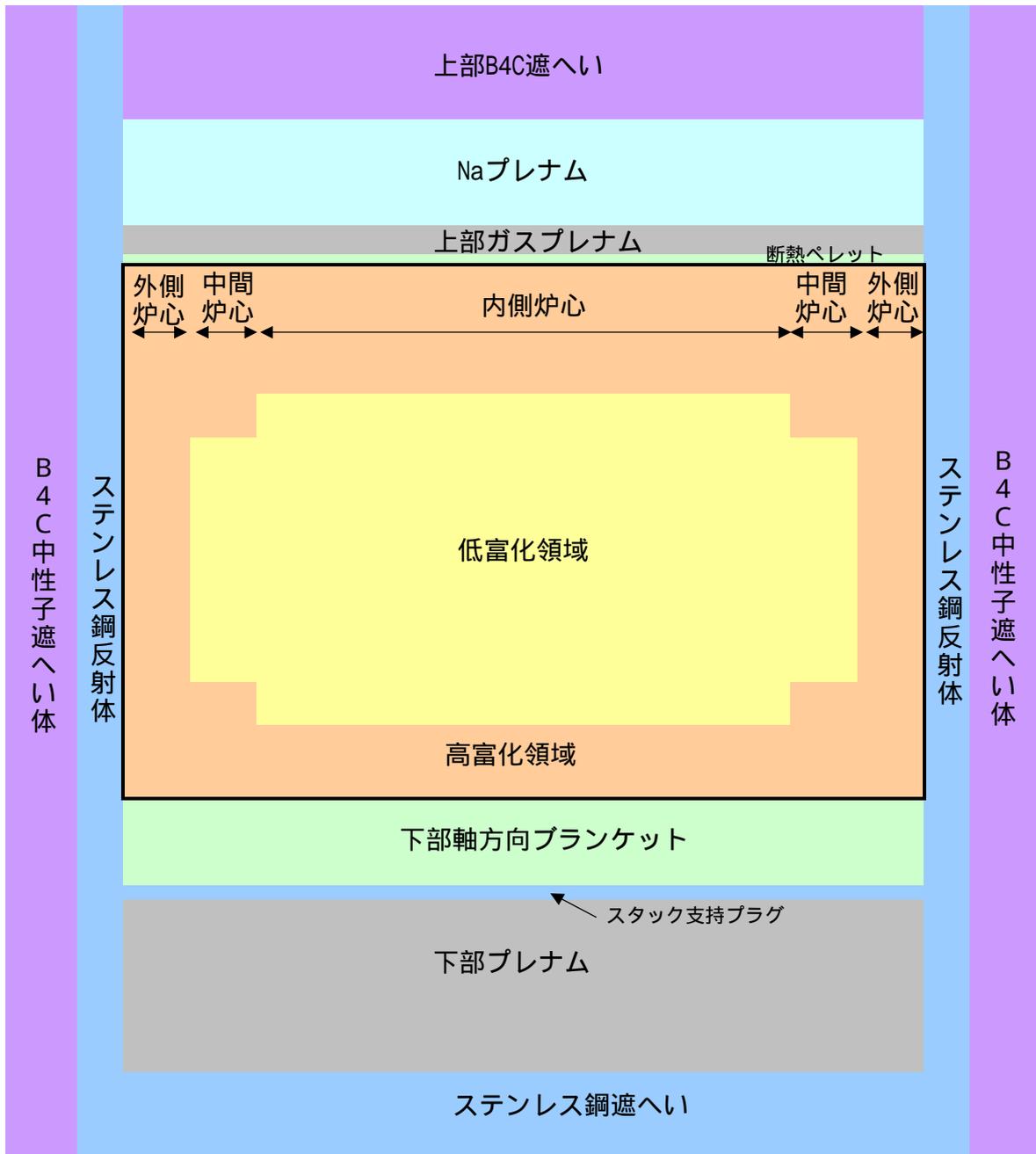


図2-3 内部増殖炉心の炉心構造
(軸方向富化度分布、Naプレナム)

3. 太径中空燃料を用いた内部増殖炉心案の設計検討

3.1 検討方針及び条件

3.1.1 設計条件とその対応

平成 11 年度は、過去に設計検討された実証炉の炉心規模（1600MWth）をレファレンス（以下、H11 炉心）として検討したが、平成 12 年度では実用化戦略調査研究（以下、F S）で設定している炉心規模（3500MWth）の大型炉に対して検討する。F S で、プラント設計、安全評価等との取り合いで設定されている設計条件²⁾と本検討における対応を表 3.1-1 にまとめて示す。また、個別の項目毎の内容を以下に示す。

(1) 炉心規模

F S 設計条件；1500MWe/3570MWth

対応；準拠

炉心スケールによる経済性効果を相殺するために、F S では、炉心規模を将来の軽水炉で予想される規模に設定している。なお、本検討では炉心特性向上による冷却特性の改善効果を期待し、概数として熱出力を 3500MWth とした。

(2) 取出平均燃焼度

F S 設計条件；約 150GWd/t（炉心燃料部）

対応；準拠

F S Phase-I では、実用化段階での FBR に要求する取出平均燃焼度として上記を設定している。

ただし、上記は炉心燃料部に対する取出平均燃焼度であり、燃料サイクルコストに主体的に影響するブランケットをも含めた全炉心平均の取出平均燃焼度については特段の条件が設定されていない。

(3) 運転サイクル長さ

F S 設計条件；18 ヶ月以上

対応；準拠

内部増殖炉心概念では、出力密度が低いこと、燃焼欠損反応度が小さいことから、運転サイクル期間の長期化が容易に達成できる。本検討において、適当な燃料交換バッチ数と取出平均燃焼度との関連で調整して設定する。

(4) 増殖比

F S 設計条件；1.2 以上（径方向ブランケット等設置の場合）

対応；1+（燃料サイクルロス + ²⁴¹Pu 崩壊分）目安 1.05

F S では発電量の急な拡大にも対応できる柔軟性を確保するために、径方向ブランケッ

ト等を設置した場合で 1.2 以上の増殖比を条件としている。

本検討では、前述のように軽水炉のリプレイスに伴う緩やかな導入を想定しているため、持続的なエネルギー供給が可能となる程度の増殖性能に留める。なお、内部増殖炉心概念では、ブランケットの装荷を最小限にすることを指向しており、径方向ブランケットは装荷しない。

なお、核燃料サイクルロスを補って持続性を維持するために重要なのは fissile 核種の消滅率に対する fertile 核種の中性子吸収率で定義される瞬時的な増殖比ではなく、物質収支上の fissile 核種の利得量であることに注意が必要である。

(5) Na ボイド反応度

F S 設計条件；6 \$ 以下（炉心部がボイド化した場合）

対応；6 \$ 以下（炉心部及び上部プレナム領域がボイド化した場合）

CDA 評価の一環として ULOF 事象の起因過程解析において、LOF-driven-TOP（Transient Over Power；過出力事象）による機械的エネルギー発生を防止する観点で、F S では炉心部の Na ボイド反応度の目安として 6 \$ 以下を設定している。

内部増殖炉心においては炉心高さの拡大に伴う Na ボイド反応度の増加に対応して、Na がボイド化した際の上方向への中性子漏洩効果を促進するために、上部軸方向ブランケットを削除すると共に Na プレナムを設置している。実際の ULOF 事象においては炉心部のみならず、上部プレナム領域（上部ガスプレナム部及び Na プレナム部）においても Na がボイド化することが期待できるため、炉心部に加えて上部プレナム領域をも同時にボイド化させた場合で 6 \$ 以下を目標とする。

ただし、起因過程解析においては、正の Na ボイド反応度と溶融燃料の軸方向移動による負の反応度との競合が考慮されており、この目標値を満足したとしても LOF-driven-TOP 現象が発生するかどうかについては、具体的な解析により確認する必要がある。

（注）本検討以降に類似の炉心概念を適用した炉心（太径燃料、低比出力、炉心高さ 120cm）において、Na ボイド反応度を 6 \$ 以下に保った場合でも SAS-4A コードによる CDA 起因事象解析において LOF-driven-TOP による厳しい出力バーストが発生することが指摘されている。その原因として、低比出力（単位燃料重量当たりの出力）化により、破損した燃料の分散による負の反応度投入のタイミングが数十 msec レベルで遅れること等が推定されている。本炉心においても、同様な事象となる可能性は否定できず、本炉心概念を成立させるためには、CDA 起因過程での事象進展を正確に把握し、適切な対策をとる必要があるものとする。

(6) 遮へい体外接円径

F S 設計条件；6.6m 以下

対応；目標

プラント設計での原子炉容器径との取り合いで設定されており、これを目標とする。

ただし、原子炉容器への高速中性子照射量制限が前提となり、遮へい体外接円径は設置する中性子遮へい体の種類、層数等にも依存することに留意する必要がある。

(7) 燃料バンドル部圧力損失

F S 設計条件；約 2 kg/cm^2 以下

対応；準拠

冷却系ループ数削減に対応して自然循環時の除熱性能を高めるために圧力損失の低減が指向されており、本検討においても準拠する。

(8) 再臨界回避

F S 設計条件；再臨界回避に対応した炉心・燃料構成とする

対応；下部軸方向ブランケットの一部削除

CDA 評価での遷移過程において溶融燃料を炉外に排出して再臨界を回避する構造として、F S では内部ダクトを設けた燃料集合体、径方向非均質炉心で上下部軸方向ブランケットを一部削除した燃料集合体等が検討されている。

本検討では、上部軸方向ブランケットについて Na ボイド反応度低減の観点から全燃料要素に対して削除しており、溶融燃料の上部側への拡散は比較的容易となると想定される。また、下部側への排出を期待して下部軸方向ブランケットの一部（217 本中の 37 本）も削除する。

(9) 制御棒配置

F S 設計条件；切欠き UIS に対応した配置

対応；準拠

燃料交換時に制御棒駆動機構を取り出すことなく、燃料交換機を作動できるようにするため、切欠き UIS（Upper Instrumentation Structure；炉心上部機構）に対応して制御棒配置間隔が広い部分（見通し部）を少なくとも 1 方向を確保することがプラント設計側から要求されている。ただし、制御棒挿入時に制御棒が挿入されない領域の出力ピーキングが大きくなることに留意が必要となる。

3.1.2 基本仕様及び基本条件の設定

(1) 燃料要素径；12mm

燃料体積率確保のため、出力密度の低下を許容し、内部増殖炉心概念の特徴として燃料要素径を 12mm とする。

(2) 炉心高さ；120cm

軸方向中性子漏洩を低減し、Pu 富化度を低めに設定するため、H11 炉心と同様に炉心高さを 120cm とする。

(3) 軸方向 Pu 富化度分布

出力ピーキング抑制の観点から、径方向に加えて軸方向に Pu 富化度区分を設けて、炉心の中心部を低 Pu 富化度領域とし、その径方向及び軸方向の外周部を高 Pu 富化度領域とした Pu 富化度配置を用いる。これにより、ピーク燃焼度の低減による FCMI を抑制する効果や中性子漏洩効果が比較的大きい炉心上下領域での Pu 富化度を増加させたことによる Na ボイド反応度を低減する効果も期待される。

(4) スミア密度 ; 82%T.D.

高燃焼度化を考慮して FCMI を抑制するために、スミア密度を控えめに、82%T.D.に設定する。

(5) 被覆管材 ; ODS 鋼

高燃焼度化に伴う高速中性子照射量の増加に対応した耐スエリング性を有する被覆管材として現在開発中の ODS 鋼 (Oxide Dispersion Strengthened ; 酸化物分散強化型フェライト鋼) を使用することを想定する。

なお、熱効率の若干の低下を許容して、冷却材温度条件を低減する調整を行った場合には、FMS (Ferritic and Martensitic Steel) 鋼を被覆管材として使用する選択肢も存在すると考えられる。

(6) 冷却材温度条件

被覆管材として ODS 鋼を使用することを前提とするため、原子炉出口温度及び入口温度を 550 及び 395 とする。なお、これは F S で検討されているループ型プラント検討例での 1 次冷却系温度条件と同一である。

(7) 核データ ; JENDL-3.2 統合炉定数 (ADJ98)

平成 11 年度検討では、JENDL-3.2 による JFS-3-J3.2 (オリジナル) を用いていたが、F S において、JENDL-3.2 版統合炉定数(ADJ98)が標準的に用いられていることから、平成 12 年度の検討では、この統合炉定数を用いる。なお、本検討後に改定された統合炉定数(ADJ2000)を用いた場合での核特性への影響について添付資料に示す。

(8) Pu 同位体組成 ; 軽水炉使用済み燃料取出組成 fissile 率 61.5wt%

軽水炉使用済み燃料 (PWR;45GWd/t、BWR;49GWd/t) から取り出される Pu 核種及び再処理後炉心装荷までに生成する ^{241}Am を含む下記の同位体組成を使用する。

$$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am} = 3/52/27/9.5/7/1.5 \quad (\text{wt}\%)$$

なお、F S では、上記組成以外にも、Pu 核種及び MA 核種を多重リサイクルする場合、更に、低除染再処理を想定して FP 核種が付随する場合等の検討も行われている。

表3.1-1 実用化戦略調査研究での設計条件とその対応

項目	設計条件	対応	備考
炉心規模	1500MWe/3570MWth	準拠 (3500MWth)	
取出平均燃焼度 (炉心燃料部)	約150GWd/t	準拠	ブランケットを含めた全炉心平均燃焼度については大幅増加
運転サイクル長さ	18ヶ月以上	準拠	内部増殖炉心では長期サイクル容易
増殖比	1.2以上 (径ブラ付き option)	1+ (サイクルロス分)	持続的エネルギー供給達成のみ要求
Naボイド反応度	6 \$ 以下 (炉心燃料部のボイド化)	目標 (炉心部+上部プレナム部を同時にボイド化した場合)	上部プレナム部を同時にボイド化した場合
遮へい体外接円径	6.6m以下	目標	低出力密度化による増大傾向有り
バンドル部圧損	約 2 kg/cm ² 以下	目標	自然循環除熱性能向上のため
再臨界排除への対応	対応要 (検討例; 内部ダクト集合体、径非均質炉心 + 一部軸ブラ削除)	影響小の範囲で考慮 (上部軸ブラ削除、下部軸ブラ一部削除)	
制御棒配置	切欠きUIS対応	準拠	制御棒挿入時出力歪みに留意

3.2 炉心・燃料仕様の設定

“太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念”を適用した大型炉の炉心高さ、燃料要素径等の基本仕様については、実証炉規模を対象に検討した H11 炉心に準拠することとし、ワイヤ径等については実効燃料体積率、バンドル部圧力損失を踏まえて設定した。設定した炉心主要仕様及び燃料集合体仕様を H11 炉心等と比較して表 3.2-1 及び表 3.2-2 に示す。また、設定した炉心配置を図 3.2-1 に、炉心の縦断面形状を図 3.2-2 に示す。

ここで、炉心・燃料仕様を設定する際の考え方、検討内容を以下に示す。

(1) 炉心基本仕様の設定

炉心高さおよび燃料集合体体数

炉心高さについては、軸方向中性子漏洩を抑制して内部転換比 1 近傍を達成するため、Na ボイド反応度が大きくなる課題があるものの、H11 炉心と同様に 120cm とする。

平成 11 年度の検討から最大線出力を成立性が見通せる範囲内に収めるためには、炉心部平均線出力を 250W/cm 程度とする必要があり、集合体当たりの燃料要素本数を 217 本として、1/6 炉心対称性を考慮すると炉心燃料集合体体数は 520 体となる。

燃料要素径 12.0mm に対応した集合体配列ピッチ 212.5mm(設定について後述)を用い、この集合体体数に対する炉心部等価直径は約 5.3m となる。また、ステンレス鋼反射体 1 層、B₄C 中性子遮へい体 2 層を考慮した場合に、遮へい体までの等価直径は約 6.6m となり、原子炉容器設計との取り合い条件である遮へい体外接円径約 6.6m 以下をほぼ満足できる。

なお、同様な条件で炉心高さを 100cm とした場合には遮へい体外接円径は 7 m を越え、この原子炉容器設計との取り合い条件を満たさない。

炉心領域区分 (Pu 富化度領域)

前述の図 3.2-1 に示すように径方向出力分布の平坦化のため、高富化燃料が装荷される外側炉心には外周部 2 層において燃料集合体 162 体を装荷する。また、図 3.2-2 に示すように軸方向出力分布の平坦化のため、内側炉心及び中間炉心に対しては軸方向 Pu 富化度分布を採用しており、軸方向中央部においては低富化領域を、上下部については高富化度領域を設置する。ここで、中間炉心では内側炉心に比べて上下の高富化領域を 10cm ずつ延長することで、径方向出力分布の平坦化を図っている。また、内側炉心の燃料集合体は 232 体となり、中間炉心の燃料集合体は 126 体となる。

なお、上部軸方向ブランケットを削除し、下部軸方向ブランケットのみを設置していること、制御棒が炉心上方から挿入されることを考慮して軸方向出力分布を適正化するため、過去の検討例⁶⁾を参考に低富化領域を非対称に下方にシフトして設置する。

制御棒本数及び配置

内部増殖炉心概念での燃焼欠損反応度の低減を反映して、制御棒本数は従来設計例より

も削減できることを考慮して 36 体とする。

燃料交換装置の駆動スペースを確保する観点から、プラント設計との取り合い条件である切り欠き UIS に配慮して制御棒配置には見通し部を設ける。この際に、制御棒見通し部には 1/6 対象性を考慮する。

このような制御棒配置においては、制御棒挿入時に炉心中央部での出力ピーキングが大きくなることから、これを抑制するため、炉心中心付近に 3 体のステンレス鋼希釈集合体を配置する。

燃料交換バッチ及び運転サイクル長さ

内部増殖炉心概念では、径方向の高速中性子照射量分布及び燃焼度分布を平坦化するために、径方向に燃料交換バッチを変えた多段階燃料交換バッチ方式を採用している。

本炉心の燃料要素仕様において平均線出力 250W/cm は定格出力 1 ヶ月運転当たりの燃焼度進捗として 1.05GWd/t / EFPM に相当し、取出平均燃焼度 150GWd/t を得るためには、平均的な燃焼期間として約 143 ヶ月が必要となる。燃料交換バッチを 6 バッチとすると約 24 ヶ月運転が可能となるが、高速中性子照射量分布等の平坦化を意図して、下記に示す燃料交換バッチ数の組み合わせ（平均的バッチ数：約 6.9）を採用する。このバッチ数において、取出平均燃焼度を 150GWd/t に対応する運転サイクル期間は 630 日（約 20.7 ヶ月）となる。この運転サイクル期間は設計条件としている 18 ヶ月以上を満足する。

領域	集合体数	バッチ数
内側炉心	232	6
中間炉心	126	7
外側炉心	78	8
	84	9
平均		6.86

(2) 燃料要素仕様

横断面寸法

被覆管肉厚については、H11 炉心に準拠し、また、燃料体積率への影響も考慮して肉厚/外径比が 0.0059 程度となるように 0.71mm とする。

ペレット-被覆管ギャップ幅については、熔融限界線出力への影響、ペレットの被覆管への挿入性、製造時のペレット外径公差を考慮して 180 μm（直径換算）とする。これらにより、ペレット外径は 10.4mm となる。

ODS 鋼を用いた燃料要素で取出平均燃焼度 150GWd/t までの高燃焼度化を達成し、FCMI 破損を防止する観点から設計条件としてスミア密度は 82%T.D. に設定されており、これに対応してペレット内径（中空径）は 3.4mm となる。なお、中空ペレット成型時のコアロッド破損を防止する観点から中空径は 2mm 以上が望ましいとされており、これを満足する。

軸方向寸法

炉心高さは前述のように 120cm であることから、炉心燃料ペレットのスタック長さも

120cm となる。

上部軸方向ブランケットは Na ボイド反応度の低減の観点から削除し、代わりに断熱ペレットとして 1.5cm の劣化ウランペレットを用いる。

下部軸方向ブランケットについては、持続的エネルギー供給が可能となる最低限の増殖利得を確保する観点から 20cm 設置する。ただし、CDA 評価での遷移過程において熔融燃料の排出を容易とするため、217 本の燃料要素のうち 37 本については、下部軸方向ブランケットをも削除する。

下部ガスプレナム長さについては、ODS 鋼のクリープ破断強度を考慮し、被覆管 CDF (Cumulative Damage Fraction) 評価の成立性見通しが得られる範囲として第 1 次推定として 100cm とした。ここで、下部プレナム長さは核特性評価へは殆ど影響しないことから、核特性評価結果を踏まえて、その長さを再調整することとした。この第 1 次推定では被覆管 CDF 評価用の被覆管温度履歴としてサイクル当たり 5 の低下を想定したが、3.4.1 で後述するように被覆管温度低下がより緩慢であったこと等から下部プレナム長さを 135.5cm に再調整した。

上部ガスプレナム長さについては、輸送及び取り扱い時のペレットスタックの移動を防止するために設置するプレナムスプリング設計に配慮して過去の設計例から第 1 次推定として 28.5cm とした。後述する 5 章での Na ボイド反応度低減方策の検討において、上部ガスプレナム長さを短縮して、Na プレナム長さを延長した方が Na ボイド反応度を低減するのに有利となることが示された。このため、スプリング以外のペレットスタックの移動防止方策を採用することを前提に、ペレットスタックと被覆管との軸方向伸び差を吸収できる範囲として上部ガスプレナム長さを 5cm へ短縮するように再調整を行った。

上部端栓、下部端栓、支持プラグ(ペレットスタックを支持して下部ガスプレナムを確保する部材)の長さについては、過去の設計例を参考にそれぞれ 3cm、4cm、3cm とする。

以上から上部ガスプレナム長さ 28.5cm、下部ガスプレナム長さ 100cm とした第 1 次推定の場合には燃料要素全長は 280cm となる。また、上部ガスプレナム長さ 5cm、下部ガスプレナム長さ 135.5cm へと再調整した段階では燃料要素全長は 292cm となる。これらの燃料要素全長は「もんじゅ」燃料での 281.3cm と同レベルにある。

(3) 燃料集合体仕様

設定条件の一つであるバンドル部圧力損失約 2 kg/cm^2 以下は従来設計例に比べて小さいものであり、これに対応した燃料集合体仕様を設定する必要がある。この圧力損失を抑制するためにはスパーサワイヤ径を大きくして冷却材流路面積を増大する必要があるが、一方で、これは燃料体積率を低下させ、内部転換比の低下をもたらす。このため、スパーサワイヤ径をパラメータとして燃料体積率、バンドル部圧力損失への影響を検討した。

主要な検討条件を以下に示す。なお、燃料要素仕様としては前述で設定したものを適用する。

- ・ 最大の集合体内冷却材流量：36kg/sec
H11 炉心での出力ピーキング特性を参考に被覆管最高温度 700 を満足する流量と

して推定した。

- ・ スペーサワイヤ巻き付けピッチ：20cm
耐BDI（バンドル-ダクト相互作用）性を向上させる観点から「もんじゅ」燃料での30.7cmに比べ短縮した。
- ・ Porosity/Ring: : 0.09
ウエアマーク発生防止、耐BDI性を考慮し、過去の設定例を参考に設定した。
- ・ 圧力損失評価式：改良版MIT式⁷⁾
既存の圧力損失評価式のうち、本炉心を適用範囲とする評価式として選定した。
- ・ 燃料要素全長：280cm（第1次推定）
- ・ ラッパ管材質：PNC-FMS鋼⁸⁾
取出平均燃焼度150GWd/tまでの使用を考慮し、耐スエリング性に優れたフェライト鋼を適用した。なお、ラッパ管の使用温度は被覆管に比べて低いことから、ODS鋼の使用は必要とされない。
- ・ ラッパ管肉厚：5.1mm
H11炉心でのラッパ管肉厚/ラッパ管内対面間距離比とほぼ等しくなるように設定した。
- ・ 集合体間ギャップ幅：5mm
ラッパ管内対面間距離18cm程度、バンドル部圧損 2 kg/cm^2 程度、PNC-FMS鋼の照射クリープ歪み式として合理化式を用いた条件で、パッド部以外での集合体間の接触を防止する観点では、5mm程度の間隙が必要との検討例²⁾を参考として5mmとした。

スペーサワイヤ径をパラメータとして上記条件で、実効燃料体積率、バンドル部圧損を算出した結果を表3.2-3及び図3.2-3に示す。

スペーサワイヤ径を1.1mmから1.4mmの間で変化させた場合に、バンドル部圧力損失は約 2 kg/cm^2 から約 1.3 kg/cm^2 へと低下し、 2 kg/cm^2 以下とするためにはスペーサワイヤ径を1.15mm以上とする必要がある。

また、スペーサワイヤ径を増加させると実効燃料体積率は40.4%から38.5%へと低下し、内部増殖炉心での目安である40%を確保するためには、スペーサワイヤ径を1.15mm以下とする必要がある。これらの検討からスペーサワイヤ径を1.15mmとする。

この場合のラッパ管内対面間距離は197.3mm、集合体配列ピッチは212.5mmとなり、対応する実効燃料体積率は40.0%となる。

なお、上下部ガスプレナム長さを再調整した段階での燃料要素全長292cmを適用した場合においても、前述表3.2-3の下欄に示すようにバンドル部圧損は 2 kg/cm^2 以下を満足する。

(4) 制御棒仕様

過去の設計例における主炉停止系制御棒の仕様を参考に、集合体配列ピッチの増加に対

応して径方向の拡大を図ったものを核特性評価用暫定仕様として設定する。設定した暫定仕様を表 3.2-4 に示す。

(5) ステンレス鋼反射体及び B_4C 中性子遮へい体の暫定仕様について

核計算に使用するステンレス鋼反射体及び B_4C 中性子遮へい体の各構造の体積率を算出するため、暫定的なステンレス鋼反射体及び B_4C 中性子遮へい体の仕様を過去の設計例を参考にして設定する。集合体当たりの要素本数について、19 本及び 37 本のケースについて検討した結果を表 3.2-5 に示す。要素径及び本数については、ガンマ発熱及び中性子吸収反応に伴う発熱を考慮して、それぞれの要素の中心温度、健全性を考慮して設定すべきであるが、体積率に大きな差がないこと、核特性に対する感度があまり大きくないことから、暫定的に 19 本のケースを選定した。

ここで、径方向及び軸方向の中性子遮へいに使用する B_4C の ^{10}B 組成を天然組成 (19.9at%) とし、ステンレス鋼反射体の反射要素については、ラッパ管と同様に PNC-FMS 鋼を用いることとする。

なお、要素間の間隙を維持する方法として、グリッド型も想定されるが、前述の表 3.2-4 にはスペーサワイヤを用いると仮想した場合でのワイヤ径を参考として記載している。ここで、ステンレス鋼反射体及び径方向 B_4C 中性子遮へい体について、炉心槽への高速中性子照射量を低減するため、炉心高さ範囲のみならず、上下部プレナムに対応した範囲までとした。

さらに、炉心中央に設置するステンレス鋼希釈集合体については、暫定的にステンレス鋼反射体と同一仕様とした。

表3.2-1 内部増殖炉心の炉心主要仕様

		もんじゅ (高燃)	実証炉 (高燃)	内部増殖炉心	
				H11炉心	H12炉心
熱出力	(MWth)	714	1600	1600	3500
運転サイクル期間	(EFPD)	148	608	600	630
燃料集合体数	(体)	198	295	304	520
内側炉心集合体体数	(体)	108	199	82	232
中間炉心集合体体数	(体)	-	-	114	126
外側炉心集合体体数	(体)	90	96	108	162
層数(内/中/外)		7/0/2	9/0/2	6/3/2	9/2/2
径方向ブランケット	(体)	172	150	-	-
燃料交換バッチ数(平均)		5	4	7.07	6.86
内側炉心		5	4	6	6
中間炉心		-	-	6	7
外側炉心(第1層/第2層)		5	4	8/10	8/9
径方向ブランケット		5	4	-	-
制御棒本数	(体)	19	30	18	36
燃料要素本数/集合体	(本)	169	217	169	217
燃料要素径	(mm)	6.5	8.5	12.0	12.0
集合体配列ピッチ	(mm)	115.6	158.1	187.5	212.5
炉心等価直径(炉心部)	(m)	1.79	2.99	3.55	5.28
Pu富化度(内/外)	(cm)	93	100	120	120
軸ブラ長さ(上/下)	(cm)	30/35	35/35	5/20	1.5/20
出力密度	(W/cc)	282	211	128	129
炉心平均線出力	(W/cm)	212	232	247	250
実効燃料体積率	(%)	28.4	37.1	40.0	40.0
Pu富化度(内/外)	(wt%)	23.0/29.9	19.5/28.3	15.2/18.2	14.5/18.7
Pu同位体組成*		組成1	組成2	組成3	
取出平均燃焼度(炉心部)	(GWd/t)	83	157	145	155
取出平均燃焼度(全体)	(GWd/t)	23	60	123	137
増殖比		1.13	1.06	1.05	1.01
最大線出力	(W/cm)	360	450	400	420
高速中性子照射量	(10^{23} nvt)	2.3	5.1	4.9	5.2
炉心部重量(重金属)	(t_{HM})	5.88	22.98	43.11	94.69
軸ブラ重量(重金属)	(t_{HM})	4.58	17.33	10.03	15.94
径ブラ重量(重金属)	(t_{HM})	12.67	24.80	-	-

* Pu同位体組成 ; $^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$

組成1 : 0/58/24/14/4/0、組成2 : 1.7/58.1/25/9.2/4.7/1.3、組成3 : 3/52/27/9.5/7/1.5

表3.2-2 内部増殖炉心の燃料集合体仕様

		もんじゅ (高燃)	実証炉 (高燃)	内部増殖炉心	
				H11炉心	H12炉心
燃料要素本数/集合体	(本)	169	217	169	217
燃料要素リング数	(-)	8	9	8	9
燃料要素外径	(mm)	6.5	8.5	12	12
ワイヤ外径	(mm)	1.32	1.1	1.1	1.15
燃料要素バンドル密着距離	(mm)	104.0	143.7	173.0	196.5
ラッパ管内対面距離	(mm)	104.6	144.5	173.7	197.3
porosity / ring	(mm)	0.081	0.086	0.090	0.090
燃料要素間ギャップ	(mm)	0.046	0.049	0.051	0.051
燃料要素ピッチ	(mm)	7.866	9.649	13.151	13.201
ラッパ管肉厚	(mm)	3.0	3.9	4.4	5.1
ラッパ管材質		PNC316	FMS?	FMS	FMS
集合体間ギャップ	(mm)	5.0	5.8	5.0	5.0
集合体配列ピッチ	(mm)	115.6	158.1	187.5	212.5
被覆管材質		PNC316	ODS?	FMS	ODS
被覆管肉厚	(mm)	0.47	0.50	0.71	0.71
肉厚/外径比	(-)	0.072	0.059	0.059	0.059
被覆管内径	(mm)	5.56	7.50	10.58	10.58
Pu富化度(内/外)	(wt%)	23.0/29.9	19.5/28.3	15.2/18.2	14.5/18.7
Pu同位体組成 ^{*1}		組成 1	組成 2	組成 3	組成 3
ペレット外径	(mm)	5.4	7.32	10.40	10.40
ペレット内径	(mm)	0	2	3.40	3.40
ペレット密度	(%T.D.)	85	95	95	95
スミア密度	(%T.D.)	80.2	83.7	82.0	82.0
実効燃料体積率	(%)	28.4	37.1	40.0	40.0
炉心高さ	(cm)	93	100	120	120
軸ブラ高さ(上/下)	(cm)	30/35	35/35	5/20	1.5/20 ^{*2}
上部ガスプレナム長さ	(cm)	116	28.5	28.5	5.0
下部ガスプレナム長さ	(cm)	0	105	130	135.5
燃料要素全長	(cm)	281.3	313.5	313.5	292
軸ブラペレット密度	(%T.D.)	95	95	95	95
重金属重量 (炉心部)	(kg/体)	30	78	142	182
(軸ブラ部)	(kg/体)	23	59	33	31

*1 Pu同位体組成；²³⁸Pu/ ²³⁹Pu/ ²⁴⁰Pu/ ²⁴¹Pu/ ²⁴²Pu/ ²⁴¹Am

組成 1 : 0/58/24/14/4/0、組成 2 : 1.7/58.1/25/9.2/4.7/1.3、組成 3 : 3/52/27/9.5/7/1.5

*2 下部軸ブラについては、37本分をプレナムに変更

表3.2-3 ワイヤ径をパラメータとした燃料集合体仕様検討

		H11炉心 (1600MWth)	H12炉心 (3500MWth)						
			ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
燃料要素本数/集合体	(本)	169	217	217	217	217	217	217	217
燃料要素外径	(mm)	12	12	12	12	12	12	12	12
ワイヤ外径	(mm)	1.1	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4
燃料要素ピッチ ^{*1}	(mm)	13.15	13.15	13.20	13.25	13.30	13.35	13.40	13.45
ラッパ管内対面距離 ^{*1}	(mm)	173.7	196.5	197.3	198.1	198.9	199.7	200.5	201.3
ラッパ管肉厚	(mm)	4.4	5.0	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
ラッパ管材質		FMS	FMS	FMS	FMS	FMS	FMS	FMS	FMS
集合体間ギャップ	(mm)	5.0	4.9	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
集合体配列ピッチ	(mm)	187.5	211.4	212.5	213.3	214.1	214.9	215.7	216.5
被覆管材質		FMS	ODS	ODS	ODS	ODS	ODS	ODS	ODS
被覆管肉厚	(mm)	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
被覆管内径	(mm)	10.58	10.58	10.58	10.58	10.58	10.58	10.58	10.58
スミア密度	(%T.D.)	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0	82.0
実効燃料体積率	(%)	40.0	40.4	40.0	39.7	39.4	39.1	38.8	38.5
バンドル部圧力損失 ^{*2}	(kg/cm ²)	-	2.02	1.88	1.74	1.62	1.52	1.42	1.33
		-	2.10	1.96	1.82	1.69	1.58	1.48	1.38

*1 ウエアマーク発生防止、BDIの観点からPorosity/Ringを0.09に設定

*2 バンドル部圧力損失評価条件 改良版MIT式適用、冷却材流量:36kg/sec、ワイヤ巻き付けピッチ:20cm

上段:燃料要素全長280cmの場合、下段:燃料要素全長292cmの場合

表3.2-4 制御棒暫定仕様

		内部増殖炉心 3500MWh	備考 (過去の設計例との対応等)
集合体配列ピッチ	(mm)	212.5	
案内管外径	(mm)	207.5	ラッパ管外対面間距離と同一
案内管内径	(mm)	196.5	
案内管肉厚	(mm)	5.5	肉厚/外径比保存
案内管材質		PNC-FMS鋼	
保護管外径	(mm)	188.3	キヤップ幅/案内管内径比保存
保護管内径	(mm)	181.5	
保護管肉厚	(mm)	3.4	肉厚/外径比保存
保護管材質		PNC-FMS鋼	
filler直径	(mm)	28.0	
filler面積(6本計)	(mm ²)	2449.1	
要素本数	(mm)	31	
被覆管外径	(mm)	28.0	
被覆管内径	(mm)	25.4	
被覆管肉厚	(mm)	1.3	肉厚/外径比保存
被覆管材質		PNC-FMS鋼	
被覆管-レットキヤップ	(mm)	2.3	
B ₄ Cペレット外径	(mm)	23.2	スミア密度保存
¹⁰ B濃縮度	(wt%)	90	
B ₄ Cペレット密度	(%T.D.)	95	
シェラウド管厚さ	(mm)	0.1	
ワイヤ径	(mm)	1.00	
配列ピッチ面積	(mm ²)	39106	
B ₄ Cペレットスタック長さ	(cm)	120	炉心高さと同一
B ₄ C体積率	(%)	33.5	
構造材体積率	(%)	29.5	
案内管体積率	(%)	8.9	
保護管体積率	(%)	5.1	
filler体積率	(%)	6.3	
被覆管体積率	(%)	9.2	シェラウド管を含む
Na領域体積率	(%)	37.0	
集合体間キヤップ体積率	(%)	13.5	
案内管キヤップ体積率	(%)	6.3	
保護管内体積率	(%)	11.1	
被覆管キヤップ体積率	(%)	6.1	
合計		100.0	

表3.2-5 ステンレス鋼反射体、B₄C中性子遮へい体、上部中性子遮へい体の暫定仕様

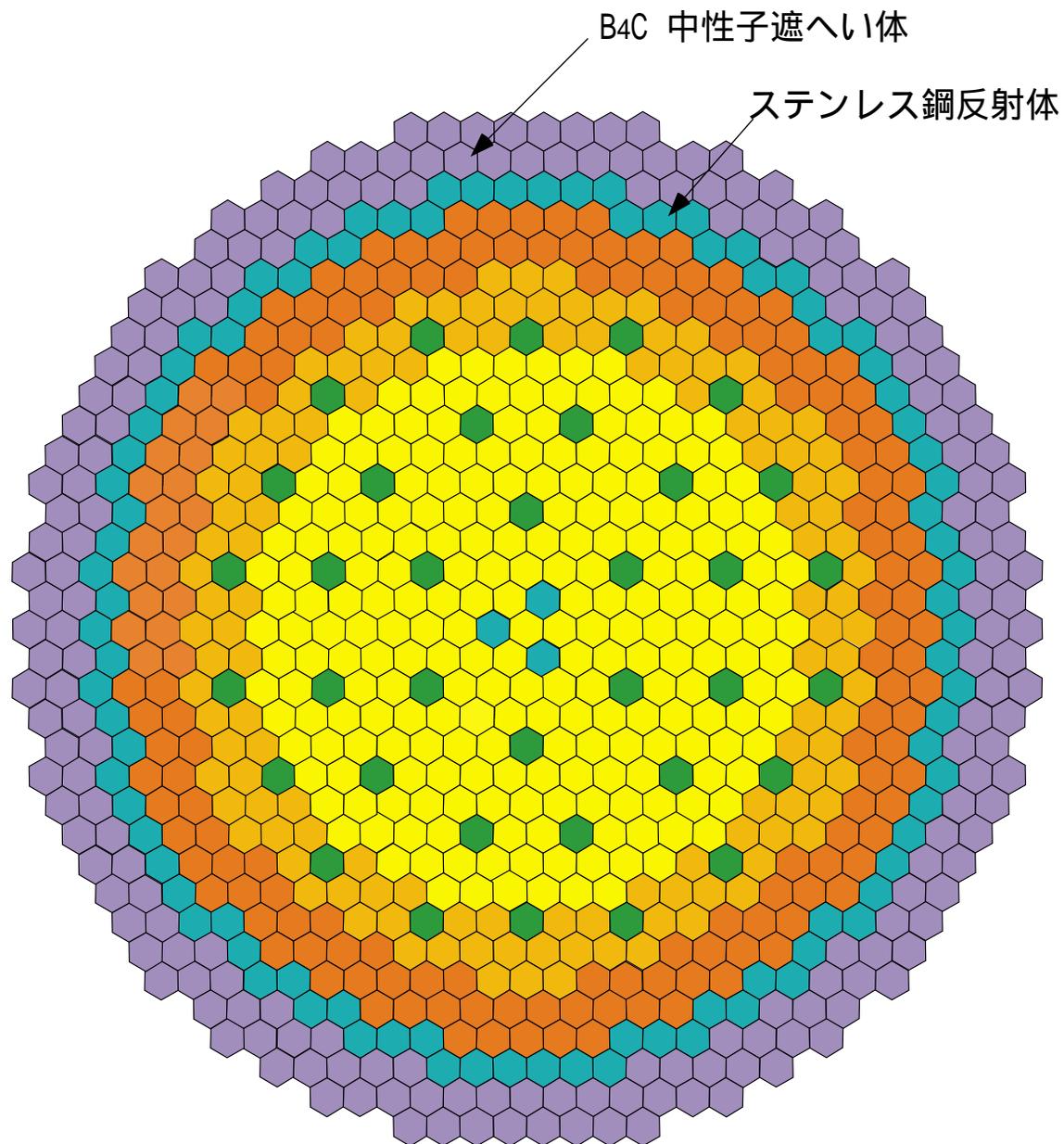
	ステンレス鋼反射体 ^{*1}		B ₄ C中性子遮へい体 ^{*1*2}		上部中性子遮へい体 ^{*1*2}	
	暫定案	参考	暫定案	参考	暫定案	参考
集合体配列ピッチ (mm)	212.5	212.5	212.5	212.5	212.5	212.5
集合体間ギャップ幅 (mm)	5	5	5	5	5	5
ラッパ管肉厚 (mm)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1
ラッパ管内対面間距離 (mm)	197.3	197.3	197.3	197.3	197.3	197.3
要素本数/集合体 (-)	19	37	19	37	19	37
要素径 (mm)	42.4	30.2	42.8	30.5	39.9	28.3
被覆管肉厚 (mm)	-	-	1.79	1.28	1.67	1.19
B ₄ Cペレット外径 (mm)	-	-	-	-	36.1	25.6
B ₄ Cペレット密度 (%T.D.)	-	-	-	-	95.0	95.0
B ₄ C粉末充填率 (%T.D.)	-	-	70	70	-	-
ワイヤ径(仮想) ^{*3} (mm)	1.4	1.4	1.1	1.1	3.5	3
P/R(仮想) ^{*3} (mm)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
ラッパ管体積率 (%)	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
集合体間ギャップ体積率 (%)	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7	4.7
ラッパ管内Na 体積率 (%)	17.5	18.6	16.3	17.0	25.6	26.7
要素体積率 (%)	68.7	67.6	-	-	-	-
被覆管体積率 (%)	-	-	11.2	11.1	9.7	9.6
B ₄ C体積率(100%.T.D.換算) (%)	-	-	41.0	40.6	47.3	46.4
Heギャップ体積率 (%)	-	-	17.6	17.4	3.6	3.6
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
備考	反射要素 FMS鋼		B;天然組成		B;天然組成	

*1 集合体あたりの要素本数について、37本バンドル型も考えられるが、体積率に大きな差がないため19本バンドル型を暫定案とする

*2 径方向中性子遮へい体にはB₄C粉末を、上部中性子遮へい体にはB₄Cペレットを想定する

上部中性子遮へい体は燃料集合体内部で燃料要素バンドルの上部に設置される

*3 要素の支持方式としてグリット型も考えられるが、ワイヤ型に換算した値を記載している



- — 内側炉心燃料集合体 :232
- — 中間炉心燃料集合体 :126
- — 外側炉心燃料集合体 :162
- — 制御棒 :36
- — ステンレス鋼希釈集合体 :3

図3.2-1 3500MWth級内部増殖炉心の炉心配置

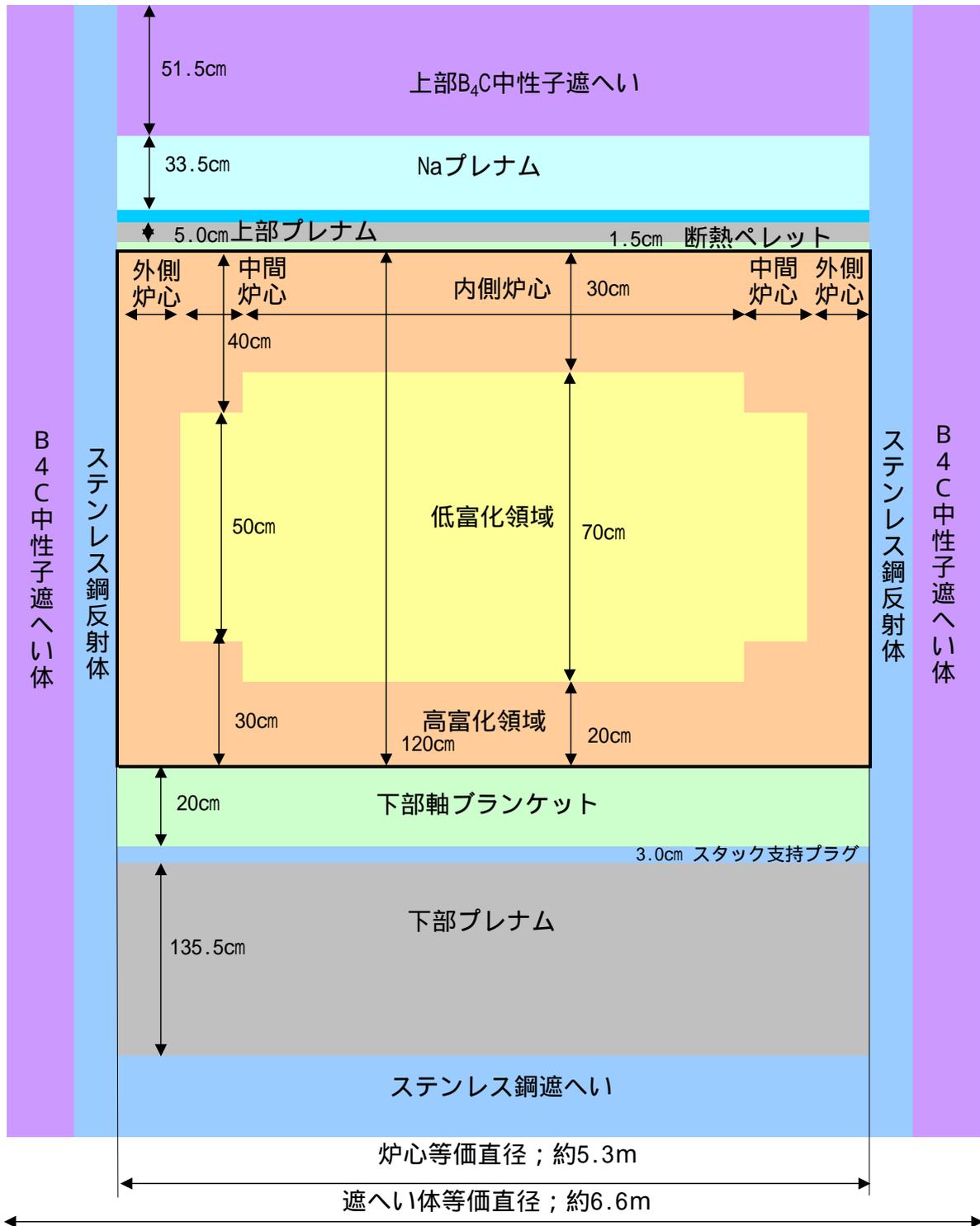


図3.2-2 3500Mwth級内部増殖炉心の炉心構成（縦断面形状）

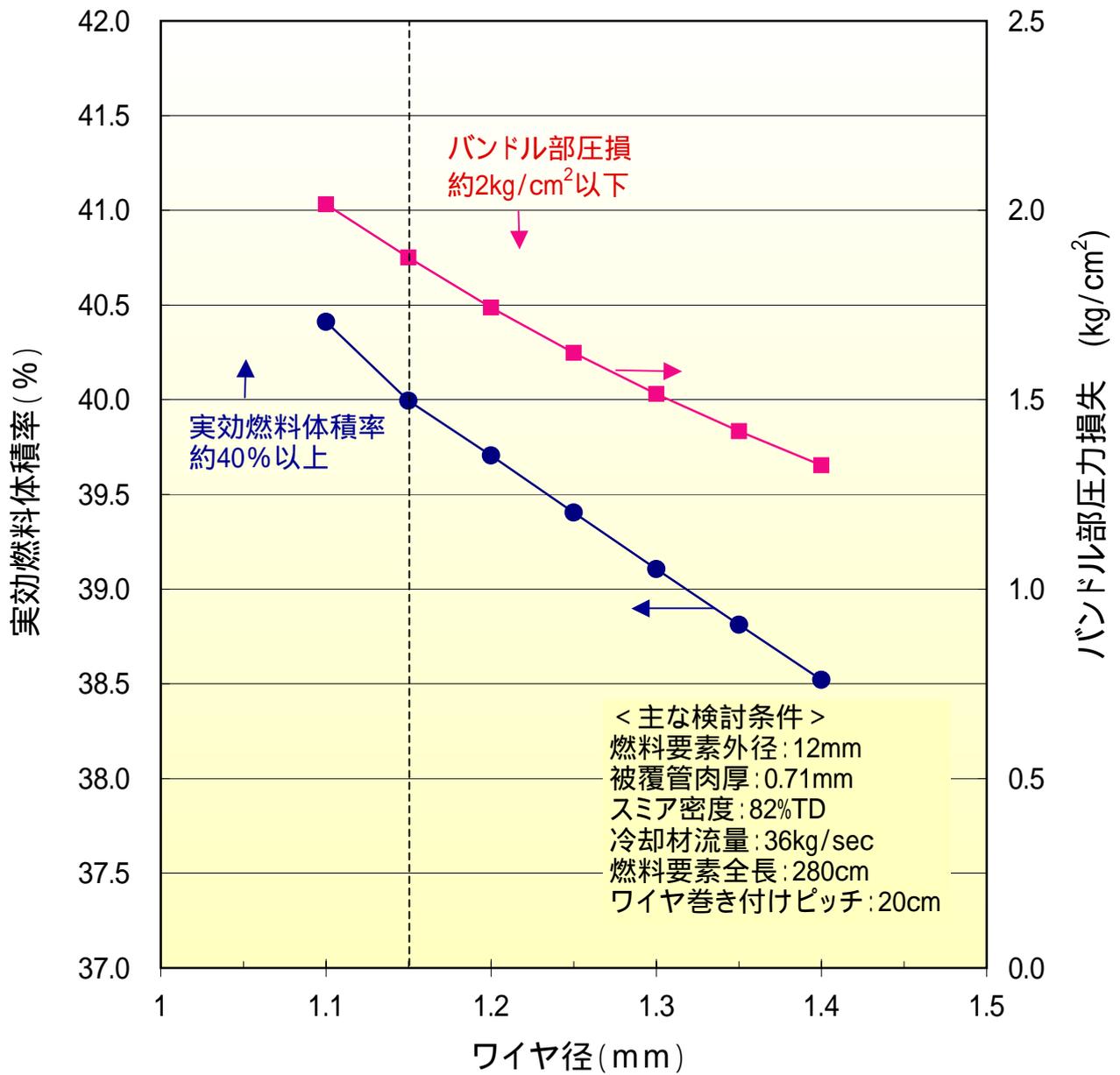


図3.2-3 ワイヤ径と燃料体積率及びバンドル部圧損との関係

3.3 核設計検討

3.3.1 解析手法

核設計計算の全体フローを図 3.3.1-1 に示す。解析手法はプルトニウム燃料センター設計評価 Gr.において標準的に用いられている手法⁹⁾を用いた。燃焼欠損反応度、増殖比、物質収支等の燃焼特性については2次元燃焼計算によって算出し、制御棒挿入効果を考慮した最大線出力、出力分布等については3次元拡散計算で評価する。以下に解析手法・条件等について述べる。

(1) 核定数ライブラリ

平成 12 年度の解析には核定数ライブラリとして、JUPITER 臨界実験データを中心に調整された JENDL3.2 ベースの統合炉定数 (ADJ98) を用いた。本ライブラリはオリジナルに比べ、 ^{239}Pu の中性子捕獲断面積を大きめに、 ^{240}Pu 及び ^{238}U の中性子捕獲断面積が小さめに補正されている等の影響により、オリジナルを用いた場合に比べて、燃焼欠損反応度を大きめに、増殖比を小さめに評価する傾向がある。また、この統合炉定数は、その後、「常陽」での燃焼欠損反応度データ等も踏まえて ADJ2000 として再調整されており、この改定された定数を用いた場合には JENDL-3.2 オリジナルと比較した増殖比の過小評価等は解消されている。

なお、平成 11 年度の 1600MWth 級炉心の検討には、JENDL3.2 のオリジナルライブラリを用いていた。

(2) 70 群実効断面積

基本的に均質セル体系で SLAROM コードにより 70 群実効断面積を作成した。

なお、遷移過程での再臨界排除対策として 217 本バンドル中の 37 本の下部軸方向ブランケットを取り除き、下部ガスプレナムに置き換えているが、この領域についても物質存在量を保存するように均質セル体系で扱った。

ただし、制御棒については非均質効果の影響が大きいことから、図 3.3.1-2 に示す非均質セル体系を用いて断面積を作成した。

断面積作成時の各領域の温度条件を表 3.3.1-1 に示す。炉心燃料の平均温度は過去の設計例での値を基に、平均的な冷却材温度(472.5 ; 原子炉入口温度(395) 及び原子炉出口温度(550)の平均値)からの燃料温度上昇幅が全炉心を対象とした平均線出力に比例すると仮定して推定した。ブランケット燃料の領域平均温度は、過去の設計例のそれを代用し、その他の領域については冷却材の原子炉出入口平均温度を用いた。

JENDL-3.2 版統合炉定数 (ADJ98) の 70 群無限希釈断面積を基にクリーン組成に対する 70 群実効断面積を一旦作成した。ついで、この 70 群実効断面積を 7 群実効断面積に縮約して燃焼計算を行い、平衡サイクル初期の燃焼組成を算出し(図

3.3.1-1 中の破線に対応)、この平衡サイクル初期組成を用いて 70 群実効断面積を再度作成した。さらに、この平衡サイクル相当の 70 群実効断面積を 7 群に縮約し、2 次元燃焼計算、3 次元拡散計算を行って燃焼度、増殖比、出力分布等を評価した。

また、Na ボイド反応度等の反応度特性については、上記で求められた平衡サイクル初期及び末期の燃焼組成を用いて 70 群実効断面積を再々度作成し、これに基づいて CITATION-FBR コードによって評価した。

(3) 2 次元 RZ 体系

2 次元計算時の RZ 体系を図 3.3.1-3 に示す。RZ 体系へのモデル化は基本的に炉心配列毎に体積を保存して円環化した。ただし、燃料集合体の炉心配置において前述の図 3.2-1 に示すように外接円径を縮小するために六角形配置の角を削り、円形に近づける工夫がなされており、中間炉心及び外側炉心については共に 2 層づつとなるようにモデル化した。

また、制御棒チャンネルのうち第 1 リング (第 5 層)、第 2 リング (第 8 層) については、体積を保存して、対応する層の中央に配置した。第 3 リング (第 11 層) については中間炉心の第 1 層目の外側に配置した。さらに、3 体のステンレス鋼希釈集合体についても、体積を保存しつつ、炉中心からの距離を保つように配置した。

(4) 少数群実効断面積

SLAROM コードで作成した 70 群実効断面積を JOINT-CITATION コードによって、2 次元体系で求められる領域毎の中性子束に基づいて少数群断面積に縮約した。ここで、輸送断面積についてはカレント重みの輸送断面積を用いた。

なお、2 次元燃焼・3 次元拡散計算用断面積は 7 群に、遅発中性子割合計算用の断面積は 18 群に縮約した。

(5) 2 次元燃焼計算

上記の平衡サイクル初期に対応する 7 群実効断面積を用いて PENCIL (CITATION) コードにより 2 次元 RZ 体系による燃焼計算を実施した。

この 2 次元燃焼計算により燃焼欠損反応度、燃焼度等の燃焼特性を評価した。なお、制御棒チャンネルについては全引き抜き状態に相当する Na フォロワーとして扱った。

ここで、PENCIL (CITATION) コードにおいては中性子捕獲反応に伴うエネルギー発生を扱っていないことから、中性子捕獲に伴うエネルギー発生を寄与分を補正係数として核分裂反応当たりの放出エネルギーに上乘せした核発熱データを使用した。この際に、核種毎に核分裂反応と中性子捕獲反応との割合が異なるため、補正係数において、その反応比を考慮した。本検討で用いた PENCIL

(CITATION)コード用の核分裂当たりの発熱データを表 3.3.1-2 に示す。

なお、主要核種の核分裂当たりの放出エネルギー及び中性子捕獲に伴うエネルギーについては Sher らの論文¹⁰⁾に基づいている。

(6) 3次元拡散計算

制御棒挿入効果を取り入れた核特性は MOSES コードを用いた 3次元 Tri-Z 体系拡散計算で評価した。この時に用いている燃焼組成は 2次元燃焼計算で求めた平衡サイクル時期のものである。また、MOSES コードでは CITATION コードとは異なり、中性子捕獲反応によるエネルギー発生を核分裂反応と区別して扱えるため、両者を区別して考慮した発熱断面積を作成し、これを使用した。

(7) Na ボイド反応度、ドップラ係数

Na ボイド反応度及びドップラ係数は、燃焼計算で求められた平衡サイクル初期及び末期における燃焼組成をもとに SLAROM コードで作成した 70 群実効断面積を使用し、CITATION-FBR コードで 70 群拡散計算を行って反応度を算出する直接計算により求めた。ここで、Na ボイド反応度はラッパ管内がボイド化したときの反応度とし、ドップラ係数は領域温度が一様に 500 上昇したときの反応度を基に算出した。

(8) 実効遅発中性子割合

実効遅発中性子割合について PERKY コードを用いて算出する。この際、入力として用いる遅発中性子割合データの群数に合わせて 18 群断面積を用いた。

表3.3.1-1 実効断面積作成用領域温度

単位：

	平成11年度検討 1600MWth級炉心	平成12年度検討 3500MWth級炉心
炉心燃料	1062.0	1062.0
軸方向ブランケット	527.0	527.0
その他	472.5	472.5

注) その他の部分には冷却材の原子炉出入口温度の平均値を用いている
 また、冷却材密度計算にも原子炉出入口温度の平均値を用いている

表3.3.1-2 核分裂当たりの放出エネルギー（計算機入力データ用）

核種	核分裂による放出 エネルギー E_f *1 (MeV)	捕獲反応の 補正係数f	補正後の放出エネ ルギー $A_2 (=fE_f)$ (MeV)	補正後の放出 エネルギー A_2 ($\times 10^{-11}$ W·sec)
U233	191.04	1.003	191.61	3.0700
U234	189.09		189.09	3.0295
U235	193.72	1.009	195.46	3.1316
U236	191.62	1.088	208.48	3.3403
U238	194.81	1.123	218.77	3.5051
Np237	193.70	1.077	208.61	3.3423
Pu238	197.21		197.21	3.1597
Pu239	199.92	1.007	201.32	3.2255
Pu240	197.79	1.025	202.74	3.2482
Pu241	201.98	1.005	202.98	3.2522
Pu242	200.88	1.027	206.30	3.3054
Am241	201.02	1.100	221.12	3.5428
Am243	201.02	1.070	215.09	3.4461
Cm244	205.61	1.034	212.60	3.4062
Cm242				3.5152
Am242m				3.4527
Cm243				3.5160
Cm245				3.5290
Np239				3.3100

