

高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(Ⅲ)

— TRU燃料集合体非均質装荷の検討 —

1993年5月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(Ⅲ)

TRU燃料集合体非均質装荷の検討

若林利男*, 山岡光明**

要 旨

高レベル廃棄物中に含まれる超ウラン元素(TRU)を高速炉により消滅処理する研究の一環として、TRU混入量の多いターゲット集合体(特殊燃料)を少数体炉心に非均質に装荷する方式について、炉心設計の成立性を検討した。この方式はTRUを含む燃料を少数にできるので、製造上や管理上、メリットをもつ可能性がある。本研究では、まず、TRUを添加することによる燃料物性(融点、熱伝導度)の変化を、今までに公開されている物性データを基に推定し、それを基にしてTRU混入量依存の燃料許容線出力を算出した。この許容線出力を条件として、ターゲット集合体を分散装荷した方式について、核・熱特性を解析検討した。検討の結果、燃料の線出力制限を満足するためにターゲット集合体の燃料ピン径を細く一体あたりのピン本数を多くするとともに、ターゲット集合体の炉心内配置の最適化、流量配分の最適化を図ることにより、ターゲット集合体方式によるTRU消滅が成立可能であることがわかった。

* 技術開発部中性子工学Gr

**技術開発部プラント工学室(現東芝)

Study on TRU Transmutation by LMFBRs (III)

Characteristics of Heterogeneous TRU-Loading Core

T. Wakabayashi* and M. Yamaoka**

Abstract

A heterogeneous MA-loading method, where a few number of subassemblies with concentrated MA fuel (target fuel subassemblies) are loaded in the core, can have an advantage in fabricating and managing the MA-loaded fuel since the number of the MA-loaded fuel subassemblies is smaller compared with the method loading MA homogeneously. A study has been carried out on the feasibility of the heterogeneous MA-loading in an oxide-fueled 1000MWe LMFBR core.

Based on the experimental data on fuel properties of MA fuel published up to now, it was found that MA loading significantly reduces the linear power limit almost proportionally to the MA loading ratio because of degradation of the thermal conductivity and the melting point. Furthermore, core analyses showed that heterogeneous MA-loading leads to a significant power deformation in the core if the design of target fuel subassemblies is the same as that of the normal fuel subassemblies with no MA fuel loaded. These cause a serious thermal problem.

An effort was made so as to make the heterogeneous method feasible. The fuel pin design and the loading pattern of the target fuel subassemblies were studied. It was found that reduction of the fuel pin diameter and the Pu enrichment is essential to reduce the power of MA-loaded fuel. It is concluded that the heterogeneous MA-loading method is feasible by optimizing fuel design, loading pattern and coolant flow of MA-loaded fuel subassemblies.

* Neutron Engineering Group, Technology Development Division, OEC

** Plant Engineering Office, Technology Development Division, OEC(Present:Toshiba)

目 次

要 旨

目 次

図、表一覧

1. はじめに	1
2. ターゲット集合体のTRU混入率の検討	2
2.1 ターゲット集合体の許容線出力の評価	2
2.2 ターゲット集合体の構造の検討	13
3. ターゲット集合体の装荷方法の検討	15
3.1 検討方法	15
3.2 解析条件	20
3.3 ターゲット集合体のプルトニウム富化度に関する解析	36
3.4 ターゲット集合体の装荷位置に関する検討	47
3.5 パラメータサーベイのまとめ	87
4. 核熱特性の検討	90
4.1 解析対象炉心	90
4.2 核特性	90
4.3 熱特性	100
5. ターゲット集合体の成立性の考察	105
5.1 核特性	105
5.2 熱特性	107
6. 結 論	111