*1 Sherらの論文¹⁰⁾による。ただし、記載値がない^{242m}Am、²⁴²Cm等についてはENDFライブラリの値を使用している

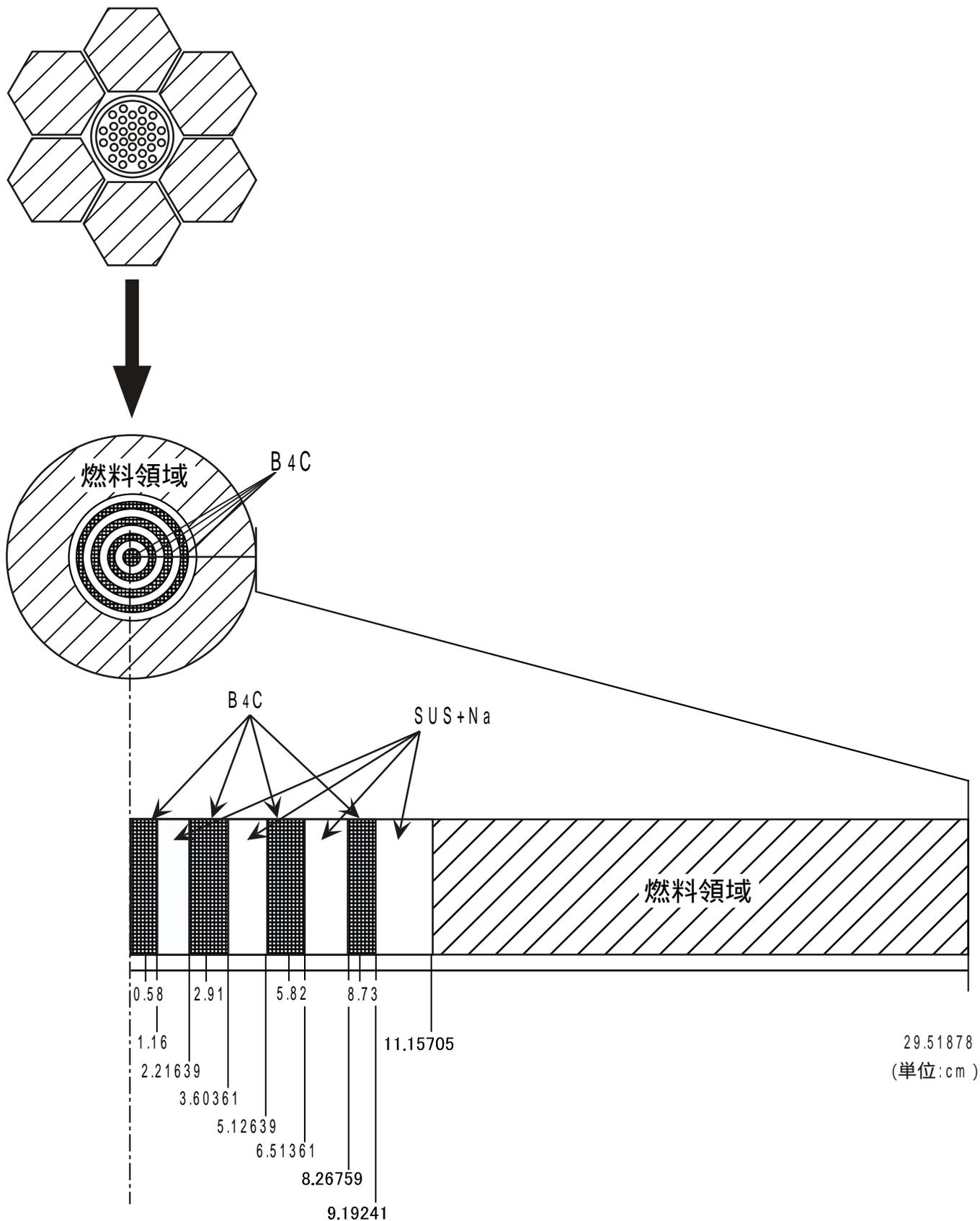


図3.3.1-2 制御棒リングモデルの形状

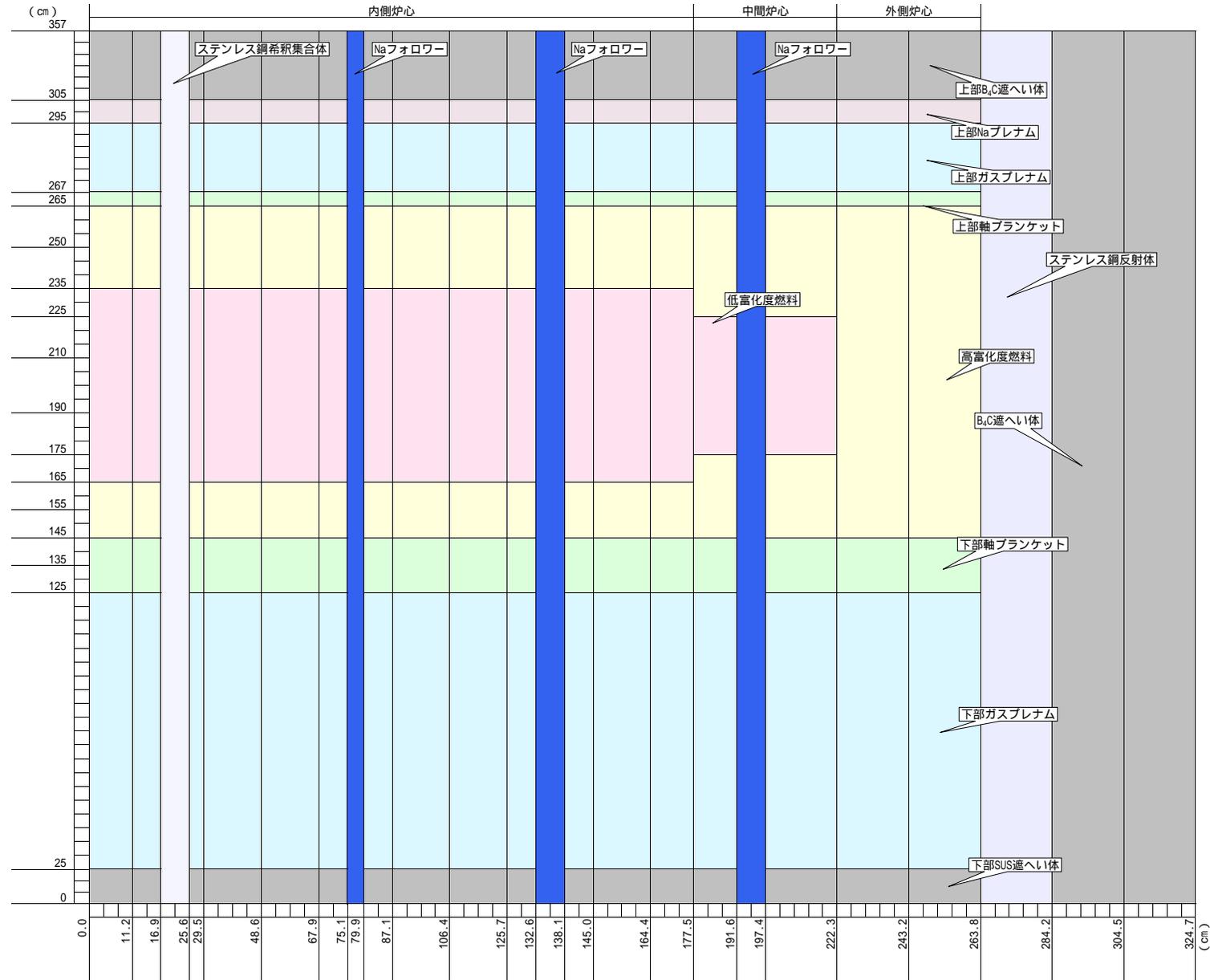


図3.3.1-3 内部増殖炉心の2次元RZ体系図

3.3.2 核特性解析結果（2次元 RZ 体系解析結果）

2次元 RZ 体系燃焼解析に基づく 3500MWth 級内部増殖炉心の平衡サイクルに対する核特性解析結果を表 3.3.2-1 にまとめて示す。なお、この表には平成 11 年度検討した 1600MWth 級炉心についても合わせて示している。

(1) Pu 富化度設定

Pu 富化度サーベイには Pu 富化度調整計算コード PENCIL を用いた。PENCIL コードは CITATION ベースの 2次元 RZ 体系拡散・燃焼計算コードである。Pu 富化度サーベイにおいて平衡サイクル末期での実効増倍率が、運転余裕等（0.3% k/k' ）を考慮した 1.003 となるように調整した。

本炉心では軸方向富化度分布を採用し、内側炉心及び中間炉心の中央部を低富化領域とし、内側炉心及び中間炉心の上下部と外側炉心を高富化領域として、2種類の Pu 富化度を用いている。このため、過去に多くの検討例がある通常の 2領域均質炉心と異なり、Pu 富化度配分において径方向出力分布のみならず、軸方向出力分布についても配慮する必要がある。ここで、大型炉の径方向出力分布は中小型炉に比べて平坦化される傾向があることから、軸方向出力分布に着目し、3次元解析効果を考慮して内側炉心における低富化度領域での最大線出力と炉心部上下端の高富化度領域での最大線出力の比がほぼ 1.0 となるように Pu 富化度を配分した。これらの条件により求められた本炉心の Pu 富化度は低富化度領域が 14.5wt%、高富化度領域が 18.7wt% となり、体積平均した炉心全体での平均値は 17.1wt% となった。

(2) 燃焼欠損反応度

本炉心の燃焼欠損反応度は 1.5% k/k' となっており、運転サイクル期間を 630 日と長く設定しているにも拘わらず燃焼欠損反応度は小さな値に保たれている。これは太径中空燃料の採用によって実効燃料体積率を高くしたこと、また、大型炉において炉心高さを 120cm とし中性子経済を改善したことにより、「もんじゅ」等の従来の高速炉に比べ炉心平均 Pu 富化度を 17.1wt% と低く設定できたことに伴って内部転換比が向上したことによると考えられる。

なお、核データライブラリとして ADJ2000 を用いて、この条件で再度 Pu 富化度サーベイを行った場合には、燃焼欠損反応度は 0.9% k/k' まで低減した。

(3) 取出平均燃焼度

炉心部取出平均燃焼度は 154GWd/t と F S での目標燃焼度を満足している。取出平均燃焼度としてブランケット燃料を含めた炉心全体を対象とした定義を用いた場合に、ブランケット燃料を多く設置した炉心では取出平均燃焼度が大きく低下するが、本炉心においては実効燃料体積率を高めて Pu 富化度を低減し、内部

転換比の向上を図ってブランケット燃料装荷量を極力削減したことで、ブランケット燃料を含めた炉心全体に対する取出平均燃焼度においても 137GWd/t と高い値を維持している。

また、ブランケット燃料についても長期に亘り照射され、軸方向ブランケット部分のみの取出平均燃焼度においても 31GWd/t に達している。このため、 ^{240}Pu の含有率は 13wt% に達し、仮に、軸方向ブランケットのみを再処理した場合においてもいわゆる核兵器級プルトニウムは得ることができない。

(4) 最大線出力

表 3.3.2-1 に示した数値は 2 次元解析に基づく結果であり、制御棒挿入効果等は考慮されておらず、参考値との位置付けであるが、本炉心における最大線出力は、径方向及び軸方向出力分布の平坦化に伴いピーク出力が抑えられたことで 400W/cm 程度となった。

本炉心の平衡サイクル初期及び末期での径方向出力分布を図 3.3.2-1、2 に示す。これらの図では、各炉心領域で最大値が発生した軸方向位置（3 レベル）に着目して径方向分布を示している。また、炉心部の範囲で軸方向に平均した出力密度に対する径方向出力分布を図 3.3.2-3 に示す。この図に示すように、制御棒挿入効果を考慮していないものの、径方向出力分布は平衡サイクル初期及び末期において極く僅かな変化に留まっている。

平衡サイクル初期及び末期において各炉心での最大値が発生した径方向位置での軸方向出力分布を図 3.3.2-4、5 に示す。軸方向に同一の Pu 富化度を適用した外側炉心では、両端を切り落としたコサイン分布となっている。ここで、下部側のみに軸方向ブランケットを設置している影響により、出力分布の勾配が上部側に比べて下部側でやや緩やかになっている。炉心中央部の Pu 富化度を低減させている内側炉心及び中間炉心では、中央部で出力密度の低下が生じている。この低富化領域は制御棒挿入効果を考慮して下方に非対称に配置しており、解析において制御棒挿入を考慮しない状態では出力ピークは上部高富化領域の下端（炉心中央より）で発生している。

(5) 増殖比

平衡サイクル初期、末期で平均した炉心部の増殖比（内部転換比）は 0.95 で核データライブラリ、燃料組成を含め、高燃焼度化の影響を考慮すると同じ MOX 燃料を用いた従来の高速炉と比べて高い値である。これは、太径中空燃料の採用により実効燃料体積率が高められ、かつ、炉心の大型化に伴う中性子漏洩の減少により、Pu 富化度が低減できたことに伴って内部転換比の向上が図られた結果と考えられる。

なお、ブランケットをも含めた炉心全体での増殖比は、Na ボイド反応度低減の観点で上部軸方向ブランケットを削除していると共にブランケット燃料の装荷量

を極力削減していることから 1.01 となっている。

ただし、添付資料に示すように核データライブラリとして ADJ2000 を用いた場合には、炉心部の増殖比は 0.99 まで改善し、ほぼ内部増殖が達成される。また、ブランケットを含めた炉心全体での増殖比は 1.06 まで改善し、設計条件で設定した目安値を満足する。

(6) 最大高速中性子束

本炉心の最大高速中性子束は $1.6 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ となっており、過去の設計例に比べ低く抑えられている。これは、太径燃料の採用に伴い、出力密度を 140 W/cm^3 程度と過去の設計例に比べて低く抑えたこと及び軸方向 Pu 富化度分布の採用等による出力分布平坦化に伴って高速中性子束のピークが低く抑えられたためと考えられる。

図 3.3.2-6 に炉心中心面での高速中性子束径方向分布を示す。平衡サイクル初期及び末期において高速中性子束分布の変化は僅かである。また、各炉心領域での最大値が発生した径方向位置での軸方向高速中性子束分布を平衡サイクル初期について図 3.3.2-7 に、平衡サイクル末期について図 3.3.2-8 に示す。上部軸方向ブランケット燃料が削除されているため、炉心上部側への中性子束の落ち込みは下部側に比べて厳しくなっている。

(7) 最大高速中性子照射量

高速中性子束が比較的小さいものの、高燃焼度化に対応して照射期間が延長されているため、最大高速中性子照射量は約 $5.2 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2$ まで増加している。図 3.3.2-9 に炉心中心面における径方向高速中性子照射量分布を、図 3.3.2-10 に各炉心領域で最大値が発生した径方向位置での軸方向高速中性子照射量分布を示す。

図 3.3.2-9 に見られるように、多段階燃料交換バッチでのバッチ数が異なる境界で高速中性子照射量に段差が生じている。また、径方向高速中性子束分布に応じて、内側よりも外側での燃料交換バッチ数を増やすことで、径方向の高速中性子照射量の平坦化が図られている。また、炉心中央部ではステンレス鋼希釈集合体の影響によって照射量の低下が見られる。

(8) 物質収支評価

平衡サイクル初期及び末期のインベントリを表 3.3.2-2 及び表 3.3.2-3 に示す。平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりの装荷・取出重量及び物質収支を炉心部、ブランケット部及びこれらの合計に着目して表 3.3.2-4～6 に示す。

本炉心の平衡サイクル初期の炉内インベントリは、Pu 合計量で 15.67t であり、Pu フィッサイル量で 9.60t となる。本炉心では出力密度を小さくしているため、炉出力当たりの Pu インベントリは過去の設計例に比べて大きな値となった。

平衡サイクルにおける 1 バッチ当たりに装荷する Pu 重量は 2315kg で、取り出

される Pu 重量は炉心部から 2182kg、軸方向ブランケット部から 163kg であり、炉心部 + ブランケット部の 1 サイクル当たりの物質収支では約 31kg の増加となる。ただし、Pu フィッサイルに着目した場合での炉心部 + ブランケット部に対する 1 サイクル当たりの物質収支は約 3 kg の減少となっている。このように、今回の解析条件での物質収支はシステムを持続的に維持するために必要な増殖性能を満たしていない。

ただし、添付資料に示すように、核データライブラリとして ADJ2000 を用いた場合では増殖特性が大幅に改善し、炉心部 + ブランケット部の 1 サイクル当たりの物質収支について、Pu 合計で約 120kg、Pu フィッサイルで 111kg の増加となった。また、1 バッチ当たりでの取出重量と装荷重量の比で定義される Pu 利得比は 1.055 に、Pu フィッサイル利得比は、1.081 となり、炉外サイクルでのロス分を考慮してもシステムを維持するのに十分な増殖性能を示した。

(9) Na ボイド反応度

平衡サイクル末期において炉心部のみで Na ボイドが発生した場合の反応度は表 3.3.2-7 に示すように 6.3\$ となっている。本炉心では、上部軸方向ブランケットの削除、軸方向富化度分布の採用等によって Na ボイド発生時の中性子漏洩が促進されていること、太径燃料の採用に伴って Na 体積率が減少していることにより、炉心高さの延長に伴う Na ボイド反応度の増加は抑制されていたものと考えられる。

CDA 評価における ULOF 事象においては炉心部のみならず炉上部側の Na も同時にボイド化することが期待できることから、炉上部に位置するガスプレナム部、Na プレナム部についても同時にボイド化することを想定した場合には、軸方向への中性子漏洩が大きく促進され、Na ボイド反応度は 5.5\$ まで低下する。特に、本炉心では上部軸方向ブランケットを削除していることから、上部側への中性子漏洩効果が拡大したものと考えられる。ここで、炉上部領域の Na をボイド化させた場合の中性子漏洩効果については、輸送効果が大きいため、炉上部領域をボイド化させた際に得られる負の反応度効果に対して 0.89 の補正を行っている。なお、この補正係数は TWOTRAN コードによる計算結果との比較により求めたものである。

このように、本炉心では F S において設定された目安値 6 \$ 以下（炉心部のみボイド化）を満足していないが、上部軸方向ブランケットの削除、Na プレナムの設置により、炉心上部領域を同時にボイド化させた場合での Na ボイド反応度が大きく低減している。

なお、Na ボイド化はラッパ管内部のみとして、ラッパ管間ギャップ部の Na のボイド化は想定していない。

(10) ドップラ係数

本炉心の平衡サイクル末期における炉心部の 500 温度上昇時のドップラ反応度係数は $-6.35 \times 10^{-3} T \cdot k / T$ となった。これは、太径燃料を用いて Pu 富化度を低く設定したことにより、比較的大きな絶対値を持つ負の反応度係数となった。

(11) 遅発中性子割合等

動特性パラメータを表 3.3.2-8 に示す。実効遅発中性子割合 β_{eff} は平衡サイクル初期及び末期において、それぞれ、0.349%、0.342%となった。

表3.3.2-1 2次元RZ計算による核特性解析結果

		内部増殖炉心		
		H11炉心	H12炉心 ^{*1}	
炉出力 (MWth)		1600	3500	
運転サイクル長さ (日)		600	630	
炉心等価直径 (m)		3.55	5.28	
集合体体数	内側 / 中間 / 外側炉心	82 / 114 / 108	232 / 126 / 162	
	制御棒	18	36	
	炉心内希釈SUS集合体	3	3	
燃料交換バッチ	内側炉心	6	6	
	中間炉心	6	7	
	外側炉心第1層 / 第2層	8 / 10	8 / 9	
炉心高さ (富化度配分) ^{*2} (cm)	内側炉心(上部/中央部/下部)	120 (30 / 65 / 25)	120 (30 / 70 / 20)	
	中間炉心(上部/中央部/下部)	120 (40 / 45 / 35)	120 (40 / 50 / 30)	
	外側炉心	120		
軸方向ブランケット 高さ (cm)	内側炉心(上部/下部)	5 / 20	1.5 / 20	
	中間炉心(上部/下部)	5 / 20	1.5 / 20	
	外側炉心(上部/下部)	5 / 20	1.5 / 20	
スミア密度 (%)		82		
Pu組成 (wt%)		*3 参照		
Pu富化度 (wt%)	低/高	15.2 / 18.2	14.5 / 18.7	
	体積平均	17.3	17.1	
核データライブラリ		JFS-3-J3.2	JFS-3-J3.2ベース 統合炉定数(ADJ98)	
実効増倍率	BOEC	1.0154	1.0186	
	EOEC	1.0030	1.0033	
燃焼欠損反応度 (% k/kk')		1.22	1.49	
取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心部	145.3	154.6	
	ブランケット部	24.8	31.0	
	炉心 + ブランケット部	122.6	136.8	
最大線出力 (W/cm) (参考値)	BOEC	内側炉心	392	406
		中間炉心	384	367
		外側炉心	299	306
	EOEC	内側炉心	394	388
		中間炉心	370	349
		外側炉心	291	293
新旧燃料ミスマッチ (局所)	BOEC	内側炉心	1.0137	1.1049
		中間炉心	1.0694	1.1124
		外側炉心	1.0792	1.1120
	EOEC	内側炉心	1.0229	1.0271
		中間炉心	1.0658	1.1004
		外側炉心	1.0732	1.1003
出力分担率 ^{*4} (%)	BOEC	内側炉心	35.2	55.3
		中間炉心	41.2	24.2
		外側炉心	23.6	20.5
	EOEC	内側炉心	35.4	55.9
		中間炉心	41.2	24.1
		外側炉心	23.4	20.0
増殖比	BOEC	炉心部	0.991	0.952
		ブランケット合計	1.059	1.018
	EOEC	炉心部	0.969	0.942
		ブランケット合計	1.036	1.001
	平均	炉心部	0.980	0.947
		ブランケット合計	1.048	1.010
最大高速中性子束 (n/cm ² ・s)		1.58E+15	1.61E+15	
最大高速フルエンス (n/cm ²)		4.88E+23	5.19E+23	
炉心部燃料装荷量(重金属) (t _M)		43.1	94.7	
Naボイド反応度 ^{*5} EOEC (\$)		5.7	6.3	
ドップラ係数 ^{*6} EOEC (×10 ⁻³ ・dk/dT)		-6.40	-6.35	

*1 再臨界排除対策として集合体内の37本のピンについて下部軸ブラを削除し、ガス領域としている

*2 上下部は高富化度領域、中央部は低富化度領域である

なお、外側炉心は富化度配分無しの高富化度領域である

*3 軽水炉取出組成 (PWR:49GWd/t、BWR:45GWd/t、炉外サイクル:10年)

Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241=3/52/27/9.5/7/1.5 (wt%)

*4 上下部軸ブラも含めている

*5 炉心部においてラッパ管内がボイド化したときの結果である (70群直接計算)

*6 炉心部の領域温度が一樣に500 上昇したときの結果である (70群直接計算)

表3.3.2-2 平衡サイクル初期インベントリ

単位：kg

	内側炉心 (6バッチ)		中間炉心 (7バッチ)		外側炉心第1層 (8バッチ)		外側炉心第2層 (9バッチ)		全炉心		
	炉心部	ブランク部	炉心部	ブランク部	炉心部	ブランク部	炉心部	ブランク部	炉心部	ブランク部	計
Pu-238	155.3	0.2	90.0	0.1	63.0	0.0	72.0	0.0	380.3	0.3	380.6
Pu-239	3707.2	239.3	2054.0	122.2	1328.1	65.0	1448.2	57.9	8537.4	484.4	9021.8
Pu-240	1963.9	23.4	1102.9	10.9	731.4	4.6	791.7	3.5	4589.9	42.4	4632.3
Pu-241	457.4	1.4	252.9	0.6	166.6	0.2	180.9	0.1	1057.8	2.4	1060.2
Pu-242	456.2	0.1	259.2	0.0	177.1	0.0	194.1	0.0	1086.5	0.1	1086.7
U-234	4.6	0.0	3.2	0.0	2.7	0.0	3.6	0.0	14.0	0.0	14.0
U-235	58.0	14.4	32.0	8.1	20.8	5.3	25.0	6.0	135.8	33.9	169.7
U-236	9.3	1.6	4.9	0.8	2.7	0.4	2.5	0.4	19.5	3.2	22.7
U-238	32040.7	6744.9	17356.0	3679.2	10650.4	2297.3	11701.2	2493.7	71748.4	15215.1	86963.5
Am-241	127.5	0.1	81.2	0.1	63.1	0.0	81.1	0.0	352.9	0.2	353.1
Am-242m	6.9	0.0	4.3	0.0	3.0	0.0	3.2	0.0	17.4	0.0	17.4
Am-243	47.9	0.0	26.2	0.0	16.1	0.0	14.4	0.0	104.6	0.0	104.7
NP-237	10.4	0.8	5.4	0.4	3.3	0.2	2.7	0.1	21.8	1.5	23.3
Cm-242	5.3	0.0	2.7	0.0	1.6	0.0	1.4	0.0	11.1	0.0	11.1
Cm-243	0.5	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.9	0.0	0.9
Cm-244	14.6	0.0	7.3	0.0	3.8	0.0	2.6	0.0	28.3	0.0	28.3
Cm-245	1.3	0.0	0.6	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	2.4	0.0	2.4
Cm-246	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	40.6	5.4	20.9	2.7	11.5	1.4	10.0	1.3	83.0	10.9	93.9
Fp(U-238)	420.2	24.4	216.0	11.9	126.6	5.9	96.7	4.2	859.5	46.4	905.8
Fp(Pu-239)	2061.3	49.3	1083.1	23.1	635.4	9.8	509.4	7.0	4289.2	89.1	4378.4
Fp(Pu-241)	641.2	0.7	340.3	0.3	209.3	0.1	166.0	0.1	1356.8	1.2	1357.9
O	5613.4	960.7	3049.5	521.7	1889.0	323.0	2034.3	347.8	12586.2	2153.2	14739.3
Na	2512.5	450.2	1364.5	244.5	844.7	151.3	909.7	163.0	5631.4	1009.0	6640.4
Fe	17800.7	3189.3	9667.6	1732.1	5984.7	1072.3	6445.1	1154.7	39898.0	7148.4	47046.4
Cr	1984.5	355.6	1077.8	193.1	667.2	119.5	718.5	128.7	4448.0	796.9	5244.9
Ni	31.3	5.6	17.0	3.0	10.5	1.9	11.3	2.0	70.2	12.6	82.8
Mo	39.2	7.0	21.3	3.8	13.2	2.4	14.2	2.5	87.8	15.7	103.5
Mn	47.0	8.4	25.5	4.6	15.8	2.8	17.0	3.0	105.4	18.9	124.2
W	406.2	72.8	220.6	39.5	136.6	24.5	147.1	26.3	910.4	163.1	1073.5
Pu Total	6740.1	264.4	3758.9	133.8	2466.1	69.8	2686.9	61.6	15652.0	529.6	16181.6
Pu-fiss Total	4164.7	240.7	2306.9	122.8	1494.6	65.2	1629.1	58.1	9595.3	486.8	10082.0
U Total	32112.6	6760.9	17396.2	3688.1	10676.6	2303.0	11732.3	2500.2	71917.7	15252.2	87169.9
MA Total	214.5	0.9	128.1	0.4	91.3	0.2	105.7	0.2	539.6	1.7	541.3
Fp Total	3163.2	79.9	1660.3	38.0	982.8	17.2	782.2	12.5	6588.4	147.6	6736.0
H.M Total	42230.4	7106.0	22943.5	3860.3	14216.7	2390.3	15307.1	2574.4	94697.6	15931.1	110628.7
Fuel Total	47843.8	8066.7	25992.9	4382.0	16105.7	2713.3	17341.4	2922.3	107283.8	18084.2	125368.1
Coolant Total	2512.5	450.2	1364.5	244.5	844.7	151.3	909.7	163.0	5631.4	1009.0	6640.4
Steel Total	20308.8	3638.7	11029.8	1976.2	6828.0	1223.3	7353.2	1317.4	45519.8	8155.6	53675.4
Total	70665.1	12155.5	38387.3	6602.7	23778.3	4087.9	25604.3	4402.7	158435.0	27248.8	185683.9

表3.3.2-3 平衡サイクル末期インベントリ

単位：kg

	内側炉心 (6バッチ)		中間炉心 (7バッチ)		外側炉心第1層 (8バッチ)		外側炉心第2層 (9バッチ)		全炉心		
	炉心部	フランク部	炉心部	フランク部	炉心部	フランク部	炉心部	フランク部	炉心部	フランク部	計
Pu-238	140.7	0.3	83.6	0.1	59.5	0.0	69.6	0.0	353.4	0.5	353.9
Pu-239	3711.2	316.7	2047.1	156.1	1310.3	81.1	1436.7	70.8	8505.4	624.7	9130.1
Pu-240	2002.6	36.4	1118.0	16.0	734.0	6.5	795.6	4.8	4650.1	63.6	4713.7
Pu-241	406.1	2.6	226.5	1.0	149.2	0.3	164.1	0.2	945.9	4.1	950.0
Pu-242	444.9	0.1	254.0	0.1	174.1	0.0	192.3	0.0	1065.2	0.2	1065.4
U-234	6.0	0.0	4.1	0.0	3.3	0.0	4.4	0.0	17.8	0.0	17.8
U-235	43.5	12.2	25.6	7.1	17.6	4.9	22.4	5.7	109.1	29.7	138.8
U-236	11.8	2.0	6.1	1.0	3.3	0.5	3.0	0.5	24.2	4.1	28.3
U-238	30812.9	6610.3	16830.4	3623.1	10410.4	2272.9	11530.4	2475.6	69584.1	14981.9	84566.1
Am-241	132.3	0.3	85.4	0.1	67.1	0.0	87.6	0.0	372.5	0.5	372.9
Am-242m	8.9	0.0	5.3	0.0	3.7	0.0	4.0	0.0	21.9	0.0	21.9
Am-243	62.8	0.0	33.2	0.0	19.8	0.0	17.5	0.0	133.3	0.0	133.3
NP-237	13.5	1.0	6.9	0.5	4.1	0.2	3.3	0.2	27.8	1.9	29.7
Cm-242	6.3	0.0	3.2	0.0	1.9	0.0	1.7	0.0	13.1	0.0	13.1
Cm-243	0.6	0.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	1.1	0.0	1.1
Cm-244	21.8	0.0	10.4	0.0	5.2	0.0	3.4	0.0	40.8	0.0	40.8
Cm-245	2.2	0.0	1.0	0.0	0.4	0.0	0.2	0.0	3.9	0.0	3.9
Cm-246	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	52.8	7.2	26.3	3.5	14.2	1.8	12.1	1.6	105.5	14.1	119.6
Fp(U-238)	580.5	34.0	285.3	15.8	161.5	7.6	120.1	5.3	1147.4	62.6	1210.0
Fp(Pu-239)	2885.3	80.0	1443.3	35.0	812.7	14.2	633.9	9.7	5775.2	138.8	5914.0
Fp(Pu-241)	883.6	1.4	447.6	0.5	265.0	0.2	204.4	0.1	1800.7	2.2	1802.9
O	5613.4	960.7	3049.5	521.7	1889.0	323.0	2034.3	347.8	12586.2	2153.2	14739.3
Na	2512.5	450.2	1364.5	244.5	844.7	151.3	909.7	163.0	5631.4	1009.0	6640.4
Fe	17800.7	3189.3	9667.6	1732.1	5984.7	1072.3	6445.1	1154.7	39898.0	7148.4	47046.4
Cr	1984.5	355.6	1077.8	193.1	667.2	119.5	718.5	128.7	4448.0	796.9	5244.9
Ni	31.3	5.6	17.0	3.0	10.5	1.9	11.3	2.0	70.2	12.6	82.8
Mo	39.2	7.0	21.3	3.8	13.2	2.4	14.2	2.5	87.8	15.7	103.5
Mn	47.0	8.4	25.5	4.6	15.8	2.8	17.0	3.0	105.4	18.9	124.2
W	406.2	72.8	220.6	39.5	136.6	24.5	147.1	26.3	910.4	163.1	1073.5
Pu Total	6705.5	356.1	3729.2	173.3	2427.0	87.9	2658.3	75.9	15520.0	693.1	16213.1
Pu-fiss Total	4117.3	319.3	2273.6	157.1	1459.4	81.4	1600.9	71.0	9451.2	628.8	10080.1
U Total	30874.3	6624.5	16866.1	3631.2	10434.6	2278.3	11560.2	2481.7	69735.2	15015.7	84751.0
MA Total	248.6	1.3	145.8	0.6	102.3	0.3	117.8	0.2	614.5	2.4	616.9
Fp Total	4402.3	122.7	2202.5	54.8	1253.4	23.7	970.6	16.6	8828.8	217.8	9046.6
H.M Total	42230.6	7104.6	22943.7	3859.9	14217.2	2390.2	15307.0	2574.4	94698.5	15929.1	110627.6
Fuel Total	47844.0	8065.3	25993.1	4381.6	16106.2	2713.2	17341.3	2922.2	107284.7	18082.3	125367.0
Coolant Total	2512.5	450.2	1364.5	244.5	844.7	151.3	909.7	163.0	5631.4	1009.0	6640.4
Steel Total	20308.8	3638.7	11029.8	1976.2	6828.0	1223.3	7353.2	1317.4	45519.8	8155.6	53675.4
Total	70665.3	12154.1	38387.5	6602.3	23778.9	4087.8	25604.2	4402.7	158435.9	27246.9	185682.8

表3.3.2-4 平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(炉心部)

単位: kg

	装荷重量					取出重量					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	
			第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)				第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)		
Pu-238	34.3	16.7	10.0	9.5	70.5	19.7	10.3	6.5	7.1	43.6	-26.9
Pu-239	594.8	289.0	172.8	165.4	1222.0	599.1	282.1	154.8	153.6	1189.6	-32.4
Pu-240	308.8	150.0	89.7	85.9	634.4	347.6	165.2	92.3	89.8	694.8	60.4
Pu-241	108.7	52.8	31.6	30.2	223.2	57.3	26.4	14.1	13.4	111.3	-112.0
Pu-242	80.1	38.9	23.3	22.3	164.5	68.8	33.8	20.2	20.3	143.1	-21.4
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.9	0.6	0.8	3.8	3.8
U-235	17.7	8.2	4.3	4.1	34.3	3.2	1.7	1.1	1.5	7.6	-26.7
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.1	0.6	0.5	4.7	4.7
U-238	5877.0	2714.0	1440.0	1379.0	11410.0	4650.0	2189.5	1199.0	1204.0	9242.5	-2167.5
Am-241	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	22.0	12.6	9.0	11.2	54.7	19.5
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.1	0.7	0.7	4.5	4.5
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	6.9	3.8	3.1	28.7	28.7
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	1.4	0.8	0.6	5.9	5.9
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	0.3	0.2	2.0	2.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	3.1	1.4	0.9	12.5	12.5
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.4	0.1	0.1	1.5	1.5
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.3	5.4	2.7	2.2	22.5	22.5
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	160.3	69.1	35.2	24.0	288.6	288.6
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	823.5	359.3	178.3	127.1	1488.2	1488.2
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	242.2	107.0	56.1	39.4	444.7	444.7
O	935.6	435.7	236.1	226.1	1833.5	935.6	435.7	236.1	226.1	1833.5	0.0
Na	418.8	194.9	105.6	101.1	820.4	418.8	194.9	105.6	101.1	820.4	0.0
Fe	2967.0	1381.2	748.2	716.2	5812.6	2967.0	1381.2	748.2	716.2	5812.6	0.0
Cr	330.8	154.0	83.4	79.8	648.0	330.8	154.0	83.4	79.8	648.0	0.0
Ni	5.2	2.4	1.3	1.3	10.2	5.2	2.4	1.3	1.3	10.2	0.0
Mo	6.5	3.0	1.6	1.6	12.8	6.5	3.0	1.6	1.6	12.8	0.0
Mn	7.8	3.6	2.0	1.9	15.3	7.8	3.6	2.0	1.9	15.3	0.0
W	67.7	31.5	17.1	16.3	132.6	67.7	31.5	17.1	16.3	132.6	0.0
Pu Total	1126.7	547.4	327.3	313.3	2314.6	1092.5	517.7	287.9	284.2	2182.3	-132.3
Pu-fiss Total	703.5	341.8	204.4	195.6	1445.2	656.4	308.5	168.9	167.0	1300.9	-144.4
U Total	5894.7	2722.2	1444.3	1383.1	11444.3	4657.2	2193.2	1201.4	1206.8	9258.6	-2185.7
MA Total	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	51.3	26.0	16.0	16.9	110.2	74.9
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1238.3	540.9	272.3	192.6	2244.0	2244.0
H.M Total	7038.5	3277.9	1776.6	1701.2	13794.2	7039.3	3277.8	1777.6	1700.4	13795.1	0.9
Fuel Total	7974.1	3713.6	2012.7	1927.3	15627.7	7974.9	3713.5	2013.7	1926.5	15628.6	0.9
Coolant Total	418.8	194.9	105.6	101.1	820.4	418.8	194.9	105.6	101.1	820.4	0.0
Steel Total	3385.1	1575.8	853.6	817.1	6631.6	3385.1	1575.8	853.6	817.1	6631.6	0.0
Total	11778.0	5484.3	2971.9	2845.5	23079.8	11778.7	5484.3	2972.9	2844.7	23080.7	0.9

表3.3.2-5 平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支（ブランケット部）

単位：kg

	装荷重量					取出重量					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	
			第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)				第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)		
Pu-238	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
Pu-239	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	77.4	33.8	16.0	12.9	140.1	140.1
Pu-240	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.9	5.1	1.9	1.3	21.2	21.2
Pu-241	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.4	0.1	0.1	1.7	1.7
Pu-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
U-235	3.6	1.7	0.9	0.9	7.0	1.3	0.7	0.4	0.5	2.8	-4.1
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2	0.1	0.1	0.9	0.9
U-238	1181.8	550.1	298.0	285.2	2315.1	1047.4	494.4	273.7	267.1	2082.6	-232.5
Am-241	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.5	0.5
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	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	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	0.8	0.4	0.3	3.2	3.2
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	3.8	1.6	1.0	16.0	16.0
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.6	11.8	4.3	2.7	49.4	49.4
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	0.2	0.1	0.0	1.1	1.1
O	160.2	74.5	40.4	38.6	313.7	160.2	74.5	40.4	38.6	313.7	0.0
Na	75.0	34.9	18.9	18.1	147.0	75.0	34.9	18.9	18.1	147.0	0.0
Fe	531.6	247.5	134.1	128.4	1041.5	531.6	247.5	134.1	128.4	1041.5	0.0
Cr	59.3	27.6	14.9	14.3	116.1	59.3	27.6	14.9	14.3	116.1	0.0
Ni	0.9	0.4	0.2	0.2	1.8	0.9	0.4	0.2	0.2	1.8	0.0
Mo	1.2	0.5	0.3	0.3	2.3	1.2	0.5	0.3	0.3	2.3	0.0
Mn	1.4	0.7	0.4	0.3	2.8	1.4	0.7	0.4	0.3	2.8	0.0
W	12.1	5.6	3.1	2.9	23.8	12.1	5.6	3.1	2.9	23.8	0.0
Pu Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	91.6	39.3	18.0	14.3	163.2	163.2
Pu-fiss Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	78.5	34.2	16.1	13.0	141.8	141.8
U Total	1185.3	551.8	298.9	286.1	2322.0	1049.2	495.2	274.2	267.7	2086.3	-235.7
MA Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2	0.1	0.0	0.7	0.7
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	42.6	16.7	6.4	4.0	69.7	69.7
H.M Total	1185.3	551.8	298.9	286.1	2322.0	1183.8	551.4	298.7	286.0	2319.9	-2.1
Fuel Total	1345.5	626.3	339.2	324.7	2635.7	1344.0	625.9	339.1	324.7	2633.6	-2.1
Coolant Total	75.0	34.9	18.9	18.1	147.0	75.0	34.9	18.9	18.1	147.0	0.0
Steel Total	606.5	282.3	152.9	146.4	1188.2	606.5	282.3	152.9	146.4	1188.2	0.0
Total	2027.0	943.6	511.1	489.3	3970.9	2025.5	943.2	511.0	489.2	3968.8	-2.1

表3.3.2-6 平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支（炉心部+ブランケット部）

単位：kg

	装荷重量					取出重量					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心		合計	
			第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)				第1層 (8バッチ)	第2層 (9バッチ)		
Pu-238	34.3	16.7	10.0	9.5	70.5	19.8	10.3	6.5	7.1	43.7	-26.8
Pu-239	594.8	289.0	172.8	165.4	1222.0	676.5	315.9	170.8	166.5	1329.7	107.7
Pu-240	308.8	150.0	89.7	85.9	634.4	360.5	170.2	94.1	91.0	715.9	81.5
Pu-241	108.7	52.8	31.6	30.2	223.2	58.4	26.8	14.3	13.5	112.9	-110.3
Pu-242	80.1	38.9	23.3	22.3	164.5	68.9	33.8	20.2	20.3	143.2	-21.3
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.9	0.6	0.8	3.8	3.8
U-235	21.2	9.8	5.2	5.0	41.3	4.5	2.4	1.6	2.0	10.4	-30.9
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.4	0.7	0.6	5.6	5.6
U-238	7058.8	3264.1	1738.0	1664.2	13725.1	5697.4	2683.9	1472.7	1471.1	11325.1	-2400.0
Am-241	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	22.1	12.7	9.0	11.2	54.9	19.7
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.1	0.7	0.7	4.5	4.5
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	6.9	3.8	3.1	28.7	28.7
Np-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.5	0.8	0.6	6.4	6.4
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	0.3	0.2	2.0	2.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	3.1	1.4	0.9	12.5	12.5
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.4	0.1	0.1	1.5	1.5
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	6.2	3.0	2.4	25.7	25.7
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	169.8	73.0	36.8	25.0	304.5	304.5
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	854.1	371.1	182.6	129.8	1537.6	1537.6
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	242.9	107.3	56.2	39.4	445.8	445.8
O	1095.8	510.2	276.5	264.7	2147.2	1095.8	510.2	276.5	264.7	2147.2	0.0
Na	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Fe	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	0.0
Cr	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	0.0
Ni	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	0.0
Mo	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	0.0
Mn	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	0.0
W	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	0.0
Pu Total	1126.7	547.4	327.3	313.3	2314.6	1184.1	557.0	306.0	298.4	2345.5	30.9
Pu-fiss Total	703.5	341.8	204.4	195.6	1445.2	734.9	342.7	185.1	180.0	1442.6	-2.6
U Total	7080.0	3273.9	1743.2	1669.2	13766.4	5706.4	2688.5	1475.6	1474.5	11344.9	-2421.4
MA Total	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	51.7	26.2	16.1	16.9	110.9	75.6
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1280.9	557.5	278.6	196.6	2313.7	2313.7
H.M Total	8223.8	3829.6	2075.5	1987.3	16116.2	8223.1	3829.2	2076.3	1986.5	16115.0	-1.2
Fuel Total	9319.6	4339.9	2351.9	2252.0	18263.4	9318.8	4339.5	2352.7	2251.2	18262.2	-1.2
Coolant Total	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Steel Total	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	0.0
Total	13805.0	6427.9	3483.0	3334.8	27050.7	13804.2	6427.5	3483.8	3334.0	27049.5	-1.2

表3.3.2-7 平衡サイクルにおけるNaボイド反応度

Naボイド反応度 ^{*1}	ボイド領域	初期	末期
単位：% k/kk'	炉心部	2.03	2.15
	炉心 + 上部軸ブラ部	2.02 (-0.00)	2.14 (-0.00)
	炉心 + 上部軸ブラ + 上部ガスプレナム	1.87 (-0.15)	2.00 (-0.14)
	炉心 + 上部軸ブラ + 上部ガスプレナム +上部Naプレナム	1.74 (-0.13)	1.88 (-0.13)
単位：\$ ^{*2}	炉心部	5.80	6.28
	炉心 + 上部軸ブラ部	5.79 (-0.01)	6.26 (-0.01)
	炉心 + 上部軸ブラ + 上部ガスプレナム	5.37 (-0.43)	5.86 (-0.41)
	炉心 + 上部軸ブラ + 上部ガスプレナム +上部Naプレナム	4.98 (-0.38)	5.49 (-0.37)

*1 ボイド領域は全てラッパ管内としている

炉心上部領域での負の反応度幅に対して輸送補正効果として0.89を考慮

*2 平衡初期 (1\$ = 0.349% k/kk')、平衡末期 (1\$ = 0.342% k/kk')

表3.3.2-8 平衡サイクルにおける動特性パラメータ *1

パラメータ		初期	末期
遅発中性子割合		3.490E-03	3.421E-03
群 毎 内 訳	1	7.167E-05	7.103E-05
	2	7.253E-04	7.142E-04
	3	6.348E-04	6.239E-04
	4	1.284E-03	1.256E-03
	5	5.988E-04	5.839E-04
	6	3.490E-03	1.727E-04
即発中性子寿命(μs)		0.397	0.396

*1 PERKYコードによる18群計算の結果である

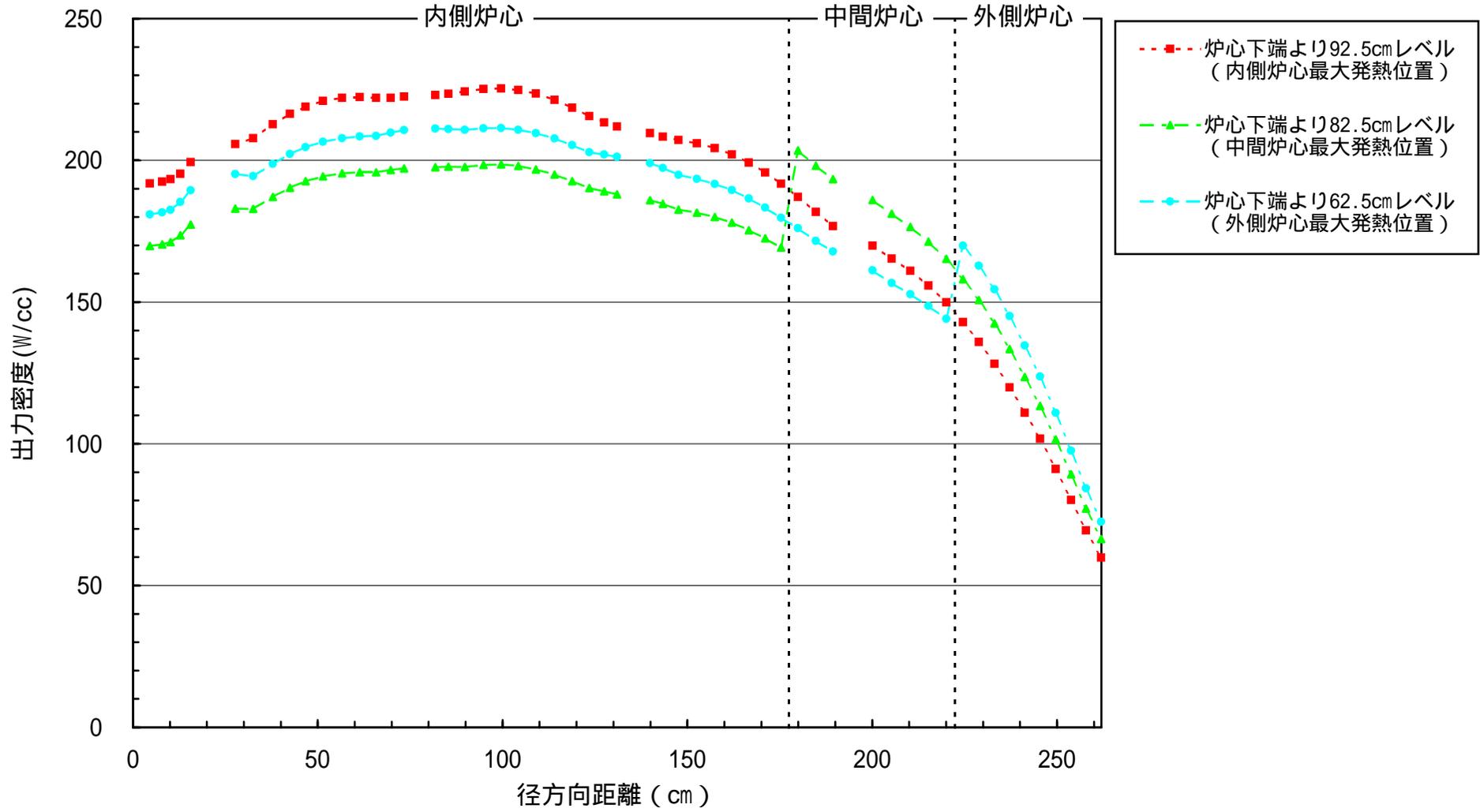


図3.3.2-1 平衡サイクル初期における径方向出力分布

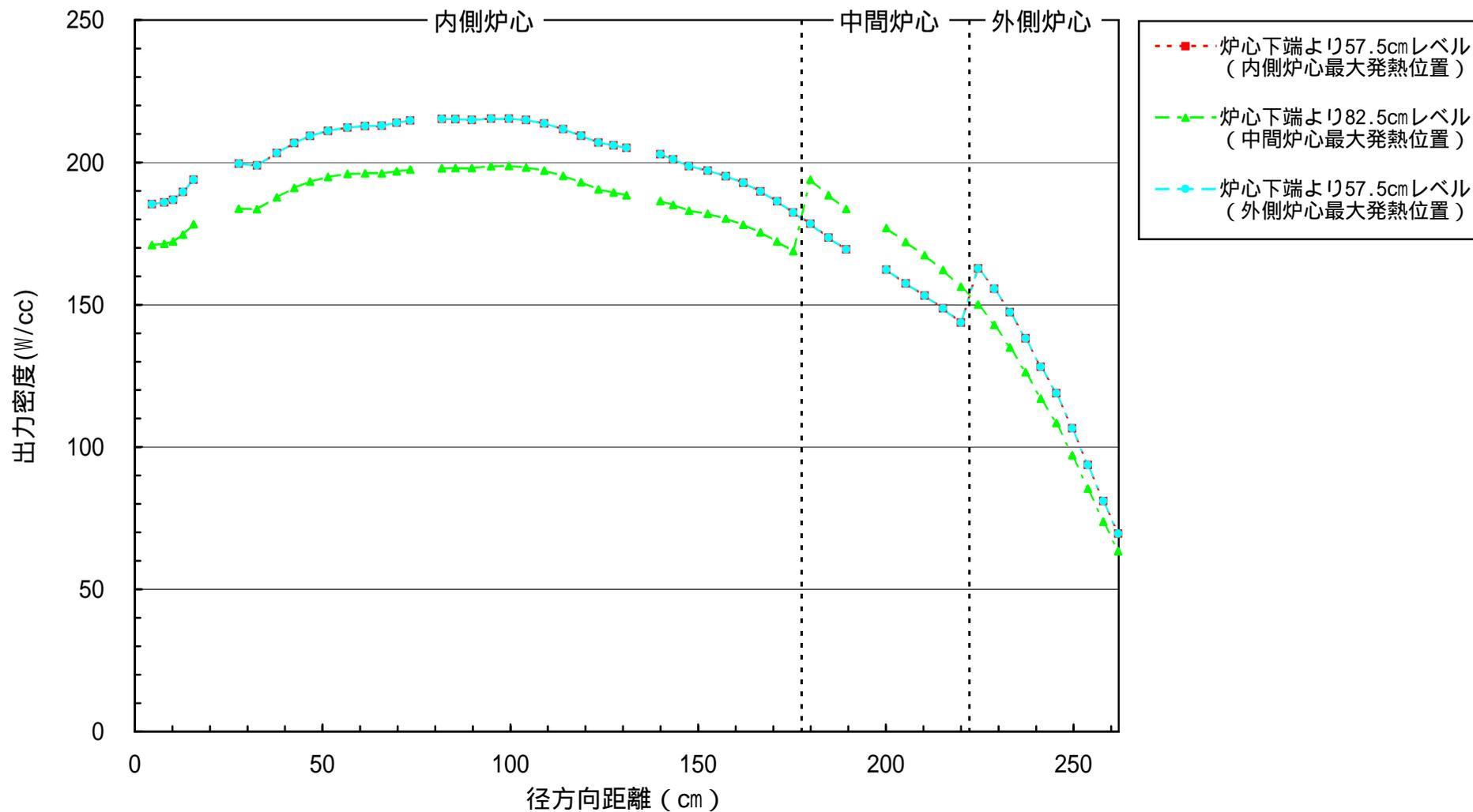


図3.3.2-2 平衡サイクル末期における径方向出力分布

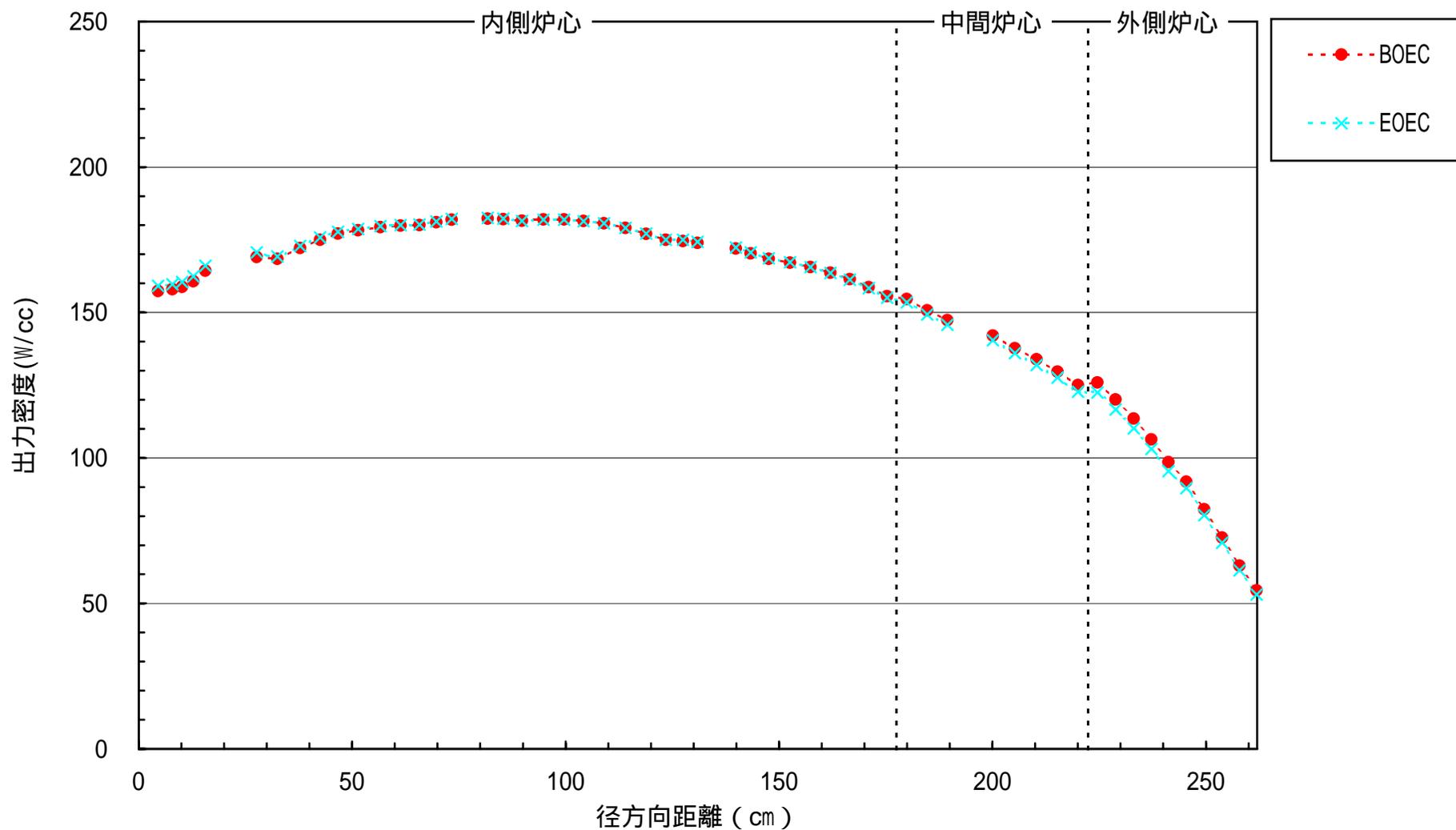
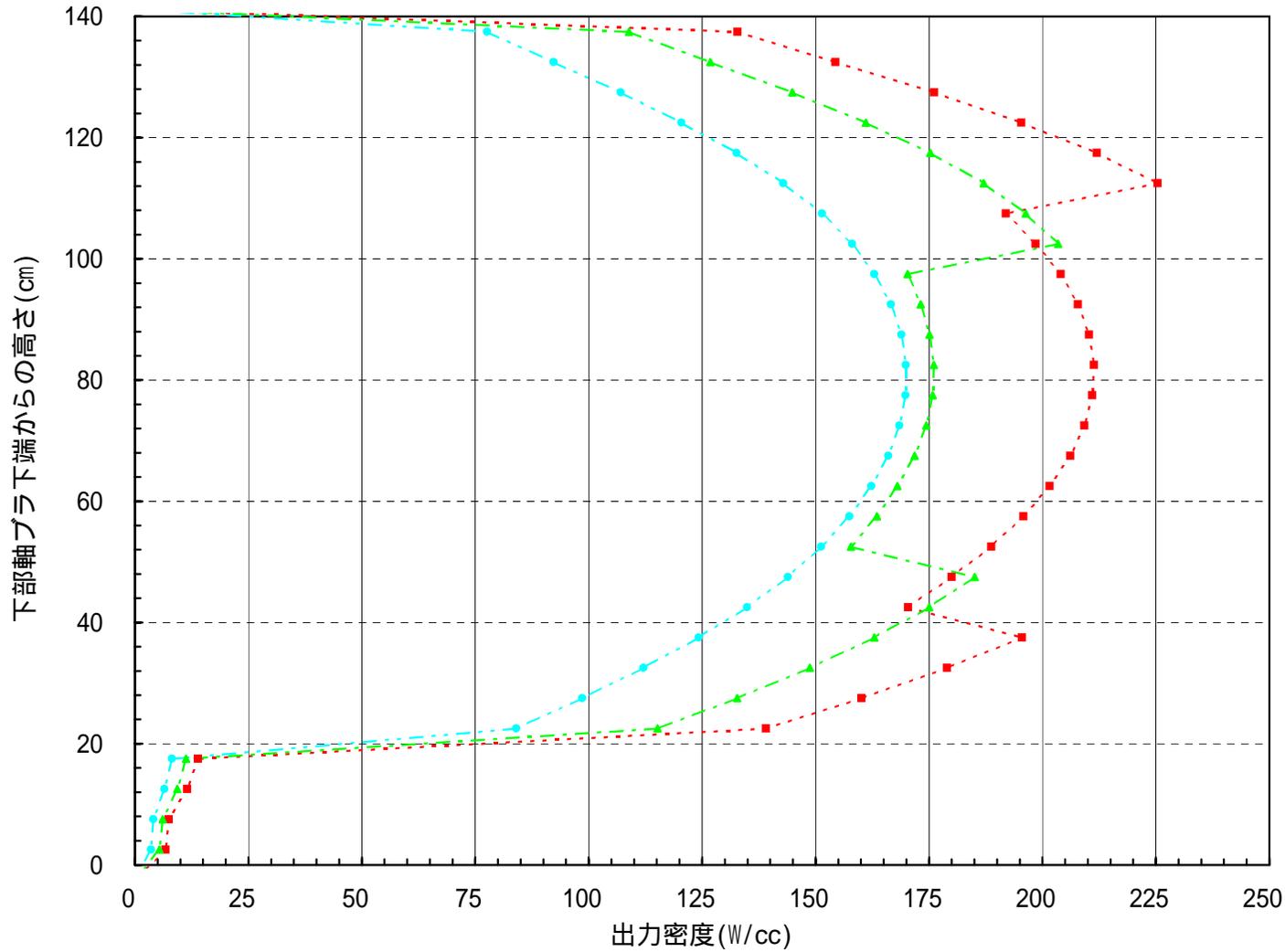


図3.3.2-3 平衡サイクルにおける径方向出力分布変化 (炉心部軸方向平均)



---■--- 内側炉心最大値発生位置 (99.6cm) *
---▲--- 中間炉心最大値発生位置 (180.0cm) *
---●--- 外側炉心最大値発生位置 (224.6cm) *

* : 炉中心からの径方向距離

図3.3.2-4 平衡サイクル初期における軸方向出力分布

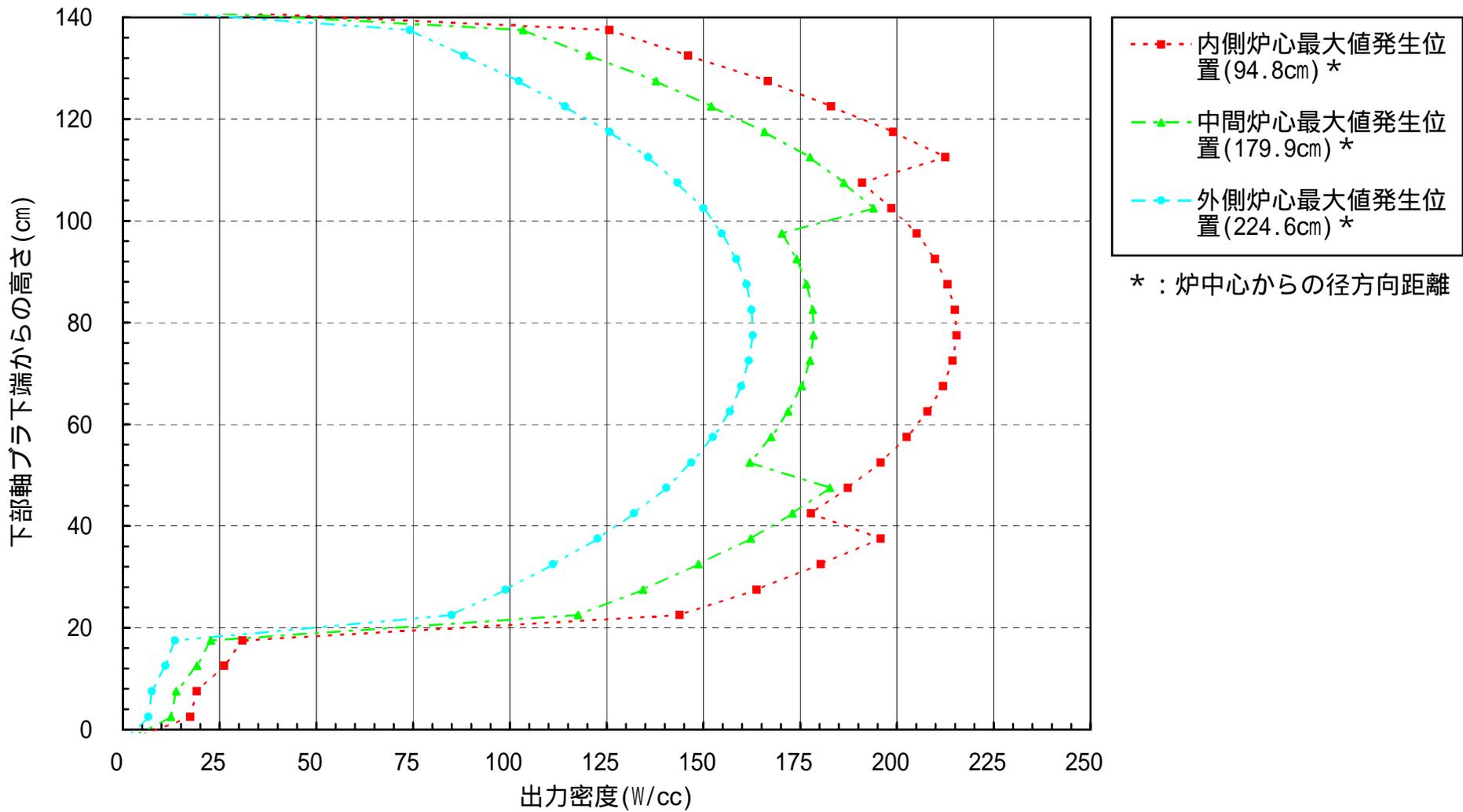


図3.3.2-5 平衡サイクル末期における軸方向出力分布

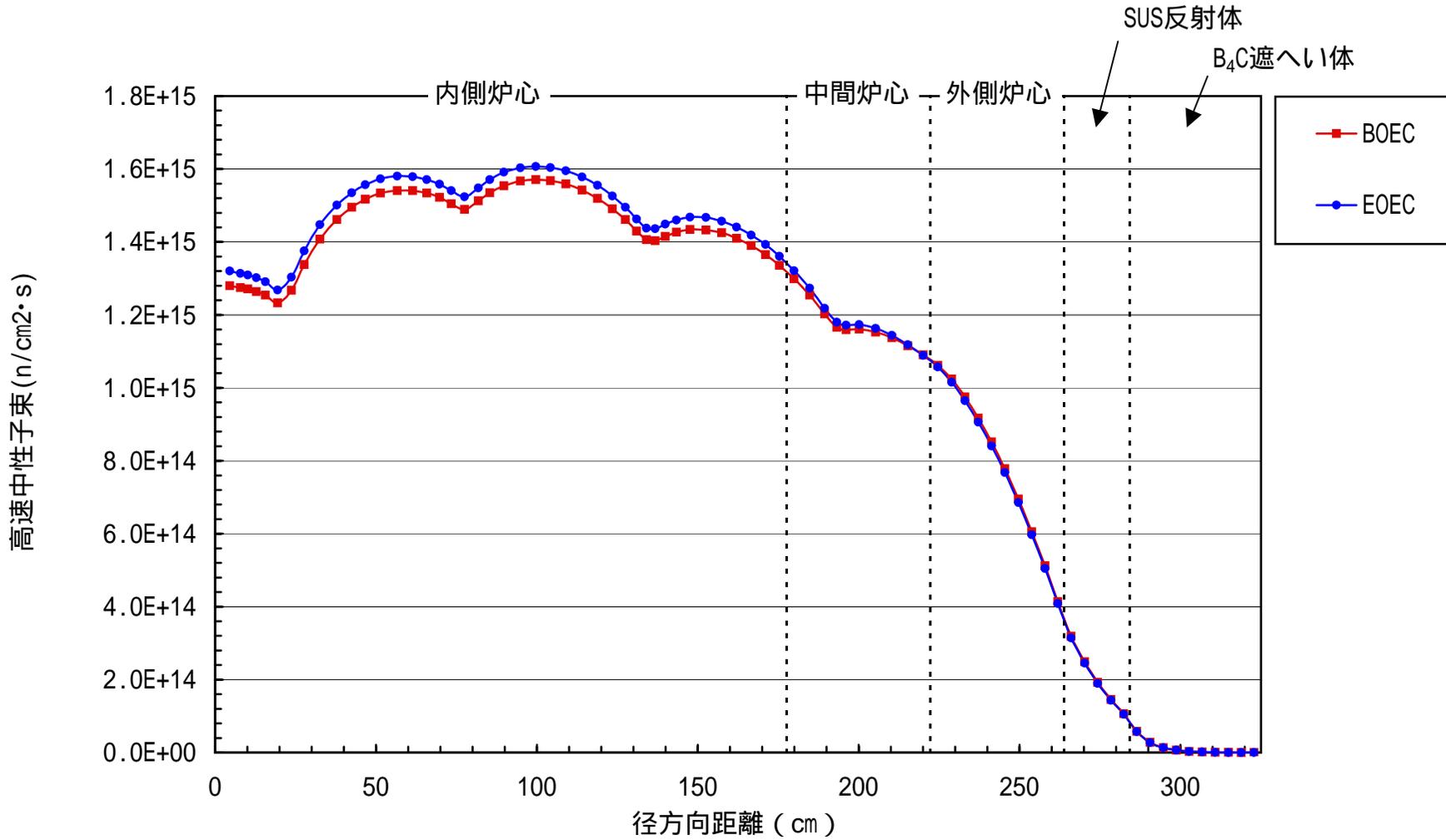


図3.3.2-6 平衡サイクルにおける径方向高速中性子束分布 (炉心部軸方向中心面)

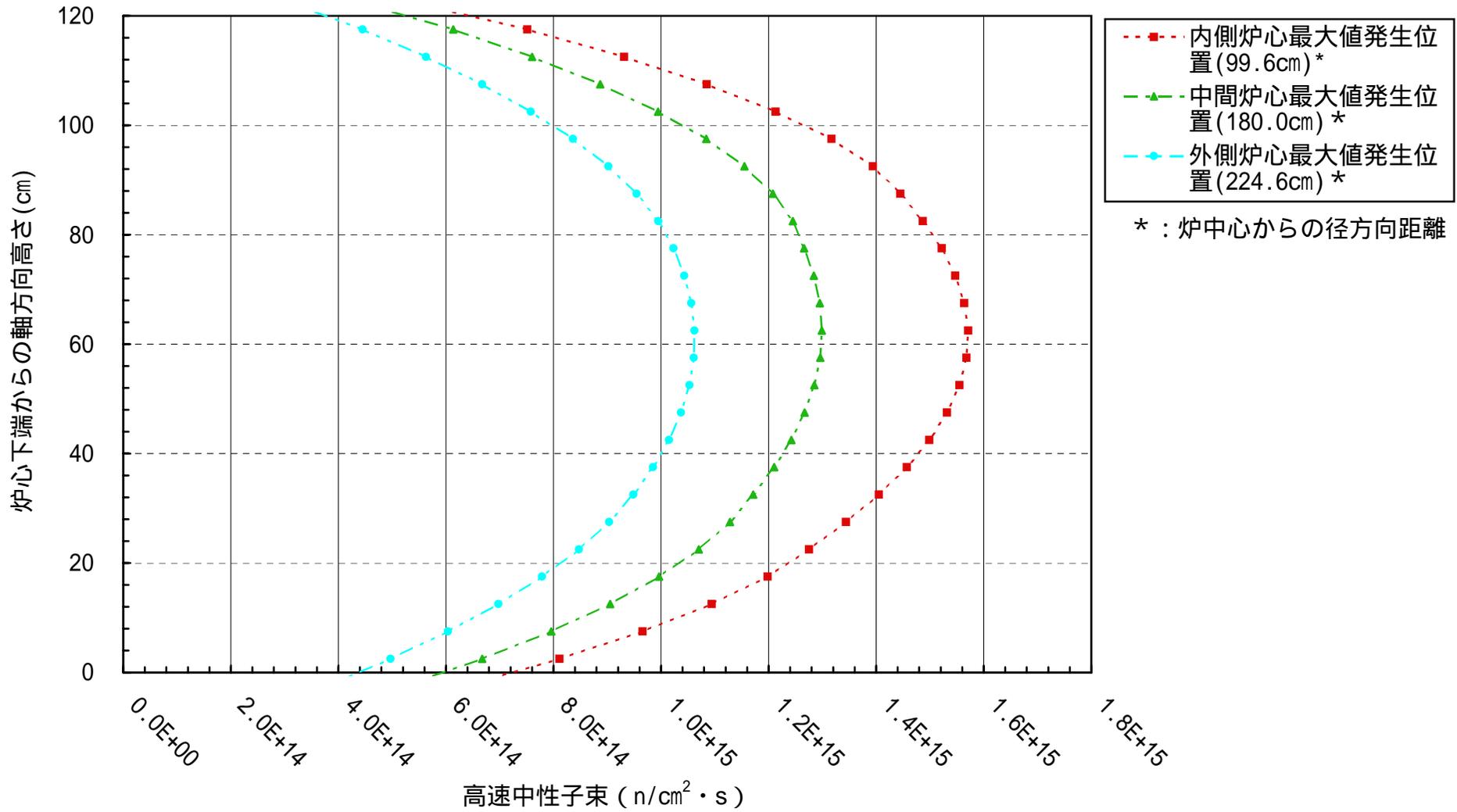


図3.3.2-7 平衡サイクル初期における軸方向高速中性子束分布

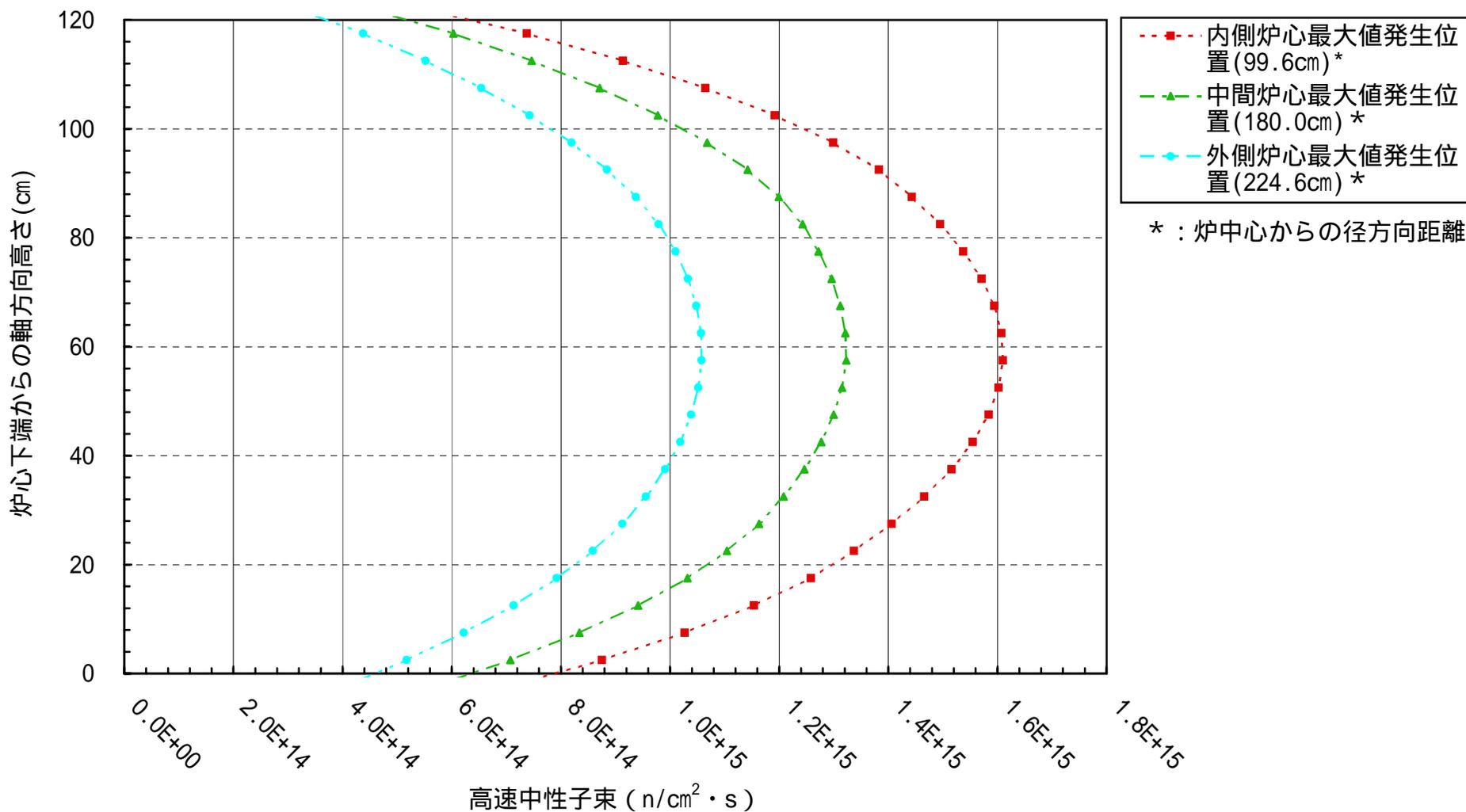


図3.3.2-8 平衡サイクル末期における軸方向高速中性子束分布

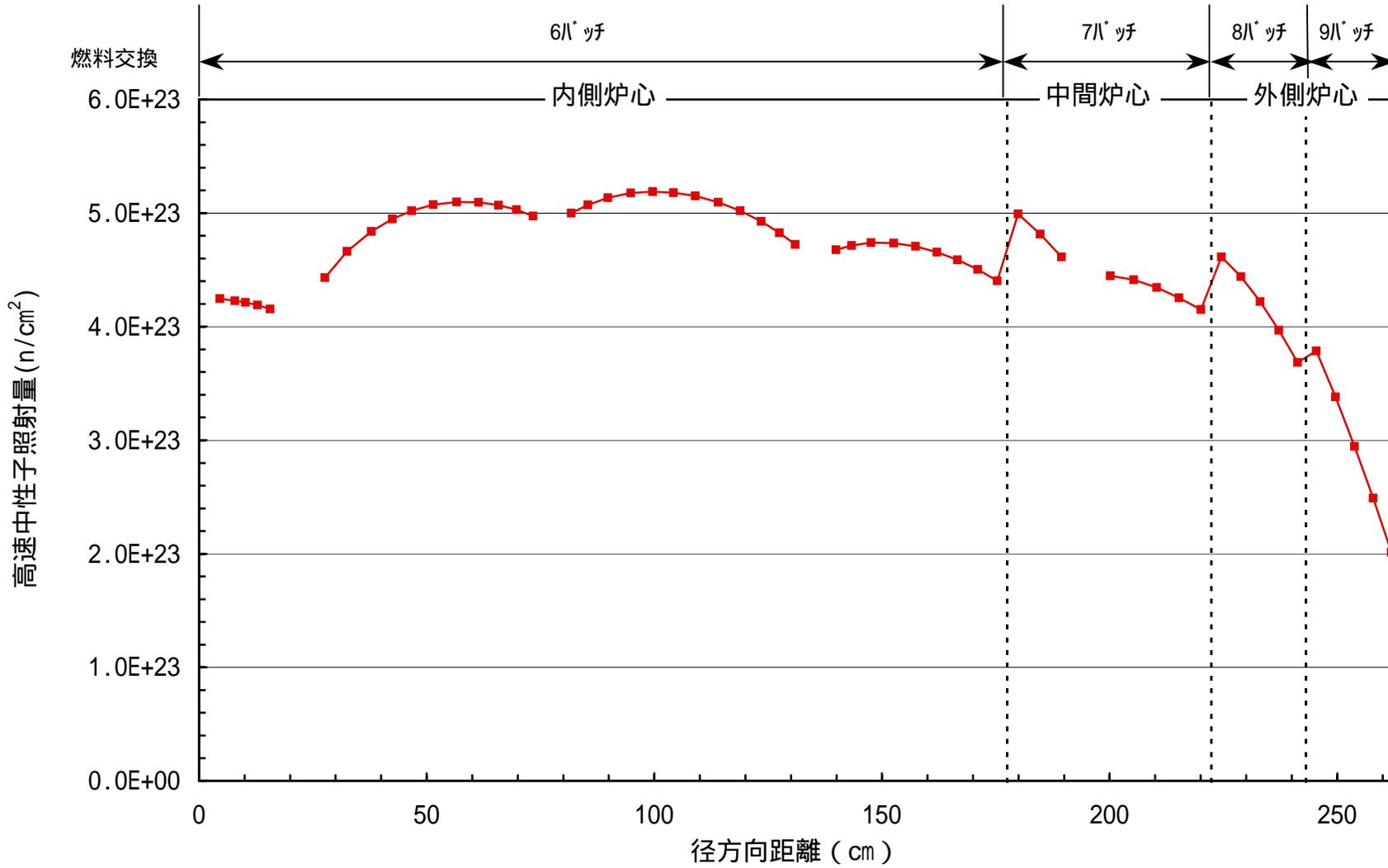


図3.3.2-9 平衡サイクルにおける径方向高速中性子照射量分布 (炉心部軸方向中心面)

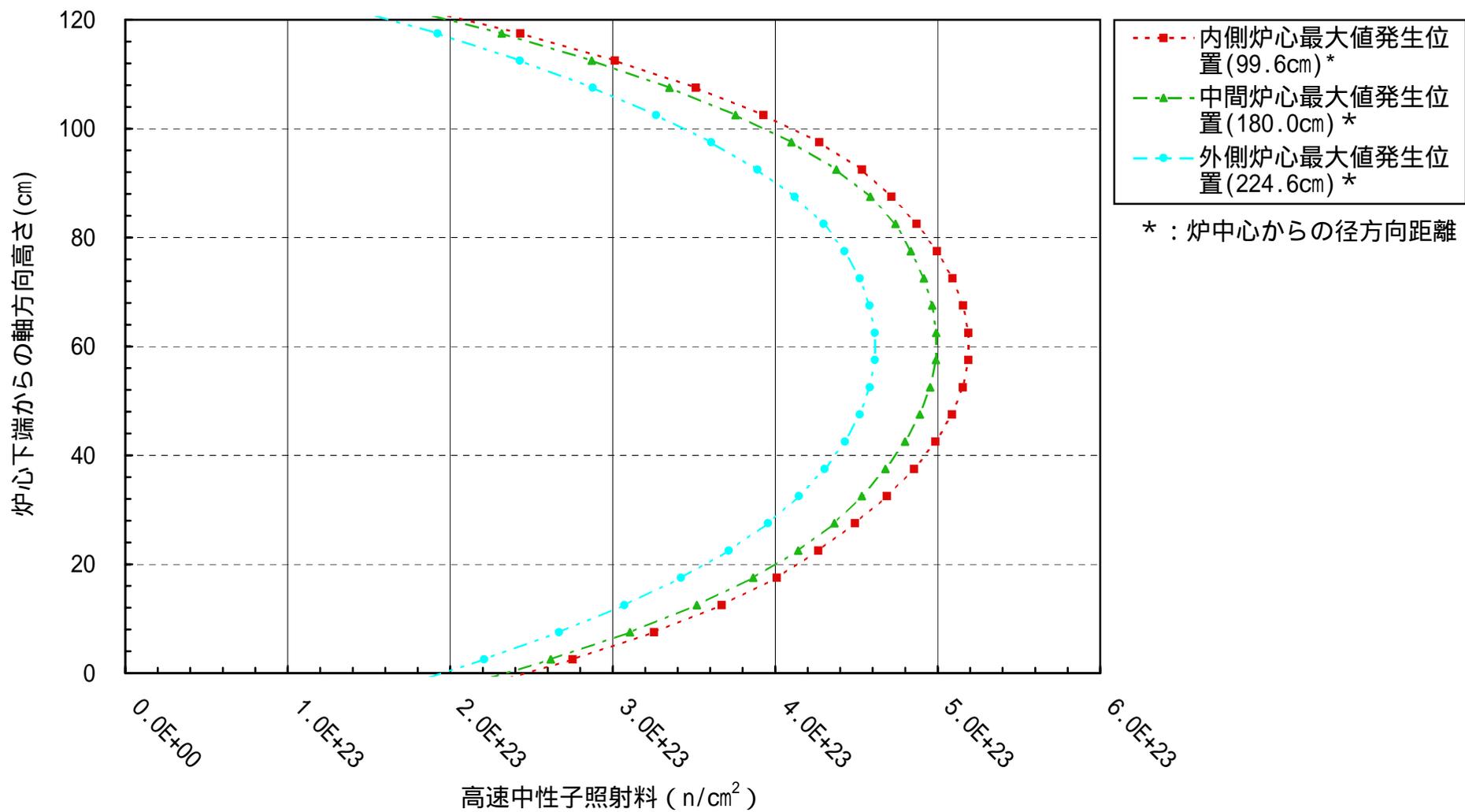


図3.3.2-10 平衡サイクルにおける軸方向高速中性子照射量分布

3.3.3 出力・燃焼度分布評価

MOSES コードを用いて 3 次元拡散計算を行い、内部増殖炉心の出力分布及び燃焼度分布について評価した。

ここで、制御棒動作及び役割分担について、大型炉では核的デカップリングが大きく、局所出力歪みが大きくなる傾向を有している。このため、従来設計例のような主炉停止系及び後備炉停止系の区分を行わず、同一仕様の制御棒群を電源系、制御信号系等を独立させた 2 系統に分離することとし、長期的反応度制御については 2 系統で同時に行うこととした。

このため、制御棒挿入パターンとして、平衡サイクル初期において総ての制御棒が 40cm 挿入された位置とし、平衡サイクル末期においてパーク位置まで引き抜かれることとした。ここで、平衡サイクル初期での制御棒挿入位置は、燃焼欠損反応度に若干の余裕をさせた反応度制御範囲を考慮したものであり、制御棒パーク位置は制御棒吸収体部下端が炉心上端と一致するように設定した。

(1) 集合体出力分布

内部増殖炉心の炉内集合体出力分布を平衡サイクル初期及び末期について図 3.3.3-1 ~ 3 に示す。ここで、図 3.3.3-3 においては、平衡サイクル初期及び末期での集合体出力の変化を炉中心からの距離 (R 座標) に対する分布として示している。

3 次元拡散計算は 2 次元燃焼計算結果に基づく燃料交換バッチ間の平均組成を用いて平衡サイクル炉心を模擬しており、この計算結果単独では新旧燃料混在による組成変化の効果が現れない。そこで、本検討においては別途、2 次元燃焼計算結果を基に、燃料組成変化が出力に与える影響として得られる燃焼ミスマッチ係数を求め、これを 3 次元計算による集合体出力に対して乗算することで寿命中最大の集合体出力を評価した。ここで、燃焼ミスマッチ係数は燃料組成を計算する単位 (径方向には集合体配列層毎、軸方向には 10 ~ 20cm 刻みで 9 領域 (炉心部)) 毎に設定されるため、軸方向に各領域出力を重みとして平均操作して層毎に 1 集合体当たりの燃焼ミスマッチ係数を求め、それを 3 次元解析結果の当該層に対して考慮した。

図 3.3.3-1 ~ 3 に示す通り、本炉心は制御棒が挿入される平衡サイクル初期において径方向の出力分布がかなり平坦化され、制御棒をパーク位置まで引き抜いた平衡サイクル末期において、炉心中央部の出力が若干増加する傾向が認められる。また、切り欠き UIS に対応して見通し部を設けた制御棒配置を採用したことから、制御棒挿入時では制御棒が配置されない見通し部での出力が増加する特徴が認められる。

(2) 流量領域区分設定

内部増殖炉心の 1/3 炉心での最大集合体出力分布を平衡サイクル初期及び末期について図 3.3.3-4、図 3.3.3-5 に示し、これら 2 つの包絡分布を図 3.3.3-6 に示す。なお、これらの分布は上記同様、2次元燃焼計算結果に基づく燃焼ミスマッチを考慮したものである。

冷却材流量領域区分数は燃料集合体エントランスノズル部のオリフィス設計との関連で設定することとなるが、過去の設計例を参考に領域区分数を内側炉心及び中間炉心に対してそれぞれ 3 区分、集合体出力のばらつきが大きくなる外側炉心に対して 4 区分とし、合計 10 区分とした。

この領域区分数において図 3.3.3-6 に示した包絡出力分布に対して流量領域毎の包絡出力（最大集合体出力×集合体体数）の合計を冷却上の炉出力として、これができるべく小さくなるように流量領域区分を暫定的に設置した。その結果を図 3.3.3-7 に示す。各領域の包絡出力及び冷却上の炉出力を表 3.3.3-1 に示す。なお、同表には参考として流量領域を設定せずに層毎の包絡出力で求めたものを併せて示す。

本炉心は冷却上の炉出力が 3899MWth となり実際の炉出力 3500MWth に対して、約 1.11 倍の結果となった。過去の設計例では同比率が約 1.2 倍となっており、本炉心では内部転換比の改善等により出力分布が安定化したことから、より少ない冷却材流量で炉心を冷却できることとなる。この良好な冷却特性は、原子炉出口温度の高温化を図る際に有利となると共に 1 次冷却系ポンプの容量の低減、所内利用電力の抑制に寄与するものと考えられる。

(3) 最大集合体出力

炉心領域毎の最大集合体出力は、内側炉心について平衡サイクル末期における 9.09MW であり、中間炉心及び外側炉心について平衡サイクル初期における 7.81MW 及び 7.47MW である。

(4) 集合体出力履歴

流量領域毎に寿命中の最大集合体出力が発生した燃料集合体に着目した出力履歴を表 3.3.3-2、図 3.3.3-8 に示す。また、履歴作成の際の 2次元燃焼計算結果に基づく当該集合体に対する燃焼ミスマッチ係数を表 3.3.3-2 に併せて示している。

運転サイクルの進展に伴う燃焼ミスマッチ係数の低下幅が少なく、集合体出力の低下も抑えられている。これは実効燃料体積率を高く設定し、Pu 富化度を抑えて内部転換比の向上を図った内部増殖炉心概念の特徴が反映されているものと考えられる。ここで、燃焼が進んだ段階での出力低下率は Pu 富化度を高く設定している外側炉心で相対的に大きくなっている。

(5) 最大線出力

内部増殖炉心の流量領域毎の最大線出力を表 3.3.3-3 に示す。なお、本検討においては 3 次元拡散計算で求めた各位置での線出力に対して、2 次元燃焼計算結果において当該位置を含む燃焼ゾーン毎の燃焼ミスマッチ係数を考慮している。

内側炉心、中間炉心、外側炉心のそれぞれの最大線出力は、408W/cm、418W/cm、389W/cm となっている。全炉心での最大線出力 418W/cm は、制御棒が 40cm 挿入された平衡サイクル初期における中間炉心下部側の高富化度領域上端で発生している。なお、後述するように中間炉心の軸方向 Pu 富化度区分を微調整することで最大線出力を若干低下させる余地を残している。

この最大線出力レベルの妥当性については、本燃料要素仕様での溶融限界線出力及び NIS 等の核計装の設置想定を踏まえた過出力係数を設定した上で判断することとなるが、過去の設計例との比較から成立性が十分に期待できるものである。

(6) 軸方向線出力分布

流量領域毎に最大線出力を経験した集合体の軸方向線出力分布を図 3.3.3-9 ~ 18 に示す。なお、これらの分布は上記と同様に各位置での線出力に対して、2 次元燃焼計算結果において当該位置を含む燃焼ゾーンの燃焼ミスマッチ係数を考慮している。

内側炉心（流量領域 1～3）では、制御棒を 40cm 挿入している平衡サイクル初期において下部側高富化度領域の上端で最大線出力が発生し、制御棒が引き抜かれている平衡サイクル末期では低富化領域である炉心中央部で最大線出力が発生する。冷却材温度は上方に行くにつれて上昇し、同一線出力でも燃料温度が増加すること、燃焼に伴って溶融限界出力が低下すると考えられることから、前者の最大線出力（炉心下部側、新燃料、；408W/cm）が後者の最大線出力（炉心中央部、1 サイクル燃焼後；395w/cm）を若干上回っていることは、軸方向 Pu 富化度配分がほぼ妥当であると考えられる。

中間炉心（流量領域 4～6）については、平衡サイクル初期において下部側高富化度領域の上端で発生する最大線出力が、他の領域で発生する最大線出力及び平衡サイクル末期での最大線出力に比べて高く、下部側の高富化領域の範囲を若干下方に調整することで最大線出力を低下できる余地が残されている。

外側炉心（流量領域 7～10）については軸方向 Pu 富化度配分を採用していないため、従来設計同様の両端を切り落としたコサイン分布に類似した分布を示している。制御棒が炉心中央部により多く配置されているため、制御棒が挿入された平衡サイクル初期において、外側炉心の出力分担が増加し、最大線出力が発生している。外側炉心の最大線出力は 390W/cm 程度と内側炉心、外側炉心のそれに比べて若干低いが、制御棒誤引き抜き時の出力歪が炉心周辺部でより大きくなることを考慮すると妥当な範囲と考えられる。

(7) 径方向燃焼度分布

内部増殖炉心の平衡サイクルに対する集合体平均取出燃焼度の分布を図 3.3.3-19 に示す。この図には集合体全体（炉心部+軸方向ブランケット）で平均した取出燃焼度に加えて、炉心部のみ、軸方向ブランケットのみで平均した取出燃焼度を合わせて示している。この図において、炉心中心を基点として、各集合体の中心位置までの距離に基づいて座標を設定している。

出力密度が低くなる炉心外周部に向かって燃料交換バッチ数が増える多段階燃料交換バッチ方式（6～9バッチ）*を採用しているため、径方向の燃焼度分布が平坦化している。また、炉心中央部ではステンレス鋼希釈集合体の影響により緩やかな落ち込みが認められる。

また、軸方向ブランケットの長さを 20cm と抑制し、また、炉内滞在期間を長くしていることから、軸方向ブランケットの取出燃焼度は 20～50GWd/t 程度と比較的高い値を示している。

*多段階燃料交換バッチ 内側炉心；6バッチ
 中間炉心；7バッチ
 外側炉心（第1層/第2層）；8/9バッチ

(8) 集合体平均、燃料要素平均、ペレット最大燃焼度

内部増殖炉心の流量領域毎の最大発熱集合体に対する集合体平均、燃料要素平均、ペレット最大燃焼度を表 3.3.3-4 に示す。なお、これらの燃焼度はいずれも軸方向ブランケットを除外し、炉心部にのみ着目したものである。燃料要素平均燃焼度は制御棒挿入パターンを考慮した3次元拡散計算により求められる集合体当たり6点（三角メッシュの重心位置）の中性子束を後処理して得られる燃料要素単位での出力を基に評価したものである。また、ペレット最大燃焼度は、着目する集合体内における軸方向出力分布が一様であると仮定して、集合体断面平均出力に対する軸方向分布を用いて、最大の燃焼度を示す燃料要素に対して算出したものである。

炉心部にのみ着目した集合体平均燃焼度は内側炉心で約 171GWd/t（第1流量領域）、中間炉心で約 173GWd/t（第4流量領域）、外側炉心で約 173GWd/t（第7流量領域）であり、各炉心領域においてほぼ等しく、平坦化されている。

また、集合体平均燃焼度に対する燃料要素平均最大燃焼度の比は、内側炉心で 1.03、中間炉心で 1.06、外側炉心の第1層目で 1.10、第2層目で 1.29 である。この比は寿命中の平均的な集合体内径方向出力分布に対応するものであり、大型炉心の特徴として炉内中央部のかなり広い範囲（内側炉心、中間炉心）において出力分布が平坦化し、これが集合体内出力分布にも反映されたものと考えられる。また、炉心外周部では径方向への中性子漏洩に伴って集合体内出力分布が傾斜しており、このため、燃料要素平均最大燃焼度は外側炉心（第7流量領域）で発生し、約 187GWd/t となっている。

さらに、寿命中の平均的な軸方向出力ピーキングに関連する燃料要素平均燃焼度に対するペレット最大燃焼度の比は、軸方向富化度分布を適用した内側炉心及び中間炉心では 1.22 程度に留まっているが、軸方向に均質な Pu 富化度を用いている外側炉心では 1.26 程度の値となり、より大きいピーキングを示している。このため、ペレット最大燃焼度は外側炉心で発生し、約 234GWd/t となっている。

なお、参考として、内側炉心の第 1 流量領域、中間炉心の第 4 流量領域、外側炉心の第 7 流量領域における軸方向燃焼度分布を図 3.3.3-20 に示す。内側炉心、中間炉心では高富化度領域で燃焼がより進み、軸方向燃焼度分布が平坦化されたことが示される。

表3.3.3-1 平衡サイクルにおける包絡領域出力及び冷却上の炉出力

種類	流量領域 番号	集合体 体数 (体)	最大集合体 出力 ^{*1} (MWth)	最小集合体 出力 (MWth)	集合体 出力差 (MW)	包絡領域 出力 (MWth)
内側領域	1	78	9.09	8.70	0.39	709.0
	2	66	8.67	8.33	0.34	572.2
	3	88	8.23	7.66	0.57	724.2
中間領域	4	42	7.81	7.44	0.37	328.0
	5	42	7.37	7.14	0.23	309.5
	6	42	7.04	6.44	0.60	295.7
外側領域	7	24	7.47	7.35	0.12	179.3
	8	54	6.88	6.24	0.64	371.5
	9	36	5.55	4.66	0.89	199.8
	10	48	4.37	3.68	0.69	209.76
計		520	-	-	-	3899.1
炉出力比(冷却上炉出力 / 実際の炉出力 ^{*2})						1.114

*1 平衡サイクル初期及び末期包絡値に対する流量領域毎の最大値

*2 実際の炉出力:3500MWth

参考表 層毎の出力で評価した際の冷却上炉出力

領域		集合体 体数 (体)	最大集合体 出力 ^{*1} (MWth)	最小集合体 出力 (MWth)	集合体 出力差 (MW)	包絡領域 出力 (MWth)
内側炉心	第1層	1	7.79	7.79	0.00	7.8
	第2層	3	8.09	8.09	0.00	24.3
	第3層	12	8.57	8.33	0.24	102.8
	第4層	18	8.89	8.62	0.27	160.0
	第5層	18	9.09	8.85	0.24	163.6
	第6層	30	9.01	8.77	0.24	270.3
	第7層	36	8.79	8.66	0.13	316.4
	第8層	30	8.57	8.48	0.09	257.1
	第9層	48	8.23	8.08	0.15	395.0
	第10層	36	7.82	7.66	0.16	281.5
中間炉心	第1層	42	7.81	7.44	0.37	328.0
	第2層	84	7.37	6.44	0.93	619.1
外側炉心	第1層	78	7.47	6.24	1.23	582.7
	第2層	84	5.55	3.68	1.87	466.2
計		520	-	-	-	3974.9
炉出力比(冷却上炉出力 / 実際の炉出力 ^{*2})						1.136

*1 平衡サイクル初期及び末期包絡値に対する層毎の最大値

*2 実際の炉出力:3500MWth

表3.3.3-2 各流量領域における最大発熱集合体の集合体出力履歴

領域	集合体出力履歴 (MW)																		サイクル間の最大 集合体出力低下	
	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル			
	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	幅 (MW)	率 (%)
第1流量領域 (No.38)	8.39	9.09	8.41	9.07	8.39	9.01	8.33	8.91	8.24	8.78	8.12	8.62	-	-	-	-	-	-	0.46	5.1
第2流量領域 (No.33)	7.42	8.67	7.42	8.64	7.38	8.57	7.32	8.46	7.23	8.33	7.12	8.18	-	-	-	-	-	-	0.49	5.7
第3流量領域 (No.203)	7.55	8.22	7.54	8.18	7.51	8.12	7.45	8.04	7.38	7.93	7.28	7.81	-	-	-	-	-	-	0.41	4.9
第4流量領域 (No.218)	7.81	7.27	7.74	7.20	7.67	7.13	7.59	7.05	7.50	6.96	7.40	6.86	7.30	6.75	-	-	-	-	0.52	6.6
第5流量領域 (No.380)	7.37	6.72	7.29	6.66	7.22	6.60	7.15	6.53	7.07	6.45	6.99	6.37	6.90	6.29	-	-	-	-	0.47	6.3
第6流量領域 (No.451)	7.03	5.98	6.96	5.93	6.89	5.87	6.82	5.81	6.75	5.74	6.67	5.67	6.59	5.59	-	-	-	-	0.44	6.3
第7流量領域 (No.450)	7.47	6.25	7.26	6.09	7.08	5.96	6.93	5.85	6.79	5.75	6.67	5.65	6.55	5.55	6.44	5.46	-	-	1.03	13.8
第8流量領域 (No.449)	6.88	5.95	6.68	5.81	6.51	5.69	6.37	5.58	6.25	5.48	6.14	5.38	6.03	5.30	5.93	5.21	-	-	0.95	13.8
第9流量領域 (No.526)	5.55	4.48	5.43	4.40	5.33	4.32	5.24	4.26	5.16	4.21	5.10	4.16	5.03	4.11	4.97	4.06	4.91	4.02	0.64	11.5
第10流量領域 (No.611)	4.37	3.51	4.27	3.44	4.19	3.38	4.12	3.34	4.06	3.29	4.01	3.25	3.96	3.22	3.91	3.18	3.86	3.14	0.50	11.5

<参考 内部増殖炉心の各流量領域における最大発熱集合体の燃焼ミスマッチ係数>

領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル	
	初期	末期																
第1流量領域 (No.38)	1.009	1.020	1.012	1.018	1.010	1.011	1.002	1.000	0.991	0.985	0.976	0.967	-	-	-	-	-	-
第2流量領域 (No.33)	1.015	1.023	1.014	1.019	1.009	1.011	1.001	0.998	0.988	0.983	0.973	0.965	-	-	-	-	-	-
第3流量領域 (No.203)	1.014	1.020	1.012	1.016	1.008	1.009	1.000	0.999	0.990	0.985	0.976	0.970	-	-	-	-	-	-
第4流量領域 (No.218)	1.032	1.034	1.022	1.024	1.013	1.014	1.002	1.003	0.991	0.990	0.978	0.975	0.963	0.960	-	-	-	-
第5流量領域 (No.380)	1.032	1.032	1.021	1.022	1.011	1.012	1.001	1.002	0.990	0.990	0.979	0.978	0.966	0.964	-	-	-	-
第6流量領域 (No.451)	1.032	1.032	1.021	1.022	1.011	1.012	1.001	1.002	0.990	0.990	0.979	0.978	0.966	0.964	-	-	-	-
第7流量領域 (No.450)	1.083	1.073	1.052	1.047	1.026	1.025	1.004	1.005	0.985	0.987	0.967	0.970	0.950	0.954	0.934	0.938	-	-
第8流量領域 (No.449)	1.083	1.073	1.052	1.047	1.026	1.025	1.004	1.005	0.985	0.987	0.967	0.970	0.950	0.954	0.934	0.938	-	-
第9流量領域 (No.526)	1.069	1.061	1.046	1.041	1.026	1.024	1.009	1.009	0.995	0.996	0.981	0.984	0.969	0.973	0.958	0.962	0.946	0.951
第10流量領域 (No.611)	1.069	1.061	1.046	1.041	1.026	1.024	1.009	1.009	0.995	0.996	0.981	0.984	0.969	0.973	0.958	0.962	0.946	0.951

表3.3.3-3 流量領域毎の最大線出力

領域		平衡サイクル初期 (制御棒：40cm挿入)				平衡サイクル末期 (制御棒：パーク位置)			
		集合体 No.	燃料要素 No.	発生位置* (cm)	最大線出力 (W/cm)	集合体 No.	燃料要素 No.	発生位置* (cm)	最大線出力 (W/cm)
内側炉心	第1流量領域	54	128	37.5	408.1	54	62	72.5	395.0
	第2流量領域	128	194	37.5	398.1	118	202	72.5	380.7
	第3流量領域	217	194	37.5	392.2	217	195	72.5	366.1
中間炉心	第4流量領域	271	194	47.5	417.4	271	202	47.5	359.3
	第5流量領域	331	194	47.5	393.0	331	202	102.5	328.9
	第6流量領域	379	194	47.5	376.7	379	194	102.5	316.0
外側炉心	第7流量領域	450	194	67.5	388.9	377	194	77.5	329.9
	第8流量領域	449	194	67.5	369.9	449	194	77.5	312.6
	第9流量領域	544	202	67.5	330.4	544	202	77.5	269.2
	第10流量領域	611	198	72.5	271.5	446	194	77.5	215.0

* 下部軸方向ブランケットの下端からの距離

表3.3.3-4 流量領域毎の最大発熱集合体の燃焼度

	流量領域	集合体平均燃焼度 ^{*1}		燃料要素最大燃焼度 ^{*1}		ペレット最大燃焼度		要素平均/ 集合体平均比	ペレット最大/ 要素平均比
		集合体No.	GWd/t	要素No.	GWd/t	位置 ^{*2} (cm)	GWd/t		
内側 炉心	第1領域	No.38	170.6	No.92	171.6	45 ~ 50	206.9	1.006	1.206
	第2領域	No.33	159.6	No.210	163.9	45 ~ 50	199.8	1.027	1.219
	第3領域	No.203	157.3	No.202	162.0	50 ~ 55	196.4	1.030	1.212
中間 炉心	第4領域	No.218	172.8	No.194	180.2	25 ~ 30	220.3	1.043	1.223
	第5領域	No.380	161.8	No.196	165.8	25 ~ 30	203.0	1.025	1.224
	第6領域	No.451	149.6	No.199	158.0	25 ~ 30	189.3	1.056	1.198
外側 炉心	第7領域	No.450	172.9	No.194	187.0	50 ~ 55	233.7	1.082	1.250
	第8領域	No.449	159.2	No.194	175.6	50 ~ 55	220.8	1.103	1.257
	第9領域	No.526	144.3	No.194	176.9	50 ~ 55	222.2	1.226	1.256
	第10領域	No.611	111.6	No.198	144.0	50 ~ 55	179.5	1.290	1.247

*1 集合体、および燃料要素の燃焼度は炉心燃料部での値である

*2 位置は炉心下端からの距離で示している

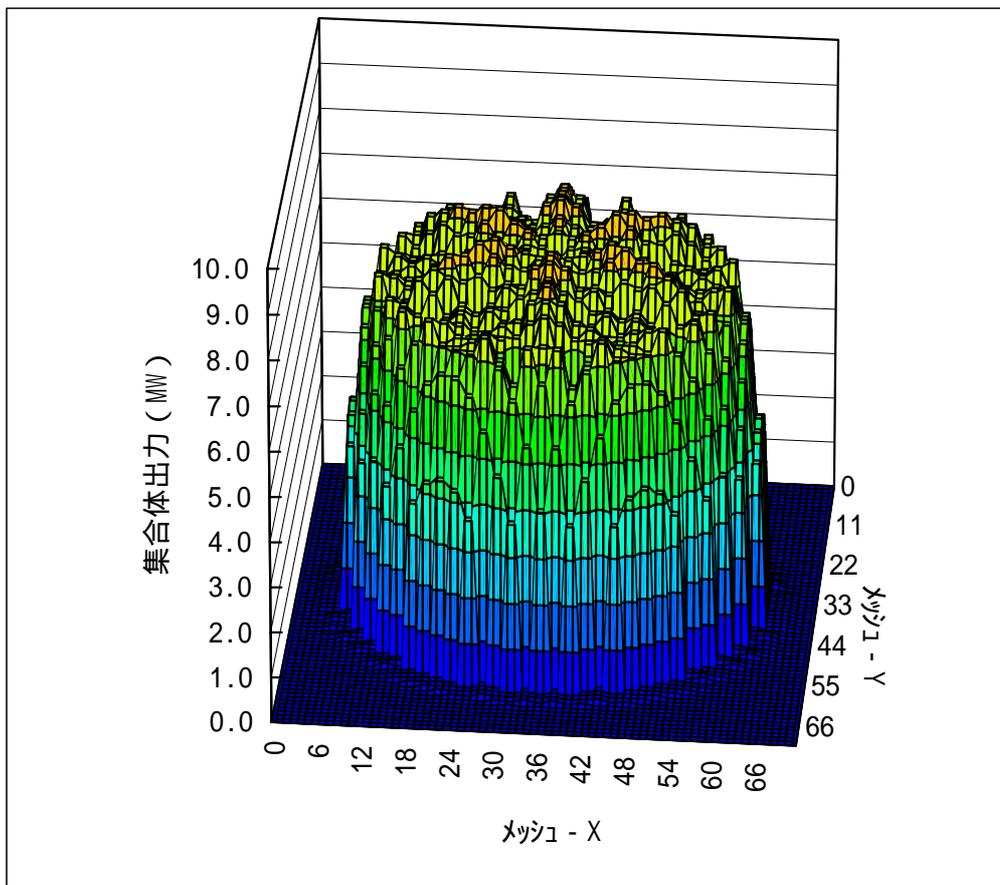
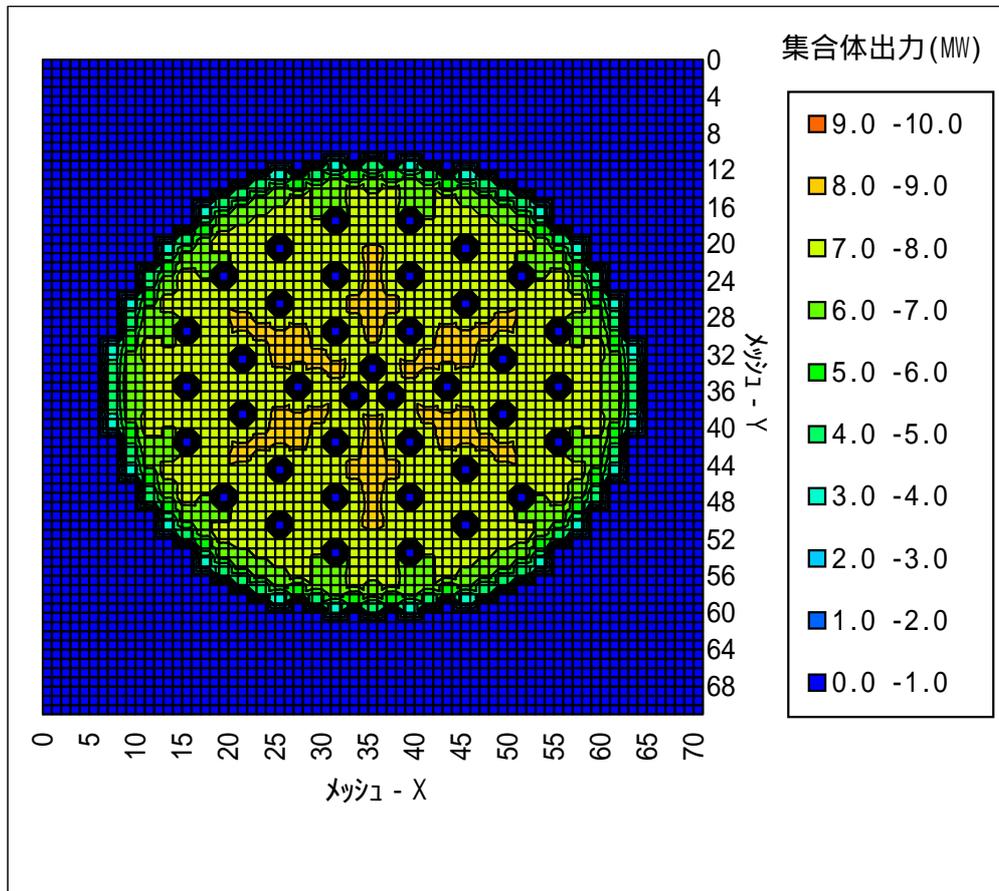


図3.3.3-1 平衡サイクル初期における集合体出力分布
 - 全制御棒40cm挿入、燃焼ミスマッチ考慮 -

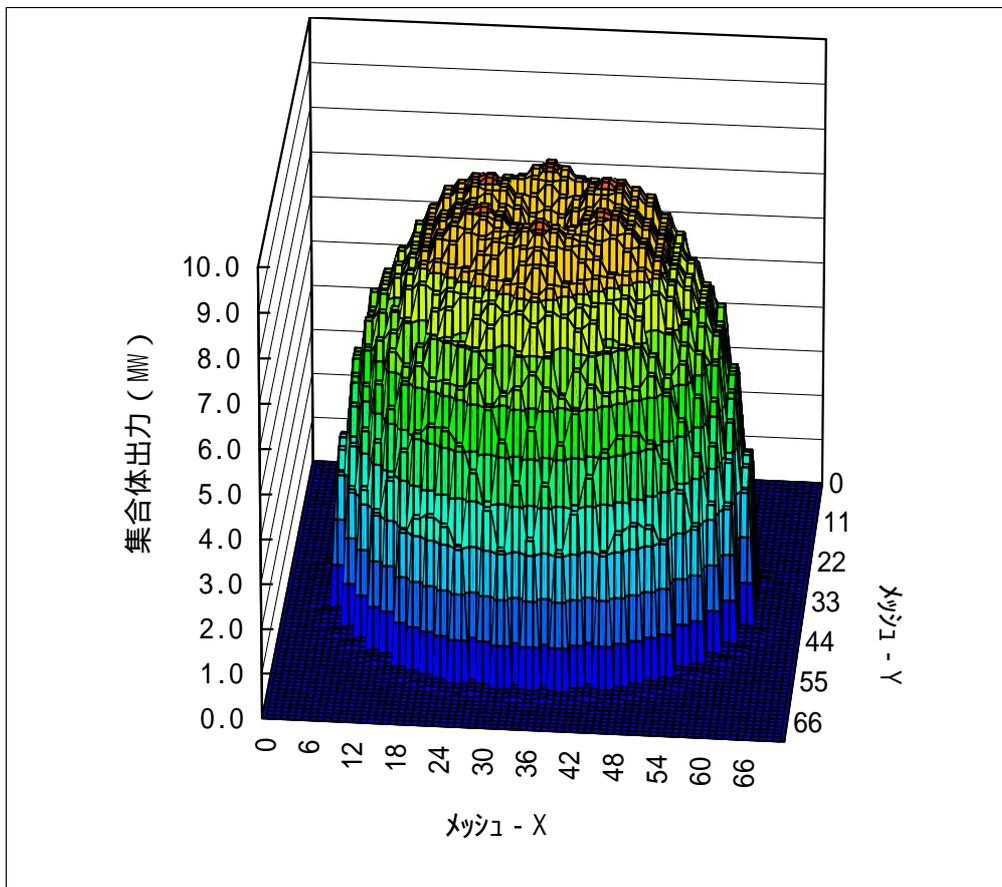
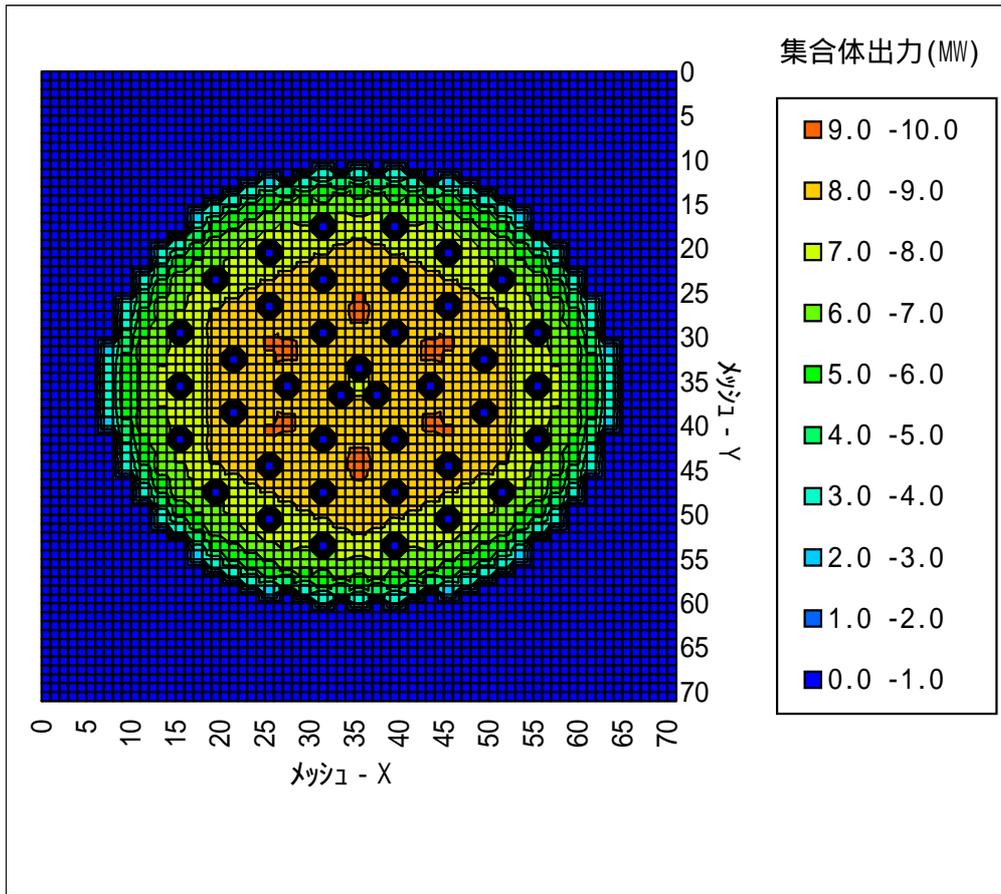