謝 辞

参考文献

付録 使用物性値

表リスト

表 2.1-1	各TRU組成及び混入率での燃料溶融線出力、燃料融点	5
表 2.1-2	燃料溶融に至るまでの燃料中心温度計算結果	6
表 2.1-3	TRU1燃料の各サイクル、混入率での燃料溶融線出力、燃料融点	7
表 2.1-4	各TRU組成及び混入率での燃料許容線出力	8
表 2.1-5	TRU1燃料の各サイクル、混入率での燃料許容溶融線出力	8
表 3.2-1	炉心主要仕様	21
表 3.2-2	炉心構成要素主要仕様	24
表 3.2-3	構造材組成データ	28
表 3.2-4	構造材密度データ	28
表 3.2-5	TRU燃料の組成一覧	29
表 3.2-6	エネルギー群構造及び核分裂スペクトル	30
表 3.2-7	出力分布・燃焼計算条件	32
表 3.3-1	炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果） —ターゲット集合体のプルトニウム富化度の影響—	38
表 3.4.1-1	炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果） —TRU装荷パターンの影響（プルトニウム富化度0.3倍）—	51
表 3.4.2-1	ターゲット集合体のTRU混入率	52
表 3.4.2-2	炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果） —F4パターンでのターゲット集合体の燃料ピン本数の効果—	53
表 3.4.2-3	炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果） —F, Aパターンでの追加検討(1)—	54
表 3.4.2-4	炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果） —F, Aパターンでの追加検討(2)—	55
表 4.2-1	平衡炉心の出力分担率	94
表 4.2-2	平衡炉心の出力分布係数及び最大線出力	95
表 4.2-3	全炉心の出力分布係数	96
表 4.2-4	平衡炉心の増殖比	97
表 4.2-5	ターゲット集合体装荷炉心のTRU消滅率（CASE-F4-b）	98
表 4.3-2	流量配分（計画流量）	102
表 4.3-3	ターゲット集合体装荷炉心（CASE-F4-b）温度評価結果	103

図リスト

図2.1-1	TRU燃料融点のTRU混入率依存性	9
図2.1-2	TRU燃料熱伝導度のTRU混入率依存性	9
図2.1-3	燃料溶融線出力のTRU量依存性	10
図2.1-4	TRU1 (Np+Am+Cm) 混入燃料融点の燃焼度依存性	11
図2.1-5	TRU1 (Np+Am+Cm) 混入燃料溶融線出力の燃焼度依存性	11
図2.1-6	燃料許容線出力のTRU量依存性	12
図2.1-7	TRU1 (Np+Am+Cm) 混入燃料許容線出力の燃焼度依存性	12
図3.1-1	検討の流れ	17
図3.1-2	燃料集合体例	18
図3.1-3	TRUターゲット燃料集合体例(1)	18
図3.1-4	TRUターゲット燃料集合体例(2)	19
図3.2-1	レファレンス炉心の炉心構成図	33
図3.2-2	TRU燃焼チェーン (actinide build up path)	34
図3.2-2	二次元XY、1/6炉心体系 (基準体系)	35
図3.3-1	ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-A)	39
図3.3-2	CASE-A3 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	40
図3.3-3	CASE-A3 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	41
図3.3-4	CASE-A4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	42
図3.3-5	CASE-A4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	43
図3.3-6	CASE-A5 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	44
図3.3-7	CASE-A5 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	45
図3.3-8	ターゲット集合体のPu富化度の変化による最大線出力の変化 (CASE-A) ..	46
図3.4.1-1	ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-F)	56
図3.4.1-2	ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-G)	57
図3.4.1-3	ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-H)	58
図3.4.1-4	CASE-F4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	59
図3.4.1-5	CASE-F4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	60
図3.4.1-6	CASE-G4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	61
図3.4.1-7	CASE-G4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	62
図3.4.1-8	CASE-H4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	63
図3.4.1-9	CASE-H4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	64
図3.4.2-1	CASE-F4-331 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	65

図3.4.2-2 CASE-F4-331 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	66
図3.4.2-3 CASE-F4-397 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	67
図3.4.2-4 CASE-F4-397 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	68
図3.4.2-5 CASE-F4-a の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	69
図3.4.2-6 CASE-F4-a の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	70
図3.4.2-7 CASE-F4-b の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	71
図3.4.2-8 CASE-F4-b の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	72
図3.4.2-9 CASE-F5 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	73
図3.4.2-10 CASE-F5の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	74
図3.4.2-11 CASE-FI4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	75
図3.4.2-12 CASE-FI4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	76
図3.4.2-13 CASE-F4-b体系での内側炉心のPu富化度 (ターゲット集合体) の線出力 に対する効果	77
図3.4.2-14 CASE-A 体系のターゲット集合体のPu富化度による最大線出力の変化 ...	78
図3.4.2-15 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	79
図3.4.2-16 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	80
図3.4.2-17 CASE-F3-bの集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	81
図3.4.2-18 CASE-F3-bの集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	82
図3.4.2-19 CASE-F3-b' の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	83
図3.4.2-20 CASE-F3-b' の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	84
図3.4.2-21 ターゲット集合体のPu富化度変更に伴う燃料集合体の最大線出力の 変化	85
図3.4.2-22 ターゲット集合体のPu富化度変更に伴うターゲット集合体の最大線 出力の変化	86
図3.5.1-1 内側炉心と外側炉心の最大線出力の関係 (炉心燃料)	88
図3.5.1-2 炉心燃料とターゲット集合体の最大線出力の関係	89
図4.1-1 二次元R Z計算体系 (ターゲット集合体装荷炉心, CASE-A1)	99
図4.3-1 流量領域区分	104
図5.1-1 ターゲット集合体装荷拡大炉心の炉心構成	108
図5.1-2 ターゲット集合体装荷拡大炉心の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)	109
図5.1-3 ターゲット集合体装荷拡大炉心の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)	110