図3.3.3-2 平衡サイクル末期における集合体出力分布
 - 全制御棒パーク位置、燃焼ミスマッチ考慮 -

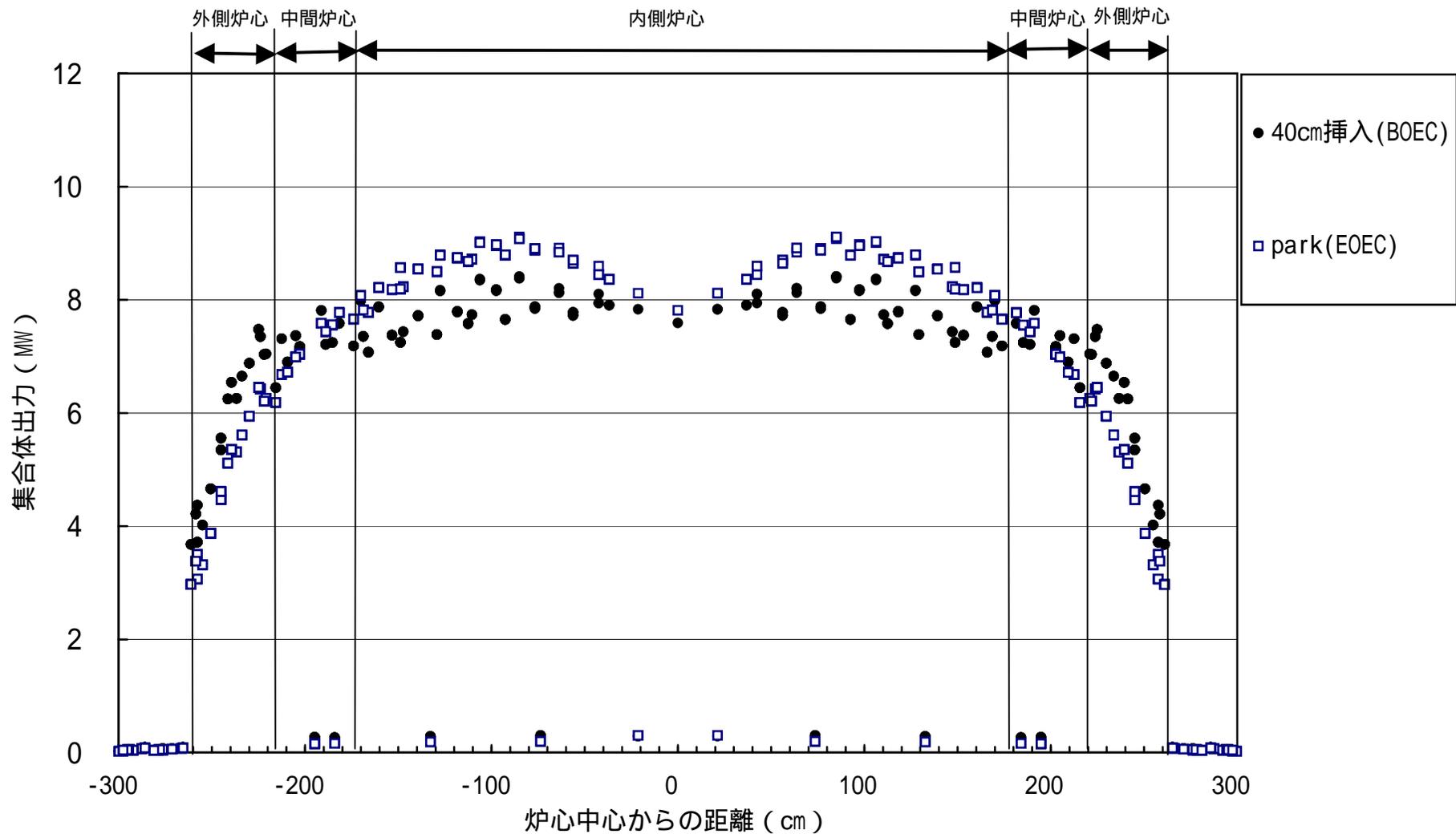
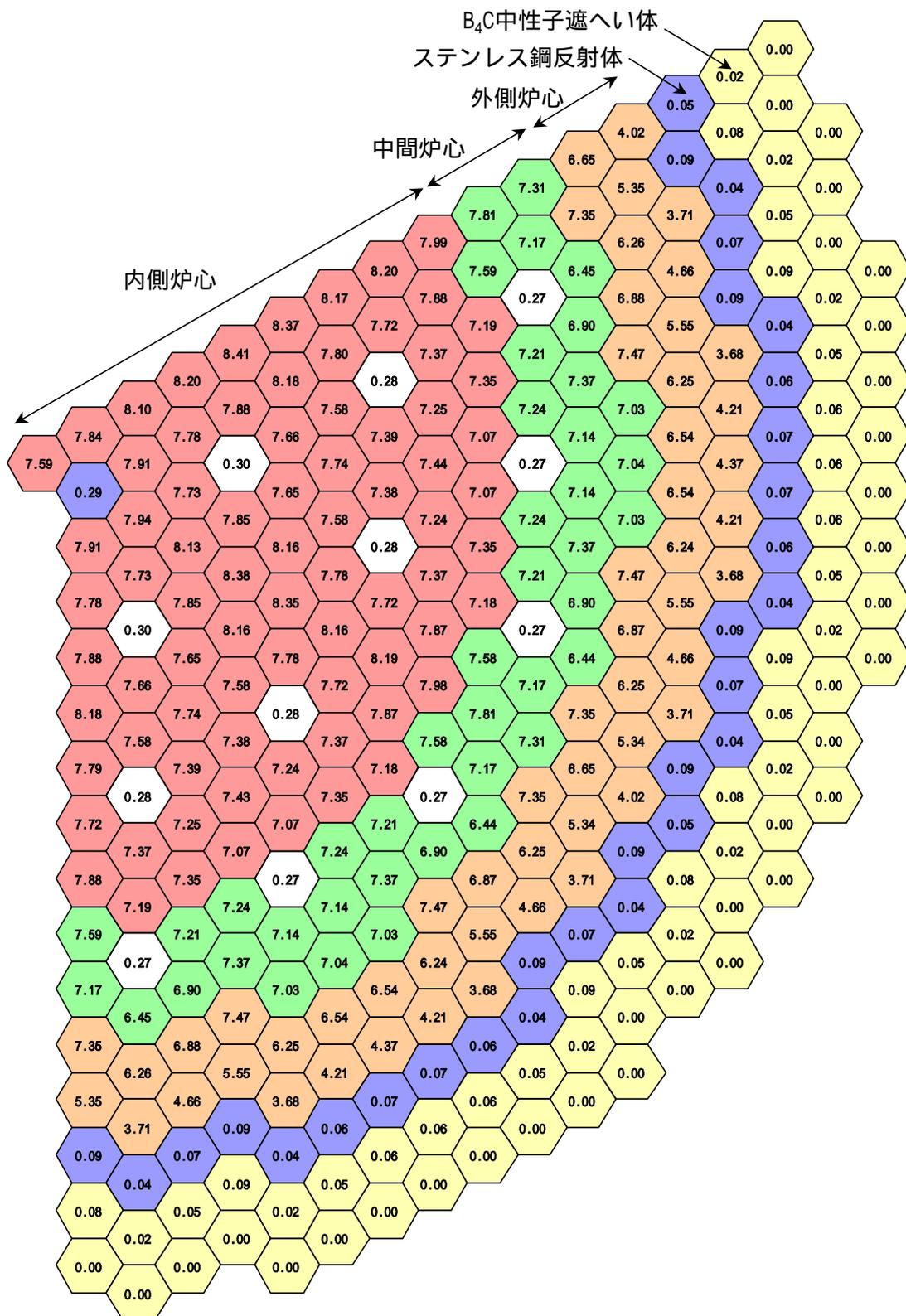
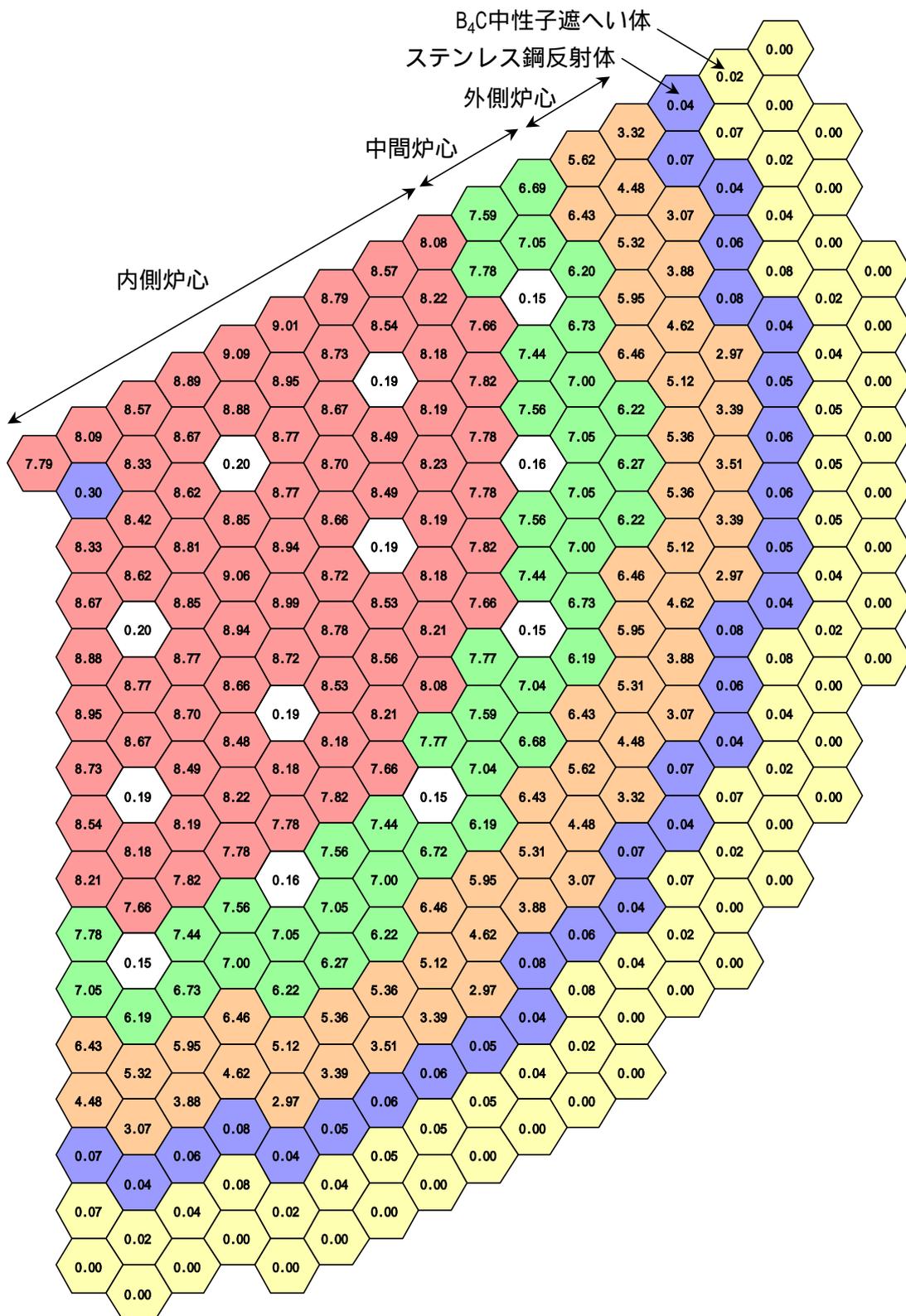


図3.3.3-3 平衡サイクル時の径方向出力分布 (燃焼ミスマッチ考慮)



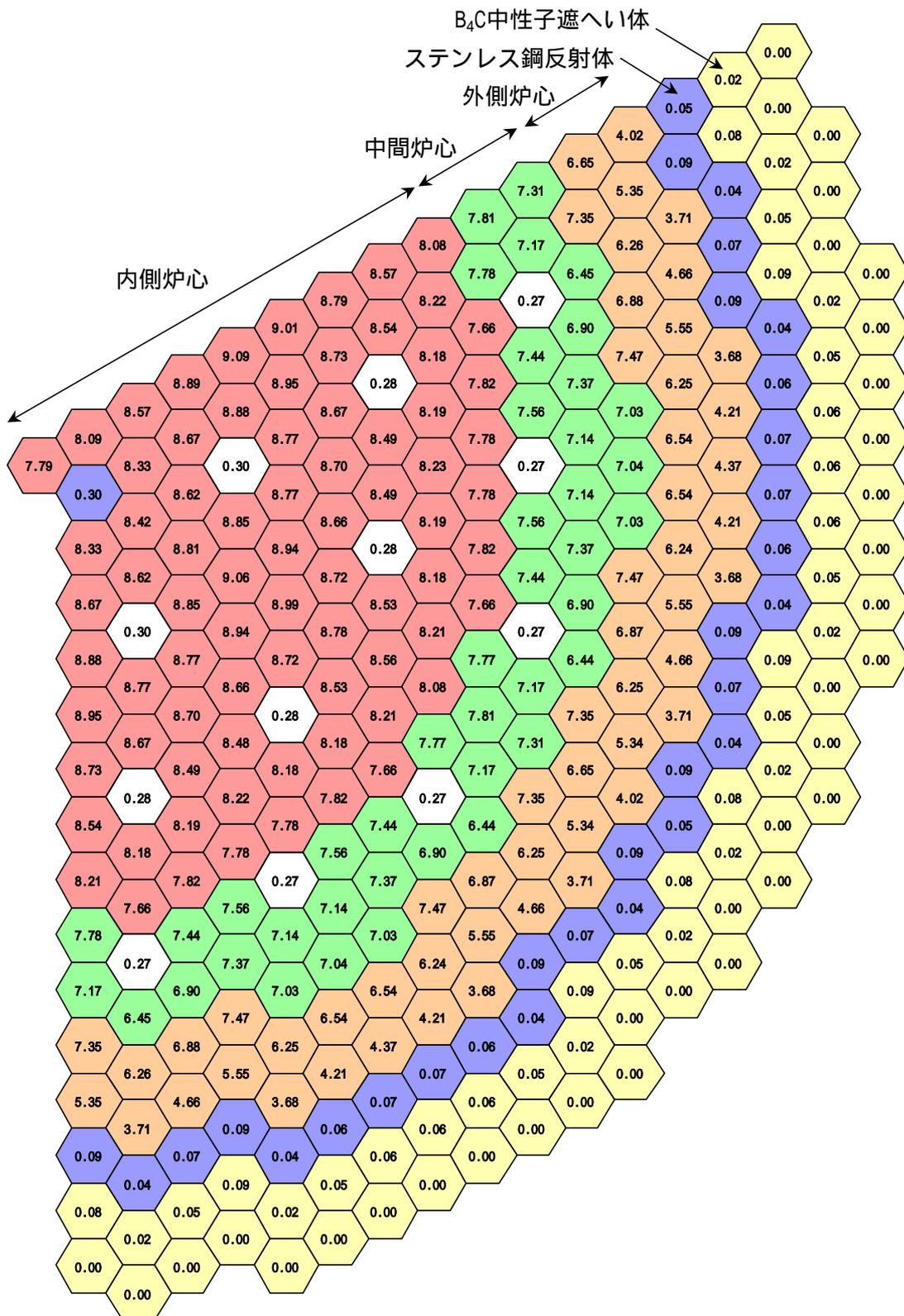
単位： [MW]

図3.3.3-4 平衡サイクル初期における集合体出力分布
(制御棒40cm挿入)



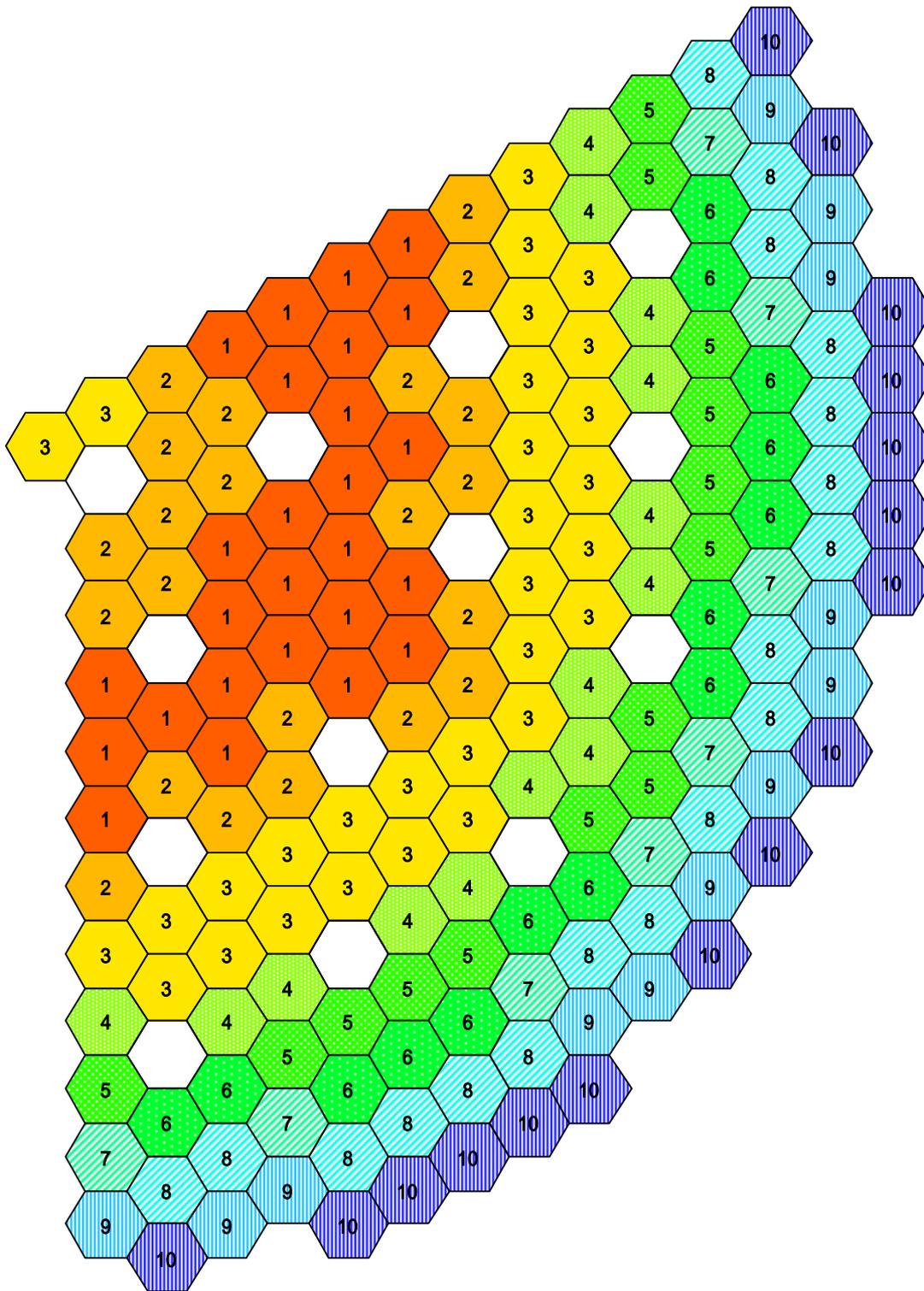
単位： [MW]

図3.3.3-5 平衡サイクル末期における集合体出力分布
(制御棒パーク位置)



単位： [MW]

図3.3.3-6 平衡サイクルにおける包絡集合体出力分布



単位：[MW]

図3.3.3-7 内部増殖炉心の流量領域区分（暫定案）

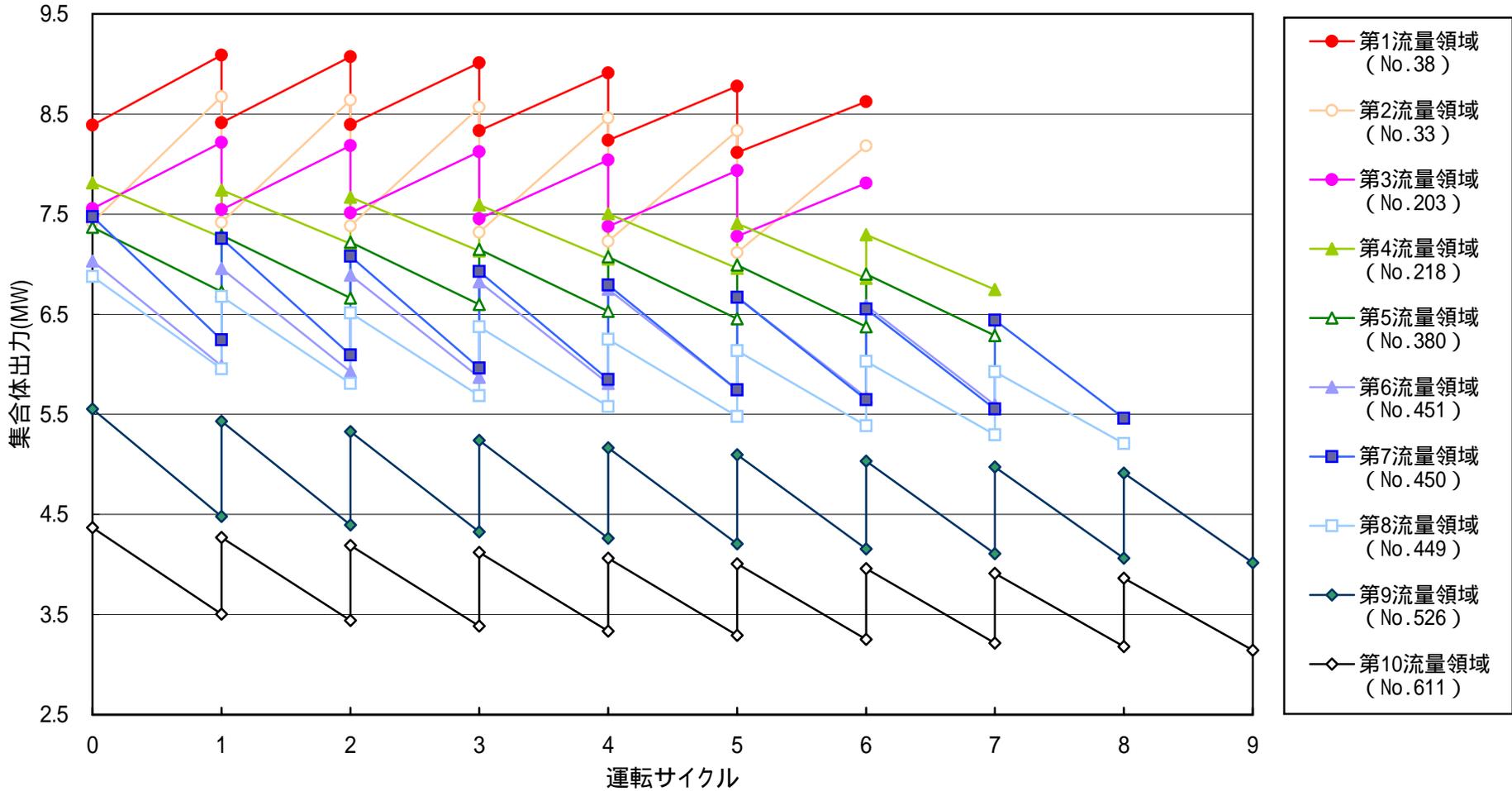


図3.3.3-8 各流量領域の最大発熱集合体に対する集合体出力履歴

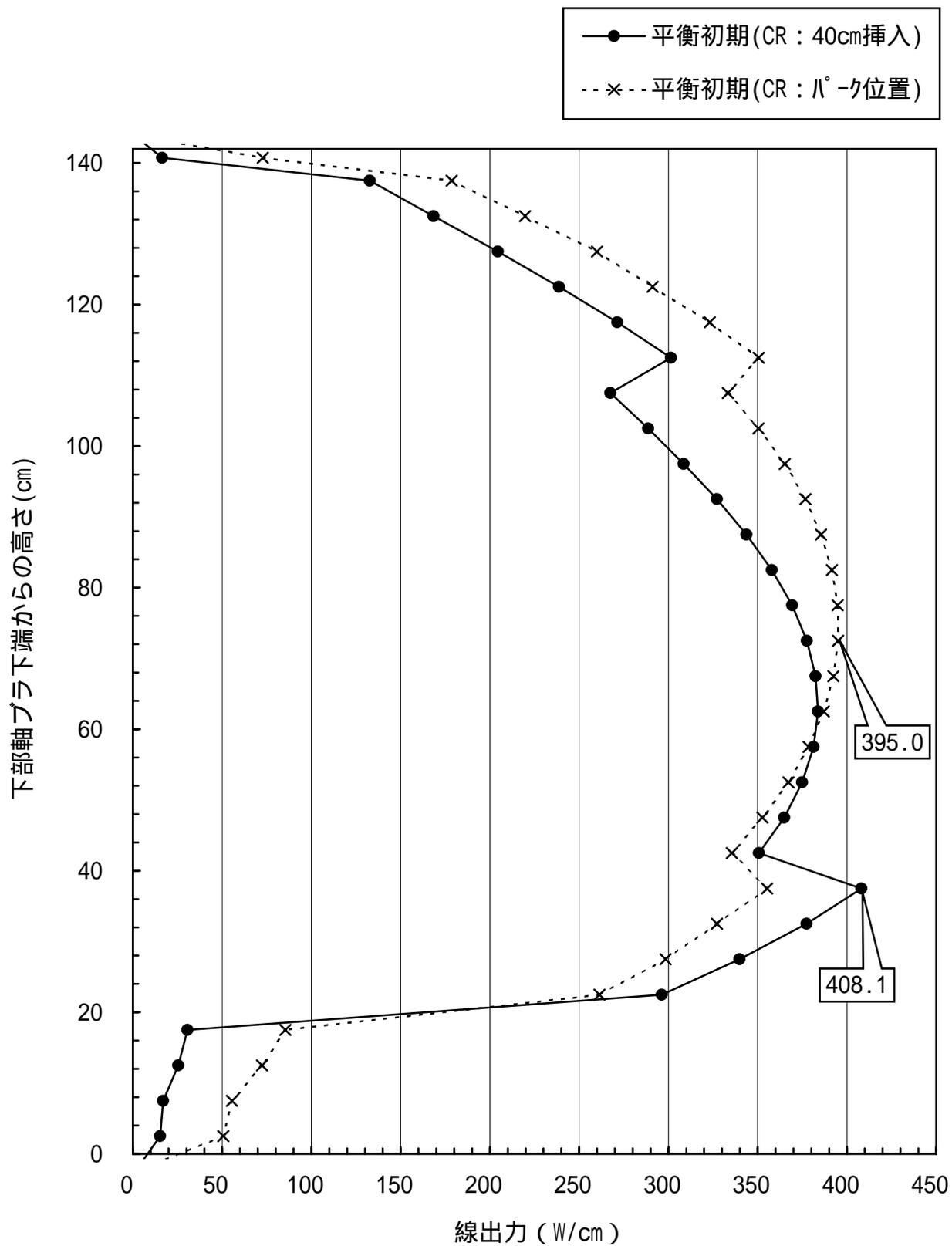


図3.3.3-9 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第1流量領域、集合体No.54 -

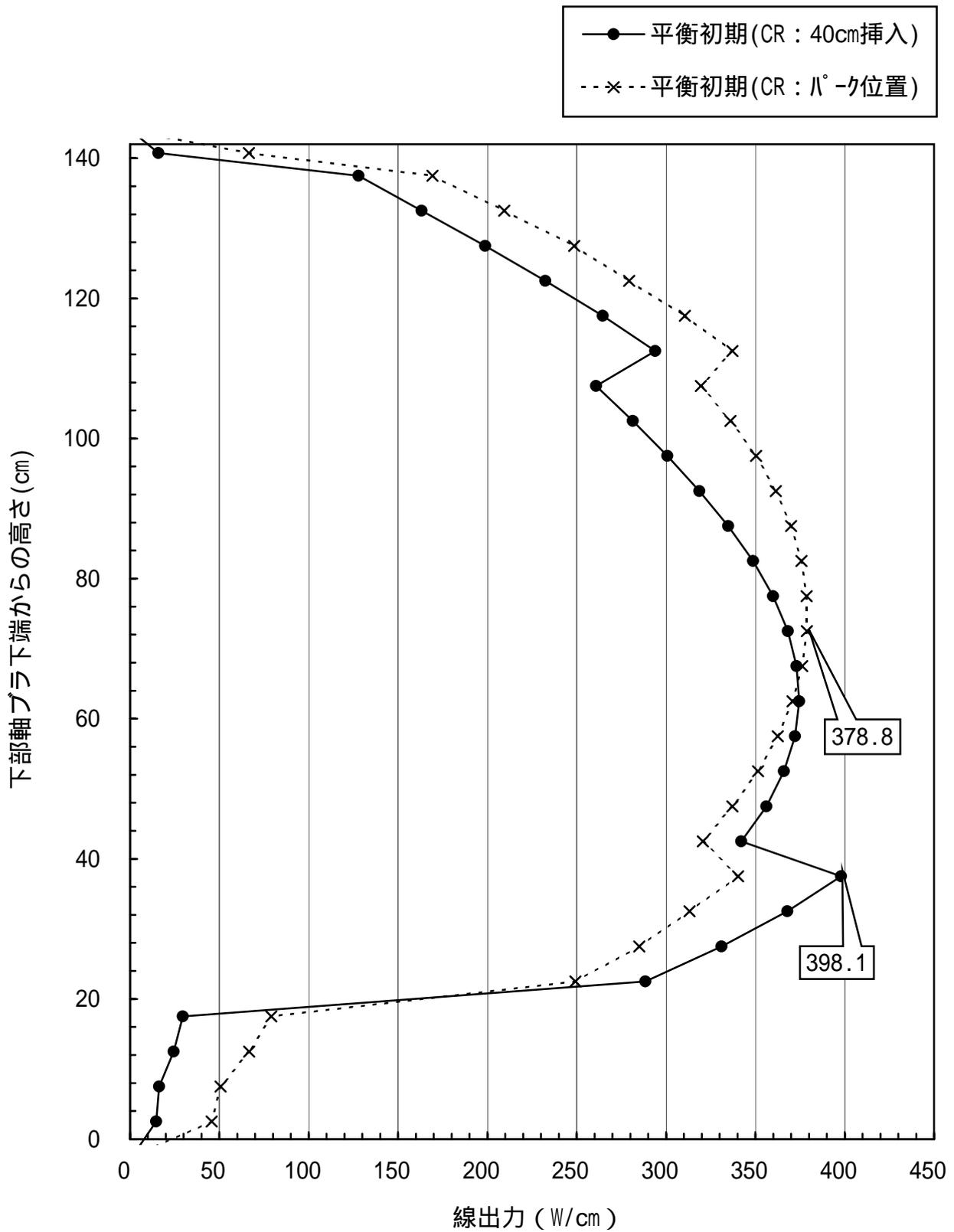


図3.3.3-10 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第2流量領域、集合体No.128 -

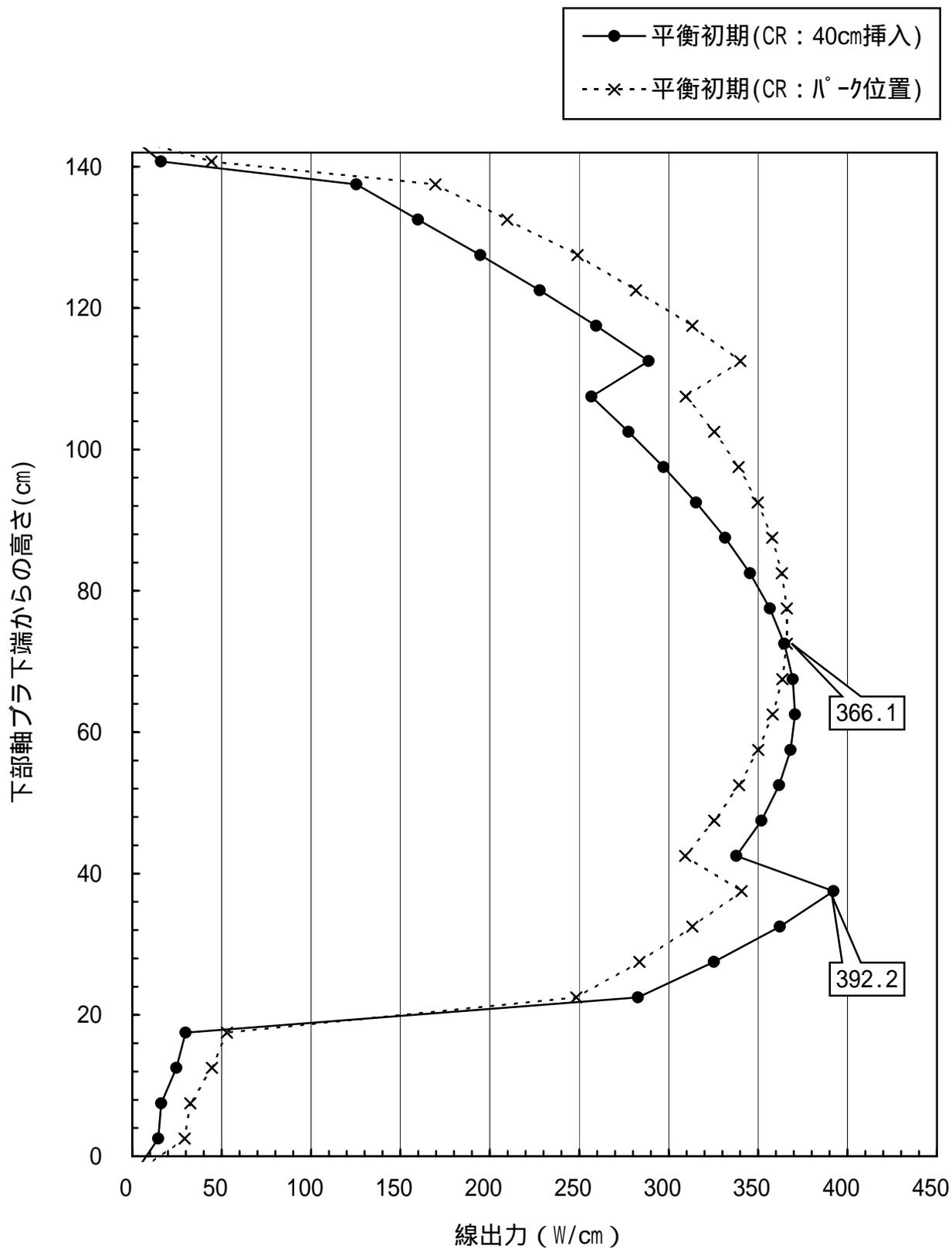


図3.3.3-11 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第3流量領域、集合体No.217 -

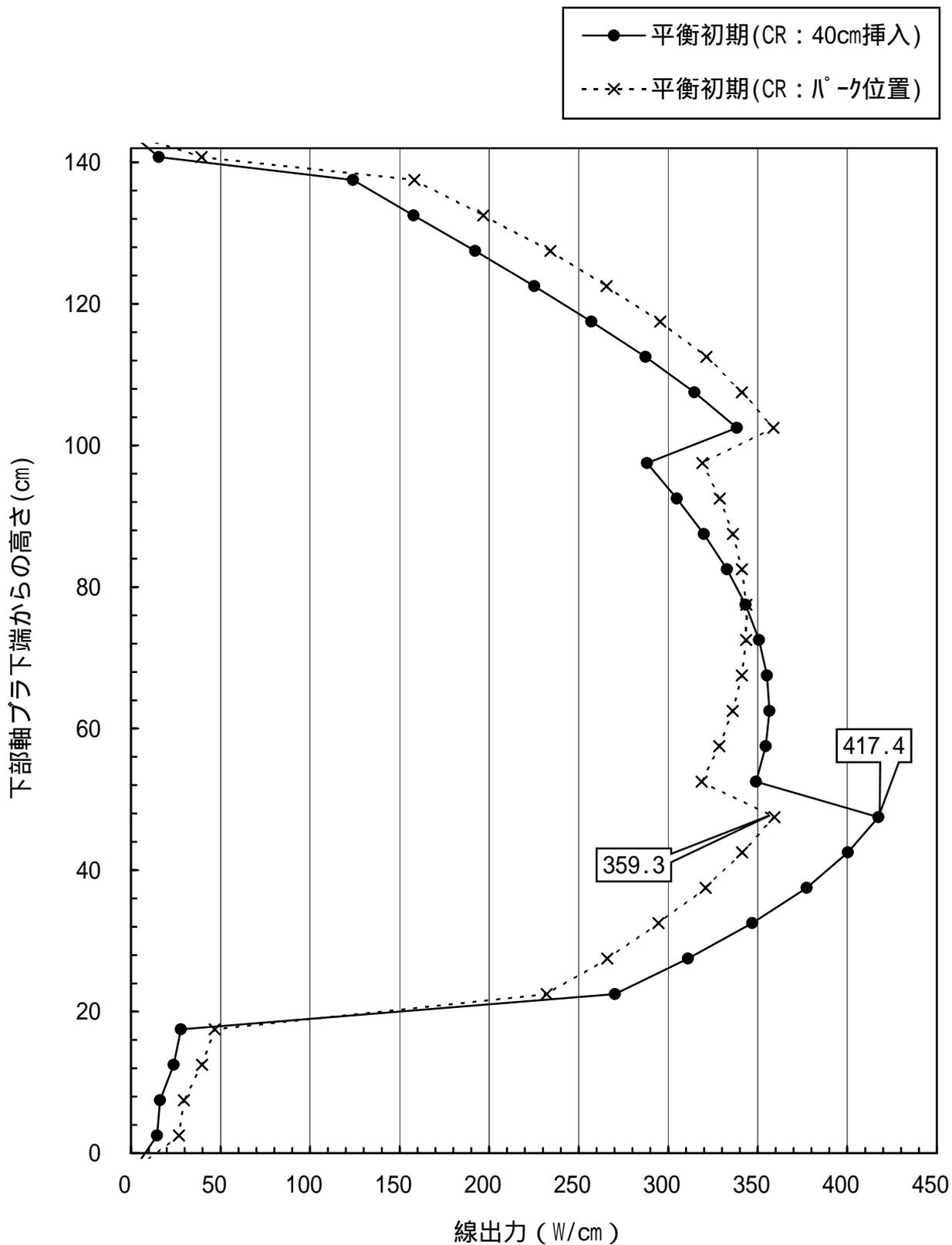


図3.3.3-12 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第4流量領域、集合体No.271 -

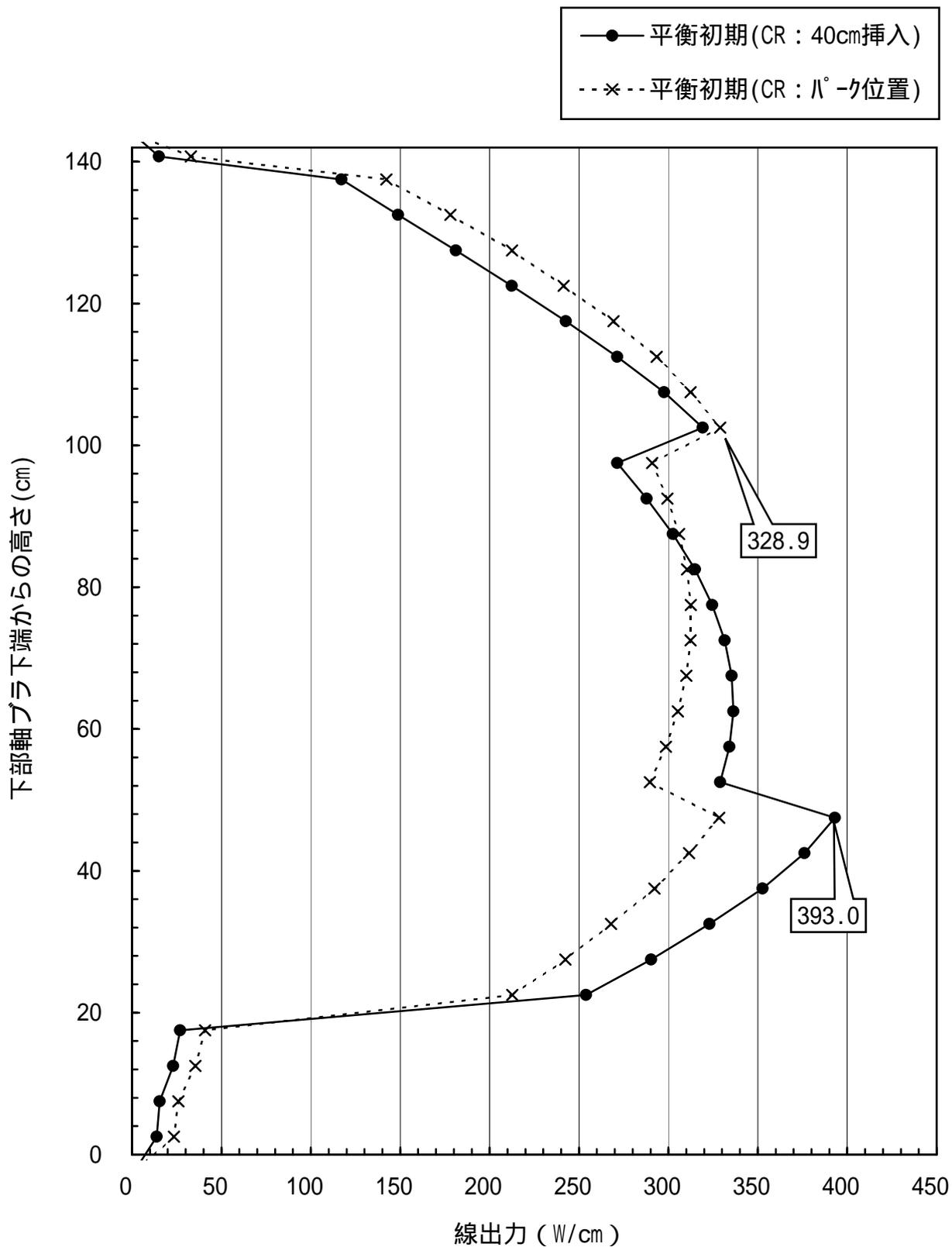


図3.3.3-13 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第5流量領域、集合体No.331 -

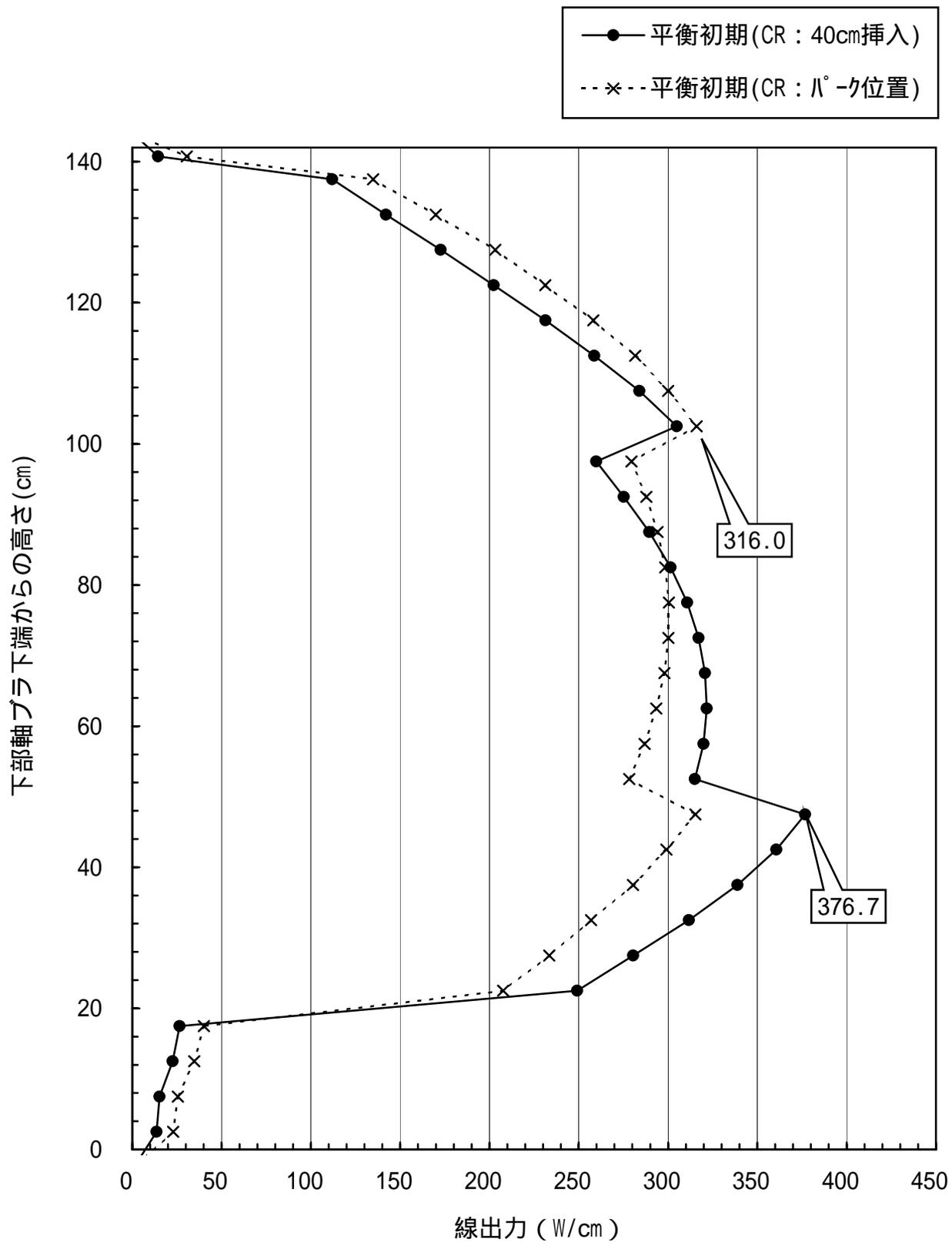


図3.3.3-14 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第6流量領域、集合体No.379 -

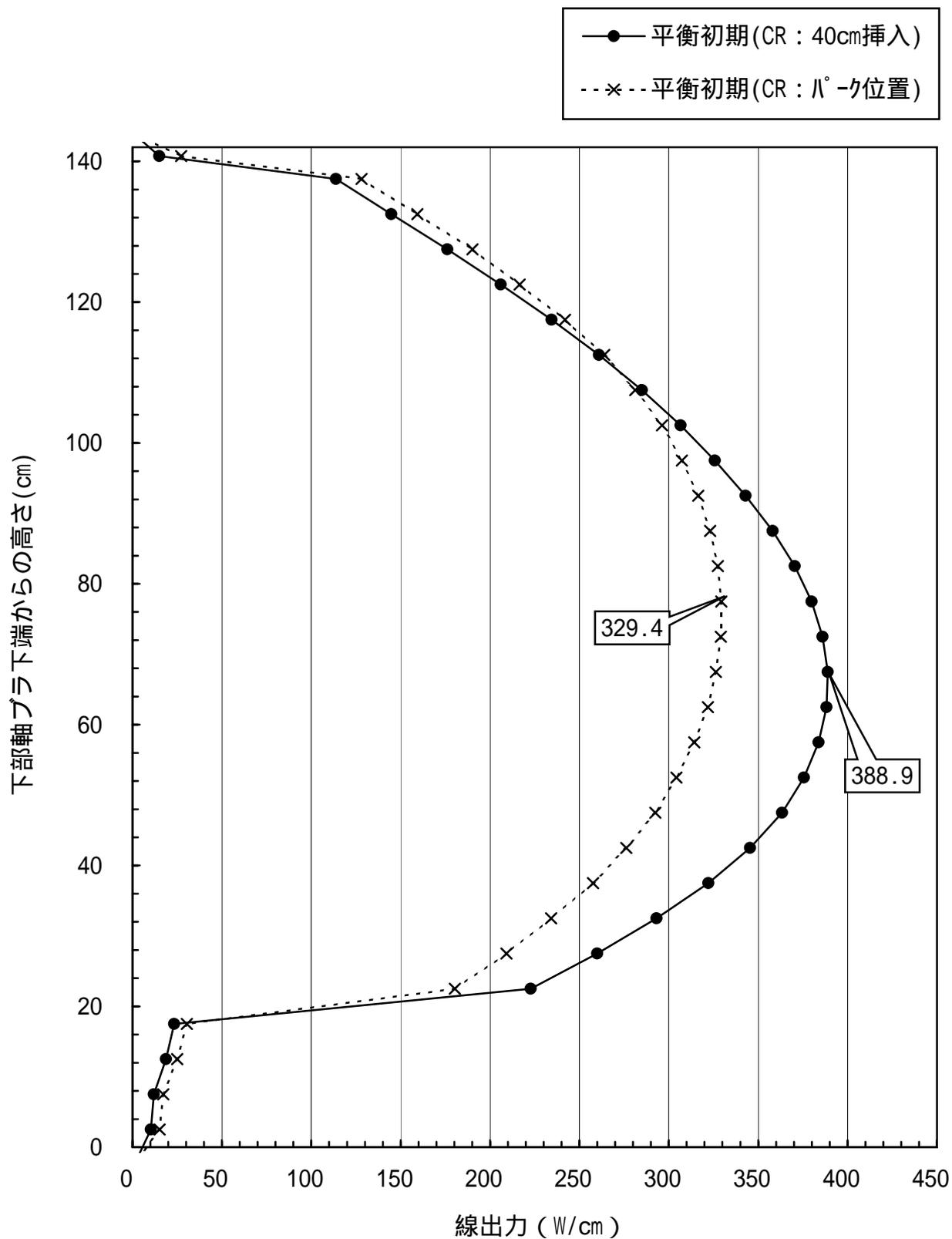


図3.3.3-15 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第7流量領域、集合体No.450 -

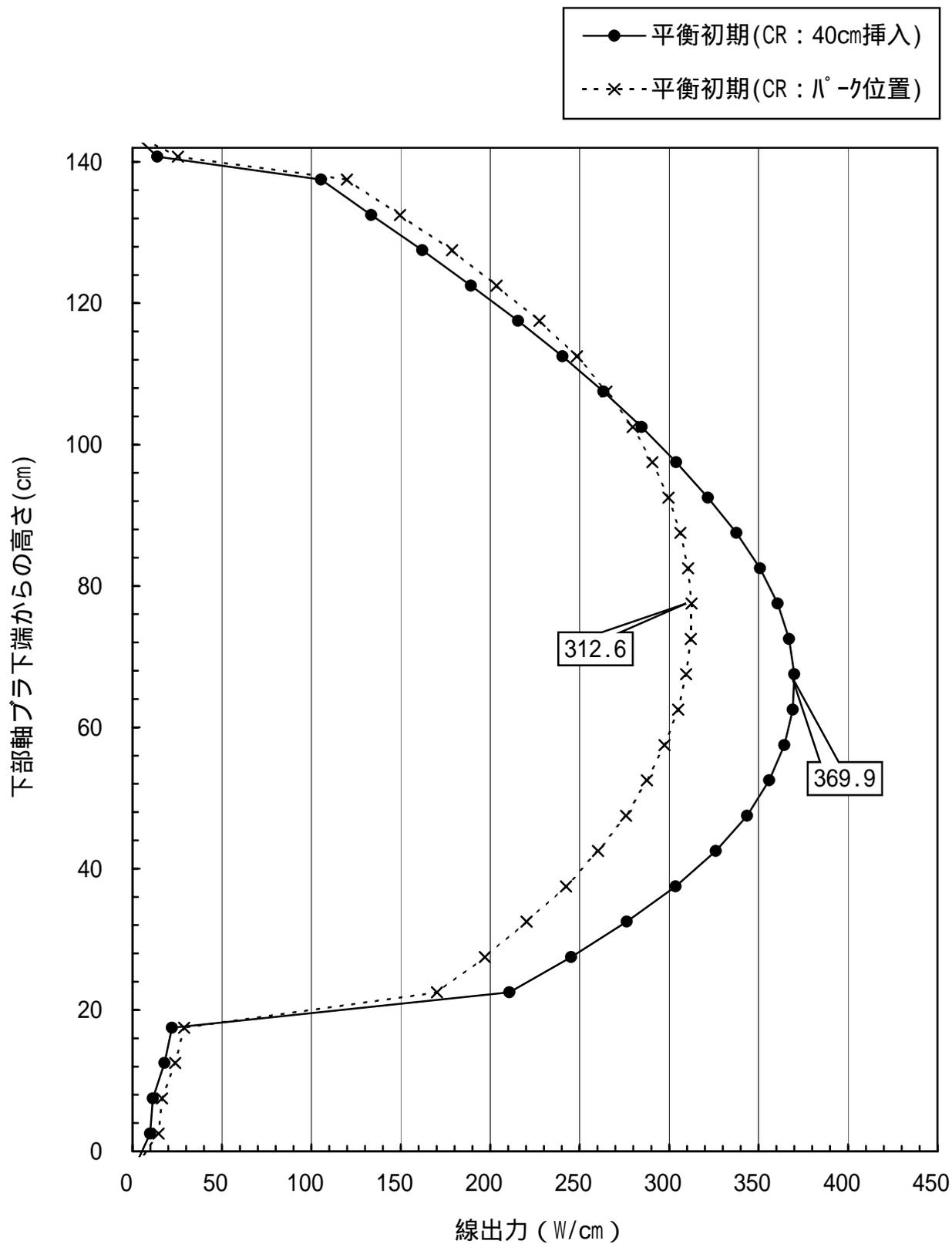


図3.3.3-16 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第8流量領域、集合体No.449 -

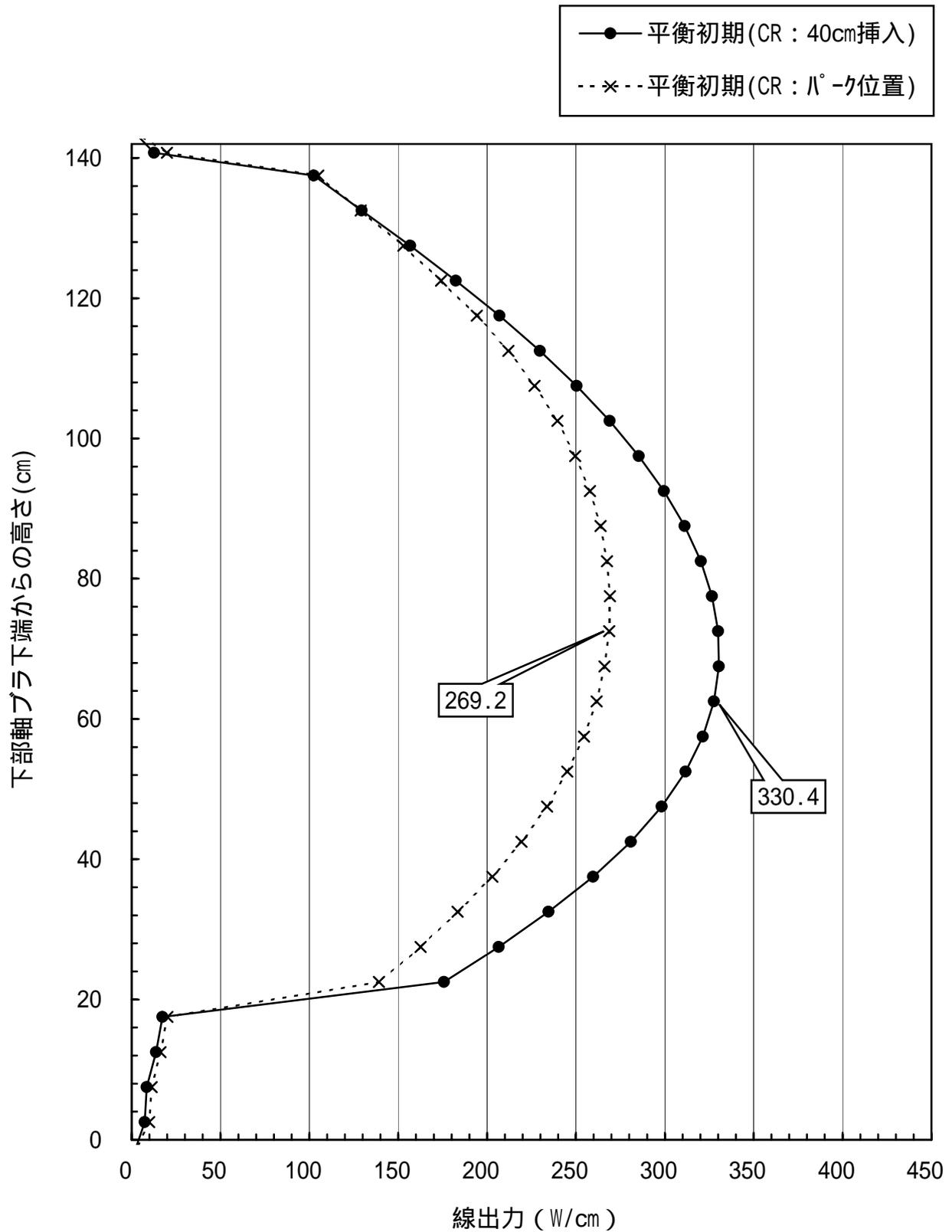


図3.3.3-17 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第9流量領域、集合体No.544 -

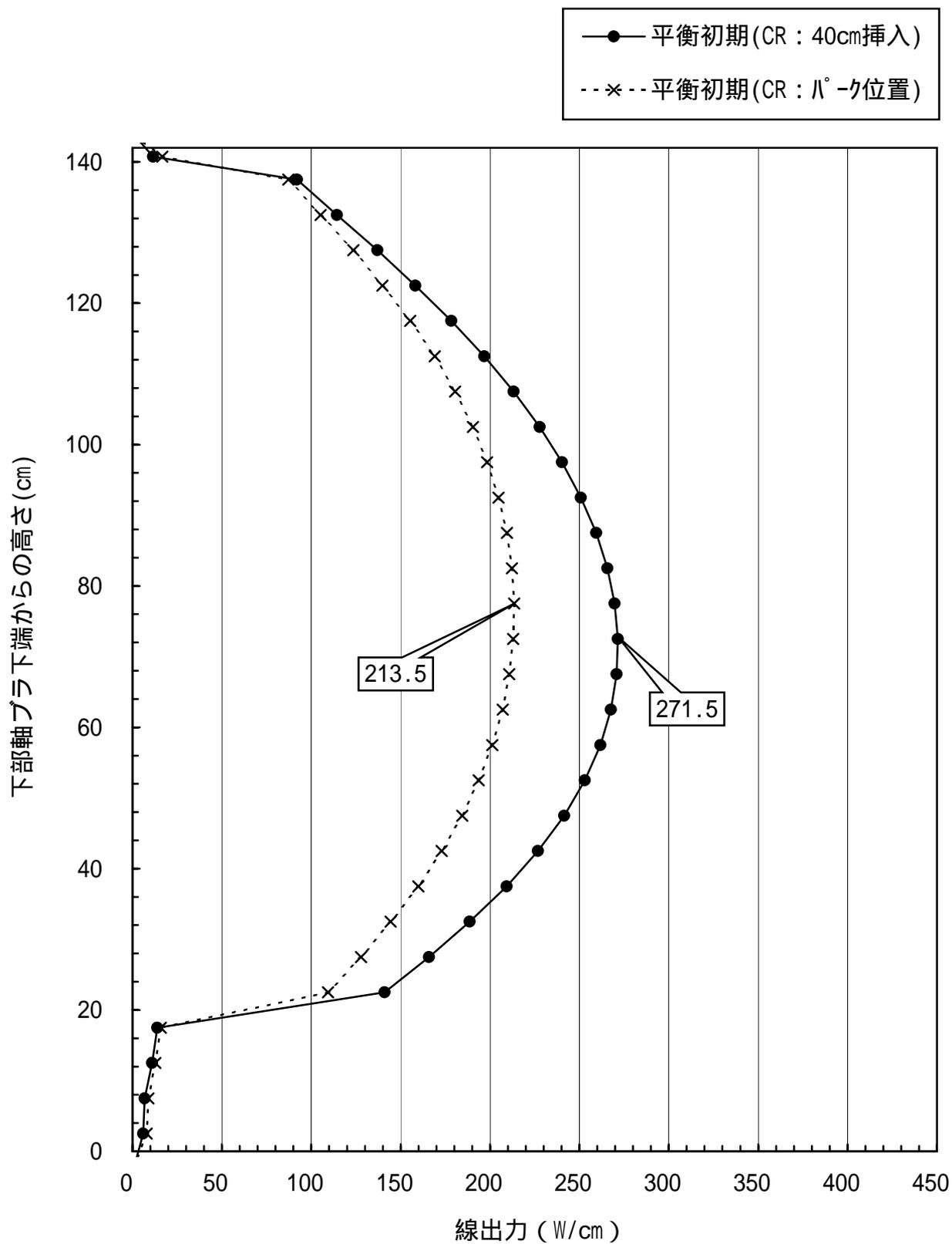


図3.3.3-18 内部増殖炉心の平衡サイクルにおける軸方向線出力分布
 - 第10流量領域、集合体No.611 -

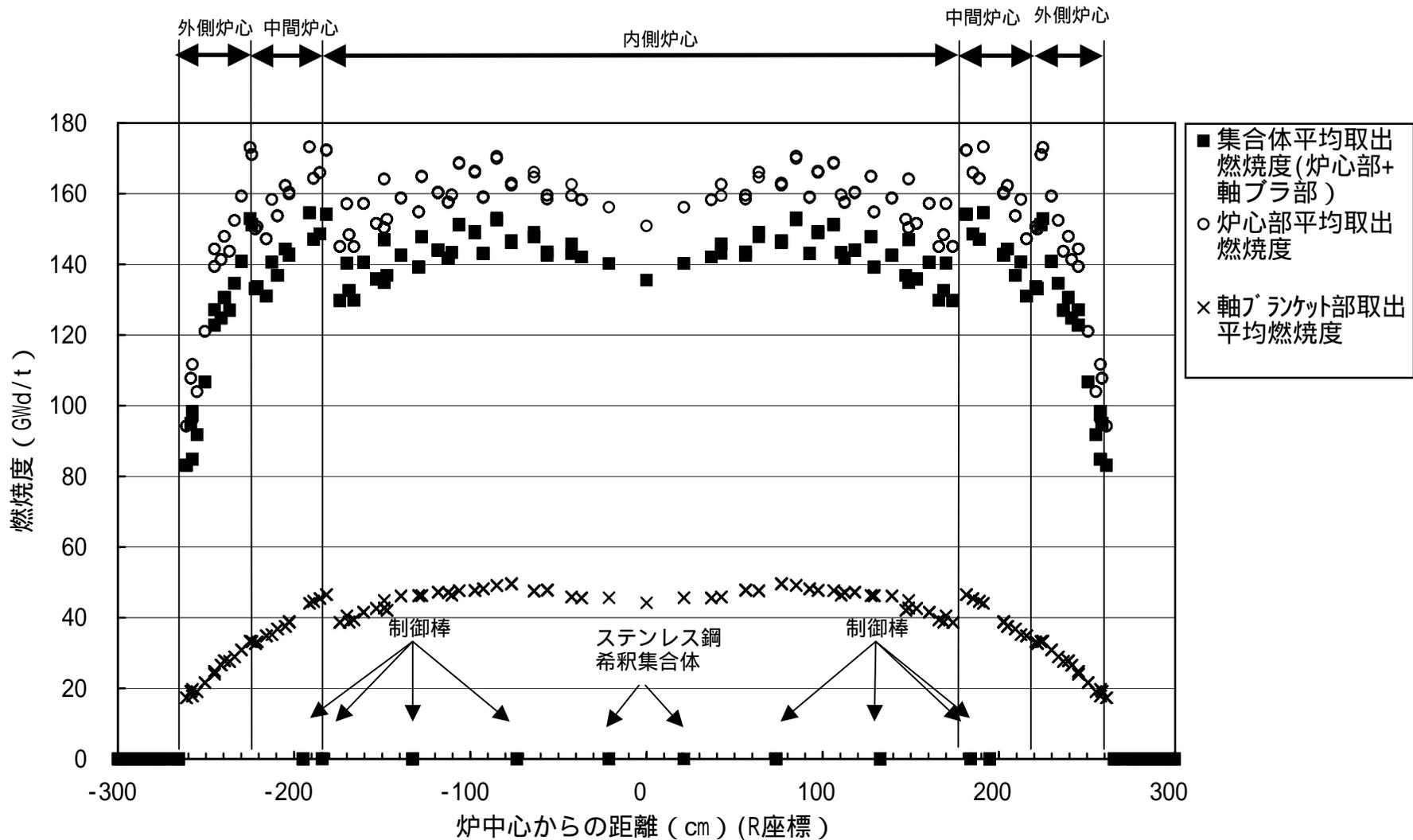


図3.3.3-19 集合体平均取出燃焼度の径方向分布

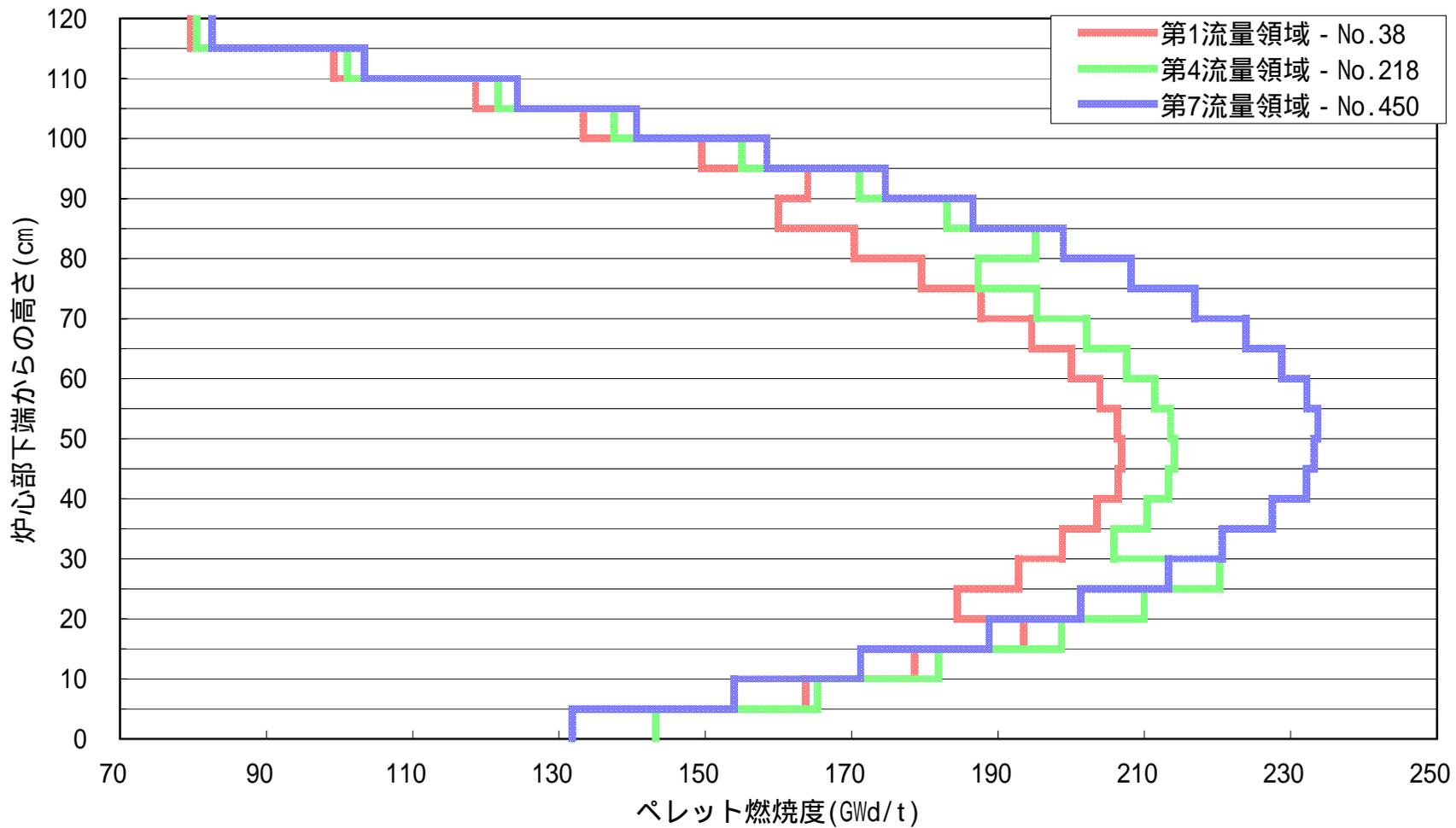


図3.3.3-20 炉心領域毎の代表集合体に対する軸方向燃焼度分布

3.3.4 制御棒反応度収支の推定

(1) 目的

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念では、実効燃料体積率を高め設定し、燃焼欠損反応度を低減すると共に制御棒挿入による出力分布変動幅を抑制している。この燃焼欠損反応度の低減に対応して制御棒本数を燃料集合体数の約7%と従来のFBR炉心設計例に比べて、少なめに設定している。このため、制御棒反応度収支を推定し、その妥当性を確認する。

(2) 制御棒区分及び役割分担について

大型炉心では核的デカップリングが大きく、局所出力歪が大きくなる傾向を有しており、従来設計例のように主炉停止系及び後備炉停止系の区別を行った場合に、サイクル初期においても全引き抜き状態である後備炉停止系制御棒近傍に出力ピークが発生しやすいことが懸念される。このため、両者の区別を行わず、同一仕様の制御棒群を電源系、制御信号系等を独立させた2つの系統に分離することで、原子炉停止系の独立2系統の設計基準を満足させることとする。想定した2系統の同時作動及び1系統のみの作動における機能分担を表3.3.4-1に整理する。ここで、燃焼欠損反応度等の長期に亘る反応度制御は2系統を合わせて行うこととする。原子炉緊急停止（スクラム）に関して、2系統合わせて長期的な反応度補償のために部分挿入した状態から、2系統のうち、それぞれ、1系統のみの残余の反応度価値により、出力補償分に対応して低温停止させるまでの機能を要求条件とする。

2系統の同時作動の場合には、サイクル期間を通じての長期間での反応度制御が可能となるかが問題となり、瞬時的なスクラムを対象としておらず、必ずしもワノンロードスタック条件を課す必要はないと考えられるが、適切な運転余裕として、従来指針を参考に、最大価値の制御棒1本の全引き抜きを想定するものとする。

また、瞬時的なスクラムの対象となる1系統単独作動の場合においては、対象系統での残余の制御棒価値が最小となる制御棒1本の不作動（部分挿入状態のまま）を想定する。さらに、制御棒誤引き抜き事象時でのスクラムを想定して、評価対象外系統の最も影響が大きい制御棒1本の全引き抜きを仮定する。

(3) 解析条件

制御棒反応度を評価する際の解析条件を以下に列挙する。

- ・ 制御棒配置；図 3.3.4-1
- ・ 制御棒仕様；表 3.2-4（前述）

過去の設計例での主炉停止系制御棒の仕様を参考に設定したもの。また、制御棒価値の不足が懸念されることから、 ^{10}B 濃縮度を90wt%とした。

- ・ 核データ；JENDL3.2 ベースの統合炉定数（ADJ98）

- ・ ミク口断面積作成方法 ; SLAROM-JOINT-CITATION(FBR)による 7 群実効ミク口断面積
制御棒用ミク口断面積は、第 1 リングの制御棒を想定し、31 本の吸収要素を 4 層のリングとなるように円筒状非均質モデルで考慮する。
- ・ 燃焼組成 ; CITATION コードによる 2 次元 R Z 体系拡散燃焼計算により得られる平衡サイクル初期及び末期でのものを用いる。
- ・ 制御棒価値評価 ; MOSES コードによる 3 次元 Tri-Z 体系拡散計算

(4) 制御棒反応度価値解析結果

2 系統同時作動させた場合での各制御棒挿入深度における実効増倍率及び制御棒パーク位置 (B₄C 吸収要素下端が炉心上端にくる位置) と比較しての制御棒反応度価値を表 3.3.4-2 に示す。2 系統共にパーク位置から全挿入した場合での制御棒価値は 8.85% k/kk' であり、各リングの制御棒 1 体がパーク位置でスタックした場合の制御棒価値は、第 3 リングの制御棒がスタックした場合が最も小さく 7.25% k/kk' となった。ここで、ワンロッドスタックによる影響が炉心中心に近い第 1 リングの制御棒でなく、外周部に近い第 3 リングの制御棒で大きくなったのは、この位置での核的デカップリングが大きく、引き抜かれている制御棒周辺の出力歪、核的インポートランスが他のリングの場合に比べて大きくなったことが原因と考えられる。

また、長期的な反応度制御を 2 系統で対応して部分挿入された状態で、1 系統のみが更に下端まで挿入された場合の制御棒価値をサイクル初期及びサイクル末期について表 3.3.4-3 に示す。

サイクル初期では燃焼欠損反応度を補償して制御棒が挿入されており、この場合の制御棒挿入深度を 40cm としている。この挿入深度に対応する制御棒価値は、約 2.5% k/kk' であり、これは燃焼欠損反応度約 1.5% k/kk' に、臨界性予測誤差、運転余裕等を考慮して余裕を持たせたものである。この状態から 1 系統のみを全挿入させた場合の制御棒価値は、約 3.4% k/kk' となる。

ここで、運転員の誤操作等で引き抜かれる制御棒及び部分挿入の状態スタックする制御棒の組み合わせは多くのものが想定できるが、2 系統同時作動時においてワンロッドスタックした場合の影響が第 3 リングの制御棒で最も大きくなったことに着目して、第 3 リングで誤引き抜き等が起こる場合を中心に解析した。この結果、No.284 の制御棒が 40cm 挿入状態のままスタックして、No.280 の制御棒が誤引き抜きされた場合が最も制御棒価値が小さく、約 2.5% k/kk' となる。

サイクル末期では、Pu 富化度が過不足なく設定されていれば、両系統の制御棒はパーク位置近傍に位置することとなる。両系統がパーク位置にあり、1 系統のみを全挿入させた場合での制御棒価値は、約 4.6% k/kk' であり、制御棒 1 本がパーク位置のままスタックした場合では、約 3.7% k/kk' となる。サイクル末期でも余剰の反応度が残されている場合に、ある程度制御棒が挿入され、挿入できる制御棒価

値が低下する場合は考えられるが、燃焼欠損反応度を補償するために最も深く制御棒が挿入されているサイクル初期に比べて小さくなることはない。

(5) 制御棒反応度収支の推定

解析により得られた制御棒価値に対しては各種の補正を施す必要があるが、本解析と同様な制御棒反応度価値評価手法を用いて「もんじゅ」性能試験での制御棒反応度価値を評価した際に求められた各種補正係数¹¹⁾を代用する。この際に、本炉心と同じ¹⁰B濃縮度(約90wt%)となる後備炉停止系制御棒の補正係数を若干制御棒反応度価値が小さめとなるようにまるめた。また、制御棒反応度価値の不確かさは、過去の設計例と同程度と仮定した。

これらの補正を考慮した制御棒反応度価値を表3.3.4-4に示しており、基準計算値より約20%小さく、2系統同時作動の場合で約5.8% k/kk' 、1系統単独作動の場合で約2.0% k/kk' となった。

前述の表3.3.4-1に示した各作動パターンでの役割分担を考慮して制御棒反応度収支を推定したものを表3.3.4-5に示す。

ここで、出力補償反応度についてはH11炉心のもので代用し、臨界性予測誤差、燃料交換余裕等は過去の設計例でのもので代用した。

長期的な反応度収支については、2系統を同時に作動させて対応するが、必要反応度約4% k/kk' に対して制御棒価値はワンロードスタック条件を考慮しても約5.8% k/kk' あり、約1.8% k/kk' の余裕がある。Pu富化度設定余裕約0.5% k/kk' を考慮した場合でも反応度余裕は1.4% k/kk' 程度が確保され、設計目標である0.4% k/kk' 以上を満足する。なお、Pu富化度設定余裕は、燃焼(運転期間)保証を確実にする観点で実効増倍率を意図的に高めに設定するものであり、運転実績を蓄積して臨界性予測誤差等が合理化できた場合には必ずしも必要のないものである。

また、長期的な反応度補償が2系統の制御棒で行われている状態で、1系統単独作動による原子炉スクラムを行う場合に、冷温停止に至るまで必要な反応度は約1.2% k/kk' であり、当該系統のワンロードスタック及び他系統の制御棒誤引き抜きを考慮した制御棒価値は約2% k/kk' であることから、反応度停止余裕として約0.8% k/kk' が確保されている。これは設計目標である0.4% k/kk' 以上を満足するものである。

このように、本炉心案では制御棒本数を従来設計例に比べて相対的に削減しているが、長期的な反応度制御及び瞬時的な原子炉スクラムにおいて要求される制御棒反応度収支が成立する見通しである。

表3.3.4-1 反応度制御系の役割分担

	2系統同時作動 (燃焼欠損反応度等の長期的 反応度制御)	1系統のみ作動 (瞬時的スクラム)
1 . 出力補償 冷温停止 高温停止 2 . 燃焼補償 3 . 運転余裕 4 . 反応度不確かさ補償 5 . 反応度停止余裕 6 . Pu富化度設定余裕		(出力補償分のみ)
要求想定	ワンロッドスタック(長期的な反応度制御の観点では必ずしも必要ではないが、適切な安全余裕として考慮する)	長期的反応度制御補償状態 ^{*1} 他系統1本の制御棒誤引抜き ^{*2} 当該系統制御棒のワンロッドスタック ^{*3}

* 1 燃焼欠損反応度等を補償するように両系の制御棒は部分挿入状態

対象とした系統の部分挿入から全挿入までの残余の反応度価値が対象となる

* 2 制御棒誤引き抜き事故での炉停止を想定

* 3 最大価値を有する制御棒1本は長期的反応度制御補償を行った部分挿入状態のまま

表3.3.4-2 2系統同時作動時における制御棒価値^{*1}

運転サイクル	制御棒挿入状態 ^{*2}	実効増倍率 keff	制御棒価値 % k/kk' ^{*3}
平衡初期	全引抜き (Naフォロー)	1.01683	
	炉心上端 (ハ°-ク位置)	1.01111	(0.56)
	15cm挿入	1.00778	0.33
	30cm挿入	0.99502	1.60
	40cm挿入	0.98649	2.47
	60cm挿入	0.96653	4.56
	全挿入 (120cm挿入)	0.92804	8.85
平衡末期	全引抜き (Naフォロー)	1.00159	
	炉心上端 (ハ°-ク位置)	0.99632	(0.53)

< 制御棒 2 系統同時作動時のワレット⁶ スタックにおける制御棒価値 >

運転サイクル	制御棒挿入状態 ^{*2}			実効増倍率 keff	制御棒価値 % k/kk' ^{*3}
	挿入位置	スタック位置	スタック制御棒		
平衡初期	ハ°-ク位置			1.01111	
	全挿入	ハ°-ク位置	第1リング ^{*4}	0.92942	8.69
			第2リング ^{*4}	0.93028	8.59
			第3リング ^{*4}	0.94209	7.25

*1 制御棒断面積作成時に非均質効果を考慮している

*2 制御棒の挿入深度は炉心上端からの深さで示している

*3 ハ°-ク位置を基準とした反応度変化である
ただし、() 内はNaフォローを基準とした値である

*4 第1/第2/第3 : No.40/No.130/No.274

表3.3.4-3 1系統単独作動時における制御棒価値^{*1}

運転サイクル	制御棒挿入状態 ^{*2}		実効増倍率 keff	制御棒価値 % k/kk' ^{*3}	備考	
	系統 - A	系統 - B				
平衡初期	ハ°-ク位置	ハ°-ク位置	1.01111	-	炉心上端	
	40cm挿入	40cm挿入	0.98649	- (2.47)	基準状態	
	全挿入	40cm挿入	0.95420	3.43 (5.90)		
	ワレット スタック	ワレット 誤引き 抜き		0.95847	2.96 (5.43)	第2リング No.140 スタック 第2リング No.137 誤引き抜き
				0.96307	2.47 (4.93)	第3リング No.277 スタック 第3リング No.274 誤引き抜き
				0.96258	2.52 (4.99)	第3リング No.277 スタック 第3リング No.280 誤引き抜き
				0.96318	2.45 (4.92)	第3リング No.284 スタック 第3リング No.280 誤引き抜き
				0.96294	2.48 (4.95)	第3リング No.284 スタック 第3リング No.287 誤引き抜き
				0.96193	2.59 (5.06)	第3リング No.290 スタック 第3リング No.287 誤引き抜き
				0.96264	2.51 (4.98)	第3リング No.290 スタック 第3リング No.294 誤引き抜き
	全挿入		0.92804	6.39 (8.85)		
平衡末期	ハ°-ク位置		0.99632	-	基準状態	
	全挿入	ハ°-ク位置	0.95287	4.58		
	ワレット スタック	ハ°-ク位置	0.96122	3.66	第3リング No.290 スタック	

*1 制御棒断面積作成時に非均質効果を考慮している

*2 制御棒の挿入深度は炉心上端からの深さで示している

*3 40cm挿入を基準とした反応度変化である。ただし、()内はハ°-ク位置を基準とした値である

表3.3.4-4 各種補正を考慮した場合の制御棒価値の推定

	2系統同時作動 ワンロードスタック時 (% k/kk')	1系統単独作動 ワンロードスタック & 誤引き抜き時 (% k/kk')	備考
解析ノミナル値	7.25	2.45	
メッシュ補正	1.03	1.03	
群縮約補正	0.96	0.96	「もんじゅ」後備系制御棒 より代用
輸送理論補正	0.95	0.95	
非均質補正(残留分)	0.94	0.94	
不確かさ9%(3 相当)	0.91	0.91	過去の設計例より代用
補正後の制御棒価値	5.83	1.97	

表3.3.4-5 制御棒反応度収支の推定

		2系統同時作動時 ワンロッドスタック時 (% k/kk')	1系統単独作動時 ワンロッドスタック& 誤引抜き時 (% k/kk')	備考
I. 計画余剰 反応度	合計	2.62	0.93	
	1.出力補償反応度	0.93	0.93	H11炉心計算値代用
	2.燃焼補償反応度	1.49		計算値
	3.運転余裕	0.2		過去の設計例からの代用
II. 余剰反応 度不確かさ (3)	合計	1.37	0.28	
	(1)臨界性予測誤差	1.20		過去の設計例からの代用
	(2)出力補償予測誤差	-	0.28	出力補償反応度の30%(3 相当)
	(3)燃料製作公差	0.60		もんじゅ設計からの代用
	(4)燃料交換余裕	0.30		過去の設計例からの代用
III. 必要制御反応度(=I + II)		3.99	1.21	
IV. 制御棒反応度価値		5.83	1.97	
V. 反応度停止余裕(=IV - III)		1.84	0.76	0.40% k/kk'以上

Pu富化度設定余裕を考慮した場合の制御棒反応度収支

		2系統同時作動時 ワンロッドスタック時 (% k/kk')	備考
I'. Pu富化度設定余裕(1)		0.46	
(1)臨界性予測誤差		0.40	過去の設計例からの代用
(2)出力補償予測誤差		0.09	出力補償反応度の10%
(3)燃料製作公差		0.12	もんじゅ設計からの代用
(4)燃料交換余裕		0.10	過去の設計例からの代用
(5)燃焼補償予測誤差		0.14	燃焼補償反応度の10%
III'. 必要制御反応度(=I' + II')		4.46	
IV. 制御棒反応度価値		5.83	
V'. 反応度停止余裕(=IV - III')		1.37	0.40% k/kk'以上

3.3.5 制御棒誤引き抜き時の出力歪

大型炉心では核的なデカップリングが大きくなる傾向があり、制御棒誤引き抜きなどの局所外乱による影響が炉心全体に伝播されず、出力分布に局所的な歪みが生じる場合がある。このため、制御棒挿入に伴う出力分布変化及び制御棒誤引き抜きによる出力歪の発生状況について把握する。

(1) 計算手法

- ・使用コード MOSES/DIF3D 3次元拡散計算
- ・計算オプション Hex-Z ノード法
- ・ライブラリ JFS-3-J3.2 統合炉定数 (ADJ98)
- ・群数 7群
- ・燃料組成 平衡サイクル初期 (2次元 RZ 体系燃焼計算)

ここで、MOSES コードにおける計算オプションとして Tri-Z 詳細計算ではなく、中性子束を連続的に扱う Hex-Z ノード法を選択したのは本炉心のように大型バンドルを用いた場合には詳細メッシュであってもメッシュ幅が比較的大きくなり、制御棒周辺での出力分布を Hex-Z ノード法の方がより忠実に評価できるためである。

(2) 制御棒の挿入パターン

まず、炉内の径方向位置に応じた核的デカップリング状況を把握するために、全ての制御棒がパーク位置にある状態を基準として、そのうち1本が挿入される際の出力歪状況を評価した。

ついで、実際の制御棒誤引き抜き事象を模擬するものとして、サイクル初期での制御棒挿入位置に相当する全制御棒 40cm 挿入状態から1本の制御棒がパーク位置まで引き抜かれる状況を想定した。

ここで、前述の図 3.3.4-1 に示すように制御棒が概ね3つのリング状に配置されていることから、評価対象とする制御棒を各リングから1本ずつ (No.48、No.144、No.290) 選択して、これらで代表させることとした。

なお、全引き抜き状態から、1本を選択して制御棒を挿入するケースにおいて、挿入深度として40cm、80cm、120cm (全挿入) の3段階を考慮した。

(3) 集合体出力変動の感度

燃料集合体 i の集合体出力変化率 (α_i) を次式で定義した。

$$\alpha_i = \frac{P_i^p - P_i}{P_i} \times 100(\%)$$

ここで

P_i : 基準体系 (制御棒挿入前の状態) の集合体出力

P_i^p : 摂動体系 (制御棒挿入後の状態) の集合体出力

とする。

また、制御棒挿入時の出力歪は印加される制御棒反応度にも依存することから、挿入反応度当たりの出力変化率 (γ_i) を下記のように定義した。

$$\gamma_i \equiv \frac{\alpha_i}{|\Delta\rho|}$$

$$\text{ただし、制御棒挿入反応度 } \Delta\rho = \frac{k_{\text{eff}}^p - k_{\text{eff}}^0}{k_{\text{eff}}^0 k_{\text{eff}}^p} \times 100 (\%)$$

k_{eff}^0 : 基準体系の実効増倍率

k_{eff}^p : 摂動体系の実効増倍率

とする。

(4) 制御棒 1 本挿入による集合体出力変動の解析結果

制御棒をパーク位置とした状態から各リングにおいて着目した制御棒 (No.48、No.144、No.290) のみをそれぞれ 40cm、80cm、120cm 挿入した場合での挿入反応度、着目した制御棒に隣接した 6 体の集合体の平均集合体出力に対する変化率等を表 3.3.5-1 に示す。制御棒 1 本の反応度価値としては、第 1 リング (0.21% k/kk')、第 2 リング (0.18% k/kk')、第 3 リング (0.12% k/kk') の順に小さく、炉心外周部へ向かって低下している。一方、隣接集合体で平均した出力変化幅は炉心外周部ほど大きく、全挿入した場合に第 1 リングでは約 50%、第 2 リングでは約 56%、第 3 リングでは約 59% 低下している。このため、挿入反応度当たりの出力変化幅は外周部で大きくなり、第 3 リングの挿入反応度当たりの出力変化幅は第 1 リングの 2 倍以上となっている。

また、各集合体の集合体出力変化率に対する炉内分布を図 3.3.5-1 に示す。各リングの制御棒の挿入深度を深くするにつれて制御棒周辺での出力が、より低下している。また、制御棒周辺での出力低下幅は挿入される制御棒位置が炉心の周辺に近づくとつれて大きくなっている。ここで、全炉心出力を保存しているため、制御棒が挿入された反対側の領域で逆に出力の増加が生じている。

挿入反応度当たりの出力変化率の炉内分布を図 3.3.5-2 に示す。挿入反応度当たりの出力変化率は制御棒挿入深度に依らず、専ら制御棒位置に依存することが示される。挿入反応度当たりの出力変化率は炉心中心から離れた制御棒を挿入した場合の方がより深くなっている。これは、大型炉心における炉心周辺部でのデ

カップリングの拡大、換言すれば、摂動を加える制御棒領域と他領域との核的結合程度の低下を表していると考えられる。

(5) 制御棒 1 本誤引き抜きによる集合体変動の解析結果

サイクル初期において燃焼欠損反応度に対応して全制御棒を 40cm 挿入している状態から、No.48、No.144、No.290 制御棒のうち、各 1 本をそれぞれパーク位置まで引き抜いた場合における出力変化状況を表 3.3.5-2 及び図 3.3.5-3 に示す。なお、図 3.3.5-3 では上部に各集合体の出力変化率を、下部に挿入反応度当たりの出力変化率を示している。

ここで、全制御棒が 40cm 挿入状態から 1 本だけパーク位置まで引き抜いた際の反応度価値は、リング毎の依存性が小さく、いずれも $0.08\% \quad k/k'$ 程度であるため、集合体出力の変化率と挿入反応度当たりの変化率は類似した分布形状を示している。

制御棒 1 本の誤引き抜きを想定した場合に、隣接集合体の集合体出力は、第 1 リングで約 24%、第 2 リングで約 28%、第 3 リングで約 43% 増加しており、出力歪が炉心外周部のリングにおいてより大きくなることが示される。特に、第 3 リングにおいては、制御棒から外周方向に向かう位置の集合体の出力がより増加している。

大型炉心では核的デカップリングが大きく、制御棒誤引き抜き時の出力歪が大きくなる傾向がある。この出力歪の増加は、制御棒誤引き抜き時において確実に出力変化を捉えるために必要となる中性子計装の装置数を増加させることとなる。

本検討で明らかになったように、制御棒誤引き抜き時の出力歪は制御棒位置に大きく依存し、外周部に近づくほど大きくなる。ここで、制御棒配置検討において、外周部を避け、炉心中央部に優先させて制御棒を配置することで出力歪を抑制できることは注目に値する。なお、本炉心においては、出力分布の適性を考慮した上で、過去の設計例に比べて意識的に制御棒を中央よりに配置している。また、本炉心のように、燃焼特性を改善し、燃焼欠損反応度を低下させることは、サイクル初期での制御棒の挿入深度を低減することになり、制御棒誤引き抜き時の出力歪の抑制にも寄与すると考えられる。

表3.3.5-1 制御棒1本挿入時の出力変化率

制御棒	挿入位置 (cm)	実効増倍率 k_{eff}	挿入反応度 (% k/kk')	隣接集合体の 平均集合体出力 ^{*2} (MW)	隣接集合体の 出力変化率 ^{*3} (%)	挿入反応度当 たりの変化率 (-)
No.48 (第1リング)	0 ^{*1}	1.01079		8.42		
	40	1.00995	-0.083	6.80	-19.3	-233.2
	80	1.00895	-0.181	4.87	-42.1	-232.6
	120	1.00865	-0.211	4.21	-50.0	-237.2
No.144 (第2リング)	0 ^{*1}	1.01079		8.19		
	40	1.01003	-0.074	6.35	-22.5	-302.2
	80	1.00922	-0.155	4.28	-47.7	-307.7
	120	1.00899	-0.178	3.64	-55.6	-312.9
No.290 (第3リング)	0 ^{*1}	1.01079		7.00		
	40	1.01026	-0.052	5.20	-25.7	-495.3
	80	1.00974	-0.104	3.38	-51.7	-498.3
	120	1.00960	-0.117	2.85	-59.3	-505.9

*1 全制御棒パーク位置;基準状態

*2 制御棒に隣接した集合体6体の平均出力

*3 $\Delta P/P \times 100$

P:基準体系(制御棒パーク位置)における集合体出力、P':擾動体系(制御棒挿入状態)における集合体出力

表3.3.5-2 制御棒誤引き抜き時の出力変化率

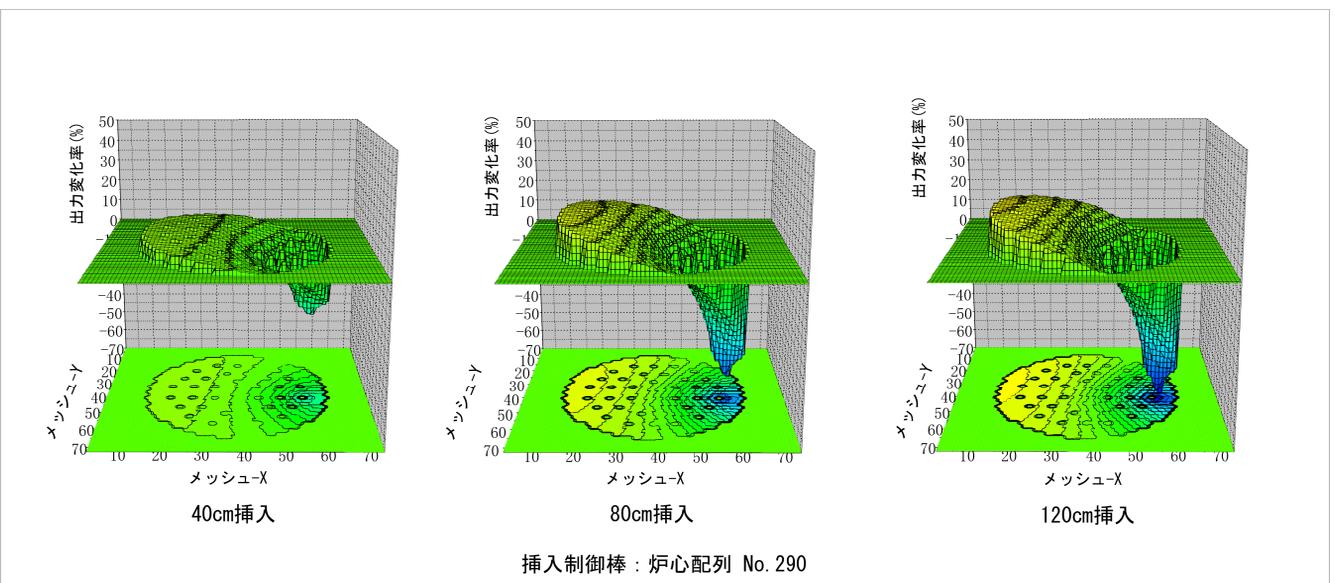
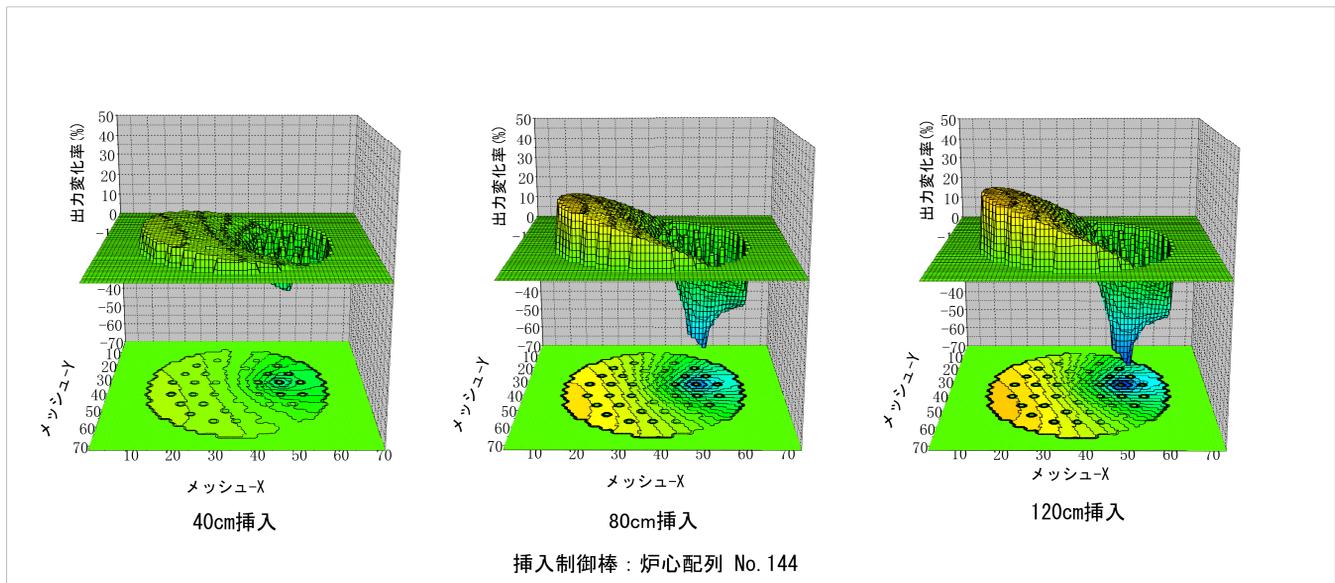
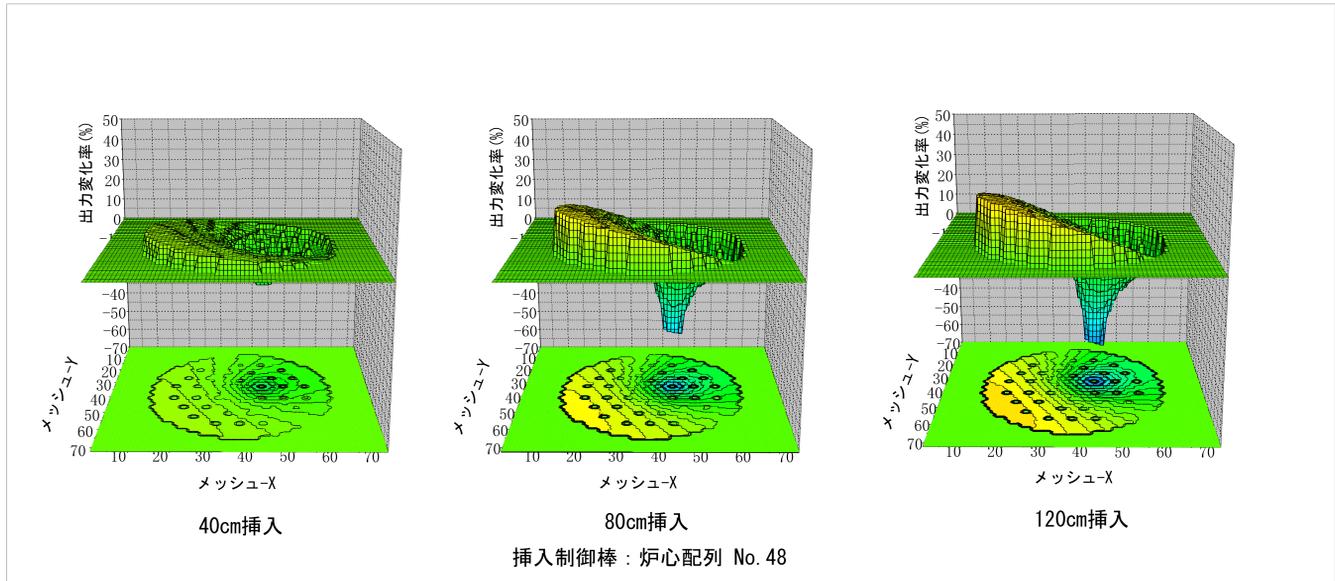
制御棒状態		実効増倍率 k_{eff}	挿入反応度 (% k/kk')	隣接集合体の 平均集合体出力 ^{*3} (MW)	隣接集合体の 出力変化率 ^{*4} (%)	挿入反応度当 たりの変化率 (-)
全制御棒パーク位置		1.01079				
No.48 (第1リング)	基準 ^{*1}	0.98431		7.57		
	引抜き ^{*2}	0.98512	0.0823	9.38	23.9	290.9
No.144 (第2リング)	基準 ^{*1}	0.98431		7.36		
	引抜き ^{*2}	0.98507	0.0769	9.41	27.8	361.3
No.290 (第3リング)	基準 ^{*1}	0.98431		6.91		
	引抜き ^{*2}	0.98512	0.0823	9.89	43.1	524.0

*1 全制御棒40cm挿入位置(40cm挿入時の制御棒価値2.66% k/kk') *2 対象制御棒のみパーク位置

*3 制御棒に隣接した集合体6体の平均出力

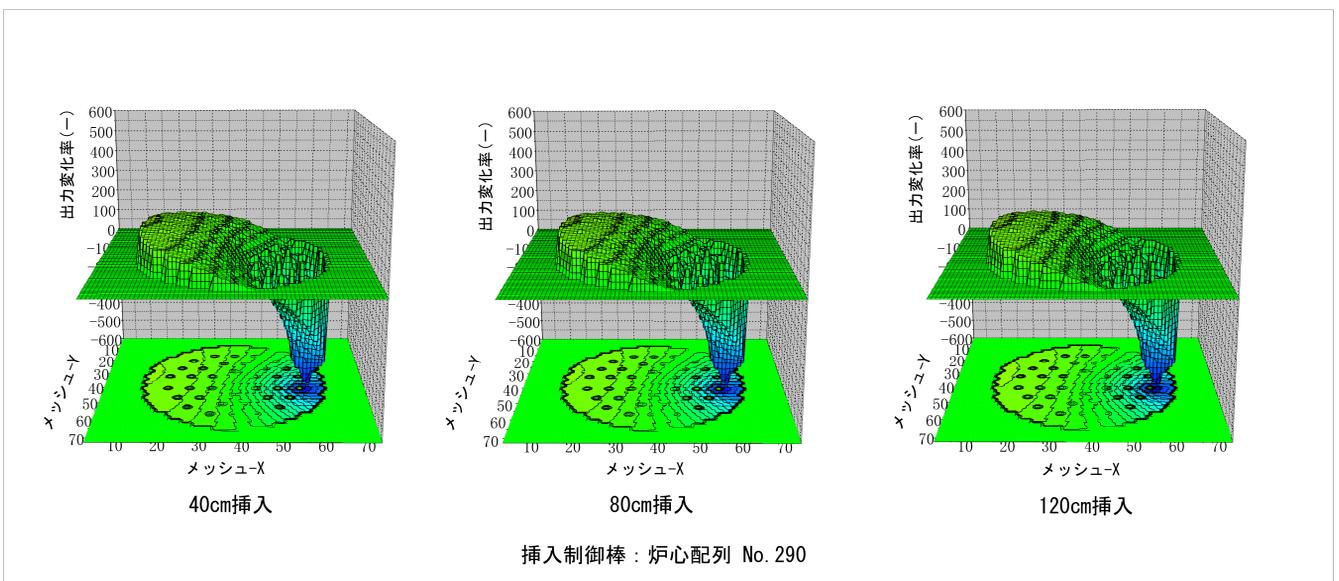
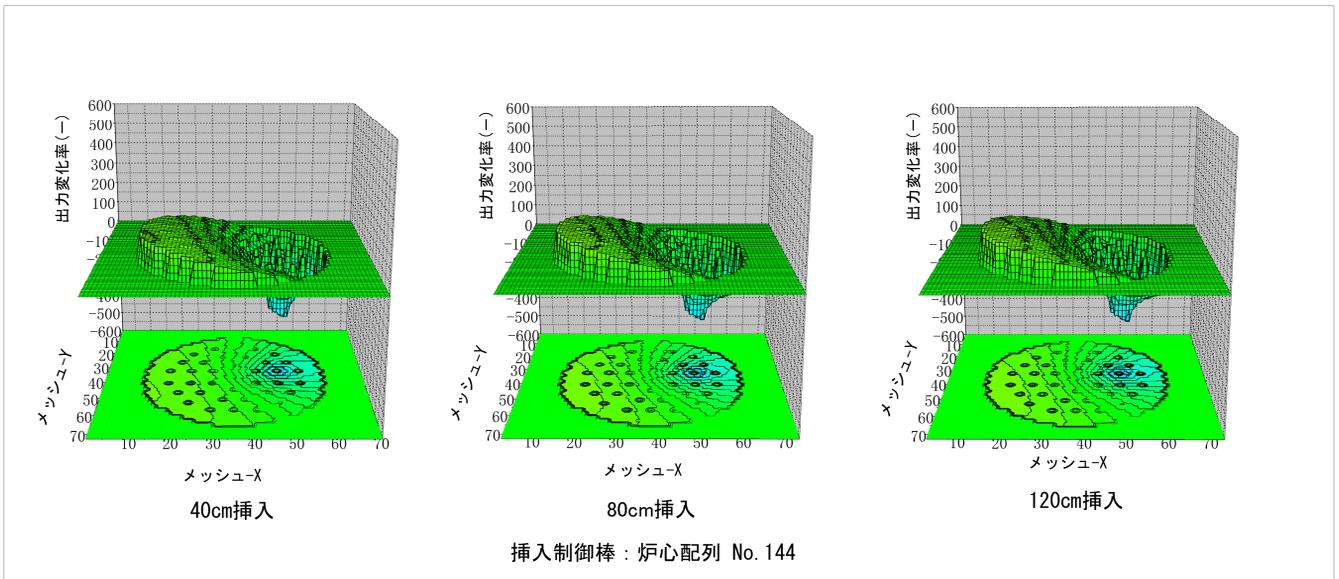
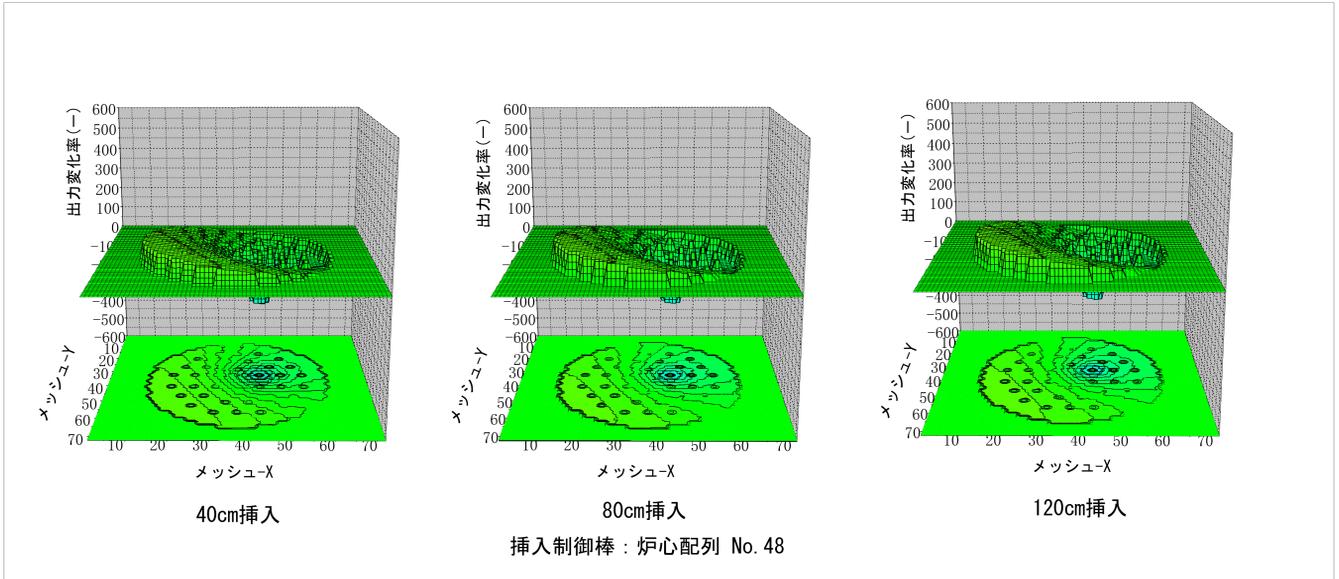
*4 $= (P' - P) / P * 100$

P: 基準体系(制御棒パーク位置)における集合体出力、P': 摂動体系(制御棒挿入状態)における集合体出力



$$\frac{(\text{制御棒挿入時出力}) - (\text{Park時出力})}{\text{Park時出力}} \times 100 (\%)$$

図3. 3. 5-1 各制御棒 1 体挿入における出力変化率



出力変化率(%)
 制御棒挿入反応度(%)

図3.3.5-2 各制御棒1体挿入における挿入反応度当たりの出力変化率

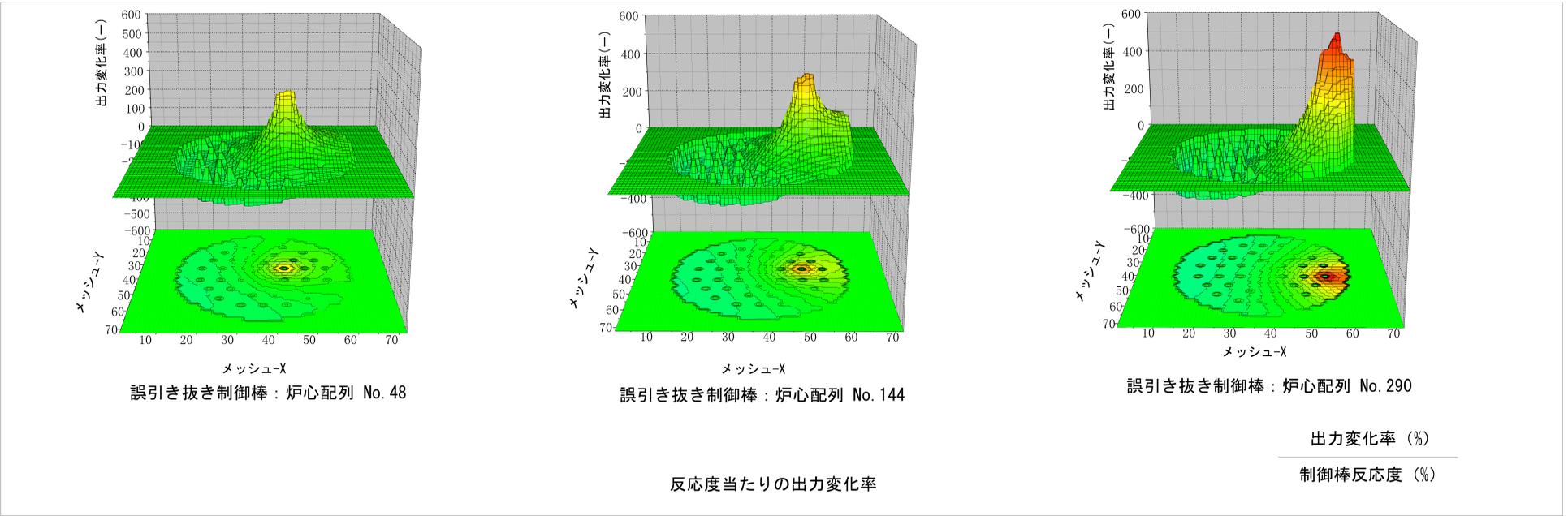
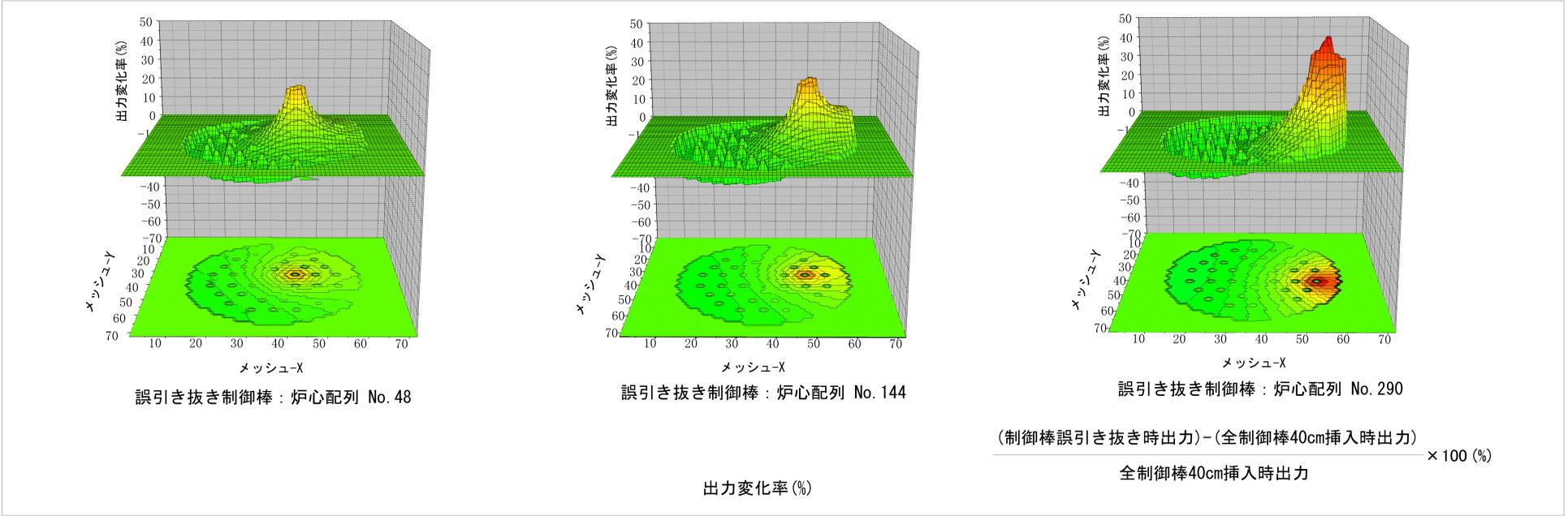


図3.3.5-3 各制御棒1体誤引き抜き時の出力変化

3.4 熱流設計検討

3.4.1 被覆管 CDF 評価

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した本炉心の内側、中間及び外側炉心において、最も厳しい条件の燃料要素の被覆管 CDF 評価を実施し、CDF 制限目安を満足する被覆管最高温度を把握する。

(1) 評価条件

3.3.3 で示した流量領域毎の集合体出力履歴に基づいて被覆管最高温度履歴を設定し、被覆管 CDF 評価を実施する。この際に、内側炉心、中間炉心及び外側炉心の単位で被覆管温度を階段状に包絡させた温度履歴を対象とする。また、寿命中の被覆管最高温度について、ODS 鋼の開発目標の 700 から被覆管 CDF 評価値が成立性を判断する目安値を満足するまで 5 づつ低下させて評価を行う。

ここで、被覆管 CDF の成立性目安値については、今後、詳細に検討する必要があるが、過去の検討例を参考に、過渡変化による追加分、使用済み燃料の取扱い中の増加分等を考慮して、炉内の定常運転への割り当て分として暫定的に 0.5 未満とする。

また、同一被覆管温度履歴においては燃料要素内圧が高くなるほど、被覆管 CDF は大きくなり、また、炉心領域毎に包絡した被覆管温度履歴を対象とすることから、炉心領域毎に燃料要素平均燃焼度が最も高い燃料要素を代表させて評価する。ただし、外側炉心では燃焼するサイクル期間が 2 種類あることから、これらを区別して評価する。

CDF 評価用の燃料要素仕様

CDF 評価のために暫定的に設定した燃料要素仕様を表 3.4.1-1 に示す。ここで、蒸発性不純物仕様、He ガス封入圧、冷却材外圧、被覆管肉厚の公差等については「もんじゅ」燃料に対する評価条件を参考に暫定的に設定した。

「3.2 炉心・燃料仕様の設定」における被覆管 CDF 評価においては、第 1 次推定として上部ガスプレナム長さを 285mm としたが、後述するように Na ボイド反応度を低減する Na プレナム効果を高めるため、上部ガスプレナム長さを 50mm に短縮した。なお、上部ガスプレナムには、燃料輸送時等のペレットスタックの移動防止用の構造部材の体積として自由体積の約 2 割に相当する 1 cm^3 を考慮する。

この上部ガスプレナム長さの短縮に伴って、下部ガスプレナム長さについても第 1 次推定での 1000mm から見直し、被覆管 CDF の成立性を確保する観点、燃料集合体の全長の観点から暫定的に 1355mm とした。この内部増殖炉心の燃料集合体の軸方向寸法を参考として図 3.4.1-1 に示す。

CDF 評価用被覆管温度履歴の設定

2次元RZ燃焼計算による燃焼ミスマッチ及び3次元拡散計算による集合体出力を基に、流量領域毎に集合体出力が最大となる集合体に着目した集合体出力履歴を前述の表3.3.3-2に示している。

この集合体出力履歴に基づいて下記のように原子炉入口温度から被覆管温度までの温度上昇幅が集合体出力に比例するとして被覆管温度を概略的に推定した。

各時期の被覆管温度 = (寿命中の被覆管最高温度 - 原子炉入口温度) × 各時期の集合体出力 / 寿命中の最大集合体出力 + 原子炉入口温度

各流量領域に推定される被覆管温度履歴を表3.4.1-2~4に示す。ここで、内側炉心及び中間炉心に位置する流量領域1~6については寿命中の被覆管最高温度を700から5又は10低下させた場合の履歴も算出した。なお、流量領域3には炉心中心部に位置し、燃焼に伴う集合体出力の低減が少ない集合体が含まれており、これについても包絡させるように配慮した。

被覆管CDF評価においては、表3.4.1-5~7及び図3.4.1-2~7に示すように、炉心領域毎に被覆管温度を各サイクルにおいて5刻みで包絡するように被覆管温度履歴を設定した。

また、冷却材のミキシング効果等が期待できる上部ガスプレナム温度は被覆管最高温度から暫定的に10低く設定し、下部ガスプレナム温度は原子炉入口温度(395)に設定した。

クリープ破断強度式

ODS鋼のクリープ強度式については、下記に示すFS用に暫定的に提示されたものを使用した。なお、ODS鋼では炉内での強度低下(Na環境効果、熱時効、照射効果)が少ないとして、この式は大気中クリープ破断データを基に作成されている。

クリープ破断強度式(時間係数3)

$$\begin{aligned} \text{LMP} &= (T + 273.15) \times (35.12 + \log_{10}(3t_R)) \times 10^{-3} \\ &= 56.784 - 9.133 \times \log_{10} \text{SR} \end{aligned}$$

T: 被覆管肉厚中心温度()

t_R : クリープ破断時間(hr)

SR: 設計クリープ破断応力強さ(MPa)

(2) 評価結果

表3.4.1-8に、内側炉心、中間炉心及び外側炉心における最も厳しい条件の燃料要素の被覆管CDF評価値を示す。

被覆管最高温度を700に設定した冷却材流量配分を実施した場合に、燃焼末期

での被覆管温度が低下している外側炉心の被覆管 CDF は 0.12 (9 サイクル燃焼、177GWd/t) 及び 0.27 (8 サイクル燃焼、187GWd/t) であり、成立性目安とした 0.5 未満を満足している。

一方、内側及び中間炉心では燃焼に伴う集合体出力の低下が小さく、寿命中の被覆管最高温度の低下がゆるやかであったため、被覆管最高温度を 700 とした場合に、被覆管 CDF は 1 未満であるものの目安とした 0.5 を上回った。このため、中間炉心では被覆管最高温度を 695 まで、内側炉心では 690 まで低下させるように冷却材流量を若干多く配分することを前提とすると、被覆管 CDF はそれぞれ、0.40、0.35 と 0.5 未満となる。

このように、被覆管 CDF の成立性を確保するためには、被覆管最高温度を内側炉心について 690 程度に、中間炉心について 695 程度に、外側炉心について 700 程度に制限する必要があることが示された。

なお、これらの被覆管最高温度設定に対する冷却材流量配分及びバンドル部圧損評価については 3.4.2 に、ヒートバランスについては 3.4.3 に後述する。

表3.4.1-1 被覆管CDF評価用燃料要素仕様

項目	単位	値	備考
燃料ペレット外径	mm	10.4	
燃料ペレット内径	mm	3.4	
燃料ペレット密度	%TD	95	
燃料スミア密度	%TD	82	
燃料蒸発性不純物量	μl/g oxide	180	「もんじゅ」仕様準拠
炉心燃料重量	g metal	839.1	
軸ブランケット燃料蒸発性不純物量	μl/g oxide	50	「もんじゅ」仕様準拠
軸ブランケット燃料重量	g metal	167.9	
被覆管材質	-	ODS鋼	
被覆管外径	mm	12.00	
被覆管内径	mm	10.58	
被覆管肉厚	mm	0.71公差0.04	
腐食代	mm	0.1	
炉心燃料長さ	mm	1200	
断熱ペレット長さ(上部)*	mm	15	劣化ウラン酸化物
下部軸ブランケット長さ*	mm	200	劣化ウラン酸化物
上部プレナム長さ	mm	50	
下部プレナム長さ	mm	1355	
プレナム構造物体積	cm ³	1	上部プレナム中
初期封入ガス圧力	kg/cm ² a	1	「もんじゅ」準拠
冷却材圧力	kg/mm ²	0.015	「もんじゅ」準拠
運転サイクル期間	EFPD	630	
サイクル数(第1, 2 & 3 流量領域)	回	6	
〃(第4, 5 & 6 流量領域)	回	7	
〃(第7 & 8 流量領域)	回	8	
〃(第9 & 10 流量領域)	回	9	
要素平均燃焼度(第1 流量領域)	GWd/t	<u>171.6</u>	内側炉心
〃(第2 流量領域)	〃	163.9	〃
〃(第3 流量領域)	〃	160.6	〃
〃(第4 流量領域)	〃	<u>180.2</u>	中間炉心
〃(第5 流量領域)	〃	167.1	〃
〃(第6 流量領域)	〃	158.0	〃
〃(第7 流量領域)	〃	<u>187.0</u>	外側炉心
〃(第8 流量領域)	〃	175.6	〃
〃(第9 流量領域)	〃	<u>176.9</u>	〃
〃(第10 流量領域)	〃	144.0	〃

* 軸ブランケットの燃焼度は流量領域毎に炉心部の要素平均燃焼度の約2割と仮定した

表3.4.1-2 各流量領域の被覆管温度履歴（被覆管最高温度を700 とした場合） []

領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル		
	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	
内側炉心	第1流量領域 (No.38)	677	700	677	699	677	697	675	694	672	690	667	684						
	第2流量領域 (No.33)	656	700	656	699	655	696	652	693	649	688	645	683						
	第3流量領域 (No.2)	687	699	690	700	690	699	690	698	688	694	685	690						
中間炉心	第4流量領域 (No.218)	700	679	697	676	694	673	691	670	688	667	684	663	680	658				
	第5流量領域 (No.380)	700	673	697	671	694	668	691	665	688	662	684	659	681	655				
	第6流量領域 (No.451)	700	655	697	652	694	650	691	647	688	644	684	641	681	638				
外側炉心	第7流量領域 (No.450)	700	650	691	644	684	638	678	634	672	629	667	625	662	622	658	618		
	第8流量領域 (No.449)	700	659	691	653	684	647	678	642	672	638	667	634	662	630	658	626		
	第9流量領域 (No.526)	700	641	693	636	688	633	683	629	679	626	675	623	671	621	668	618	665	616
	第10流量領域 (No.611)	700	640	693	635	688	631	683	628	679	625	675	622	671	620	668	617	665	615

表3.4.1-3 各流量領域の被覆管温度履歴（被覆管最高温度を695 とした場合） []