1. はじめに

使用済燃料の再処理によって発生する高レベル廃棄物には、長半減期の超ウラン元素 (Transuranium: TRU) が存在する。代表的なものとしては、ネプツニウム-237 (^{237}Np , 半減期約210万年)、アメリシウム-241 (^{241}Am , 約433年)、アメリシウム-243 (^{243}Am , 約7000年) 等があげられる。これらTRUを中性子による核分裂や中性子吸収反応によって安定核種や短半減期の核種に変換しようというのが消滅処理技術である¹⁾。高速炉は中性子エネルギースペクトルが硬いため、熱中性子炉に比べて核分裂による核変換が中性子吸収反応による核変換より多くなり、高次の長半減期のTRU (^{245}Cm , ^{246}Cm 等) ができにくいという特徴をもっている。また、中性子束も高く、軽水炉に比べて高いTRU消滅率が得られると考えられる。更に、高速炉では、TRUを消滅するだけでなく ^{238}U より優れた親物質として使用できるため、炉心の高性能化(長期運転等)が期待できる。

TRU消滅高速炉の設計研究に関しては、燃料サイクル全体を視野に入れつつ、MOX燃料高速炉でより現実的な成立性の評価を行ってきた^{2)~6)}。更に、高速炉の多様な可能性を追求する観点から、TRUの特性を最大限に活かした革新的炉心概念(超寿命炉心等)の検討も実施してきている^{9)~11)}。

MOX燃料大型高速炉でのTRU装荷法としては、均質装荷(炉心燃料全てにTRUを混入する方法で、均質2領域の場合は内側炉心と外側炉心でTRU混入量の調整もある。)と非均質装荷(特定の燃料集合体にTRUを混入し、その燃料集合体を分散又は集中的に装荷する方法)が主に考えられる。均質装荷においては、炉心平均で5%のTRU混入率であれば炉心特性に大きな影響を与えないでTRUを消滅できることが分かっている²⁾。一方、TRU燃料集合体非均質装荷については、TRUを含む燃料を少数にできるので、製造上や管理上メリットをもつ可能性があり、概略検討を行った。その結果、TRU混入率の高い特定の燃料集合体(以後ターゲット集合体と呼ぶ。集合体平均でTRU混入率は30~50%)は、炉心内で分散装荷する方が集中的に装荷する方法よりも核・熱特性上良いことが分かっている⁷⁾。しかし、TRU混入率の高い燃料は、TRUの物性特性から融点や熱伝導率が通常のMOX燃料に比べて低下することが予想され、ターゲット集合体による非均質装荷の成立性を評価するには、TRU燃料の物性特性を考慮した検討が必要になる。

本研究では、まず、TRUを混入することによる燃料物性(融点、熱伝導度)の変化を、今までに公開されている物性データを基に推定し、それを基にしてTRU混入量依存の燃料許容線出力を算出し、この許容線出力を条件として、ターゲット集合体を分散装荷した方式について核・熱特性を解析検討し、TRU燃料集合体非均質装荷の成立性を評価した。

2. ターゲット集合体のTRU混入率の検討

2.1 ターゲット集合体の許容線出力の評価

ターゲット集合体の成立性を判断するデータとしてTRU混入率及びTRU組成をパラメータとして、TRU混入燃料の定格出力時の許容線出力を評価した。この評価において、燃焼に伴う組成変化、出力変化等も考慮した。

(1) 評価条件

(a) 溶融線出力評価パラメータ

TRU混入率・・・ 0%、5%、10%、30%、50%

TRU組成・・・ 2種類

TRU 1 (Np+Am+Cm LWR取出し)

TRU 2 (Npのみ)

(b) 燃料仕様

ペレット・・・ U, Pu混合酸化物(マトリックス部)

外径 7.22mm

密度 92%T.D.