領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル		
	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	
内側炉心	第1流量領域 (No.38)	672	695	673	694	672	692	670	689	667	685	663	680						
	第2流量領域 (No.33)	652	695	652	694	650	691	648	688	645	683	641	678						
	第3流量領域 (No.2)	682	694	685	695	686	694	685	693	683	690	680	686						
中間炉心	第4流量領域 (No.218)	695	674	692	672	689	669	686	666	683	662	679	658	675	654				
	第5流量領域 (No.380)	695	669	692	666	689	664	686	661	683	658	680	655	676	651				
	第6流量領域 (No.451)	695	650	692	648	689	645	686	643	683	640	680	637	676	634				

表3.4.1-4 各流量領域の被覆管温度履歴（被覆管最高温度を690 とした場合） []

領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル		
	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	
内側炉心	第1流量領域 (No.38)	667	690	668	689	667	687	666	684	662	680	658	675						
	第2流量領域 (No.33)	647	690	647	689	646	686	644	683	641	678	637	673						
	第3流量領域 (No.2)	678	689	680	690	681	690	680	688	678	685	675	681						
外側炉心	第3流量領域 (No.203)	666	690	666	689	665	687	663	684	660	680	656	675						

<参考 各流量領域の最大集合体出力履歴> [MW]

領域	第1サイクル		第2サイクル		第3サイクル		第4サイクル		第5サイクル		第6サイクル		第7サイクル		第8サイクル		第9サイクル		
	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期	
内側炉心	第1流量領域 (No.38)	8.39	9.09	8.41	9.07	8.39	9.01	8.33	8.91	8.24	8.78	8.12	8.62						
	第2流量領域 (No.33)	7.42	8.67	7.42	8.64	7.38	8.57	7.32	8.46	7.23	8.33	7.12	8.18						
	第3流量領域 (No.2)	7.74	8.06	7.81	8.09	7.84	8.07	7.82	8.02	7.77	7.94	7.69	7.83						
中間炉心	第3流量領域 (No.203)	7.55	8.22	7.54	8.18	7.51	8.12	7.45	8.04	7.38	7.93	7.28	7.81						
	第4流量領域 (No.218)	7.81	7.27	7.74	7.20	7.67	7.13	7.59	7.05	7.50	6.96	7.40	6.86	7.30	6.75				
	第5流量領域 (No.380)	7.37	6.72	7.29	6.66	7.22	6.60	7.15	6.53	7.07	6.45	6.99	6.37	6.90	6.29				
外側炉心	第6流量領域 (No.451)	7.03	5.98	6.96	5.93	6.89	5.87	6.82	5.81	6.75	5.74	6.67	5.67	6.59	5.59				
	第7流量領域 (No.450)	7.47	6.25	7.26	6.09	7.08	5.96	6.93	5.85	6.79	5.75	6.67	5.65	6.55	5.55	6.44	5.46		
	第8流量領域 (No.449)	6.88	5.95	6.68	5.81	6.51	5.69	6.37	5.58	6.25	5.48	6.14	5.38	6.03	5.30	5.93	5.21		
	第9流量領域 (No.526)	5.55	4.48	5.43	4.40	5.33	4.32	5.24	4.26	5.16	4.21	5.10	4.16	5.03	4.11	4.97	4.06	4.91	4.02
第10流量領域 (No.611)	4.37	3.51	4.27	3.44	4.19	3.38	4.12	3.34	4.06	3.29	4.01	3.25	3.96	3.22	3.91	3.18	3.86	3.14	

表3.4.1-5 CDF評価用被覆管温度履歴（被覆管最高温度：700 の場合）

単位：

項目		被覆管温度	上部プレナム温度	下部プレナム温度
内側炉心	第1、2 & 3 流量領域			
	第1 サイクル	700	690	395
	第2 サイクル	700	690	"
	第3 サイクル	700	690	"
	第4 サイクル	700	690	"
	第5 サイクル	695	685	"
中間炉心	第4、5 & 6 流量領域			
	第6 サイクル	695	685	"
	第1 サイクル	700	690	395
	第2 サイクル	700	690	"
	第3 サイクル	695	685	"
	第4 サイクル	695	685	"
	第5 サイクル	690	680	"
外側炉心	第7、8、9 & 10 流量領域			
	第6 サイクル	685	675	"
	第7 サイクル	685	675	"
	第1 サイクル	700	690	395
	第2 サイクル	695	685	"
	第3 サイクル	690	680	"
	第4 サイクル	685	675	"
	第5 サイクル	680	670	"
	第6 サイクル	675	665	"
第7 サイクル	675	665	"	
第8 サイクル	670	660	"	
第9 サイクル	665	655	"	

表3.4.1-6 CDF評価用被覆管温度履歴（被覆管最高温度：695 の場合）

単位：

項目		被覆管温度	上部プレナム温度	下部プレナム温度
内側炉心	第1、2 & 3 流量領域			
	第1 サイクル	695	685	395
	第2 サイクル	695	685	"
	第3 サイクル	695	685	"
	第4 サイクル	695	685	"
	第5 サイクル	690	680	"
中間炉心	第4、5 & 6 流量領域			
	第5 サイクル	690	680	"
	第1 サイクル	695	685	395
	第2 サイクル	695	685	"
	第3 サイクル	690	680	"
	第4 サイクル	690	680	"
	第5 サイクル	685	675	"
外側炉心	第6、7 流量領域			
	第6 サイクル	680	670	"
第7 サイクル	680	670	"	

表3.4.1-7 CDF評価用被覆管温度履歴（被覆管最高温度：690 の場合）

単位：

項目		被覆管温度	上部プレナム温度	下部プレナム温度
内側炉心	第1、2 & 3 流量領域			
	第1 サイクル	690	680	395
	第2 サイクル	690	680	"
	第3 サイクル	690	680	"
	第4 サイクル	690	680	"
	第5 サイクル	685	675	"
第6 サイクル	685	675	"	

表3.4.1-8 各炉心領域の被覆管CDF評価結果

	流量領域	サイクル数	平均燃焼度 (GWd/t)	被覆管最高温度 ()	内圧 (kg/mm ²)	応力 (kg/mm ²)	CDF(-)
内側炉心	第1	6	171.6	700	0.876	8.529	0.923
				695	0.876	8.528	0.572
				690	0.876	8.528	<u>0.352</u>
中間炉心	第4	7	180.2	700	0.917	8.932	0.647
				695	0.917	8.931	<u>0.398</u>
外側炉心	第7	8	187.0	700	0.949	9.249	<u>0.272</u>
	第9	9	176.9	700	0.901	8.773	<u>0.122</u>

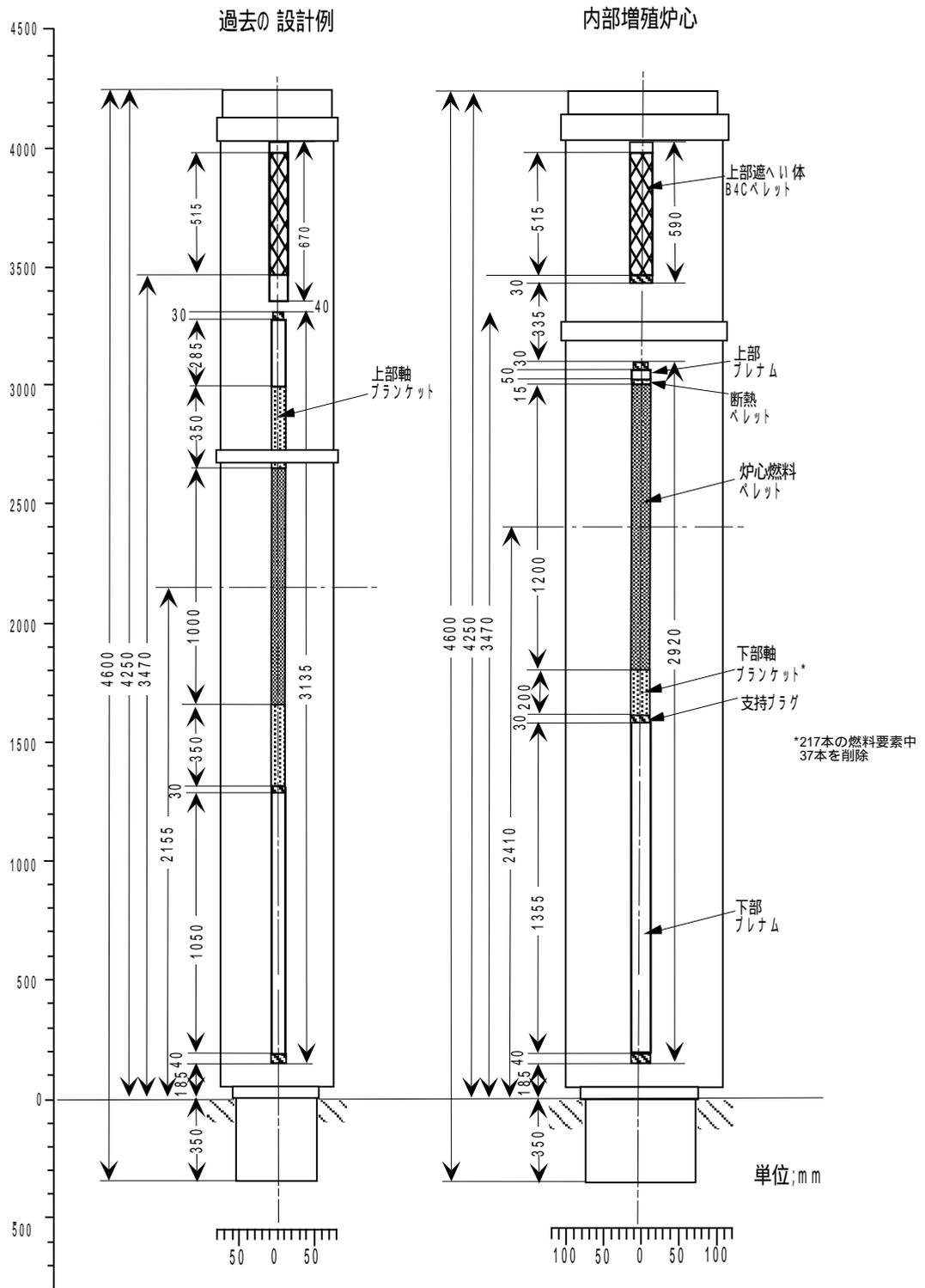
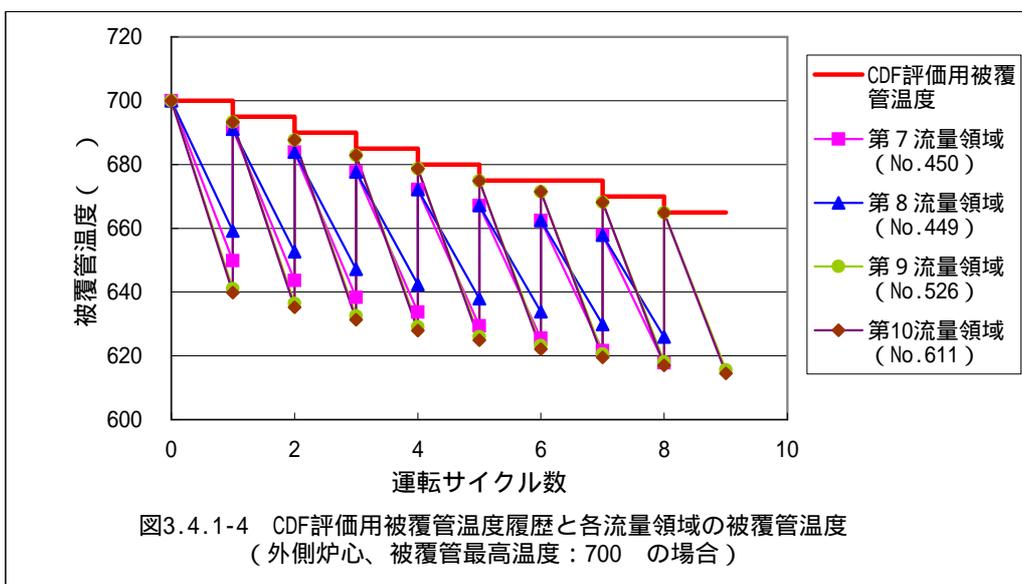
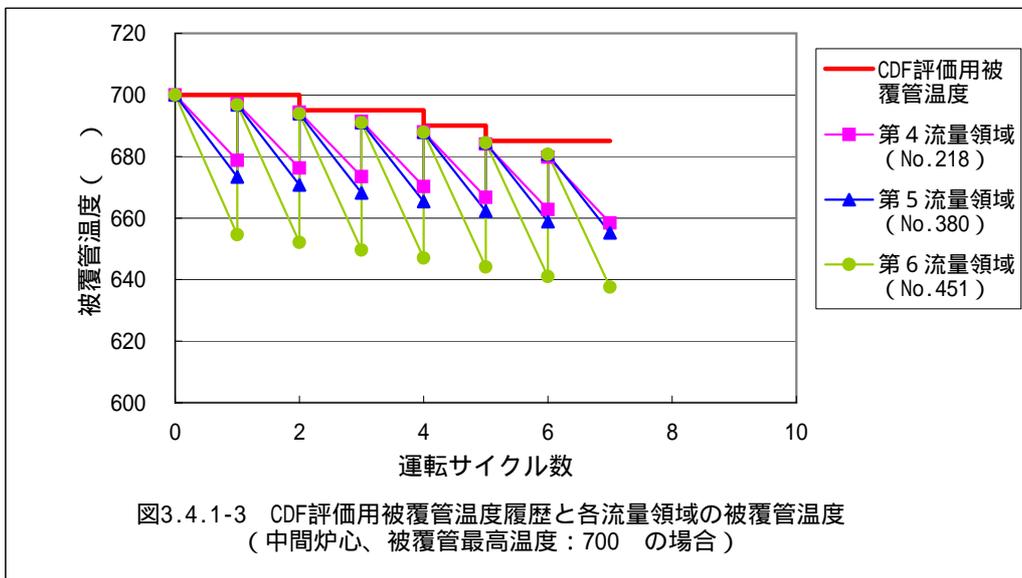
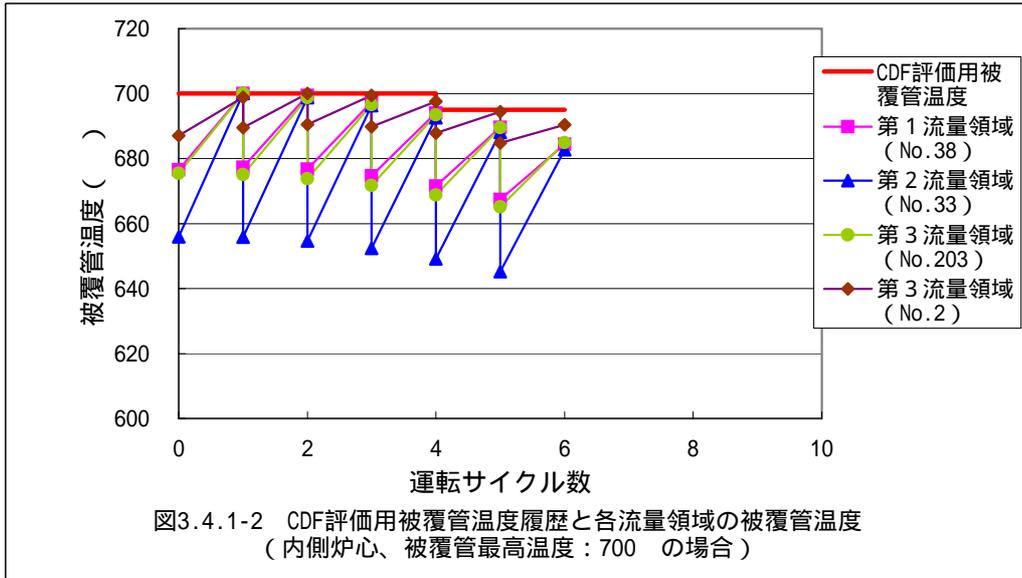
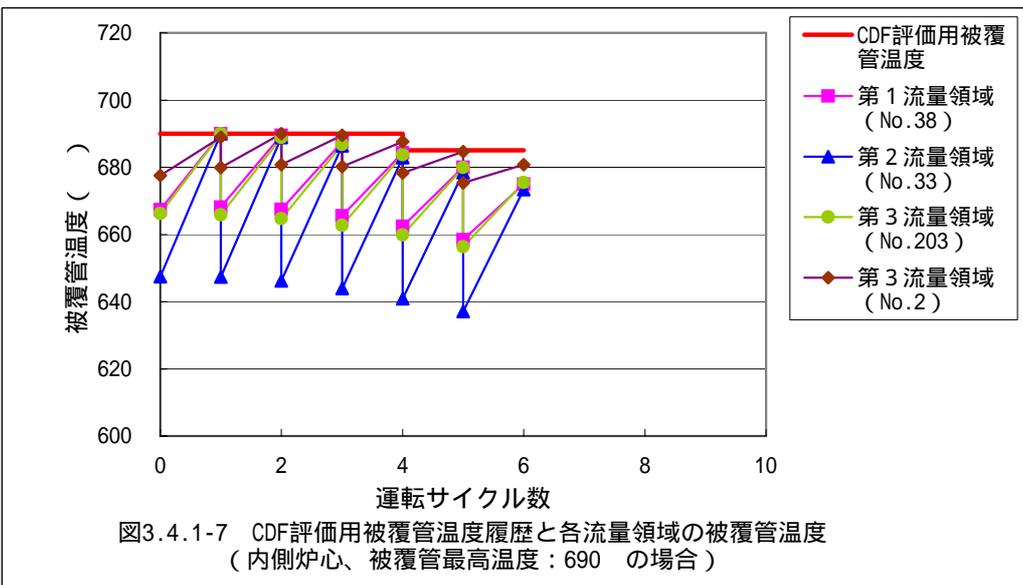
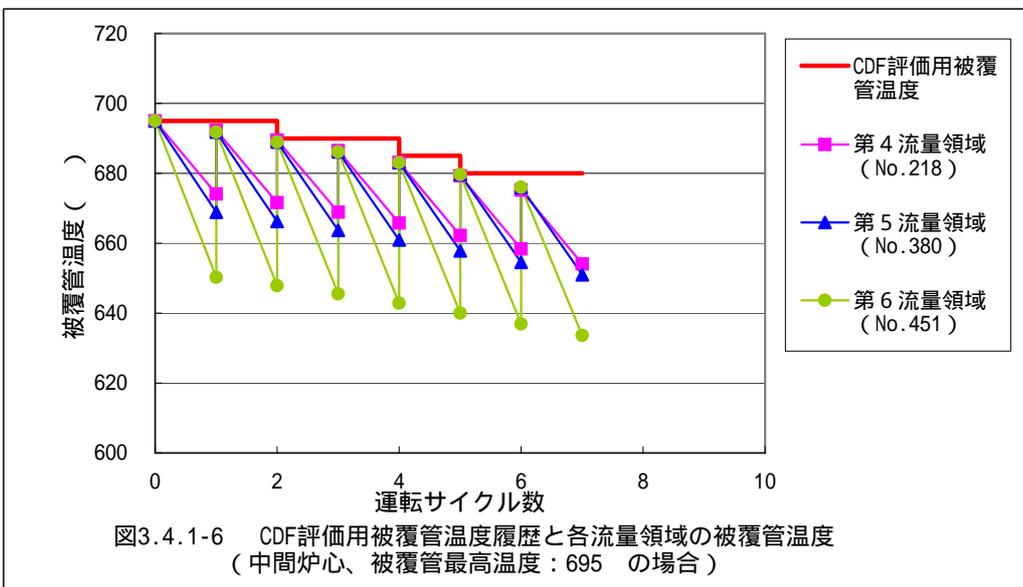
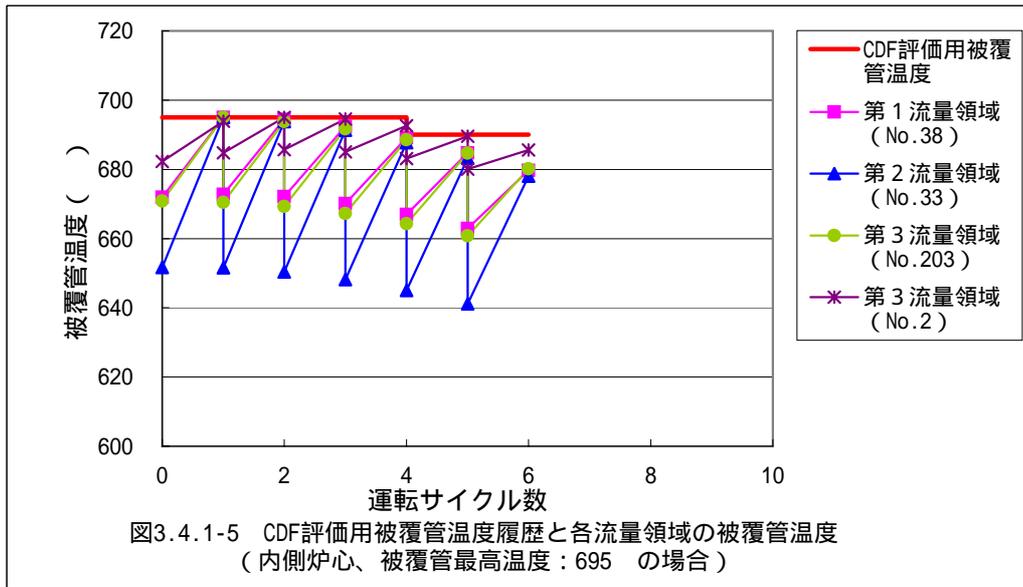


図 3.4.1 - 1 内部増殖炉心の燃料集合体軸方向寸法





3.4.2 熱流動サブチャンネル評価

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した本炉心に対して、熱流解析コード「FLOWER」を用いて、各流量領域の最大集合体出力となる燃料集合体に着目して目標とする被覆管最高温度（被覆管肉厚中心ホットスポット温度）を満足する冷却材必要流量を設定し、各流量領域のバンドル部圧力損失を求める。

ここで、前述の 3.4.1 被覆管 CDF 評価の結果から、CDF 評価の成立性見通しを得るために、被覆管最高温度の目標値を内側炉心に対して 690、中間炉心に対して 695、外側炉心に対して 700 とする。

(1) 評価条件

被覆管温度制限 ; 内側炉心 690、中間炉心 695、外側炉心 700

原子炉入口温度 ; 395

各流量領域の軸方向出力分布 ; 表 3.4.2-1 及び図 3.4.2-1

各流量領域において最大の集合体出力が発生する燃料集合体の軸方向分布を示す。集合体を代表させる観点から集合体の横断面ノード（六角柱）の平均出力密度に基づいて軸方向出力分布を算出している。また、表 3.4.2-1 には参考として当該集合体の最大線出力を併せて示している。

各流量領域の集合体内径方向出力分布 ; 図 3.4.2-2～図 3.4.2-11

燃料要素の軸方向積算出力を基準として集合体内径方向分布を算出している。ODS 鋼の熱伝導式 ; ODS 鋼の熱伝導式は策定されていないため、FMS 鋼の評価式⁸⁾を代用する。

ワイヤ巻き付けピッチ ; 200mm

燃料要素有効長 ; 2920mm (前述図 3.4.1-1 参照)

工学的安全係数 ; 表 3.4.2-2 (過去の設計例から準用)

冷却材及び被覆管温度の算出においては、炉心出力分布誤差、ペレット製作交差等の各種不確かさを考慮する。

ホットスポット温度評価式 ; 下式

$$T_{na}^{HS} = T_{in} + \Delta T_{na} \times \prod_i HS_i^{ns-na} \times \left(1 + \sqrt{\sum_i (HS_i^{s-na} - 1)^2} \right)$$

$$T_{\text{clad}}^{\text{HS}} = T_{\text{na}}^{\text{HS}} + \Delta T_{\text{film}} \times \prod_i \text{HS}_i^{\text{ns-film}} \times \left(1 + \sqrt{\sum_i (\text{HS}_i^{\text{s-film}} - 1)^2} \right) \\ + \frac{1}{2} \times \Delta T_{\text{clad}} \times \prod_i \text{HS}_i^{\text{ns-clad}} \times \left(1 + \sqrt{\sum_i (\text{HS}_i^{\text{s-clad}} - 1)^2} \right)$$

ここで

- T_{in} : 冷却材入口温度
- ΔT_{na} : ノミナル冷却材温度上昇
- ΔT_{film} : ノミナルフィルム温度上昇

- ΔT_{clad} : ノミナル被覆管温度上昇
- $T_{\text{na}}^{\text{HS}}$: ホットスポット冷却材温度
- $T_{\text{clad}}^{\text{HS}}$: ホットスポット被覆管肉厚中心温度
- $\text{HS}_i^{\text{ns-na}}$: 冷却材温度上昇に対する工学的安全係数 (乗算項)
- $\text{HS}_i^{\text{s-na}}$: 冷却材温度上昇に対する工学的安全係数 (統計項)
- $\text{HS}_i^{\text{ns-film}}$: フィルム温度上昇に対する工学的安全係数 (乗算項)
- $\text{HS}_i^{\text{s-film}}$: フィルム温度上昇に対する工学的安全係数 (統計項)
- $\text{HS}_i^{\text{ns-clad}}$: 被覆管温度上昇に対する工学的安全係数 (乗算項)
- $\text{HS}_i^{\text{s-clad}}$: 被覆管温度上昇に対する工学的安全係数 (統計項)

(2) 評価結果

各流量領域の最大集合体出力が発生する燃料集合体に対して被覆管最高温度（被覆管肉厚中心ホットスポット温度）が目標値を満足する冷却材必要流量及びバンドル圧力損失を表 3.4.2-3 に示す。なお、圧力損失においては、改良版 MIT 評価式⁷⁾を適用した。

最大の集合体出力（9.09MW）が発生し、被覆管最高温度を 690 にする必要がある第 1 流量領域で冷却材必要流量は最も大きくなり、35.5kg/sec であった。バンドル部の圧力損失は冷却材流量に応じて大きくなり、最大の冷却材必要流量 35.5kg/cm² に対して約 1.9kg/cm² であり、検討方針で設定した目標値約 2 kg/cm² 以下を満足した。

ただし、制御棒挿入深度変動等の各種の不確かさを考慮して、必要流量に対して余裕を持たせた流量を配分することが考えられ、冷却材流量が必要流量の約 3% 増の 36.3kg/cm² 以内であれば圧力損失の目標値を満足できる。

また、各種の安全係数を考慮しない被覆管ノミナル温度（肉厚中心）はホットスポット温度に比べて約 54 低い値であった。

表3.4.2-1 流量領域毎の軸方向出力分布

領域	下部軸ブラ下端からの距離 (cm) ()内は中央値	第1流量領域	第2流量領域	第3流量領域	第4流量領域	第5流量領域	第6流量領域	第7流量領域	第8流量領域	第9流量領域	第10流量領域
		EOEC	EOEC	EOEC	BOEC						
		集合体No.=38	集合体No.=33	集合体No.=203	集合体No.=218	集合体No.=380	集合体No.=451	集合体No.=450	集合体No.=449	集合体No.=449	集合体No.=526
断熱ベレット	140.0 ~ 141.5 (140.8)	0.1299	0.1289	0.2157	0.0363	0.0400	0.0426	0.0394	0.0391	0.1450	0.1637
炉心	135.0 ~ 140.0 (137.5)	0.4670	0.4717	0.5143	0.2881	0.3103	0.3292	0.2990	0.2948	0.3454	0.3817
	130.0 ~ 135.0 (132.5)	0.5743	0.5799	0.6014	0.3668	0.3948	0.4179	0.3793	0.3714	0.4236	0.4558
	125.0 ~ 130.0 (127.5)	0.6798	0.6846	0.6916	0.4470	0.4807	0.5076	0.4606	0.4498	0.5053	0.5356
	120.0 ~ 125.0 (122.5)	0.7673	0.7701	0.7638	0.5242	0.5627	0.5926	0.5379	0.5250	0.5747	0.6030
	115.0 ~ 120.0 (117.5)	0.8517	0.8534	0.8384	0.5992	0.6417	0.6734	0.6120	0.5978	0.6487	0.6757
	110.0 ~ 115.0 (112.5)	0.9238	0.9250	0.9034	0.6703	0.7155	0.7477	0.6809	0.6666	0.7176	0.7428
	105.0 ~ 110.0 (107.5)	0.8440	0.8443	0.8522	0.7365	0.7829	0.8144	0.7436	0.7303	0.7729	0.7958
	100.0 ~ 105.0 (102.5)	0.8873	0.8877	0.8935	0.7973	0.8433	0.8728	0.8004	0.7892	0.8288	0.8491
	95.0 ~ 100.0 (97.5)	0.9246	0.9251	0.9298	0.6931	0.7299	0.7516	0.8506	0.8422	0.8733	0.8904
	90.0 ~ 95.0 (92.5)	0.9539	0.9544	0.9577	0.7334	0.7680	0.7871	0.8944	0.8888	0.9150	0.9289
	85.0 ~ 90.0 (87.5)	0.9761	0.9766	0.9787	0.7695	0.8014	0.8177	0.9314	0.9282	0.9493	0.9596
	80.0 ~ 85.0 (82.5)	0.9915	0.9918	0.9931	0.7999	0.8290	0.8424	0.9610	0.9595	0.9738	0.9806
	75.0 ~ 80.0 (77.5)	0.9994	0.9995	1.0000	0.8242	0.8500	0.8609	0.9827	0.9823	0.9914	0.9947
	70.0 ~ 75.0 (72.5)	1.0000	1.0000	0.9997	0.8415	0.8639	0.8723	0.9958	0.9959	1.0000	1.0000
	65.0 ~ 70.0 (67.5)	0.9934	0.9932	0.9923	0.8515	0.8702	0.8765	1.0000	1.0000	0.9993	0.9962
	60.0 ~ 65.0 (62.5)	0.9791	0.9788	0.9771	0.8543	0.8690	0.8734	0.9949	0.9943	0.9937	0.9880
	55.0 ~ 60.0 (57.5)	0.9578	0.9573	0.9552	0.8490	0.8593	0.8621	0.9797	0.9779	0.9727	0.9647
	50.0 ~ 55.0 (52.5)	0.9291	0.9286	0.9260	0.8360	0.8417	0.8430	0.9539	0.9508	0.9409	0.9311
	45.0 ~ 50.0 (47.5)	0.8921	0.8918	0.8881	1.0000	1.0000	1.0000	0.9172	0.9125	0.9053	0.8943
	40.0 ~ 45.0 (42.5)	0.8488	0.8490	0.8449	0.9573	0.9515	0.9500	0.8677	0.8618	0.8510	0.8394
35.0 ~ 40.0 (37.5)	0.9331	0.9354	0.8990	0.8986	0.8873	0.8845	0.8056	0.7992	0.7932	0.7818	
30.0 ~ 35.0 (32.5)	0.8596	0.8642	0.8305	0.8235	0.8077	0.8036	0.7304	0.7242	0.7165	0.7061	
25.0 ~ 30.0 (27.5)	0.7799	0.7891	0.7610	0.7352	0.7161	0.7110	0.6453	0.6398	0.6397	0.6313	
20.0 ~ 25.0 (22.5)	0.6838	0.6982	0.6751	0.6354	0.6141	0.6083	0.5512	0.5470	0.5477	0.5427	
下部軸ブラ	15.0 ~ 20.0 (17.5)	0.1539	0.1572	0.2139	0.0653	0.0632	0.0624	0.0574	0.0570	0.1691	0.1680
	10.0 ~ 15.0 (12.5)	0.1303	0.1352	0.1851	0.0536	0.0511	0.0502	0.0461	0.0459	0.1360	0.1366
	5.0 ~ 10.0 (7.5)	0.0969	0.1012	0.1450	0.0350	0.0330	0.0323	0.0291	0.0291	0.1053	0.1072
	0.0 ~ 5.0 (2.5)	0.0881	0.0931	0.1350	0.0308	0.0286	0.0279	0.0251	0.0254	0.0931	0.0967
集合体出力 (MW)		9.09	8.67	8.22	7.81	7.37	7.03	7.47	6.88	5.55	4.37
最大線出力 (W/cm)		395	379	391	415	392	369	389	370	330	272

注1) 軸方向出力密度分布は軸方向の最大値を1.0に規格化したものである

注2) 平衡サイクル初期においては全ての制御棒を40cm挿入している

注3) 表中の破線は軸方向富化度分布における富化度境界を示している

表3.4.2-2 被覆管最高温度評価用工学的安全係数

処理法	因子	炉心燃料		
		T _{na}	T _{film}	T _{clad}
乗算処理	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05
	原子炉熱出力誤差	1.00	1.02	1.02
	流路変形誤差	1.03	1.00	1.00
	集合体間流路配分誤差	1.05	1.00	1.00
	原子炉出入口温度誤差	1.02	1.00	1.00
	ワイヤコンタクト誤差	1.00	2.00	1.00
統計処理	炉内集合体間流路配分誤差	1.03	1.00	1.00
	物性値誤差	1.02	1.03	1.03
	各部製造公差	1.03	1.04	1.05
	ペレット偏心効果	1.00	1.16	1.2

表3.4.2-3 流量領域毎の冷却材必要流量及びバンドル圧力損失

流量領域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
被覆管最高温度 (HS) ()	690	690	690	695	695	695	700	700	700	700
被覆管肉厚 ノミナル温度()	634	634	634	639	639	639	644	644	644	644
冷却材必要流量 (kg/sec)	35.5	33.9	32.50	29.7	28.81	27.7	28.8	27.1	24.5	20.2
バンドル圧力損失 (kg/cm ²)	1.91	1.72	1.63	1.38	1.31	1.22	1.31	1.17	0.98	0.69
最大集合体出力 (MW)	9.09	8.67	8.22	7.81	7.37	7.03	7.47	6.88	5.55	4.37

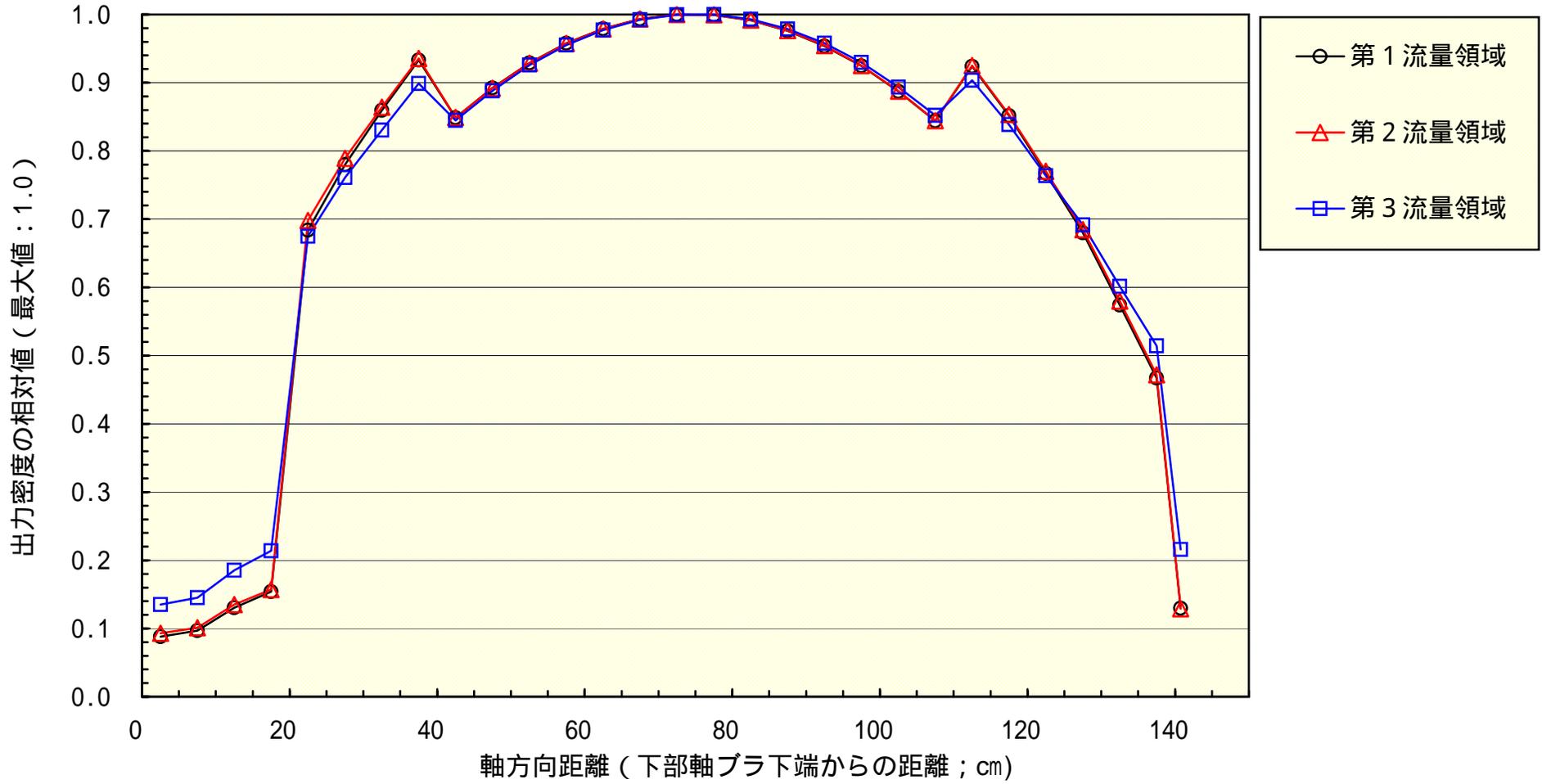


図3.4.2-1(a) 流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (内側炉心領域)

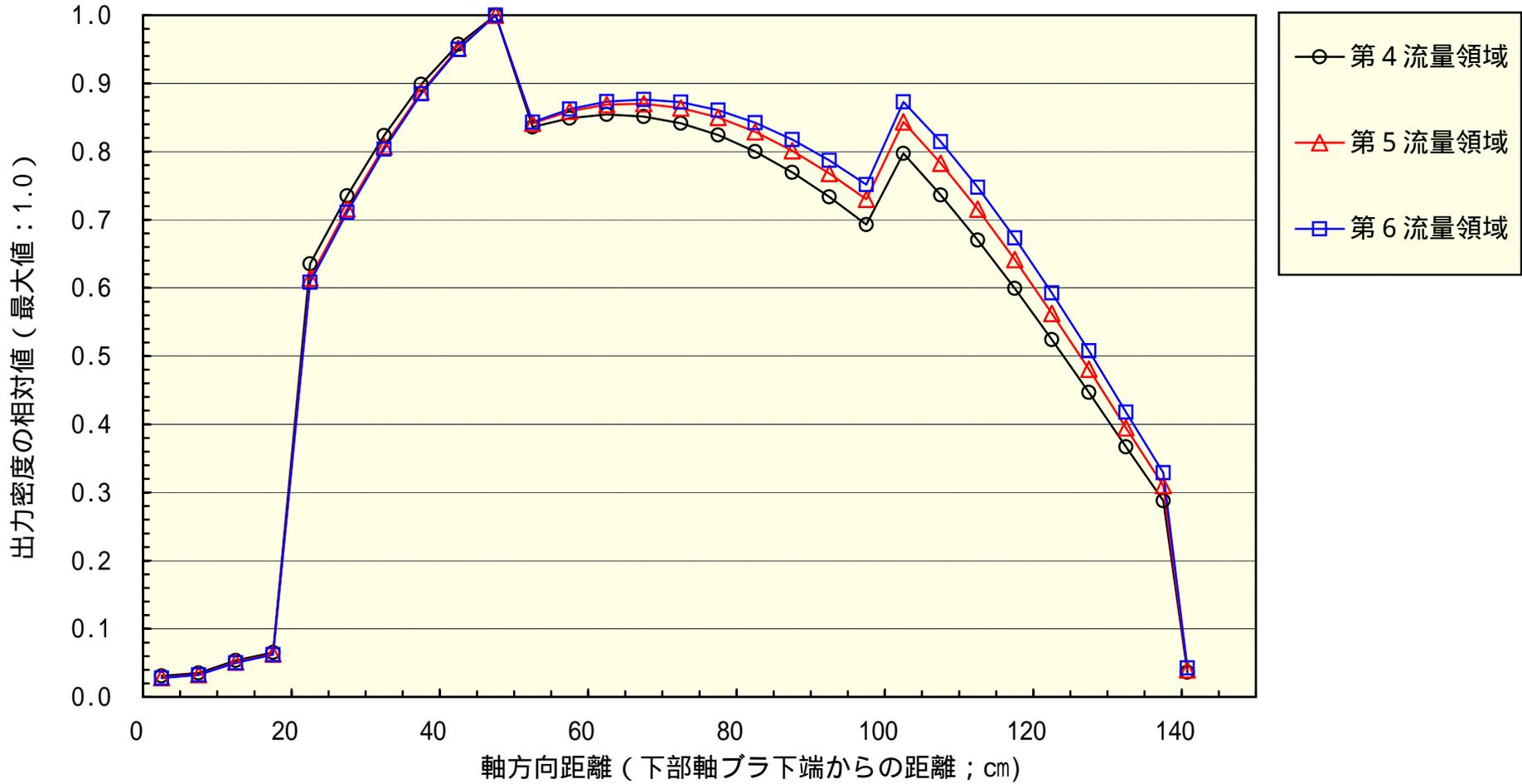


図3.4.2-1(b) 流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (中間炉心領域)

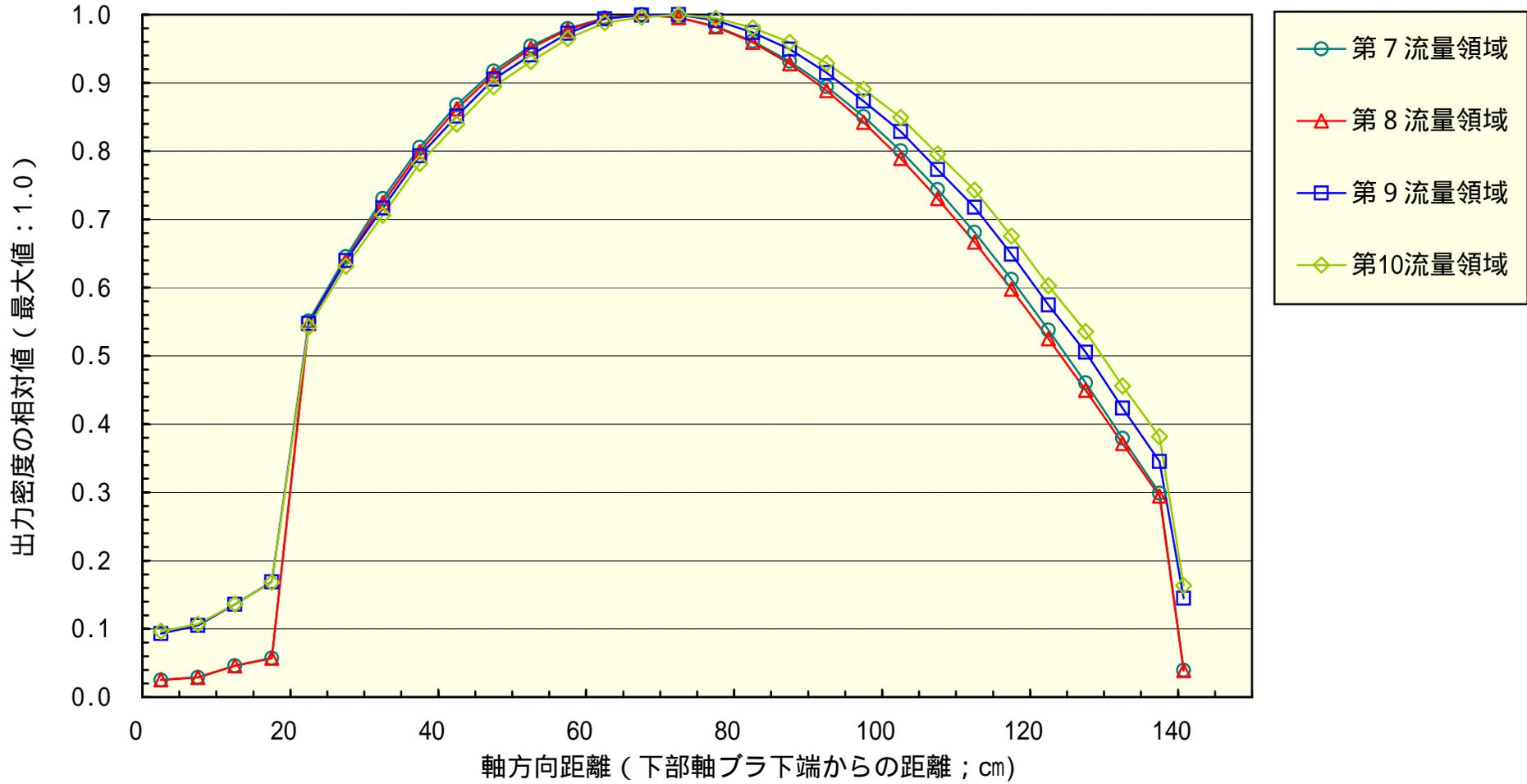
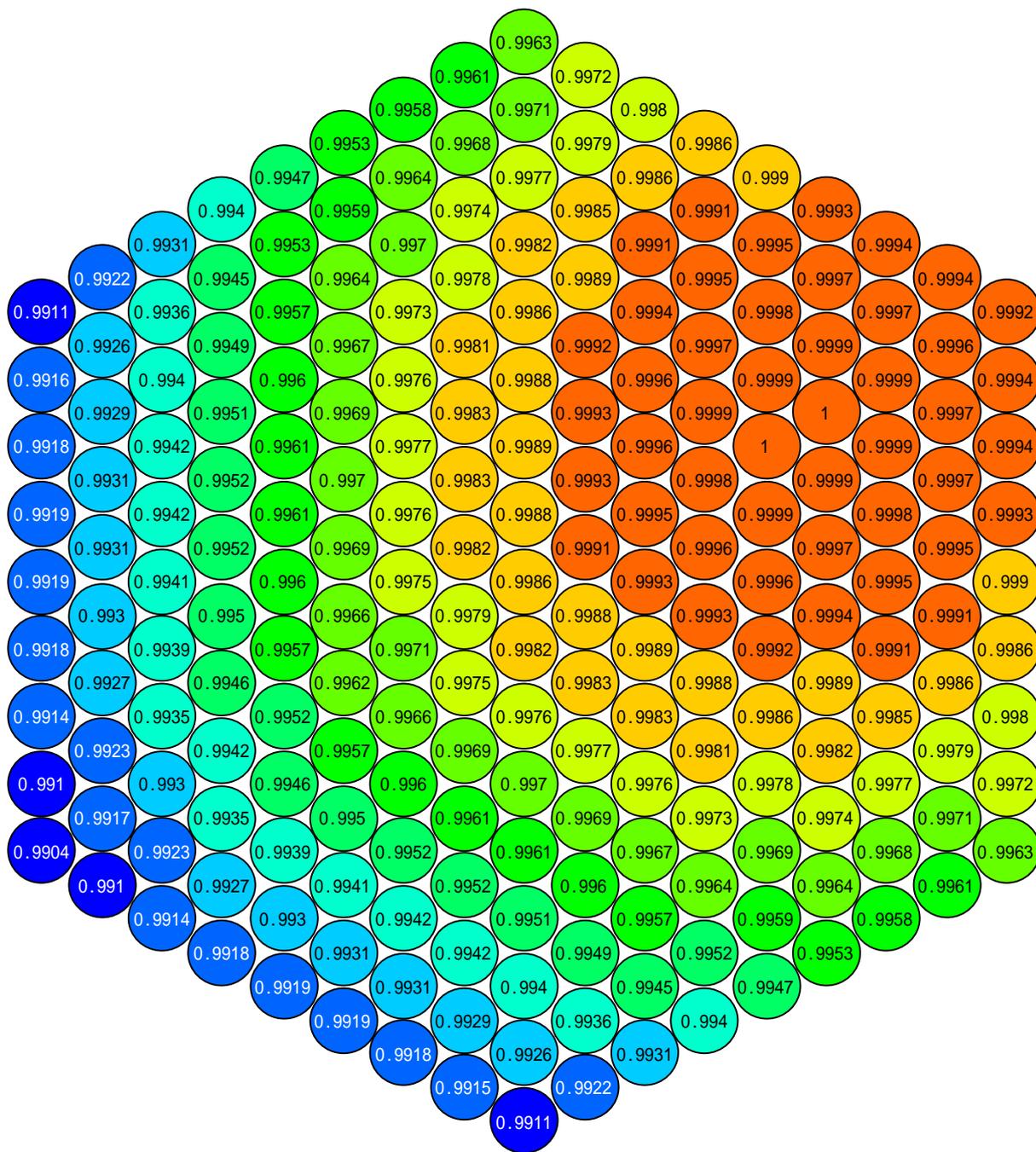
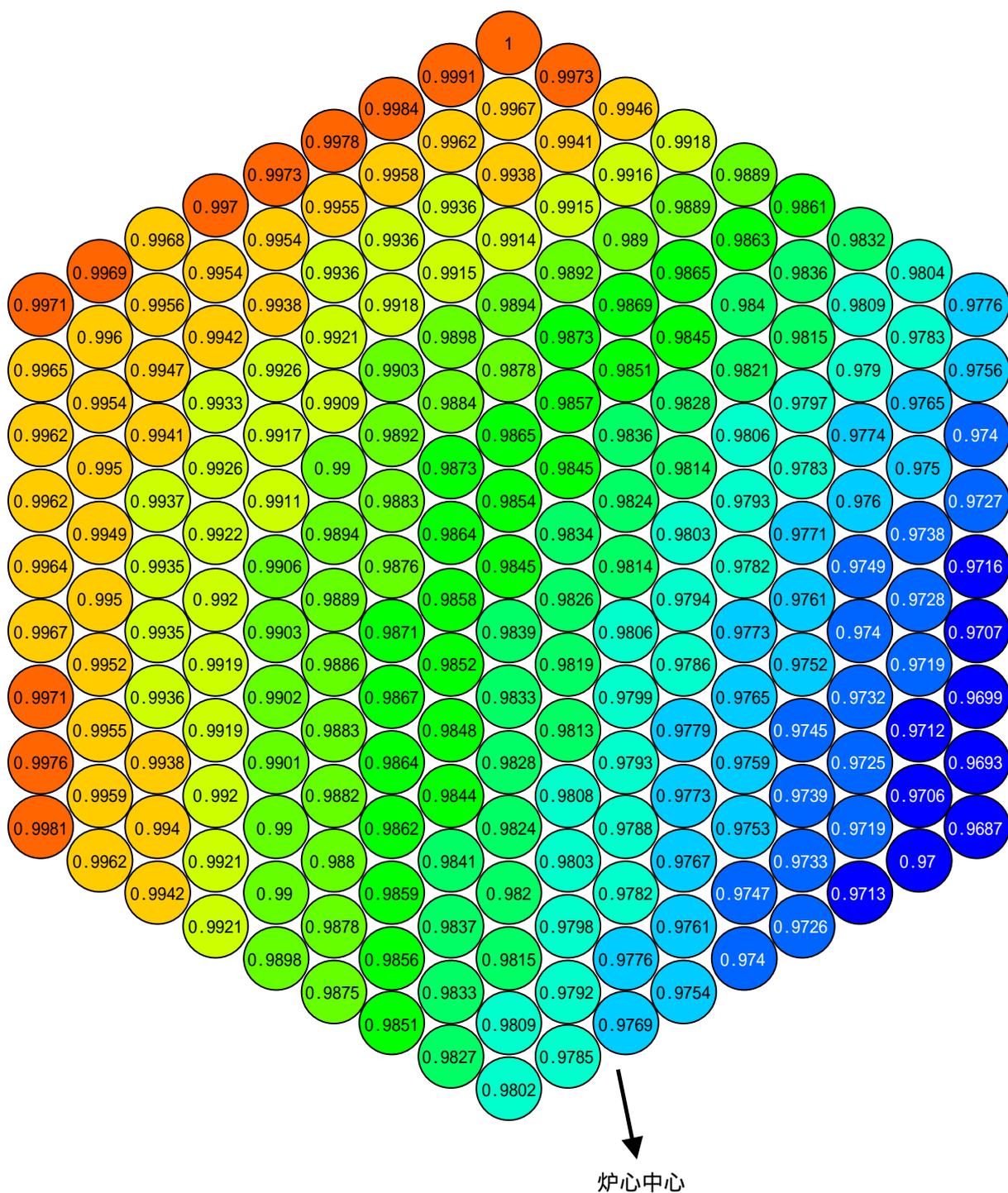


図3.4.2-1(c) 流量領域毎の最大発熱集合体に対する軸方向出力分布 (外側炉心領域)



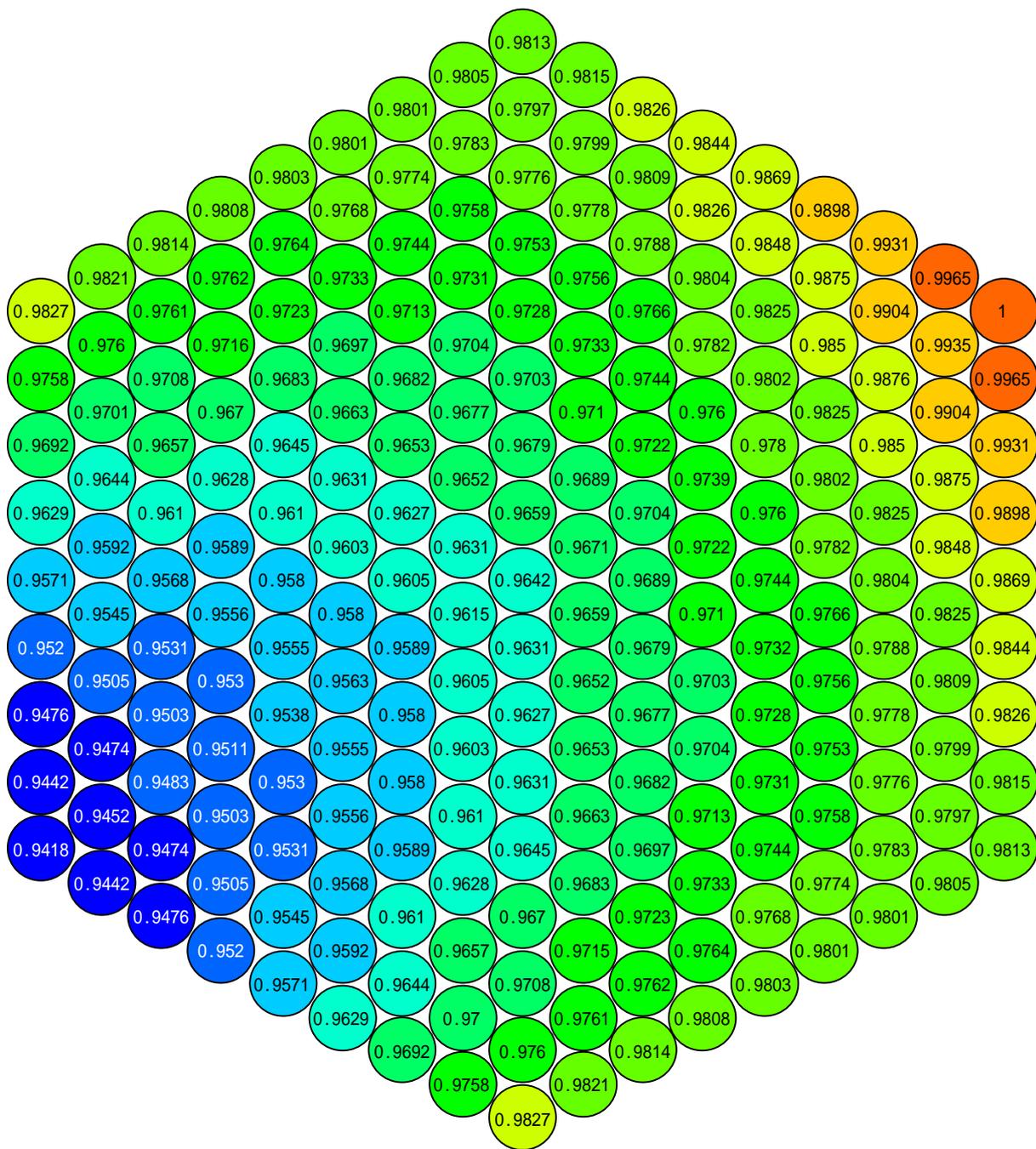
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-2 第1流量領域における最大発熱集合体 (No.38) の径方向出力分布



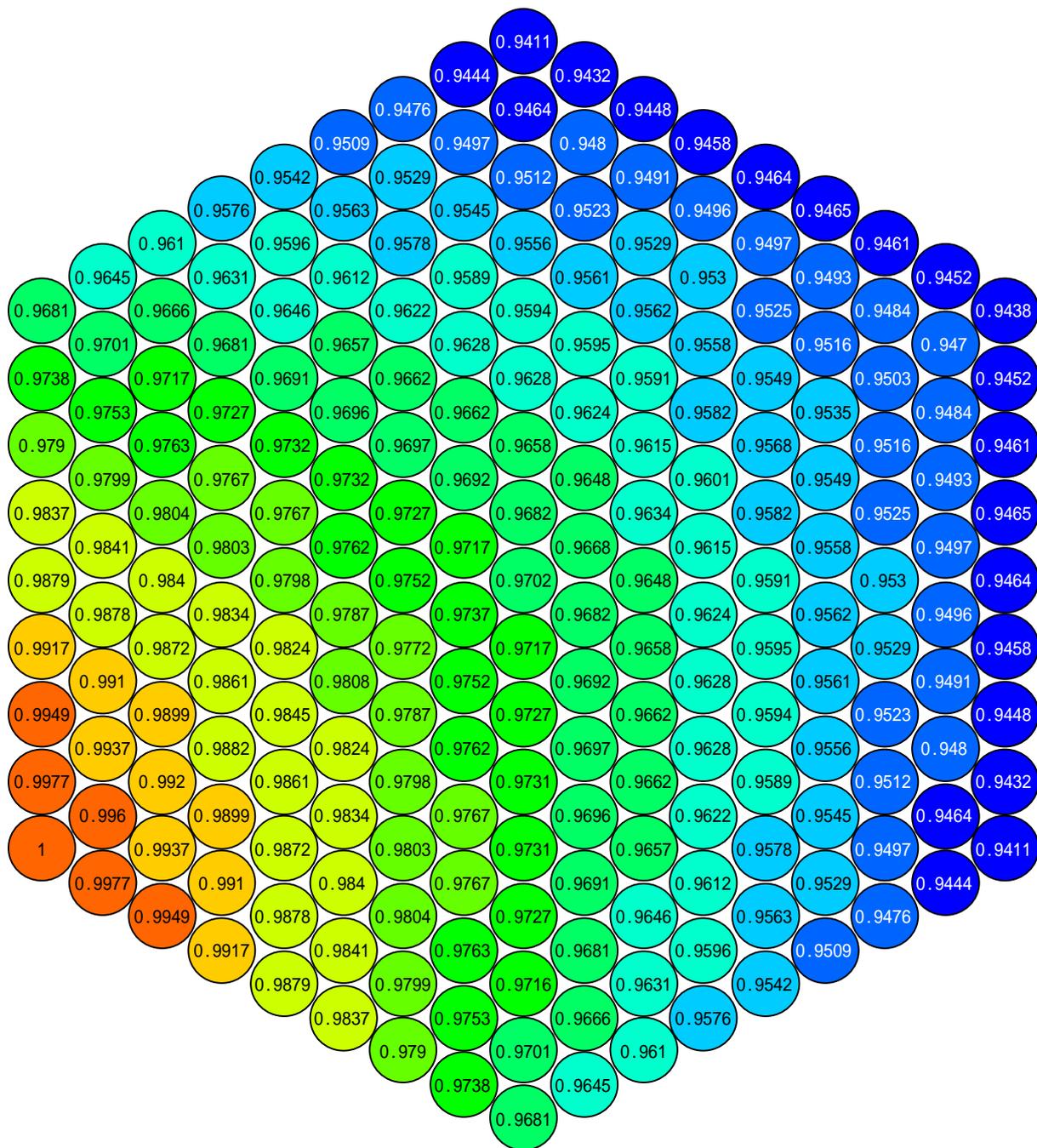
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-3 第2流量領域における最大発熱集合体 (No.33) の径方向出力分布



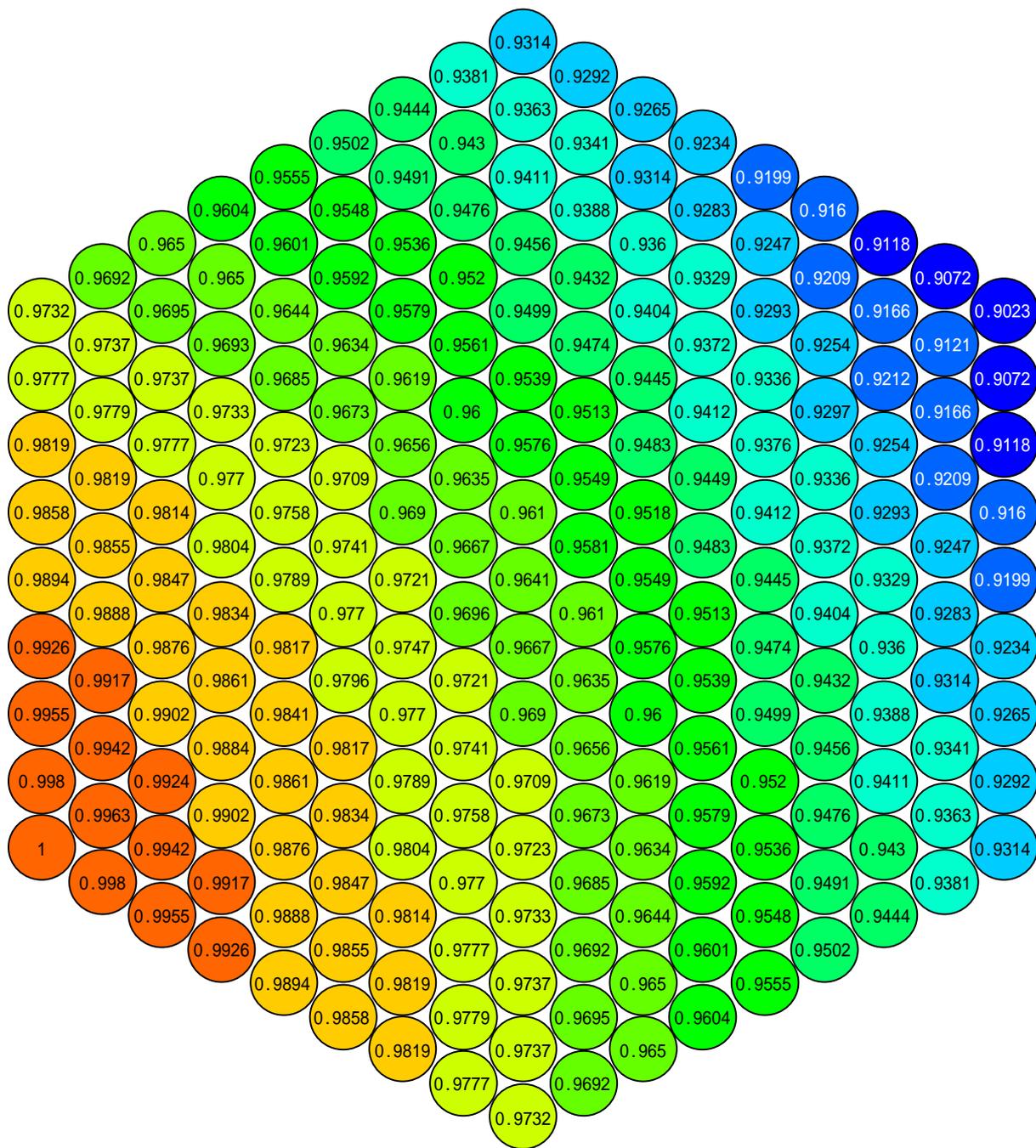
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-4 第3流量領域における最大発熱集合体(No.203)の径方向出力分布



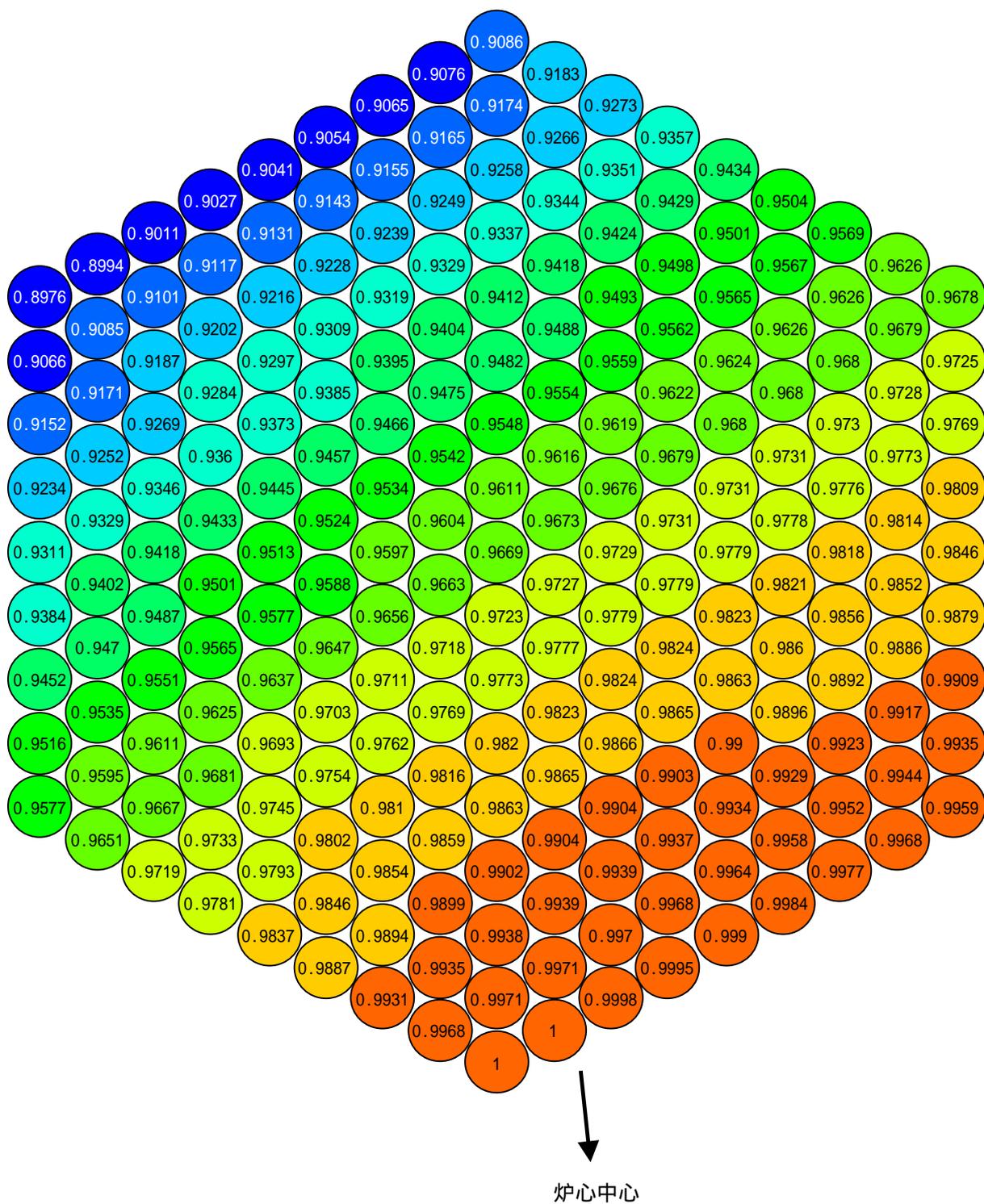
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-5 第4流量領域における最大発熱集合体(No.218)の径方向出力分布



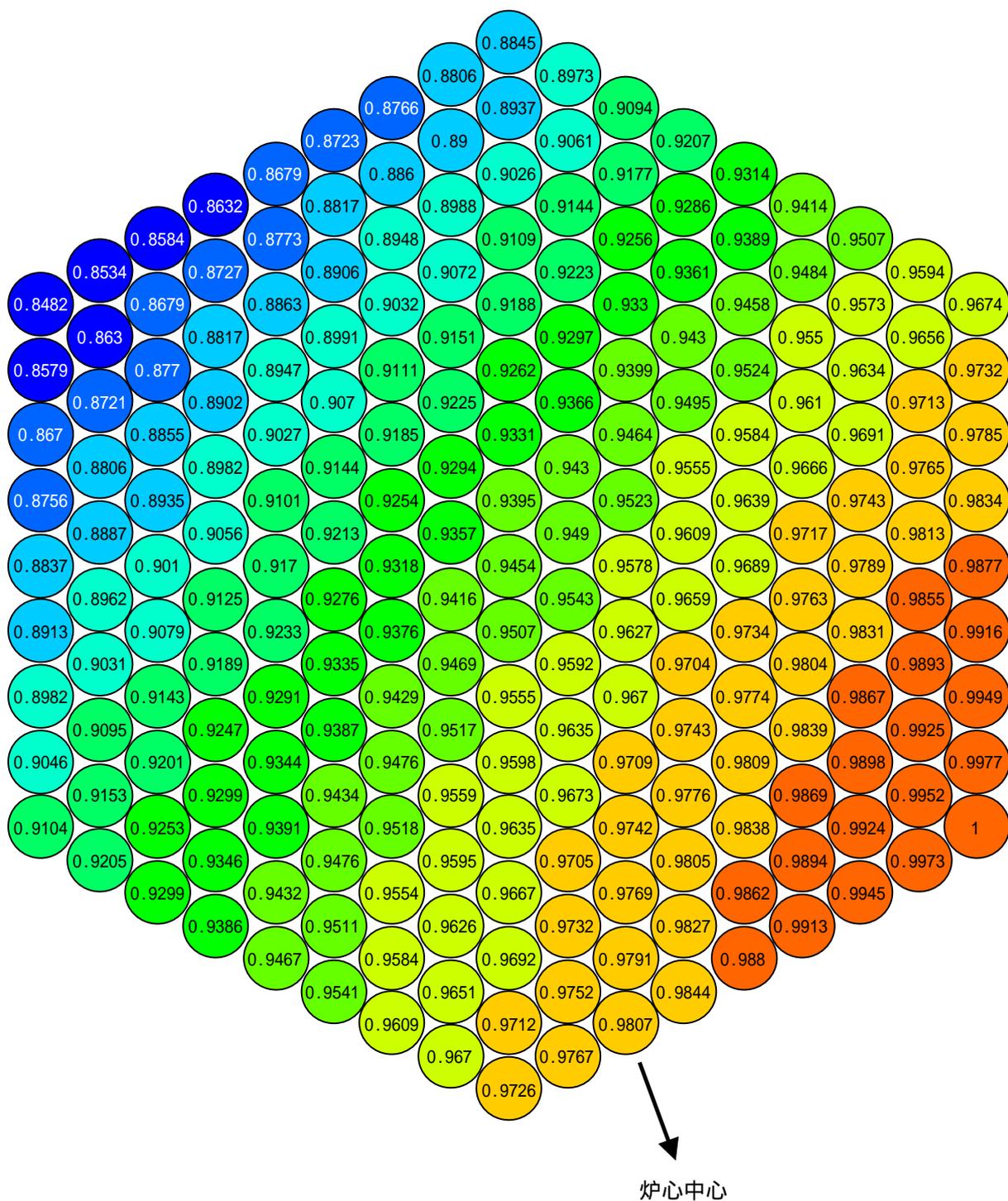
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-6 第5流量領域における最大発熱集合体(No.380)の径方向出力分布



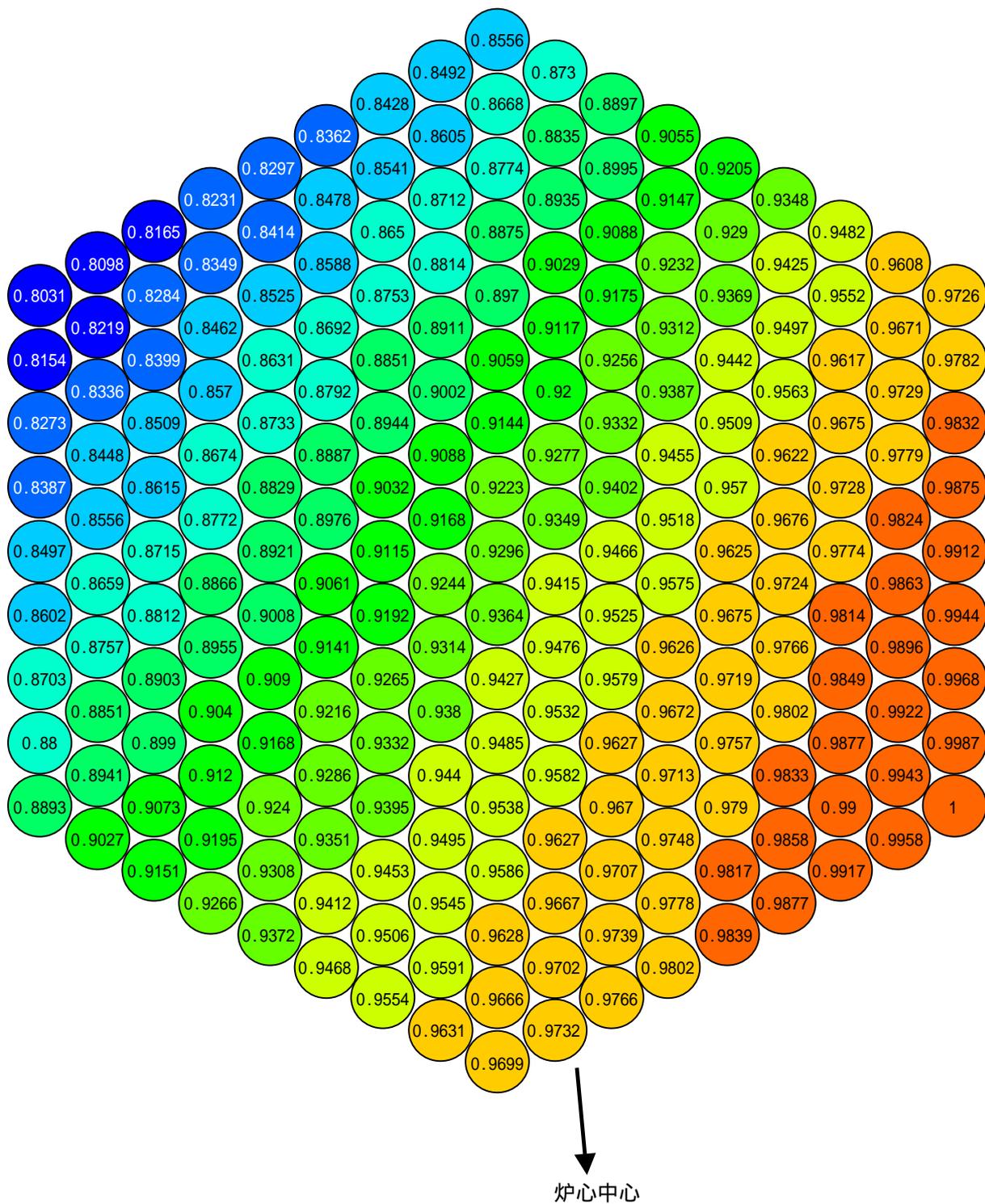
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-7 第6流量領域における最大発熱集合体(No.451)の径方向出力分布



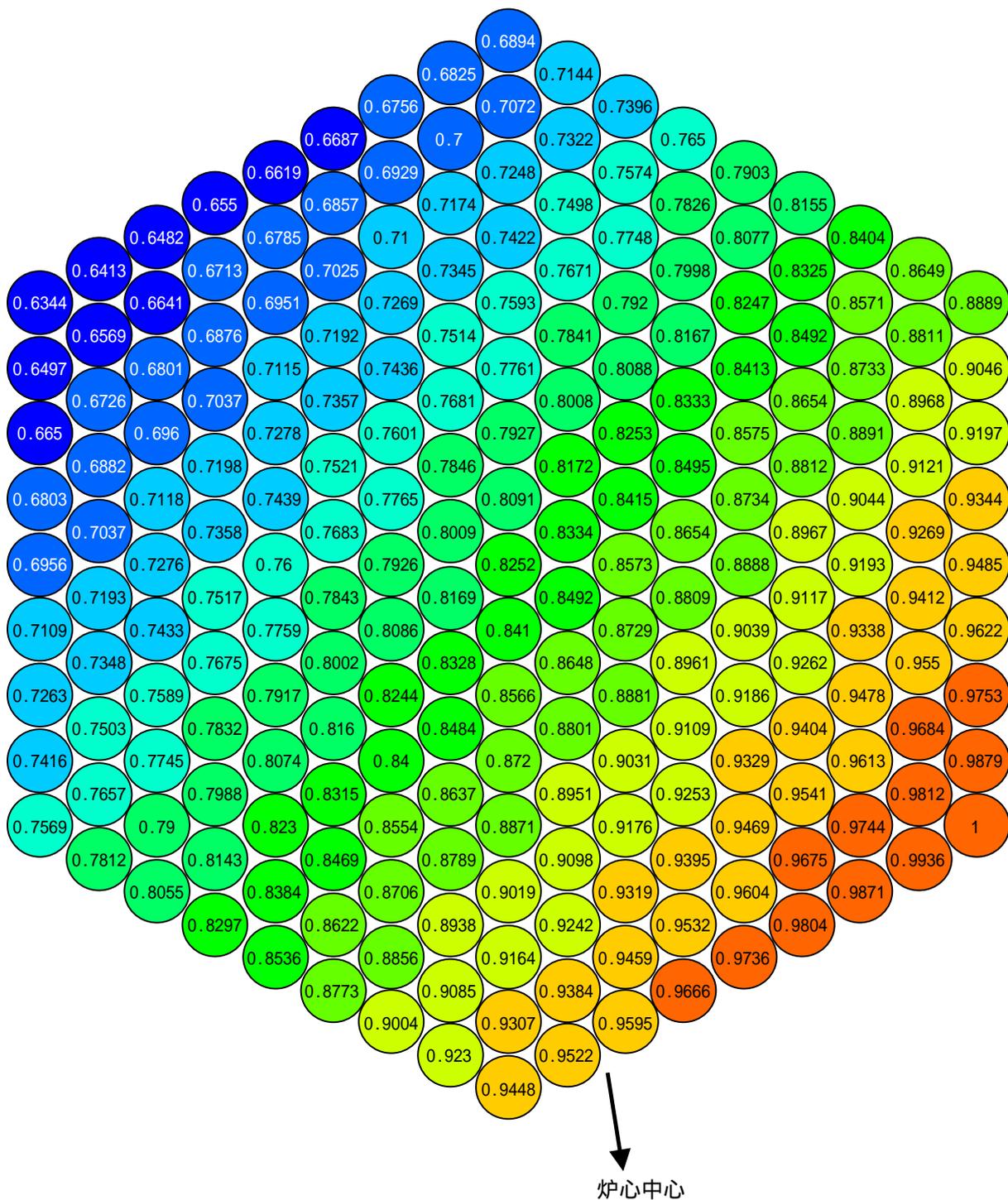
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-8 第7流量領域における最大発熱集合体(No.450)の径方向出力分布



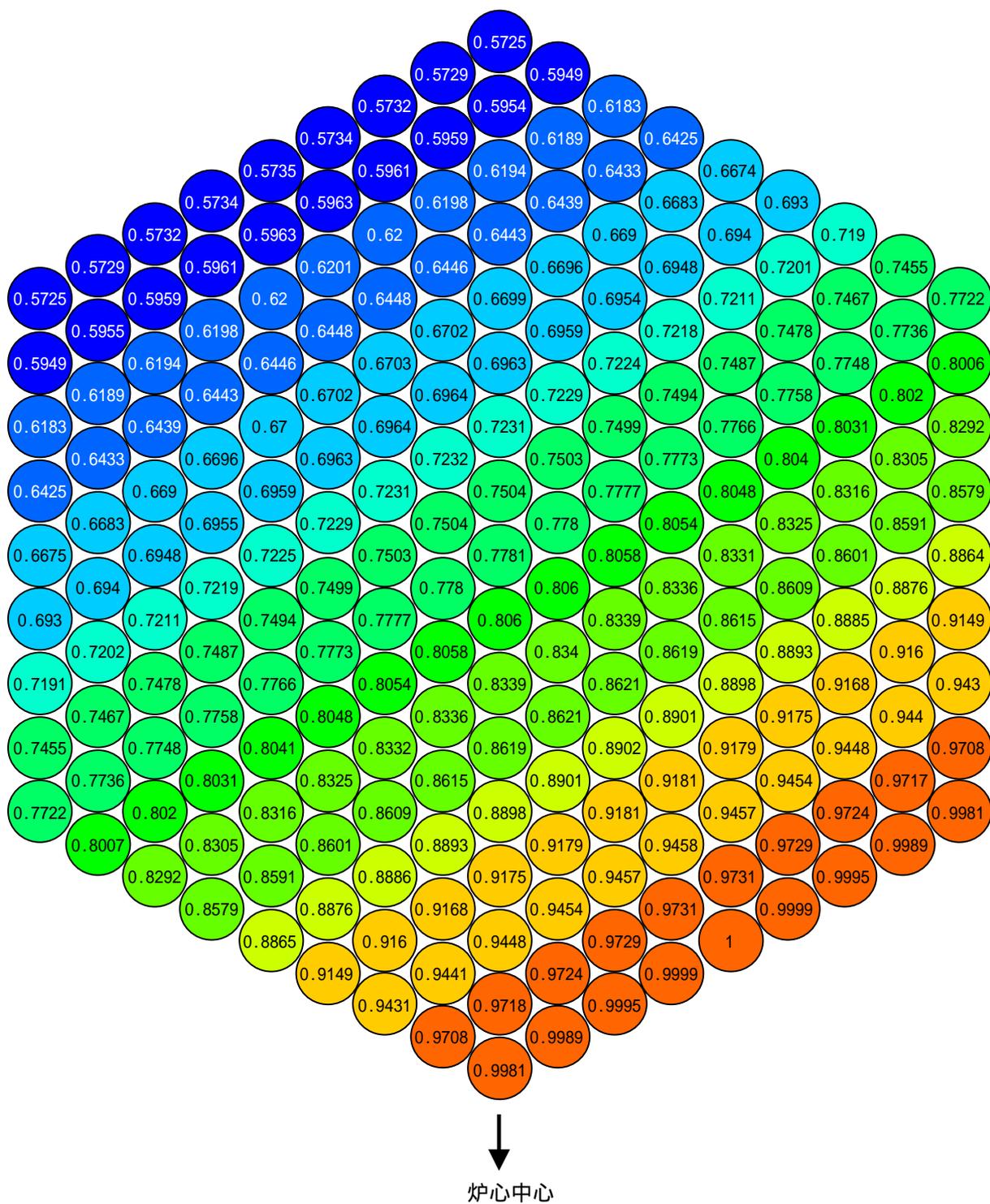
注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-9 第8流量領域における最大発熱集合体(No.449)の径方向出力分布



注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-10 第9流量領域における最大発熱集合体(No.526)の径方向出力分布



注) 分布は各燃料要素の軸方向積算出力に対するもので最大値を1.0としている。

図3.4.2-11 第10流量領域における最大発熱集合体 (No.611) の径方向出力分布

3.4.3 ヒートバランス概略評価

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した本炉心を用いた発電プラントのヒートバランスについて概略的に検討する。

(1) 評価条件

原子炉出口温度の算出

原子炉出口温度は、原子炉入口温度、原子炉熱出力、1次系流量及び定圧比熱の関係から簡易的に算出することができる。本検討においては、原子炉内を炉心燃料部及び炉心燃料部以外（ステンレス鋼希釈集合体、制御棒、ステンレス鋼反射体、 B_4C 中性子遮へい体、炉壁及び無効漏洩）に分割した。この前提条件をもとに、及び式から各流量領域の集合体出口平均冷却材温度を算出した。

$$T_{Zone-out} = T_{Reactor-in} + \frac{Q_{Zone}}{W_{Zone} \cdot Cp} \quad \text{-----}$$

Q_{Zone} : 各流量領域の出力 (MW)

$T_{Zone-out}$: 各流量領域の集合体出口平均冷却材温度 ()

$T_{Reactor-in}$: 原子炉入口温度 (395)

W_{Zone} : 各流量領域の計画流量 (kg/sec)

Cp : 比熱 (J/kgK)

$$Cp = (0.343253 - 1.38686 \times 10^{-4} T_{Coolant} + 1.1055 \times 10^{-7} T_{Coolant}^2) \times 4.186 \times 10^3 \quad \text{---}$$

$T_{Coolant}$: 冷却材温度^{*2} ()

*1 本物性式は、高速増殖原型炉「もんじゅ」の現行熱設計で使用されているものである。

*2 比熱は緩やかな温度依存性を有することから代表温度での値を一定して用いることとし、この代表温度として炉心燃料部で 500 を、炉心燃料部以外で 400 を用いる。

炉心燃料部の冷却材流量の推定

3.4.2に示したように、被覆管CDF評価において目安値0.5未満を満足するように、内側炉心、中間炉心及び外側炉心について、被覆管最高温度制限をそれぞれ690、695、700とした場合の各流量領域の冷却材必要流量を用いる。

この冷却材必要流量は、平衡炉心のサイクル初期及び末期を包絡した出力分布に対して設定したものであるが、初装荷炉心から平衡炉心への移行炉心における出力変動、制御棒挿入深度の不確定性、運転余裕等を考慮して、過去の設計検討例を参考に計画流量としては必要流量に対して一律に3%を上乗せすることとする。

炉心燃料部以外の冷却材流量の推定

炉心燃料部以外の必要流量については、詳細な評価を実施していないことから、過去の設計例を基に推定した。

ここで、内部増殖炉心の特性である燃焼欠損反応度の低減から導かれる制御棒本数の減少効果及び炉心体積に対する炉心表面積が小さいことに起因するステンレス鋼反射体及び B_4C 中性子遮へい体の発熱割合減少効果を別途考慮することとした。

制御棒本数の減少効果については、制御棒装荷率(炉心燃料集合体体数に対する制御棒本数の比)を指標として制御棒への配分流量割合を低減させて考慮することとした。ステンレス鋼反射体等での発熱割合減少効果については、炉心体積に対する炉心側表面積の比を指標として、ステンレス鋼反射体及び B_4C 中性子遮へい体への配分流量割合に考慮することとした。

これらを考慮すると本炉心での炉心部以外への冷却材流量配分は 5.0%程度までに低減できると期待される。

(2) 評価結果

表 3.4.3-1 に本炉心に予想される流量領域毎の冷却材計画流量、出力及び出口平均温度の関係を示す。この表には、流量領域毎に積算して得られる全炉心流量及びこれらにより想定される原子炉出口温度を併せて示している。

内部増殖炉心概念を適用した本炉心では時間的及び空間的に安定した出力分布が得られることから冷却材を効率よく配分することが可能となる。全炉心出力 3500MWth、原子炉出口温度 550、原子炉入口温度 395 に対応する全炉心流量は 17.9t/sec であり、上記から想定される全炉心流量 16.8t/sec はこれより約 6 %削減されている。仮に、この削減された全炉心流量を前提とした場合には、原子炉出口温度は 560 程度まで上昇することとなる。

原子炉出入口温度、全炉心流量等の 1 次系のヒートバランスは、2 次系、蒸気系まで考慮して設定する必要があるが、効率的な流量配分によって全炉心流量の低減、原子炉出口温度の上昇の余地があることが示される。仮に、これらに対応可能である場合に、中間熱交換器 (IHX)、1 次系主循環ポンプ等の建設コストの削減、所内負荷電力の低減、熱効率の改善等の効果が期待される。

また、原子炉出口温度を 550 のままに据え置いた場合には、炉心部へより多くの流量を配分できることとなり、これは被覆管最高温度の低減に寄与することとなる。仮に、各流量領域の冷却材流量を 6 %増加させた場合には、被覆管最高温度は凡そ 15 程度低下できると考えられ、被覆管 CDF 等の燃料の機械設計への裕度を向上させることができる。

表3.4.3-1 流量領域毎の流量、出力及び出口平均温度の関係

領域		集合体体数 (体)	集合体当りの 必要流量 (kg/sec)	集合体当りの 計画流量 ^{*1} (kg/sec)	流量領域毎の 計画流量 (t/sec)	流量領域毎の 計画流量割合 (%)	流量領域毎の 合計出力 (MW)	流量領域毎の集合体 出口平均冷却材温度 ^{*2} ()
炉心燃料部	第1流量領域	78	35.50	36.56	2.852	17.0	666.3	580
	第2流量領域	66	33.85	34.87	2.301	13.7	545.7	583
	第3流量領域	88	32.50	33.48	2.946	17.5	683.7	579
	第4流量領域	42	29.71	30.60	1.285	7.7	309.1	586
	第5流量領域	42	28.81	29.67	1.246	7.4	286.1	577
	第6流量領域	42	27.69	28.52	1.198	7.1	264.1	570
	第7流量領域	24	28.84	29.71	0.713	4.2	147.6	559
	第8流量領域	54	27.09	27.90	1.507	9.0	282.2	543
	第9流量領域	36	24.52	25.25	0.909	5.4	150.0	526
	第10流量領域	48	20.25	20.85	1.001	6.0	148.7	513
	炉心燃料部合計	520	-	-	15.958	95.0	3483.7	568
炉心燃料部以外	希釈SUS集合体	3	-	-	-	-	0.86	-
	制御棒	36	-	-	-	-	6.20	-
	SUS反射体	90	-	-	-	-	4.96	-
	B4C遮へい体	198	-	-	-	-	4.32	-
	炉心燃料部以外合計	327	-	-	0.835	5.0	16.33	410
全炉心	合計	847	-	-	16.793	100.0	3500	560

* 1 初装荷、移行及び平衡炉心を包絡する計画流量の算出に当っては、平衡炉心に対して3%のマーヅンを見込んだ

* 2 集合体出口平均冷却材温度=原子炉入口冷却材温度(395)+各集合体発熱量/(各集合体流量*定圧比熱)

冷却材温度を炉心燃料部に対して500、炉心燃料部以外に対して400とした場合、定圧比熱は各々1262及び1279(J/kgK)となる

3.5 まとめ

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念の適用例として、平成 11 年度に検討した実証炉規模（1600MWth）を基に、実用化戦略調査研究で設定されている炉心規模（3500MWth）の大型化した炉心案について検討した。この際に、実用化戦略調査研究において設定されている設計条件を検討し、内部増殖炉心概念で整合するもの（下記参照）について取り入れることとした。

- 炉心部取出平均燃焼度；約 150GWd/t 以上
- 運転サイクル長さ；18 ヶ月以上
- 遮へい体外接円径；6.6m 以下
- 燃料バンドル部圧損；約 2 kg/cm² 以下
- 切り欠き UIS に対応した制御棒配置
- 核定数；JENDL-3.2 版統合炉定数 ADJ98

増殖比について実用化戦略調査研究では 1.2 程度を条件としているが、内部増殖炉心概念では、軽水炉システムから FBR システムへの緩やかな移行を想定し、経済性を追求する観点から増殖性能については持続的エネルギー供給が可能な燃料サイクルロス分を補う程度までに低減することとした。Na ボイド反応度については、実用化戦略調査研究では炉心部のみで 6 \$ 以下を目安にしているが、ULOF 時における Na ボイド領域発生状況を鑑み、炉心部のみならず、炉心上部領域も同時にボイド化した場合で 6 \$ 以下を条件とした。

このような設計条件を満たす炉心・燃料仕様案（下記参照）を簡易的な熱流動解析、被覆管 CDF 評価を通じて設定し、核熱設計検討を実施した。

- 燃料要素径；12mm
- スミア密度；82%T.D.（ペレット中空径；3.4mm）
- 実効燃料体積率；40.0%
- 燃料バンドル本数；217 本
- 集合体配列ピッチ；212.5mm
- 炉心燃料集合体体数；520 体
- 炉心等価直径；約 5.3m、遮へい体等価直径；約 6.6m
- 炉心高さ；120cm
- 軸方向ブランケット 下部；20cm、上部；削除（断熱ペレット 1.5cm）
- 被覆管材；ODS 鋼

径方向の高速中性子照射量の平坦化を意図して 6～9 バッチの多段階燃料交換バッチ（平均約 7 バッチ）を採用し、運転サイクル長さを 630 日（約 20.7 ヶ月）に設定することで炉心部の取出平均燃焼度は 154GWd/t となった。また、ブランケット部を含めた炉心全体の取出平均燃焼度は 137GWd/t であり、従来概念で炉心部の取出平均燃焼度 150GWd/t かつ増殖比 1.2 程度を目指した炉心像の炉心全体の取出平均燃焼度 60GWd/t 程度のほぼ倍となった。これは、内部増殖炉心では従来概念に比べて燃料サ

イクルに循環させる核物質量を半減以下にできることを示している。

Pu 富化度は、低富化領域で 14.5wt%、高富化領域で 18.7wt%であり、体積重み平均で 17.1wt%と従来概念での炉心に比べて大幅に低い値となった。

運転サイクル期間 630 日との長期運転にも拘らず、燃焼欠損反応度は 1.5% k/kk' と低く、反応度の安定性に優れていることが示された。

また、燃焼欠損反応度が小さいことから制御棒本数は 36 本と相対的に少ない本数においても、炉停止余裕が確保できる見通しである。なお、大型炉心での局所出力ピーキングを抑制するために、36 本の制御棒を独立した 2 系統に分割し、長期的反応度制御機能を 2 系統同時操作、スクラム機能を 1 系統単独挿入（長期的反応度補償した状態からの挿入）で行うこととした。

3次元拡散計算において制御棒挿入、燃焼ミスマッチを考慮した燃料要素単位での最大線出力は約 420W/cm であり、太径中空燃料を用いた場合に予想される許容線出力に比べて低い値である。

内部転換比が高いこと、サイクル期間中の制御棒挿入範囲の変動幅が小さいこと等から時間的及び空間的な出力変化が少なく、安定した出力分布が得られた。最大集合体出力は切り欠き UIS に対応した制御棒配置により見通し部で発生し、9.1MW 程度であった。

平衡サイクル初期及び末期で平均した炉心部の増殖比寄与は 0.95 であり、軸方向ブランケットまで含めた全炉心の増殖比は 1.01 であった。また、²³⁹Pu 及び ²⁴¹Pu の合計量の装荷量及び取出量の物質収支は僅かに減少し、持続的エネルギー供給を可能とする増殖性能要求に僅かに不足した。しかしながら、核定数として見直された JENDL-3.2 版統合炉定数 ADJ2000 を使用した場合には増殖比は 1.06 まで改善し、平衡サイクルにおける ²³⁹Pu 及び ²⁴¹Pu の合計の取出量と装荷量の比で定義する Pu fissile 利得比は 1.08 となり、炉外サイクルでのロス分を考慮してもシステムを維持するのに十分な増殖性能を示した。

大型炉においては核的デカップリングが大きくなる傾向があることから、制御棒挿入及び引き抜きを行った場合での出力歪の発生傾向を把握した。この結果、反応度変化当たりの出力歪は他領域との核的結合が低い炉心外周よりの制御棒で高くなる傾向が認められた。このため、中性子計装の必要体数の観点等を含めて出力歪を抑制するためには、出力分布への影響を考慮しつつ、制御棒配置を炉心中央よりにすることが有利となることが示された。

多段階燃料交換バッチの採用により高速中性子照射量の径方向分布は平坦化されており、最大高速中性子照射量は ODS 鋼の開発目標 $5 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ を若干上回る $5.2 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ であった。

実用化戦略調査研究において設定された検討用 ODS 鋼のクリープ強度式を用いた場合に、被覆管 CDF を 0.5 程度までに抑えるためには、被覆管最高温度を内側領域で 690、中間領域で 695、外側領域で 700 程度にする必要があることが示された。

また、この被覆管温度制限を守るように冷却材流量を確保した場合に燃料バンドル

部圧損は約 1.9kg/cm^2 と設計条件 2kg/cm^2 以下を満足した。

また、炉内の最大集合体出力分布（平衡サイクル初期及び末期の包絡値）を基に暫定的な冷却材流量領域区分を設定し、炉心流量を評価した。内部増殖炉概念での安定した出力分布の効果により、全流量は原子炉出入口温度条件（395、550）に対応した流量に比べて6%程度低減できることが示された。この冷却特性の改善は、原子炉出口温度の増加、又は、被覆管最高温度制限の低下に寄与することが期待できるものである。

このように、内部増殖炉心概念の以下の特長を有する大型炉の適用例を具体化することができた。

- ブランケットを含めた炉心全体の高燃焼度化（取出平均燃焼度 137GWd/t ）
- 太径燃料採用による高い実効燃料体積率による Pu 富化度の低減及び1近傍の内部転換比
- 内部転換比が高いこと、サイクル期間中の制御棒挿入範囲の変動幅が小さいこと等による時間的及び空間的に安定した出力分布

4. 増殖性能向上を目指した炉心案の検討

4.1 検討方針

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心では、軽水炉利用時代を通じて蓄積される使用済み燃料中に含まれる Pu を“触媒”として ^{238}U を燃焼させることにより持続的エネルギー供給を達成することを目指している。この際に、発電コストに対して資本費が支配的になる現状を考慮して炉寿命を終えた軽水炉が FBR に置換されるように FBR の導入が進むとして、軽水炉システムから FBR システムへの移行は比較的緩やかなものを想定している。このため、増殖性要求は燃料サイクル中の損失分を補う程度まで軽減できると考えている。このような想定は、原子力以外にも石油、石炭、天然ガス、水力、太陽光、風力等の多様なエネルギー源が共存し、経済優位性を示すものから順次利用されていくと思われることから妥当なものと考えられる。

しかしながら、将来、炭酸ガスによる温暖化防止等の観点から急激に原子力への切り替えが進むとのシナリオも否定できない。

このような FBR 導入速度が比較的速い場合の選択肢として増殖性能を向上させた炉心案（高増殖型）についても可能性を検討することとした。この状況下では、ある程度の燃料サイクルコストの上昇を許容しても、速やかにプルトニウムを増殖供給することが優先されることとなる。なお、3.において検討した内部増殖炉心案をこの高増殖型と対比させて、高燃焼度型と称する。

炉心の高燃焼度化を図ると Pu 富化度の増加に伴って fertile 核種である ^{238}U 装荷が減少すること、FP 核種による中性子吸収が増加すること等から増殖性能は劣化する傾向を示す。つまり、高燃焼度化と増殖性能はトレードオフの関係にある。このため、増殖性能を優先して取出平均燃焼度を低下させることを許容することとした。具体的な燃焼度の目安値としては、ブランケットを含めた炉心全体での取出平均燃焼度で 60GWd/t 程度を設定した。これは、従来概念で、炉心部の取出平均燃焼度 150GWd/t を条件に増殖比 1.2 程度を確保するためにブランケットを設置した場合にブランケットをも含めた取出平均燃焼度にほぼ相当するものである。

また、高燃焼度型に比べて、燃焼度をほぼ半減したことから燃料要素の FCMI 挙動は大幅に緩和されることが期待でき、これを利用してスミア密度を 82% T.D. から 85% T.D. 程度までは上昇させることが可能と考えられる。スミア密度の増加により実効燃料体積率も増加し、増殖性能の更なる向上が期待できる。

さらに、内部増殖炉心の炉心中央部分に位置する低富化領域の Pu 富化度を高め、中性子漏洩を抑制することによる増殖性能の改善効果についても検討した。

これは、内部増殖炉心では炉心中央部分の低富化領域とその外周部の高富化領域

の Pu 富化度配分は出力分布の観点から設定しているが、この出力バランスがある程度崩れることを許容して、増殖性能の改善に関する可能性を検討したものである。

この高増殖型炉心案の検討では、以下の概要を示すように、3.3.1 で述べた手法により 2 次元 RZ 体系での燃焼計算まで実施した。ただし、3 次元拡散計算は実施していない。

1) 断面積作成

- ・ 核定数ライブラリ ; JENDL-3.2 版統合炉定数 (ADJ98)
- ・ 70 群均質化断面積作成 ; SLAROM
- ・ 断面積縮約計算 ; JOINT-CITATION(FBR)
(輸送断面積カレント重み)

2) 燃焼計算

- ・ 拡散燃焼計算コード ; CITATION(PENCIL)
- ・ 計算体系 ; 2 次元 RZ 体系
- ・ 断面積 ; 7 群実効ミクロ断面積

4.2 燃焼度低減による効果把握

既述の高燃焼度型炉心をレファレンスとして、炉心全体での取出平均燃焼度が目安値の 60GWd/t 程度となるように、運転サイクル日数を 630 日から 270 日まで低減させた検討ケースを増殖検討 1 とする。この際に、燃焼度の低減に合わせて同様なサーベイ条件で Pu 富化度を設定した。

燃焼度を低減させた炉心案の炉心・燃料仕様を、後述する他の炉心案と併せて表 4.2-1 に、2 次元 RZ 体系での燃焼計算結果を表 4.2-2 に示す。

Pu 富化度調整の結果、高燃焼度型に比べて Pu 富化度は低富化領域で 14.5wt% から 13.2wt% へ、高富化領域で 18.7wt% から 16.9wt% へ低減し、炉心部で体積重み平均した Pu 富化度は高燃焼度型に比べて 1.5wt% 低い 15.6wt% となった。

このような Pu 富化度の低下及び内在する FP 核種の含有量の低減により、増殖比は炉心部のみの寄与で 1.04 を達成し、文字通り“内部増殖”が得られている。また、ブランケットを含めた増殖比は 1.12 まで改善している。なお、下部軸方向ブランケットについて、遷移過程での溶融燃料の排出を容易とするため、各燃料集合体に対して中央部の 37 本分については削除して、ガスプレナムとしている。

燃焼度に関して、炉心部での取出平均燃焼度は 67GWd/t 程度であり、ブランケットを含めた取出平均燃焼度は約 59GWd/t と検討方針をほぼ満足している。

燃焼欠損反応度は、サイクル期間の短縮及び内部転換の増加により 0.11% k/kk' と高燃焼度型での約 1.5% k/kk' に比べて大幅に縮小し、サイクル初期及び末期での反応度差が殆どない程度まで低減した。

制御棒効果等が考慮されていない 2 次元解析であるため参考値ではあるが、高増殖型炉心案の最大線出力は、平衡サイクル末期に発生した 394W/cm であり、高燃焼度型での 406W/cm (平衡サイクル初期に発生) に比べて低減した。これは Pu 富化度低減に伴って燃焼ミスマッチが低減した効果が支配的であり、制御棒挿入を考慮した 3 次元解析でも 10W/cm 程度の低減効果があるものと期待される。

また、最大高速中性子照射量は $2.3 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 程度であり、オーステナイト系ステンレス鋼が使用できる可能性がある程度まで低減された。

表4.2-1 増殖性能向上を目指した炉心案（高増殖型炉心）の炉心・燃料仕様

ケース		高燃焼度型	増殖検討 1	増殖検討 2	増殖検討 3
炉出力 (MWth)		3500			
運転サイクル長さ (日)		630	270	330	
炉心等価直径 (m)		5.28			
燃料集合体体数 (内側 / 中間 / 外側 炉心)		232 / 126 / 162			
制御棒本数		36			
炉心内ステンレス鋼希釈集合体数		3			
燃料交換バッチ (内側 / 中間 / 外側第1層, 第2層)		6 / 7 / 8,9			
炉心高さ (cm)		120			
軸方向Pu富化度配分 ^{*1} (上 / 中央 / 下) (cm)	内側炉心	30 / 70 / 20			
	中間炉心	40 / 50 / 30			
	外側炉心	-			
軸方向ブラケット ^{*2} 高さ (cm) (上部 / 下部)		1.5 / 20		1.5 / 40	
集合体配列ピッチ (mm)		212.5			
ラッパ管外対面間距離 (mm)		207.5			
ラッパ管肉厚 (mm)		5.1			
集合体間ギャップ (mm)		5.0			
ペレット仕様 (炉心燃料 / 軸ブラケット燃料 ^{*2})		中空 / 中実			
ペレット外径 (mm)		10.40			
ペレット内径 (mm)		3.4		2.8	
ペレット密度 (%TD)		95			
スミア密度 (%)		82.0		85.1	
被覆管外径 (mm)		12.0			
被覆管肉厚 (mm)		0.71			
ワイヤ径 (mm)		1.15			
ワイヤ巻付ピッチ (mm)		200			
燃料要素本数 (本 / 集合体)		217			
Pu富化度 (wt%) (低富化度 / 高富化度)		14.5 / 18.7	13.2 / 16.9	12.8 / 16.7	13.6 / 15.6
Pu組成		軽水炉取出 ^{*3}			
²³⁵ U濃度 (wt%)		0.3			
構造材材質 (%)		PNC-FMS & ODS			
冷却材温度 ()		472.5			
体積率 (%)	燃料 (実効)	40.0		41.5	
	ボルト+ギャップ	8.8		7.2	
	構造材	23.7		23.7	
	冷却材	27.5		27.5	

*1 内側、中間炉心の中央部は低富化度、上下部は高富化度である。また、外側炉心は軸方向富化度配分を設けず、高富化度のみとしている。

*2 再臨界排除対策として集合体内中心の37本のピンについて下部軸ブラを充填せずに、ガス領域としている。

*3 PWR ; 49GWd/t、BWR ; 45GWd/t、炉外サイクル ; 10年、
Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241=3/52/27/9.5/7/1.5 (wt%)

表4.2-2 増殖性能向上を目指した炉心案の核特性解析結果（2次元RZ燃焼計算）^{*1}

ケース	高燃焼度型	増殖検討 1	増殖検討 2	増殖検討 3		
炉出力 (MWth)	3500					
運転サイクル長さ (日)	630	270	330			
燃料集合体体数 (内側/中間/外側 炉心)	232 / 126 / 162					
軸方向ブランク高さ (上部/下部 ^{*2}) (cm)	1.5 / 20		1.5 / 40			
スミア密度 (%)	82		85.1			
Pu富化度 ^{*3} (低富化/高富化) (wt%) (体積平均)	14.5 / 18.7 17.1	13.2 / 16.9 15.6	12.8 / 16.7 15.3	13.6 / 15.6 14.9		
実効増倍率	BOEC	1.0186	1.0033	1.0027	1.0035	
	EOEC	1.0033	1.0022	1.0020	1.0023	
燃焼欠損反応度 (% k/kk')	1.49	0.11	0.07	0.12		
取出平均燃焼度 (GWd/t)	炉心部	154.6	67.2	78.8	78.7	
	ブランケット部	31.0	8.1	6.2	6.3	
	炉心+ブランケット	136.8	58.7	61.6	61.6	
最大線出力 (W/cm)	BOEC	内側炉心	406	379	387	456
		中間炉心	367	347	360	334
		外側炉心	306	296	311	257
	EOEC	内側炉心	388	394	392	460
		中間炉心	349	349	348	331
		外側炉心	293	291	292	250
新旧燃料ミスマッチ (局所)	BOEC	内側炉心	1.105	1.030	1.033	1.013
		中間炉心	1.112	1.032	1.035	1.016
		外側炉心	1.112	1.035	1.039	1.019
	EOEC	内側炉心	1.027	1.015	1.018	1.007
		中間炉心	1.100	1.031	1.034	1.007
		外側炉心	1.100	1.034	1.037	1.018
出力分担率 ^{*4} (%)	BOEC	内側炉心	55.3	53.9	53.3	59.8
		中間炉心	24.2	24.6	24.9	22.9
		外側炉心	20.5	21.5	21.8	17.4
	EOEC	内側炉心	55.9	55.5	55.5	60.5
		中間炉心	24.1	24.1	24.2	22.7
		外側炉心	20.0	20.4	20.3	16.8
増殖比	BOEC	炉心部	0.952	1.049	1.056	1.070
		ブランケット含む合計	1.018	1.129	1.164	1.177
	EOEC	炉心部	0.942	1.034	1.037	1.047
		ブランケット含む合計	1.001	1.109	1.141	1.150
	サイクル 平均	炉心部	0.947	1.041	1.046	1.058
		ブランケット含む合計	1.010	1.119	1.153	1.164
最大高速中性子束 (n/cm ² ・s)	1.61E+15	1.65E+15	1.60E+15	1.86E+15		
最大高速フルエンス (n/cm ²)	5.190E+23	2.257E+23	2.662E+23	3.159E+23		
炉心部重金属燃料装荷量 (t)	94.7	94.6	98.3	98.2		

*1 核データとしてADJ98(JENDL3.2ベース統合炉定数の1998年度版)を用いた

*2 再臨界排除対策として集合体内中心の37本のピンについて下部軸ブラを充填せずに、ガス領域としている

*3 Pu同位体組成 PWR ; 49GWd/t、BWR ; 45GWd/t、炉外サイクル ; 10年、
Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241=3/52/27/9.5/7/1.5 (wt%)

*4 上下部軸ブラも含めた分担率である。

4.3 ペレットスミア密度増加による効果把握

4.2 で示した燃焼度の低減を考慮した上で燃焼度低下による FCMI 挙動の緩和の効果を考慮して、スミア密度を高燃焼度型での 82% T.D. から 85% T.D. へと増加させた場合の効果を検討した。設定した炉心燃料仕様を前述の表 4.2-1 に併せて示している。スミア密度を増加させるために、中空ペレット内径を高燃焼度型の 3.4mm から 2.8mm へと縮小させている。また、実効燃料体積率は 40.0% から 41.5% へと増加している。

このペレット密度の増加と合わせて、増殖性能を向上させることを意図して、当面、下部軸方向ブランケット長さを 20cm から 40cm へと増加させている。このような仕様変更を行った炉心案を増殖検討 2 と称する。

また、このスミア密度の増加、下部軸方向ブランケット長さの延長に伴う核物質装荷量の増加に合わせて、ブランケットを含めた燃焼度を保存するために、運転サイクル長さを 270 日から 330 日へと増加させた。

このような炉心・燃料仕様に対して Pu 富化度調整を行い、得られた 2 次元解析による核特性解析結果を前述の表 4.2-2 に示している。

炉心部の燃焼度は増加したものの、スミア密度が増加したことから、炉心平均した Pu 富化度は増殖検討 1 に比べて、0.3wt% 低い 15.3wt% となった。

増殖比の炉心部寄与は、増殖検討 1 の 1.041 から 1.046 へと僅かに増加した。また、ブランケットまで含めた増殖比は 1.12 から 1.15 まで増加した。

燃焼欠損反応度は、運転サイクル期間が増加したものの、増殖性能の向上により、さらに小さく 0.07% k/k' とほぼ零に近い数値となった。

ブランケットを含めた炉心全体の取出平均燃焼度は約 62GWd/t であり、ブランケット装荷量の増加のため炉心部のみの取出平均燃焼度は約 79GWd/t まで増加した。

また、炉心部の燃焼度の増加等により高速中性子照射量も増加し、 $2.7 \times 10^{23} \text{n/cm}^2$ 程度となった。

このように、ブランケットを含めた燃焼度を保存することを念頭にした場合では、軸方向ブランケット長さを延長するとブランケットによる ^{239}Pu 増殖量は増加するものの、炉心部の燃焼度が増加して内部転換比が低下する効果も存在することに留意する必要がある。今後、増殖性要求、最大中性子照射量の制約等を考慮して、最適なブランケットの装荷量について検討する必要があると思われる。

また、見直された核定数 ADJ2000 を用いた場合には、添付資料に示すように増殖比は 1.19 まで改善することから、この増殖検討 2 を高増殖型に対する当面のレファレンスに設定した。

4.4 Pu 富化度バランスによる効果把握

内部増殖炉心では炉心内部を低富化領域とし、その外周部を高富化領域で取り囲む Pu 富化度配分を採用し、炉内の出力分布の平坦化を図っている。このような、Pu 富化度配分は、一方で、中性子漏洩が少ない炉心内部の核的インポートランスを低めに行っていることから中性子経済が低下する要因となっている。このため、出力分布の悪化を許容して、低富化度領域での Pu 富化度を高め、中性子漏洩が少ない炉心内部の核的インポートランスを増加させた場合の増殖性に対する効果を把握することとする。

低富化領域と高富化領域との Pu 富化度差を増殖検討 2 での 3.9wt% から 2wt% に縮小するように Pu 富化度調整を実施した結果を増殖検討 3 として表 4.2-2 に他の検討例と合わせて示している。

このような中性子漏洩を抑制した Pu 富化度配分を実施した場合に炉心平均 Pu 富化度は増殖検討 2 に比べて、0.4wt% 低下した 14.9wt% となった。

この Pu 富化度の低下に伴って、炉心部の増殖比寄与は 1.046 から 1.058 へと増加し、ブランケットを含めた増殖比は 1.153 から 1.164 へとそれぞれ 0.01 程度増加した。

出力分布に関して低富化領域での出力密度が増加し、参考値であるものの最大線出力は増殖検討 2 での 392W/cm に対して 460W/cm と大幅に増加した。3次元解析を実施した場合での制御棒挿入効果、3次元効果等を考慮すると最大線出力は更に増加することが予想され、この程度までの Pu 富化度バランスの変更は最大線出力の観点から許容できないものとする。

このように、出力分布の悪化を許容して中性子漏洩を抑制した Pu 富化度配分を実施した場合でも、増殖比の改善効果は 0.01 程度に留まることが示された。

4.5 まとめ

炭酸ガスによる温暖化防止等の観点で FBR が比較的速やかに導入される場合を想定して、増殖性能を向上させた炉心案（高増殖型）を選択肢の一つとして検討した。

ここで、Pu 富化度の増加、FP 核種の蓄積等の観点で高燃焼度化は増殖性能の向上とトレードオフの関係にあることから、燃料サイクルコストの増加を許容し、Pu 増殖を優先して高増殖型では燃焼度を低減することとした。この際に、ブランケットも含めた炉心全体の取出平均燃焼度が燃料サイクルで循環する核物質量を定めることに着目して、この炉心全体の取出平均燃焼度として 3. で述べた炉心案（高燃焼度型）での 137GWd/t に比べて、ほぼ半減した 60GWd/t を目標とした。なお、この炉心全体の取出平均燃焼度 60GWd/t は、従来炉心概念において炉心部の取出平均燃焼度を 150GWd/t 程度とし、増殖比 1.2 を達成する程度までブランケットを設置した場合でのブランケットを含めた炉心全体の取出平均燃焼度にほぼ相当するものである。

運転サイクル日数を 630 日から 270 日まで短縮して炉心全体の取出平均燃焼度を 59GWd/t まで低減した場合（増殖検討 1）では、炉心部で体積重み平均した Pu 富化度は、高燃焼度型に比べて 1.5wt% 低下した 15.6wt% となった。また、増殖比の炉心部寄与は 1 を越え文字通り内部増殖が達成されることが示された。ブランケットまで含めた増殖比は 1.12 程度まで改善した。

また、燃焼度の低減による FCMI 挙動の緩和を生かしてスミア密度を 82%T.D. から 85%T.D. へと増加させ、さらに、下部軸方向ブランケットを 20cm から 40cm まで増加させた場合（増殖検討 2）では増殖比は炉心部寄与で 1.05、炉心全体で 1.15 まで向上した。なお、スミア密度の増加、下部軸方向ブランケット長さの延長に伴って炉心全体の燃焼度を維持するために運転サイクル期間は 330 日まで増加させている。

この炉心では内部転換比の向上による燃焼ミスマッチの縮小により、最大線出力は 10W/cm 程度は低減することが期待される。

さらに、出力分布の悪化を許容して、中性子漏洩を抑制するように炉心内部の低富化領域での Pu 富化度を相対的に高める Pu 富化度を配分した場合の増殖比の改善効果を把握した。この結果、最大線出力の観点で許容レベルを超える Pu 富化度配分をした場合でも増殖比の改善効果は 0.01 程度に留まることが示された。

以上の結果から増殖検討 2 を高増殖型の当面のレファレンスとした。

このレファレンスとした炉心案に対して、核データライブラリとして JENDL-3.2 版統合炉定数 ADJ98 に替わって、見直された ADJ2000 を使用した場合には添付資料に示すように増殖比は 1.19 まで向上する。

また、高増殖型の場合には、最大高速中性子照射量が PNC1520 鋼のような改良オ

ーステナイト系ステンレス鋼が被覆管材料として適用可能となる程度まで低減されている。このことは、ODS 鋼の開発を待たずして、ブランケットまで含めた取出平均燃焼度 60GWd/t を達成できる可能性を示している。

5. Na ボイド反応度低減方策の検討

太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した本炉心について、各炉心パラメータが Na ボイド反応度に与える影響について検討する。

5.1 解析方法

Na ボイド反応度の低減効果を把握するために、3.3.1 で述べた解析手法と同様に 70 群直接計算により Na ボイド反応度を求めた。ただし、本章では相対的な効果を把握する目的として、簡易的に燃料組成として未燃焼のものを用い、また、炉上部の Na プレナム部等をボイド化した場合でも特段の輸送補正を行わないこととした。

- ・ 核定数 ; JFS-3-J3.2 統合炉定数 (ADJ98)
- ・ 燃料組成 ; 未燃焼クリーン組成
- ・ 炉心体系 ; 基準炉心体系に各種 Na 低減方策を適用した体系
- ・ 均質化 70 群マクロ断面作成 ; SLAROM
- ・ 計算コード ; CITATION-FBR

ここで、Na ボイドは、ステンレス鋼希釈集合体、制御棒を除いた炉心燃料領域について、ラッパ管内部のみで発生するとした。

また、Na ボイド反応度として、通常の炉心部のみをボイド化した場合だけでなく、上部ガスプレナム部、Na プレナム部までボイド化した場合について解析した。

これは、ULOF 時等で想定される Na のボイド化が、炉心上端付近で開始して上下方の領域に広がっていくことが想定され、炉心上部領域まで含めてボイド化させた場合の反応度が CDA 解析において実際的に対象となると考えられるためである。

さらに、実効遅発中性子割合 (β_{eff}) については、平衡サイクル末期での 0.34% を一律に適用した。

なお、燃料組成として燃焼を考慮した組成を用いた場合には、核分裂生成物の混在に伴う中性子スペクトルの硬化等により Na ボイド反応度は増加することに留意する必要がある。

5.2 炉心高さによる Na ボイド反応度に与える影響

炉心高さと Na ボイド反応度との関係は、従来からさまざまな検討例があり、炉心高さの増加に伴って Na ボイド反応度が増加することが知られている。内部増殖炉心概念を適用した本炉心に対して、炉心高さをパラメータとして解析し、その傾向を定量的に把握した。

炉心高さは、軸方向中央部を増加させて、基準としている 120cm から 10cm 刻みで 150cm まで増加させることとした。ここで、炉心高さの増加に伴う実効増倍率の増加を許容するものとして Pu 富化度は基準炉心のまま一定とした。

ここで、炉心高さ以外の炉心パラメータについては、下記に示すように基準仕様を用いた。

- ・ 上部断熱ペレット ; 1.5cm
- ・ 上部ガスプレナム長さ ; 28.5cm
- ・ Na プレナム高さ ; 10.0cm
- ・ Pu 富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%