O/M 1.98

被覆管・・・ 改良オーステナイト鋼

外径 8.3mm

内径 7.4mm

(c) 燃料物性データ

TRU混入燃料の熱伝導度、融点データ等物性値は公開されている文献^{12)~20)}をベースにして求めた。尚、定格線出力(430W/cm)評価時の融点データとの整合性をとるため、MOX燃料融点を2750°Cとし、MOX燃料の燃焼に伴う融点降下も考慮した。(使用物性値の詳細は、付録 参照。)図2.1-1 ~図2.1-2 にTRU混入率依存の融点熱伝導度を示す。

(d) 温度評価モデル

最高温度位置で、径方向一次元モデルを使用

(e) その他の条件

① ドライバー燃料許容線出力(430W/cm)時被覆管肉厚中心温度・・・ 550°C

また、各線出力での被覆管肉厚中心温度は、次式で評価した。

$$T_{center} = 375 + (550 - 375) \cdot Q / 430$$

② ギャップコンダクタンス・・・1000 BTU/ft²hr°C 一定

③ 3Cycl末期ペレット燃焼度・・・157000 MWd/t (各Cycle linear)

④ 燃焼に伴うTRU量変化・・・TRU1組成の相対値変化は以下の通り。

0 cycle	1.000
1 cycle 末期	0.878
2 cycle 末期	0.762
3 cycle 末期	0.666

また、TRU減少分は、MOX [(U,PU)O_{2-x}]になると仮定した。

(2) 評価結果及び考察

(a) 燃料溶融線出力評価結果

TRU組成及びTRU混入率を変化させた時の燃料溶融線出力を、図2.1-3に示す。TRU1 (Np+Am+Cm) 組成、TRU2 (Np) 組成とも、TRU混入率が増加するにつれて、溶融線出力は低下する。TRU混入率0% (ドライバー燃料相当) の場合の溶融線出力 497W/cmに比べて、TRUを50%混入すると、TRU1組成の場合約150W/cm、TRU2組成の場合約65W/cm、それぞれ低下する。TRU1混入よりもTRU2混入の方が溶融線出力の落ち方が小さいのは、TRU成分の内、Npの熱伝導度及び融点がAm、Cmに比べて大きいためである。

表2.1-1に各TRU組成、混入率での溶融線出力及び燃料融点計算結果、表2.1-2に燃料溶融に至るまでの燃料中心温度計算結果をそれぞれ示す。

(b) 燃焼に伴う燃料溶融線出力変化評価結果

評価の際に考慮したのは、次の事項である。

- ① 燃焼に伴うTRU量の減少 (融点及び熱伝導度の相対的な増加)
- ② (U,PU)O_{2-x} 融点の低下

(TRU及びMOXの熱伝導度の低下は考慮していない。)

TRU1 (Np+Am+Cm) 混入燃料燃料融点及び溶融線出力の燃焼度依存性を、図2.1-4,5にそれぞれ示す。

まず、燃料融点は、各TRU混入率の場合とも、第1サイクル末期で上昇する (MOXの融点低下は殆ど無く、TRU量が減少するため)。また、第2、3サイクル末期では、TRU混入率30%以下の燃料は、TRU消滅による融点上昇効果よりもMOXの融点降下の影響が大きいいため、全体として燃料融点は低下している。一方、TRU混入率50%の燃料は、TRU消滅効果がMOX部の融点降下よりもまさるため、第3サイクル末期で燃焼初期よりも約10℃融点が高くなっている。

燃料溶融線出力の変化は、TRU混入量により傾向が異なっている。TRU混入量5、10%の場合、溶融線出力は、第1サイクル末期でやや増加するが、その後低下する傾向となり、第3サイクル末期で初期よりも約10W/cm程度低くなる。