表 5.2-1 及び図 5.2-1 に炉心高さが、Na ボイド反応度に与える影響を示す。

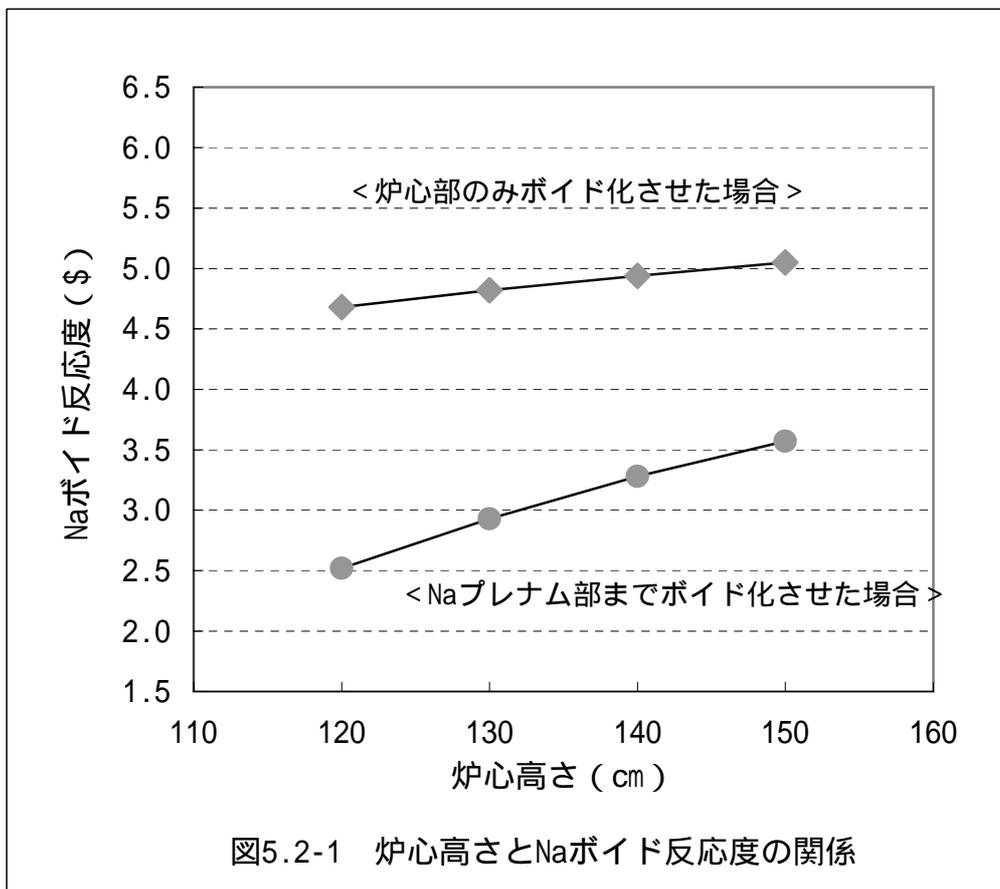
炉心高さの増加に伴って、Na ボイド反応度はほぼ直線的に増加している。これは、炉心高さを高くすることにより、Na がボイド化した際の軸方向への中性子漏洩効果が相対的に減少したことに対応している。

また、炉心部のみをボイド化させた場合の Na ボイド反応度は炉心高さ 10cm 増加する毎に 0.11 ~ 0.14 \$ 増加するのに対して、炉心部から Na プレナム部までボイド化させた場合の Na ボイド反応度はより感度が高く、炉心高さ 10cm 増加当たり 0.29 ~ 0.4 \$ 増加している。Na プレナム部までボイド化させた場合には軸方向への中性子漏洩効果がより大きな影響を及ぼしていたため、感度が増加したものと考えられる。

表5.2-1 炉心高さとNaボイド反応度の関係

炉心高さ (cm)	Naボイド反応度 (\$)	
	炉心部のみをボイド化 させた場合	Naプレナム部までボイド 化させた場合
120	4.68	2.52
130	4.82	2.93
140	4.94	3.28
150	5.05	3.57

上部ガスプレナム ; 28.5cm、Naプレナム ; 10cm
 Pu富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%



5.3 Pu 富化度分布による Na ボイド反応度に与える影響

内部増殖炉心で設定した Pu 富化度配分（低富化領域 Pu 富化度：14.5wt%、高富化領域 Pu 富化度：18.7wt%）を基準として、低富化領域及び高富化領域について、それぞれ、0.5wt%づつ Pu 富化度を増減した場合における Na ボイド反応度を解析した。

なお、軸方向富化度分布を採用した内部増殖炉心では、低富化領域を炉心の中心部に配置し、高富化領域を低富化領域の上下部及び外周部に設置している。

ここで、Pu 富化度以外の炉心パラメータについては、下記に示すように基準仕様を用いた。

- ・ 炉心高さ；120cm
- ・ 上部断熱ペレット；1.5cm
- ・ 上部ガスプレナム長さ；28.5cm
- ・ Na プレナム高さ；10.0cm

表 5.3-1 及び図 5.3-1 に Pu 富化度分布を変化させた場合での Na ボイド反応度への影響を示している。ここで、Na ボイド反応度は、炉心部のみをボイド化させた場合のものである。

低富化領域の Pu 富化度を減少させた場合、高富化領域の Pu 富化度を増加させた場合に Na ボイド反応度が減少する傾向が認められる。この感度は、低富化領域の Pu 富化度が 0.5wt% 減少する毎に約-0.02 ~ -0.07 \$、高富化領域の Pu 富化度が 0.5wt% 増加する毎に約-0.08 ~ -0.12 \$ である。

これは、炉心周辺部の反応度インポートランスを増加させた Pu 富化度配分により、Na がボイド化した際の中性子漏洩効果がより促進されたため Na ボイド反応度が減少したと考えられる。

このように、Na ボイド反応度を低減するためには、高富化領域の Pu 富化度を増加させることがある程度効果があるが、出力分布の観点から限度があることに留意する必要がある。

表5.3-1 Pu富化度分布とNaボイド反応度の関係

Pu富化度 (wt%)			Naボイド反応度* (\$)
低富化領域	高富化領域	平均	
14.0	18.2	16.7	4.72
14.0	18.7	17.0	4.60
14.0	19.2	17.3	4.49
14.5	18.2	16.9	4.76
14.5	18.7	17.2	4.66
14.5	19.2	17.5	4.55
15.0	18.2	17.0	4.78
15.0	18.7	17.4	4.70
15.0	19.2	17.7	4.60

* 炉心部のみボイド化した場合
 上部ガスプレナム ; 28.5cm、Naプレナム ; 10 c m

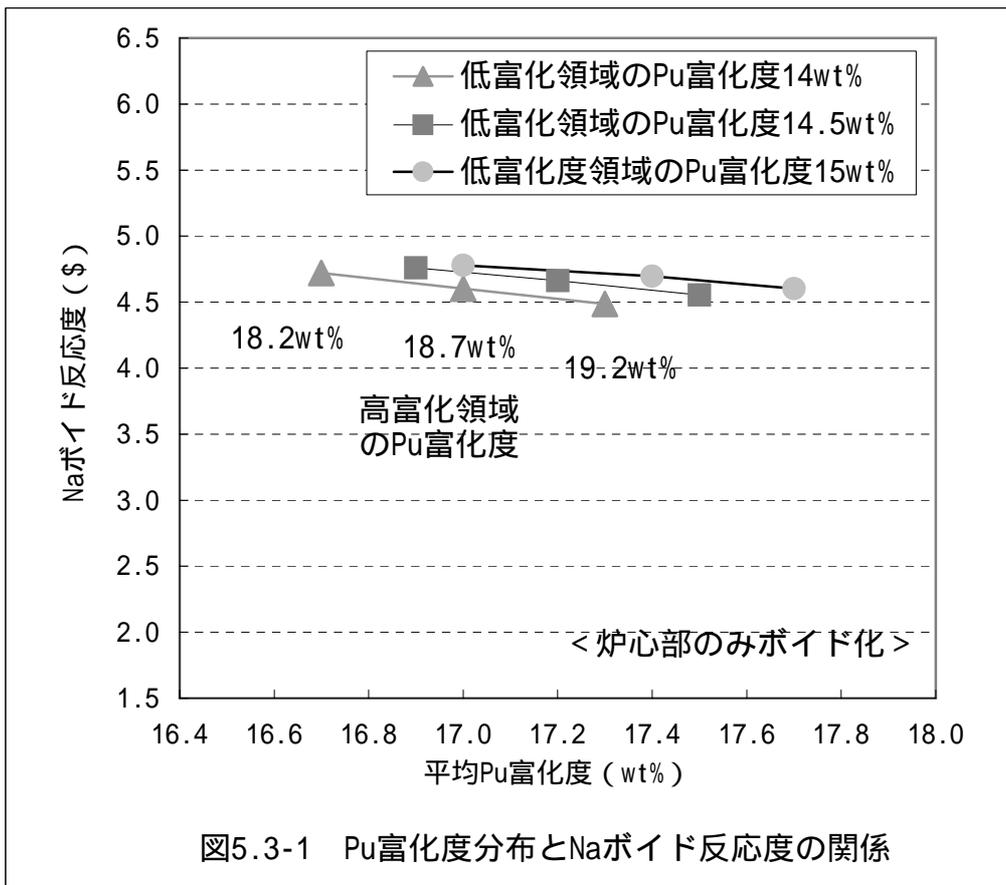


図5.3-1 Pu富化度分布とNaボイド反応度の関係

5.4 Na プレナム高さ等による Na ボイド反応度に与える影響

ULOF 事象での Na ボイド化の進展状況から、CDA 解析においては炉心上部領域を合わせた Na ボイド反応度が実質的に対象となると考えられる。この Na ボイド反応度に対してはボイド時に軸方向上方への中性子漏洩が促進される効果が期待できるため、Na プレナムの設置が有効となる。

このことから、Na プレナム高さ、上部ガスプレナム長さを下記のようにパラメータとして検討を実施した。

- ・ Na プレナム高さ ; 10、30、50、100cm
- ・ 上部ガスプレナム長さ ; 5、10、15cm

ここで、他の炉心パラメータについては、下記に示すように基準仕様を用いた。

- ・ 炉心高さ ; 120cm
- ・ 上部断熱ペレット ; 1.5cm
- ・ Pu 富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%

表 5.4-1 及び図 5.4-1 に Na プレナム高さ、上部ガスプレナム長さをパラメータとした場合の Na ボイド反応度解析結果を示す。

炉心部のみをボイド化させた場合の上部ガスプレナム及び Na プレナム高さの Na ボイド反応度に与える影響は小さい。Na プレナム高さを増加するにつれて、僅かに Na ボイド反応度が増加する傾向が認められる。

Na プレナム部までボイド化させた場合には、Na プレナム高さ等による影響が顕著に現れる。

Na プレナム高さを長くするにつれて Na ボイド反応度は低減され、Na プレナム高さが 50cm 程度で飽和する傾向が認められる。また、Na プレナム高さを 10cm から 30cm まで増加した場合でも Na ボイド反応度は 1 \$ 程度低下している。

上部ガスプレナム長さについては、Na プレナム高さが 10cm の場合に殆ど依存性を示さないが、Na プレナム高さが 30cm 以上の場合では上部ガスプレナム長さが長くなるにつれて、Na ボイド反応度が増加する傾向が認められた。これは、構造材を含む上部ガスプレナムが炉心と Na プレナムとの間に介在することで、Na プレナムによる Na ボイド反応度低下効果が抑制されたためと考えられる。

このように、Na ボイド反応度を低減するためには、上部ガスプレナム長さを短縮し、Na プレナム高さを 30cm 以上確保することが有利となる。

表5.4-1 Naプレナム高さ等とNaボイド反応度の関係

上部ガスプレナム長さ (cm)	Naプレナム高さ (cm)	Naボイド反応度	
		炉心部のみをボイド化 (%)	Naプレナム部までボイド化 (%)
5	10	4.56	3.52
5	30	4.68	2.52
5	50	4.74	2.09
5	100	4.82	1.82
10	10	4.58	3.51
10	30	4.69	2.69
10	50	4.74	2.37
10	100	4.80	2.18
15	10	4.61	3.52
15	30	4.70	2.85
15	50	4.74	2.62
15	100	4.79	2.47

炉心高さ ; 120cm、上部断熱ペレット ; 1.5 cm
 Pu富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%

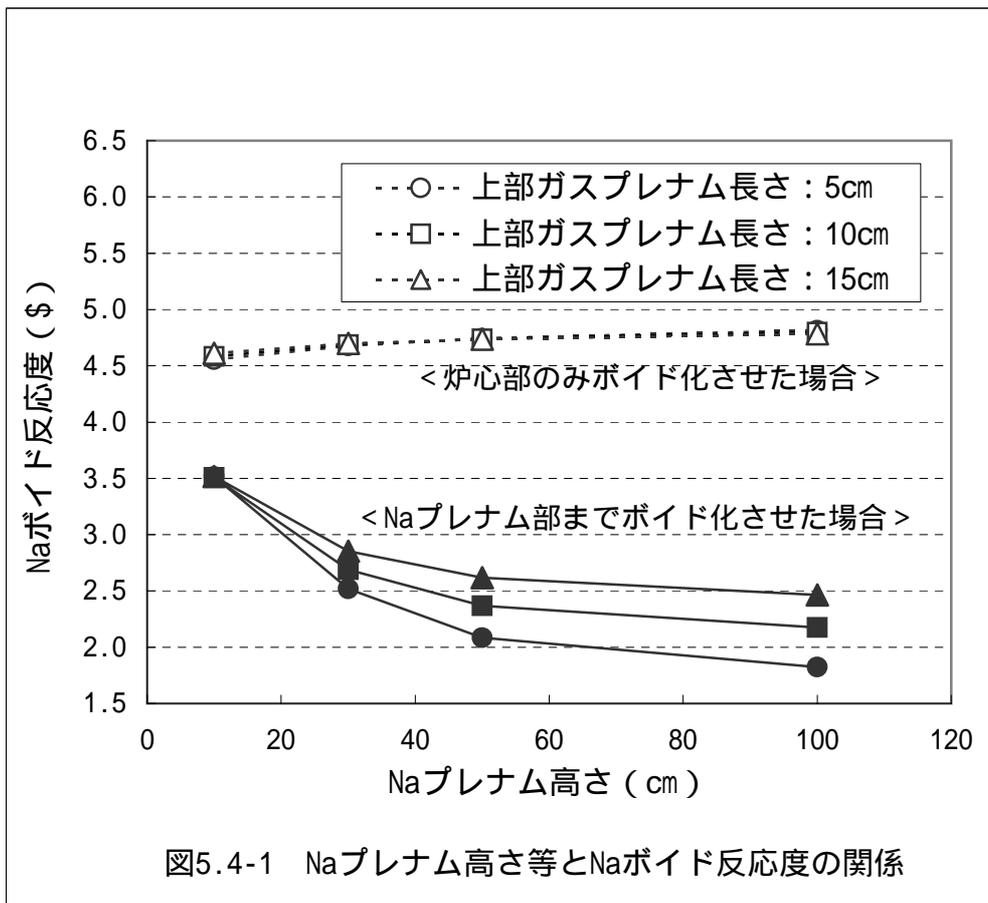


図5.4-1 Naプレナム高さ等とNaボイド反応度の関係

5.5 上部軸方向ブランケット高さによる Na ボイド反応度に与える影響

内部増殖炉心では、炉心高さ増加に伴う Na ボイド反応度の増加を抑制するために、上部軸方向ブランケットを削除することとしているが、上部ブランケット高さと Na ボイド反応度との関係を改めて確認する。

ここで、劣化ウランペレットを断熱ペレットとして装荷することを想定した 1.5cm から、上部軸方向ブランケットを 10、20、30cm 設置した場合を解析した。

ここで、上部軸方向ブランケット高さ以外の炉心パラメータについては、下記に示すように基準仕様を用いた。

- ・ 炉心高さ ; 120cm
- ・ 上部ガスプレナム長さ ; 28.5cm
- ・ Na プレナム高さ ; 10.0cm
- ・ Pu 富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%

表 5.5-1 及び図 5.5-1 に示すように、上部軸方向ブランケット高さを増加させると Na プレナム領域までボイド化させた場合の Na ボイド反応度は増加し、20cm 程度から飽和する傾向を示す。

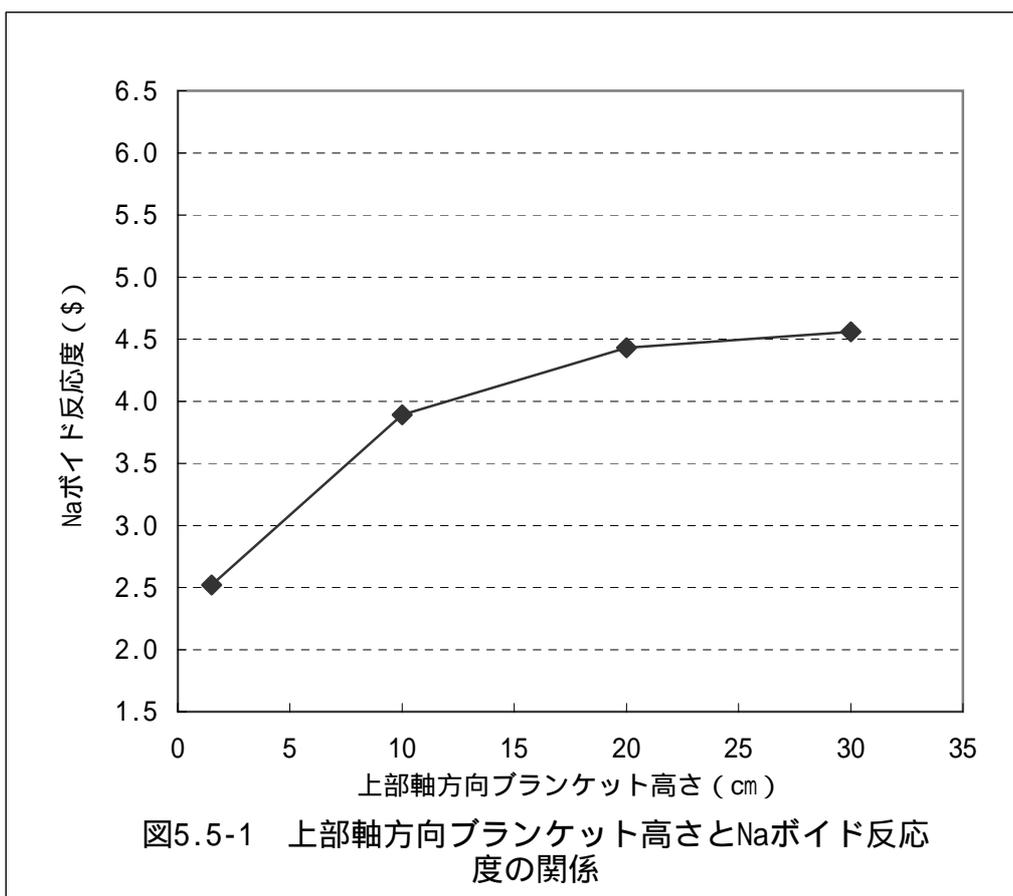
上部軸方向ブランケット領域では、冷却材流路の Na をボイド化した場合でもブランケットが残留するため、炉心部からの中性子漏洩を促進する効果は限定される。また、Na プレナム部と炉心部の距離が離れて、Na プレナム部の Na ボイド反応度低減効果が抑制されたことが考えられる。さらに、Na が排除されたことに伴う中性子スペクトル硬化により、ブランケット中の ^{238}U の高速核分裂が促進される効果も考えられる。

このように、Na ボイド反応度を抑制するためには、上部軸方向ブランケット高さを制限することが有効であることが確認できた。

表5.5-1 上部軸方向ブランケット高さとなボイド反応度の関係

上部軸方向ブランケット高さ (cm)	Naボイド反応度* (\$)
1.5	2.52
10.0	3.89
20.0	4.43
30.0	4.56

* Naプレナムまでボイド化した場合
 上部ガスプレナム ; 28.5cm、Naプレナム ; 10 c m
 Pu富化度 低富化領域 ; 14.5wt%、高富化領域 ; 18.7wt%



5.6 まとめ

中性子経済を向上させるため、内部増殖炉心では炉心高さを従来設計に比べて高い120cmとしており、Na ボイド反応度が高くなる傾向があった。このため、Na ボイド反応度の低減方策について検討した。

ここで、従来の炉心部内のNaのみをボイド化させた場合のNa ボイド反応度だけでなく、ULOF 事象でのNa ボイド領域の拡大状況に着目し、炉心部からNa プレナム部までを含めてボイド化したNa ボイド反応度を対象とすることとした。

このNa プレナム部までボイド化させたNa ボイド反応度は、Na のボイド化に伴う軸方向への中性子漏洩の促進効果により、炉心部のみをボイド化させた場合に比べて、小さい値を示す。

また、上部軸方向ブランケットを削除し、上部ガスプレナム長さを短縮し、Na プレナム高さを確保することで、この中性子漏洩効果をさらに高めることが可能であることが示された。また、このような状況でNa プレナム高さを30cm程度確保することで、1 \$ 以上のNa ボイド反応度低減効果が得られた。

6. 今後の課題及び予定

本年度の検討において、太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した1500MWeクラスの大型炉の具体化を図ることができた。

この内部増殖炉心では、軽水炉から高速炉へ緩やかに切り替わる導入シナリオを想定しているが、出力密度が低く、プルトニウムの初期インベントリが大きくなる特徴があり、導入シナリオにおいて具体的にどのように適合するのかを確認する。

また、高速炉の導入シナリオの多様性を考慮して、燃焼度を抑制してプルトニウム増殖性能を追及した炉心案の可能性を検討した。この高増殖型炉心案では最大高速中性子照射量が改良オーステナイト鋼(PNC1520)の適用が見通せる範囲まで低下した。実用化炉心・燃料像の多様性を探るため、この鋼種の適用を前提として、ブランケットをも含めた炉心全体の取出平均燃焼度約60GWd/tを達成する炉心像の検討を実施する。

さらに、内部増殖炉心では径方向ブランケットを削除すると共に安定した出力分布、出力変動により、冷却材流量の無駄を排して効率のよい冷却が可能である特長を有しており、これを被覆管最高温度の低減に活用することができる。現在開発が進められている ODS 鋼に対する代替オプションの一つと想定されている FMS 鋼は高照射量までの耐スエリング性に優れているものの、高温での機械的強度が低下する特性を有している。この特性は内部増殖炉心での特長と整合するものであり、FMS 鋼を用いた炉心オプションについても検討に値すると考えられる。

本年度検討した炉心案では、従来の設計例に比べて大幅に太径の燃料要素を用い、高い燃料体積率、低い比出力の特徴を有し、かつ、炉心高さを120cmに延長している。このような炉心において異常な過渡変化時及び事故時における挙動がどのようなものとなるのか検討を進める必要がある。

さらに、潜在的な危険性を評価する観点で、近年着目されてきた設計基準外事象である炉心崩壊事故 CDA についても検討する必要がある。本炉心案と同様に内部転換比の向上を狙い太径燃料を用いた中型炉心(低比出力、炉心高さ120cm)に対する SAS-4A コードによる CDA 起因過程解析が本検討後に実施され、Na ボイド反応度が6\$以下であっても LOF-driven-TOP により厳しい出力バーストが発生することが示されている。起因過程では炉内の出力/冷却材流量比分布に応じて冷却材ボイド領域が拡大することで印加される正の反応度と破損した燃料が軸方向に分散することで作用する負の反応度との競合関係が事象の進展に大きな影響を及ぼすと考えられている。比出力が低い炉心では燃料温度の上昇が遅れ、これにより燃料分散のタイミングが僅かに遅れることが厳しい出力バーストが発生した原因の一つではないか

と推定されている。本炉心案でも同様な事象に至る場合も考えられるが、一方で、軸方向ブランケットの全面的な削除によって破損燃料の上部側への燃料分散が容易になる効果や被覆管破損に至る前にペレットの中空部を通じた熔融燃料の移動する効果が期待される。いずれにせよ、本炉心案のように新たな特徴を有する炉心・燃料に対して CDA のような過酷な条件下の挙動については、十分な知見が得られておらず、今後、具体的な解析等によって検討を深めていく必要がある。また、この検討を通じて設計上の適切な対応を図っていく必要がある。

7. おわりに

現状、石油等が潤沢に供給されており、化石燃料資源の枯渇が顕在化していないこと、軽水炉の導入が想定よりも進まず、ウラン資源供給に対する懸念が遠のいたこと、経済性向上が著しい軽水炉に比べて FBR の発電コストが割高になると想定されること等から、FBR 実用化時期の見通しは流動化している。しかしながら、資源節約型で長期に亘って持続的なエネルギー供給が可能である等の特徴を有する FBR は、将来のエネルギー供給に対する技術的選択肢のうち、最も可能性の高いものの一つとして、従来より、また、現在でも位置付けられている。

原子力のように高い安全性、信頼性が要求される巨大なシステムでは、安全性を段階的に確認する開発手法を採らざるを得ず、開発期間が長期化するきらいがある。さらに、経験則に多くを依存する燃料分野の開発では実証が常に求められ、これには長期の照射試験が不可欠である。これらを考慮すると長期的視野に立ち、確実に研究開発を進めなければ、必要となる時期に FBR を実用化することは困難であると考えられる。

ここで、Na 冷却 MOX 燃料型の FBR は、原型炉「もんじゅ」の開発・建設を通じて確認してきたように重要な技術課題は既に解決済みであり、このため、早期に実用化できる可能性を有している。一方、実用化において、残された大きな課題は経済性の向上である。

また、燃料製造、再処理等の燃料サイクル分野において、操業、解体に伴って発生する TRU 廃棄物について、従来、対応方針が不明確であったこともあり、ともすればその重要性が十分に認識されていなかった。しかしながら、近年、TRU 廃棄物の処理・処分方法の具体化が進んでいくなかで、その影響の大きさが注目されつつある。

このような現状認識のもの、実効的な燃焼度を格段に増加させて燃料サイクルにおいて循環する核物質の物量自体を半減程度まで大幅に削減する内部増殖炉心概念は、経済性向上、廃棄物発生量低減の意味で、時代要請に合致した炉心・燃料像であると考えられる。

さらに、下北半島の六ヶ所地区における再処理を始めとした軽水炉用の燃料サイクル施設の建設が進み、操業を控えている段階に達している。FBR において MOX 燃料を使用することで、この軽水炉体系での燃料サイクルの技術基盤を円滑に引き継ぎ、産業レベルまで引き上げることが期待される。逆に、軽水炉体系で確立する燃料サイクル技術基盤を今後の FBR 体系で発展的に活用することは、今日的にプルサーマルの意義をより強固なものにすると考える。

参考文献

- 1) T. Abe, S. Maeda, H. Takashita : “ Optimization of Fast Breeder Core Design for Improving Economy” ,*GLOBAL2001*, Paris, Sept. (2001)
- 2) 池上 哲雄、他 : “ 炉心・燃料 (燃料形態) の技術検討書-平成 11 年度報告- ”、JNC TY9400 2000-021 (2000)
- 3) 横山 賢治、他 : “ JENDL-3.2 に基づく大型高速炉用統合炉定数の整備 ”、JNC TN9400 99-042 (1994)
- 4) 石川 眞、他 : “ 高速炉用統合炉定数 ADJ2000 の作成 ”、JNC TN9400 2001-071 (2001)
- 5) V. V. Orlov *et al.* : “Physical Characteristics of Lead Cooled Fast Reactor”, Proc. of Top. Meet. Advances in Reactor Physics, Vol. 1, Knoxville, TN., USA, 11-15 Apr.(1994)
- 6) T. Kamei *et al.* : “An Axially and Radially Two-Zoned Large Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Core Concept”, *Nucl. Technol.*, **71**, 548 (1985).
- 7) Shi-Kuei Cheng and Neil E.Todreas : “Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles – Bundle Friction Factors, Subchannel Friction factors and Mixing Parameters”, *Nucl. Eng. and Des.*, **92**, 227(1986)
- 8) 野村 茂雄、他 : “ 高速炉炉心構成要素用高強度フェライト/マルテンサイト鋼 (PNC-FMS)材料強度基準 (暫定案) ”、 PNC ZN9410 92-110 (1992)
- 9) 高下 浩文、他 : “ 核設計手法報告者 ”、JNC TN8410 2000-011 (2000)
- 10) R. Sher : “Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides”, Proc. Conf. Nucl. Data Evaluation Method & Procedures, BNL, p835 (1980)
- 11) 鈴木 教倫、他 : “ 高速増殖原型炉「もんじゅ」JENDL-3.2 によるもんじゅ制御棒価値解析 ”、PNC ZN2410 97-003 (1997)

添付資料 統合炉定数 ADJ2000 を用いた場合での核特性について

(1) 統合炉定数 ADJ2000

JENDL-3.2 に基づく統合炉定数については、JUPITER 臨界実験データを中心に校正された統合炉定数 (ADJ98) が平成 11、12 年度の実用化戦略調査研究において使用されており、本検討においても平成 12 年度において、この核定数を使用した。その後、「常陽」の燃焼欠損反応度等のより幅広いデータに基づく統合炉定数 (ADJ2000) が提示され、実用化戦略調査研究において平成 13 年度については、この見直された核定数が使用されている。

ここで、ADJ2000 では ADJ98 に比べて、 ^{239}Pu の中性子捕獲断面積 (σ_c) を小さく、 ^{238}U 及び ^{240}Pu の σ_c に対して大きくなるように再調整され、全般的に ADJ2000 では JENDL-3.2 のオリジナルに近づく傾向を示している。ここで、ADJ98 では fissile 核種の消滅を過大に、fertile 核種の中性子捕獲を過小に評価していたため、この定数を用いた場合に増殖特性を過小評価していたこととなる。

このため、太径中空燃料を用いた内部増殖炉心概念を適用した高燃焼度型炉心案及び高増殖型炉心案に対して、核定数として ADJ2000 を用いた場合の核特性を把握する。

(2) 各炉心の炉心燃料仕様

各炉心オプションの炉心燃料仕様を添付表 1 に示す。これらの仕様は、本文中でレファレンスに設定したものである。高増殖型炉心案は、燃焼度を低減するため運転サイクル長さを 330 日としたこと、下部軸方向ブランケットを 40cm まで延長したこと、スミア密度を 85% T.D. まで増加させるように中空径を 2.8mm としたこと、Pu 富化度を再調整したことを除いては高燃焼度型炉心案と共通したものである。

(3) 核特性解析手法

核定数として ADJ2000 を用いること以外については、本文中 3.3.1 に示した核特性解析手法に基づく。ただし、核定数の見直しに伴う、主に増殖性能に対する影響を評価する観点から CITATION コードを用いた 2 次元 RZ 体系燃焼計算での核特性を把握する。

(4) 核特性結果

2 次元 RZ 燃焼計算による核特性解析結果を添付表 2 に示す。ADJ2000 を用いた場合には、燃焼に伴う燃料組成変化において fissile 核種の低下幅が縮小するため、燃焼欠損反応度が高燃焼度型炉心案では 1.5% k/kk' から 0.9% k/kk' まで低減した。燃焼欠損反応度がほぼ零であった高増殖型炉心案では負の値となり、平衡サイクル末期での実効増倍率が初期のそれを上回っている。この燃焼欠損反応度の改善に対応して、炉心全体で体積平均した Pu 富化度は両炉心共に低下し、高増殖型炉

心案では約 15wt%となった。この Pu 富化度の低下は、好循環的に燃焼特性の向上に寄与している。この燃焼特性の改善は、燃焼ミスマッチにも影響を与えており、平衡サイクル初期の各領域の燃焼ミスマッチ係数はそれぞれ約 3 % 低減している。添付表 2 に示した最大線出力は 2 次元 RZ 体系での解析値であるため制御棒効果等を含まず参考値の位置付けであるものの、この燃焼ミスマッチ係数の低下により最大線出力は 10W/cm 程度低下することとなる。

増殖性能に関して、高燃焼度型炉心案において炉心部の平衡サイクル初期及び末期で平均した増殖比は、0.947 から 0.994 へと改善し、ほぼ内部転換比 1 を達成している。さらに、高増殖型炉心案では炉心部の増殖比が 1.046 から 1.086 へと拡大し、炉心部のみで増殖を達成している。ブランケットを含めた場合には、高燃焼度型炉心案で 1.010 から 1.059 へと増殖比が改善し、燃料サイクルロス分を補う程度までの増殖性能が得られている。また、高増殖型炉心案では 1.153 から 1.196 へと増加し、ほぼ 1.2 の増殖比が得られている。

なお、運転サイクル長さ等の条件を変更していないために、核定数の入れ替えを行っても、取出平均燃焼度への影響は殆どない。

各ケースにおける平衡サイクル初期及び末期での Na ボイド反応度を比較して添付表 3 に示す。これらの計算ケースでは核定数の差に加えて、これに伴って Pu 富化度においても違いが生じていることに注意が必要である。また、ADJ2000 においては遅発中性子割合についても調整を行っており、整合を取るため調整後の遅発中性子割合のデータを用いた。

高燃焼度型炉心案で ADJ2000 を用いた場合には、ADJ98 を用いた場合に比べて、Na ボイド反応度は約 0.2 \$ 大きくなった。この場合においても、高燃焼度型炉心案の炉心部のみをボイド化した場合では 6 \$ をこえるが、上部の Na プレナム領域まで同時にボイド化した場合では 5.7 \$ と 6 \$ 以下を満足する。燃焼度を低下させた高増殖型炉心案では、炉心部のみをボイド化した場合でも 6 \$ 以下を満足し、更に Na プレナム領域までボイド化させたケースでは 4.8 \$ まで低減した。

(5) プルトニウムインベントリ及び物質収支

両核定数を用いた場合の高燃焼度型炉心案及び高増殖型炉心案に対する平衡サイクル時の物質収支を添付表 4 ~ 7 に示す。

核定数として ADJ98 を用いた高燃焼度型炉心案の 1 バッチ当たりの物資収支では、Pu 核種全体では僅かに増加するものの、Pu-fissile では僅かに負の値となり、燃料サイクルを持続できない結果であった。しかしながら、ADJ2000 を用いた場合には、Pu-fissile で 1 サイクル当たり 111kg の利得があり、これは 1 バッチ当たりの Pu-fissile 装荷量 1368kg の約 8 % に相当し、炉外サイクルでのロスを考慮しても、十分にシステムを持続できることを示している。

高増殖型炉心案では、ADJ98 を用いた場合に 173kg の Pu-fissile 利得であったのに対して、ADJ2000 を用いた場合には、221kg と約 50kg 増加した。

内部増殖炉心では燃焼に伴う反応度変化が小さく、初装荷燃料と取替燃料との Pu 富化度差が小さいことを考慮して、取替燃料の Pu 富化度等を用いて初期インベントリを算出した結果を添付表 8 に示す。ADJ2000 を用いた場合で、高燃焼度型炉心の初期インベントリとして約 15.1tM の Pu 重量、約 9.5tM の Pu-fissile 重量が必要であり、同様に高増殖型炉心では約 14.6tM の Pu 重量、約 9.2tM の Pu-fissile 重量が必要であることが示される。

Pu-fissile 重量に関して初期インベントリと 1 バッチ当たりの利得から定義した炉倍増時間は、ADJ98 を用いた高増殖型炉心案で約 55 年であり、ADJ2000 を用いた場合には約 42 年へと短縮する。なお、利得が得られない ADJ98 を用いた高燃焼度型炉心案のケースでは炉倍増時間を設定できず、ADJ2000 を用いた場合でも約 160 年と長い値となるが、本来、高燃焼度型炉心案は倍増時間短縮を意図したものではない。

なお、この表には炉外サイクル期間 5 年を考慮した場合での複合倍増時間についても合わせて示している。内部増殖炉心では初期インベントリが大きいものの、1 バッチ当たりの装荷量は低減しているため、炉外でのインベントリが小さい。このため、炉倍増時間と複合倍増時間との差が小さい特徴がある。

添付表1 内部増殖炉心(高燃焼度型、高増殖型)の炉心・燃料仕様

ケース		高燃焼度型炉心	高増殖型炉心
炉出力 (MWth)		3500	
運転サイクル長さ (日)		630	330
炉心等価直径 (m)		5.28	
集合体体数	内側/中間/外側炉心	232/126/162	
	制御棒	36	
	ステンレス鋼希釈集合体	3	
燃料交換バッチ(内側/中間/外側1層/外側2層)		6/7/8/9	
炉心高さ (cm)		120	
富化度領域区分 (cm) (上下部:高富化度)	内側炉心(上部/中央部/下部)	30 / 70 / 20	
	中間炉心(上部/中央部/下部)	40 / 50 / 30	
軸ブラ高さ(cm)(上部/下部 ^{*1})		1.5 / 20	1.5 / 40
集合体配列ピッチ (mm)		212.5	
ラッパ管肉厚 (mm)		5.1	
集合体間ギャップ (mm)		5.0	
ペレット仕様 (炉心燃料/ブランケット燃料)		中空/中実	
ペレット外径 (mm)		10.40	
ペレット内径 (mm)		3.4	2.8
ペレット密度 (%TD)		95	
スミア密度 (%)		82	85.1
被覆管外径 (mm)		12.0	
被覆管肉厚 (mm)		0.71	
ワイヤ径 (mm)		1.15	
ワイヤ巻付ピッチ (mm)		200	
燃料要素本数 (本)		217	
Pu同位体組成		軽水炉取出 ^{*2}	
U濃縮度 (wt%)		0.3	
構造材材質 (%)		PNC-FMS&ODS	
体積率 (%)	燃料(実効)	40.0	41.5
	ボルト+ギャップ	8.8	7.2
	構造材	23.7	23.7
	冷却材	27.5	27.5

* 1: 再臨界排除対策として集合体内の37本の燃料要素について下部軸ブラを削除し、ガスプレナム領域としている。

* 2: 軽水取出(PWR:49GWd/t、BWR:45GWd/t、炉外サイクル:10年);
Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241=3/52/27/9.5/7/1.5 (wt%)

添付表2 統合炉定数ADJ2000を用いた内部増殖炉心の核特性(2次元RZ体系)

ケース		高燃焼度型炉心		高増殖型炉心		
核データライブラリ		ADJ98	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000	
炉出力 (MWth)		3500				
運転サイクル長さ (日)		630		330		
スミア密度 (%)		82.0		85.1		
Pu富化度	低富化/高富化 (wt%)	14.5 / 18.7	13.6 / 17.8	12.8 / 16.7	12.4 / 16.6	
	体積平均 (wt%)	17.15	16.28	15.29	15.08	
実効増倍率	BOEC	1.0186	1.0116	1.0027	1.0030	
	EOEC	1.0033	1.0026	1.0020	1.0050	
燃焼欠損反応度 (% k/kk')		1.49	0.88	0.07	-0.20	
取出平均 燃焼度 (GWd/t)	炉心部	154.6	154.5	78.8	78.7	
	ブランケット部	31.0	32.2	6.2	6.3	
	炉心 + ブランケット	136.8	136.9	61.6	61.6	
最大線出力 (W/cm) (2次元解析) (参考値)	BOEC	内側	406	398	387	379
		中間	367	357	360	360
		外側	306	297	311	318
	EOEC	内側	388	398	392	392
		中間	349	341	348	348
		外側	293	281	292	294
燃焼ミス マッチ係数 (ピーク位置)	BOEC	内側	1.105	1.078	1.033	1.025
		中間	1.112	1.082	1.035	1.027
		外側	1.112	1.083	1.039	1.032
	EOEC	内側	1.027	1.018	1.018	1.028
		中間	1.100	1.077	1.034	1.026
		外側	1.100	1.077	1.037	1.031
増殖比	炉心部	BOEC	0.952	1.006	1.056	1.098
		EOEC	0.942	0.982	1.037	1.074
		平均	0.947	0.994	1.046	1.086
	炉心部 + ブランケット合計	BOEC	1.018	1.074	1.164	1.211
		EOEC	1.001	1.043	1.141	1.182
		平均	1.010	1.059	1.153	1.196
最大高速中性子束 (n/cm ² ·s)		1.61E+15	1.67E+15	1.60E+15	1.59E+15	
最大高速フルエンス (n/cm ²)		5.2E+23	5.3E+23	2.7E+23	2.6E+23	
重金属燃料装荷量 (t)		94.7	94.7	98.3	98.2	

添付表3 統合炉定数ADJ2000を用いた場合のNaボイド反応度

運転サイクル		平衡サイクル初期			平衡サイクル末期		
炉心		高燃焼度型		高増殖型	高燃焼度型		高増殖型
核定数		ADJ98	ADJ2000	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000	ADJ2000
実効 増倍率 ^{*1}	基準	1.0213358	1.0140805	1.0051440	1.0059438	1.0048516	1.0064400
	: 炉心領域	1.0429140	1.0366499	1.0257944	1.0281522	1.0281399	1.0277981
	: + 上部軸ブラ	1.0428596	1.0365988	1.0257367	1.0281043	1.0280950	1.0277451
	: + 上部ガスプレナム	1.0410451	1.0347914	1.0238245	1.0264478	1.0264386	1.0259230
	: + 上部Naプレナム	1.0394293	1.0331438	1.0221027	1.0249690	1.0249300	1.0242738
反応度 ^{*2, *3} (% k/kk')	: 炉心領域	2.03	2.15	2.00	2.15	2.25	2.06
	: + 上部軸ブラ (上部軸ブラ)	2.02	2.14	2.00	2.14	2.25	2.06
	: + 上部ガスプレナム (上部ガスプレナム)	(-0.00)	(-0.00)	(-0.00)	(-0.00)	(-0.00)	(-0.00)
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	1.87	1.99	1.84	2.00	2.11	1.91
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	(-0.15)	(-0.15)	(-0.16)	(-0.14)	(-0.14)	(-0.15)
-eff		0.003495	0.003579	0.003726	0.003426	0.003498	0.003666
反応度 ^{*3} (\$)	: 炉心領域	5.80	6.00	5.37	6.27	6.44	5.63
	: + 上部軸ブラ (上部軸ブラ)	5.78	5.99	5.36	6.26	6.43	5.62
	: + 上部ガスプレナム (上部ガスプレナム)	(-0.01)	(-0.01)	(-0.01)	(-0.01)	(-0.01)	(-0.01)
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	5.36	5.57	4.93	5.85	6.03	5.20
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	(-0.43)	(-0.42)	(-0.43)	(-0.41)	(-0.40)	(-0.42)
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	4.98	5.18	4.53	5.48	5.67	4.82
	: + 上部Naプレナム (上部Naプレナム)	(-0.38)	(-0.38)	(-0.39)	(-0.36)	(-0.36)	(-0.38)

*1 ボイド化する領域は総てラッパ管内としている

*2 炉心上部領域での負の反応度幅に対して輸送補正効果として0.89を考慮する

*3 括弧内は上の欄との差

添付表4 ADJ98を用いた高燃焼度型炉心の平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)

単位: kg

	装荷重量(平衡初期)					取出重量(平衡末期)					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	
Pu-238	34.3	16.7	10.0	9.5	70.5	19.8	10.3	6.5	7.1	43.7	-26.8
Pu-239	594.8	289.0	172.8	165.4	1222.0	676.5	315.9	170.8	166.5	1329.7	107.7
Pu-240	308.8	150.0	89.7	85.9	634.4	360.5	170.2	94.1	91.0	715.9	81.5
Pu-241	108.7	52.8	31.6	30.2	223.2	58.4	26.8	14.3	13.5	112.9	-110.3
Pu-242	80.1	38.9	23.3	22.3	164.5	68.9	33.8	20.2	20.3	143.2	-21.3
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	0.9	0.6	0.8	3.8	3.8
U-235	21.2	9.8	5.2	5.0	41.3	4.5	2.4	1.6	2.0	10.4	-30.9
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	1.4	0.7	0.6	5.6	5.6
U-238	7058.8	3264.1	1738.0	1664.2	13725.1	5697.4	2683.9	1472.7	1471.1	11325.1	-2400.0
Am-241	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	22.1	12.7	9.0	11.2	54.9	19.7
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	1.1	0.7	0.7	4.5	4.5
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.8	6.9	3.8	3.1	28.7	28.7
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.5	0.8	0.6	6.4	6.4
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.5	0.3	0.2	2.0	2.0
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.2	3.1	1.4	0.9	12.5	12.5
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.4	0.1	0.1	1.5	1.5
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.1	6.2	3.0	2.4	25.7	25.7
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	169.8	73.0	36.8	25.0	304.5	304.5
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	854.1	371.1	182.6	129.8	1537.6	1537.6
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	242.9	107.3	56.2	39.4	445.8	445.8
O	1095.8	510.2	276.5	264.7	2147.2	1095.8	510.2	276.5	264.7	2147.2	0.0
Na	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Fe	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	0.0
Cr	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	0.0
Ni	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	0.0
Mo	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	0.0
Mn	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	0.0
W	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	0.0
Pu Total	1126.7	547.4	327.3	313.3	2314.6	1184.1	557.0	306.0	298.4	2345.5	30.9
Pu-fiss Total	703.5	341.8	204.4	195.6	1445.2	734.9	342.7	185.1	180.0	1442.6	-2.6
U Total	7080.0	3273.9	1743.2	1669.2	13766.4	5706.4	2688.5	1475.6	1474.5	11344.9	-2421.4
MA Total	17.2	8.3	5.0	4.8	35.2	51.7	26.2	16.1	16.9	110.9	75.6
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1280.9	557.5	278.6	196.6	2313.7	2313.7
H.M Total	8223.8	3829.6	2075.5	1987.3	16116.2	8223.1	3829.2	2076.3	1986.5	16115.0	-1.2
Fuel Total	9319.6	4339.9	2351.9	2252.0	18263.4	9318.8	4339.5	2352.7	2251.2	18262.2	-1.2
Coolant Total	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Steel Total	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	0.0
Total	13805.0	6427.9	3483.0	3334.8	27050.7	13804.2	6427.5	3483.8	3334.0	27049.5	-1.2

添付表5 ADJ2000を用いた高燃焼度型炉心の平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)

単位: kg

	装荷重量(平衡初期)					取出重量(平衡末期)					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	
Pu-238	32.4	15.8	9.5	9.1	66.7	18.5	9.7	6.2	6.7	41.1	-25.6
Pu-239	561.6	273.4	164.4	157.4	1156.8	702.2	327.3	176.1	169.8	1375.4	218.6
Pu-240	291.6	142.0	85.4	81.7	600.7	329.7	155.8	86.5	84.1	656.2	55.5
Pu-241	102.6	50.0	30.0	28.8	211.4	53.5	24.7	13.2	12.6	104.0	-107.4
Pu-242	75.6	36.8	22.1	21.2	155.7	64.4	31.8	19.2	19.3	134.6	-21.1
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.8	0.6	0.7	3.5	3.5
U-235	21.4	9.9	5.3	5.1	41.7	4.2	2.3	1.6	2.0	10.1	-31.6
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	1.4	0.7	0.6	5.8	5.8
U-238	7119.8	3292.1	1754.0	1678.2	13844.1	5697.2	2694.3	1481.4	1481.9	11354.8	-2489.3
Am-241	16.2	7.9	4.7	4.5	33.4	20.0	11.7	8.4	10.5	50.5	17.2
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.8	1.0	0.7	0.7	4.2	4.2
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.2	6.6	3.6	3.0	27.4	27.4
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.4	1.5	0.8	0.6	6.4	6.4
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.2	0.2	1.9	1.9
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.1	3.0	1.3	0.8	12.3	12.3
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.4	0.1	0.1	1.5	1.5
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4	6.3	3.1	2.5	26.3	26.3
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	173.7	73.5	36.7	24.9	308.8	308.8
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	873.6	372.7	181.3	127.7	1555.3	1555.3
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	232.6	101.3	53.0	37.3	424.2	424.2
O	1095.5	510.0	276.5	264.6	2146.6	1095.5	510.0	276.5	264.6	2146.6	0.0
Na	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Fe	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	3498.6	1628.7	882.3	844.6	6854.1	0.0
Cr	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	390.1	181.6	98.4	94.1	764.1	0.0
Ni	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	6.2	2.9	1.6	1.5	12.1	0.0
Mo	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	7.7	3.6	1.9	1.9	15.1	0.0
Mn	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	9.2	4.3	2.3	2.2	18.1	0.0
W	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	79.8	37.2	20.1	19.3	156.4	0.0
Pu Total	1063.8	518.0	311.4	298.1	2191.3	1168.2	549.3	301.2	292.5	2311.2	119.9
Pu-fiss Total	664.2	323.4	194.4	186.2	1368.2	755.7	352.0	189.3	182.4	1479.4	111.2
U Total	7141.2	3302.0	1759.2	1683.3	13885.7	5705.9	2698.8	1484.2	1485.2	11374.2	-2511.6
MA Total	16.2	7.9	4.7	4.5	33.4	48.7	24.7	15.2	16.0	104.7	71.3
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1294.3	553.8	274.1	192.4	2314.6	2314.6
H.M Total	8221.2	3827.9	2075.4	1985.9	16110.4	8217.2	3826.6	2074.7	1986.2	16104.7	-5.7
Fuel Total	9316.7	4337.9	2351.9	2250.6	18257.0	9312.6	4336.6	2351.2	2250.8	18251.3	-5.7
Coolant Total	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	493.8	229.9	124.5	119.2	967.4	0.0
Steel Total	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	3991.6	1858.2	1006.6	963.5	7819.8	0.0
Total	13802.1	6425.9	3482.9	3333.3	27044.3	13798.0	6424.6	3482.3	3333.6	27038.5	-5.7

添付表6 ADJ98を用いた高増殖型炉心の平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)

単位: kg

	装荷重量(平衡初期)					取出重量(平衡末期)					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	
Pu-238	31.6	15.4	9.2	8.8	65.1	21.8	10.8	6.7	6.9	46.2	-18.9
Pu-239	547.9	266.6	160.1	153.3	1127.9	707.1	330.1	178.1	168.1	1383.5	255.6
Pu-240	284.5	138.4	83.1	79.6	585.6	319.4	153.1	87.4	83.5	643.4	57.8
Pu-241	100.1	48.7	29.3	28.0	206.1	61.5	29.0	16.5	16.2	123.3	-82.8
Pu-242	73.8	35.9	21.6	20.6	151.8	69.4	33.8	20.3	19.8	143.3	-8.5
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	0.4	0.4	2.3	2.3
U-235	25.6	11.8	6.3	6.1	49.8	12.4	5.9	3.5	3.8	25.6	-24.2
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	1.2	0.6	0.5	5.0	5.0
U-238	8496.8	3934.5	2102.3	2012.9	16546.5	7689.7	3574.0	1933.9	1891.1	15088.7	-1457.7
Am-241	15.8	7.7	4.6	4.4	32.5	21.1	11.4	7.8	9.1	49.4	16.9
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.7	0.4	0.4	3.0	3.0
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	4.6	2.5	2.0	18.8	18.8
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.1	0.6	0.4	4.7	4.7
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.5	0.2	0.2	1.9	1.9
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	1.2	0.6	0.3	4.9	4.9
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.4	0.4
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	4.8	2.3	1.8	19.4	19.4
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	94.8	43.0	22.4	15.1	175.4	175.4
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	423.6	195.7	100.8	71.1	791.2	791.2
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	121.9	57.2	31.5	22.3	232.9	232.9
O	1278.0	595.0	322.5	308.7	2504.1	1278.0	595.0	322.5	308.7	2504.1	0.0
Na	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	0.0
Fe	3993.1	1858.9	1007.0	963.9	7822.8	3993.1	1858.9	1007.0	963.9	7822.8	0.0
Cr	445.2	207.2	112.3	107.4	872.2	445.2	207.2	112.3	107.4	872.2	0.0
Ni	7.0	3.3	1.8	1.7	13.8	7.0	3.3	1.8	1.7	13.8	0.0
Mo	8.8	4.1	2.2	2.1	17.2	8.8	4.1	2.2	2.1	17.2	0.0
Mn	10.5	4.9	2.7	2.5	20.7	10.5	4.9	2.7	2.5	20.7	0.0
W	91.1	42.4	23.0	22.0	178.5	91.1	42.4	23.0	22.0	178.5	0.0
Pu Total	1037.9	505.1	303.3	290.3	2136.5	1179.2	556.9	309.0	294.6	2339.7	203.2
Pu-fiss Total	648.0	315.3	189.4	181.3	1334.0	768.6	359.1	194.7	184.3	1506.7	172.8
U Total	8522.4	3946.4	2108.6	2019.0	16596.3	7705.7	3581.7	1938.3	1895.8	15121.6	-1474.7
MA Total	15.8	7.7	4.6	4.4	32.5	38.7	19.7	12.2	12.5	83.2	50.7
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	650.9	300.7	157.0	110.3	1218.9	1218.9
H.M Total	9576.0	4459.1	2416.5	2313.7	18765.3	9574.6	4459.0	2416.6	2313.2	18763.3	-2.0
Fuel Total	10854.0	5054.1	2739.0	2622.4	21269.4	10852.5	5053.9	2739.1	2621.9	21267.4	-2.0
Coolant Total	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	0.0
Steel Total	4555.8	2120.8	1148.8	1099.7	8925.1	4555.8	2120.8	1148.8	1099.7	8925.1	0.0
Total	15973.4	7437.2	4029.9	3858.1	31298.7	15972.0	7437.1	4030.0	3857.6	31296.7	-2.0

添付表7 ADJ2000を用いた高増殖型炉心の平衡サイクルにおける1バッチ当たりの物質収支(炉心+ブランケット部)

単位: kg

	装荷重量(平衡初期)					取出重量(平衡末期)					物質収支
	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	内側炉心 (6バッチ)	中間炉心 (7バッチ)	外側炉心第1層 (8バッチ)	外側炉心第2層 (9バッチ)	合計	
Pu-238	31.0	15.2	9.2	8.8	64.1	21.4	10.6	6.6	6.8	45.4	-18.7
Pu-239	537.4	262.7	159.1	152.3	1111.5	723.6	338.9	182.6	171.7	1416.8	305.4
Pu-240	279.0	136.4	82.6	79.1	577.1	301.2	145.4	83.9	80.8	611.3	34.3
Pu-241	98.2	48.0	29.1	27.8	203.1	59.1	27.9	16.0	15.8	118.8	-84.2
Pu-242	72.4	35.4	21.4	20.5	149.6	68.0	33.2	20.0	19.7	140.8	-8.8
U-234	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.5	0.4	0.4	2.2	2.2
U-235	25.6	11.9	6.3	6.1	49.9	12.4	5.8	3.4	3.7	25.3	-24.6
U-236	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	1.3	0.6	0.5	5.1	5.1
U-238	8516.8	3941.5	2104.3	2013.9	16576.5	7706.7	3570.0	1929.3	1886.5	15092.3	-1484.1
Am-241	15.5	7.6	4.6	4.4	32.1	20.6	11.0	7.6	8.9	48.1	16.0
Am-242m	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.7	0.4	0.4	3.0	3.0
Am-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.5	4.6	2.5	2.0	18.7	18.7
NP-237	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5	1.2	0.6	0.5	4.7	4.7
Cm-242	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	0.2	0.2	1.9	1.9
Cm-243	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2
Cm-244	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.7	1.3	0.6	0.4	4.9	4.9
Cm-245	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.4	0.4
Cm-246	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-247	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cm-248	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fp(U-235)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	4.9	2.4	1.8	19.7	19.7
Fp(U-238)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	93.7	43.8	23.1	15.7	176.3	176.3
Fp(Pu-239)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	417.7	199.2	104.5	74.0	795.3	795.3
Fp(Pu-241)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	117.7	57.0	32.1	23.0	229.8	229.8
O	1277.9	595.0	322.4	308.7	2503.9	1277.9	595.0	322.4	308.7	2503.9	0.0
Na	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	0.0
Fe	3993.1	1858.9	1007.0	963.9	7822.8	3993.1	1858.9	1007.0	963.9	7822.8	0.0
Cr	445.2	207.2	112.3	107.4	872.2	445.2	207.2	112.3	107.4	872.2	0.0
Ni	7.0	3.3	1.8	1.7	13.8	7.0	3.3	1.8	1.7	13.8	0.0
Mo	8.8	4.1	2.2	2.1	17.2	8.8	4.1	2.2	2.1	17.2	0.0
Mn	10.5	4.9	2.7	2.5	20.7	10.5	4.9	2.7	2.5	20.7	0.0
W	91.1	42.4	23.0	22.0	178.5	91.1	42.4	23.0	22.0	178.5	0.0
Pu Total	1017.9	497.5	301.4	288.5	2105.4	1173.3	556.0	309.2	294.8	2333.2	227.9
Pu-fiss Total	635.6	310.7	188.2	180.1	1314.5	782.8	366.8	198.6	187.5	1535.7	221.1
U Total	8542.4	3953.4	2110.6	2020.0	16626.3	7722.7	3577.5	1933.6	1891.1	15124.9	-1501.4
MA Total	15.5	7.6	4.6	4.4	32.1	37.9	19.4	12.1	12.4	81.8	49.7
Fp Total	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	639.6	304.7	162.1	114.5	1221.0	1221.0
H.M Total	9575.8	4458.5	2416.6	2312.9	18763.8	9573.5	4457.6	2417.0	2312.8	18761.0	-2.8
Fuel Total	10853.7	5053.5	2739.0	2621.6	21267.7	10851.4	5052.6	2739.4	2621.5	21264.9	-2.8
Coolant Total	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	563.6	262.3	142.1	136.1	1104.2	0.0
Steel Total	4555.8	2120.8	1148.8	1099.7	8925.1	4555.8	2120.8	1148.8	1099.7	8925.1	0.0
Total	15973.1	7436.6	4029.9	3857.3	31296.9	15970.8	7435.8	4030.4	3857.2	31294.1	-2.8

添付表8 統合炉定数ADJ2000を用いた場合の初期インベントリ及び倍増時間

(a) 初期インベントリ; kg

	高燃焼度型		高増殖型	
	ADJ98	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000
Pu	16030	15183	14802	14598
Pu-fissile	10009	9480	9242	9115
U	94366	95185	113798	113993
MA(²⁴¹ AM)	244	231	225	222
H.M Total	110640	110599	128825	128813
Fuel Total(oxide)	125380	125335	146016	146002
Coolant Total	6641	6641	7580	7580
Steel Total	53681	53681	61268	61268
Total	185702	185657	214864	214850

(b) 1バッチあたりの装荷量; kg

	高燃焼度型		高増殖型	
	ADJ98	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000
Pu	2315	2191	2137	2105
Pu-fissile	1445	1368	1334	1315
U	13766	13886	16596	16626
MA(²⁴¹ AM)	35	33	33	32
H.M Total	16116	16110	18765	18764

(c) 1バッチ当たりの物質収支量; kg

	高燃焼度型		高増殖型	
	ADJ98	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000
Pu	31	120	203	228
Pu-fissile	-3	111	173	221
U	-2421	-2512	-1475	-1501
MA	76	71	51	50
F P	2314	2315	1219	1221

(d) 倍増時間; y

	高燃焼度型		高増殖型	
	ADJ98	ADJ2000	ADJ98	ADJ2000
炉倍増時間 ^{*1}	-	157.7	55.0	42.3
複合倍増時間 ^{*1,2}	-	152.0	64.9	50.0

*1 運転サイクル期間 高燃焼度型; 630日、高増殖型; 330日、定検; 45日(両型共通)

*2 炉外サイクル期間5年を考慮した