これは、初期TRU量が少ないため、TRU消滅に伴う融点及び熱伝導度上昇効果よりもMOX融点降下の影響を受けるためである。TRU混入量30、50%の場合、溶融線出力は燃焼と共に増加する（TRU混入量50%の場合第3サイクル末期で約40W/cm増加する）。これは、TRU量が少ない場合とは逆に、MOX融点降下の影響よりも、TRU消滅に伴う融点及び熱伝導度上昇効果が支配的なためである。

表2.1-3 に各サイクル、TRU混入率での溶融線出力及び燃料融点計算結果を示す。

(c) 燃料許容線出力評価結果

(a)で示した様に、TRU混入率0%（ドライバー燃料相当）の場合の溶融線出力は497W/cmとなったため、過出力係数、ギャップコンダクタンス不確かさ、ペレット温度不確かさ等のファクタ（F）は、次の通りとなる。

$$F = 497/430 = 1.16$$

従って、(a)、(b)で求めた燃料溶融線出力をFで割る事により、燃料許容線出力とする。

燃料許容線出力のTRU組成、TRU混入率依存性を図2.1-6、各混入率での燃焼度依存性を図2.1-7に示す。また、これらの結果をまとめたものを、表2.1-4、2.1-5 に示す。

(3) まとめ

TRU組成、TRU混入率、燃焼度をパラメータとした時の燃料許容線出力の評価を実施した。その結果、次の事が明らかとなった。

- ① TRU混入率の増加に従い、燃料許容線出力は低下する。
- ② TRU混入率10%以下の場合、燃料許容線出力は燃焼と共にやや低下する。
一方、TRU混入率30%以下の場合、燃料許容線出力は燃焼と共に増加する。
- ③ TRU混入率50%の場合でも、燃料寿命を通じて300W/cm以上の線出力は確保できる。

表 2.1-1 各TRU組成及び混入率での燃料溶融線出力、燃料融点

TRU混入率 (%)	TRU1 (Np+Am+Cm)	TRU2 (Np)
0	497 W/cm 2750 C	497 W/cm 2750 C
5	482 W/cm 2733 C	489 W/cm 2741 C
10	468 W/cm 2715 C	481 W/cm 2731 C
30	410 W/cm 2645 C	454 W/cm 2693 C
50	350 W/cm 2575 C	432 W/cm 2655 C

表 2.1-2 燃料溶融に至るまでの燃料中心温度計算結果

TRU混入率(%)	200 W/cm	300 W/cm	400 W/cm
0	1280 C	1830 C	2334 C
5	1301 C 1254 C	1863 C 1810 C	2375 C 2335 C
10	1324 C 1229 C	1897 C 1788 C	2418 C 2336 C
30	1427 C 1139 C	2060 C 1698 C	2599 C 2341 C
50	1510 C 1068 C	2282 C 1605 C	- 2348 C

注：上段はTRU1(Np+Am+Cm)

下段はTRU2(Np)

表2.1-3 TRU1燃料の各サイクル、混入率での燃料溶融線出力、燃料融点

TRU混入率(%)	0 cycle	1 cycle	2 cycle	3 cycle
5	482 W/cm 2733 C	484 W/cm 2733 C	477 W/cm 2700 C	469 W/cm 2666 C
10	468 W/cm 2715 C	471 W/cm 2718 C	466 W/cm 2688 C	460 W/cm 2657 C
30	410 W/cm 2645 C	420 W/cm 2657 C	424 W/cm 2640 C	425 W/cm 2620 C
50	350 W/cm 2575 C	368 W/cm 2595 C	381 W/cm 2593 C	389 W/cm 2583 C

表2.1-4 各TRU組成及び混入率での燃料許容線出力

TRU混入率(%)	TRU1(Np+Am+Cm)	TRU2(Np)
0	430 W/cm	430 W/cm
5	415 W/cm	421 W/cm
10	403 W/cm	414 W/cm
30	353 W/cm	391 W/cm
50	301 W/cm	372 W/cm

表2.1-5 TRU1燃料の各サイクル、混入率での燃料許容溶融線出力

TRU混入率(%)	0 cycle	1 cycle	2 cycle	3 cycle
5	415 W/cm	417 W/cm	411 W/cm	404 W/cm
10	403 W/cm	406 W/cm	401 W/cm	396 W/cm
30	353 W/cm	362 W/cm	365 W/cm	366 W/cm
50	301 W/cm	317 W/cm	328 W/cm	335 W/cm

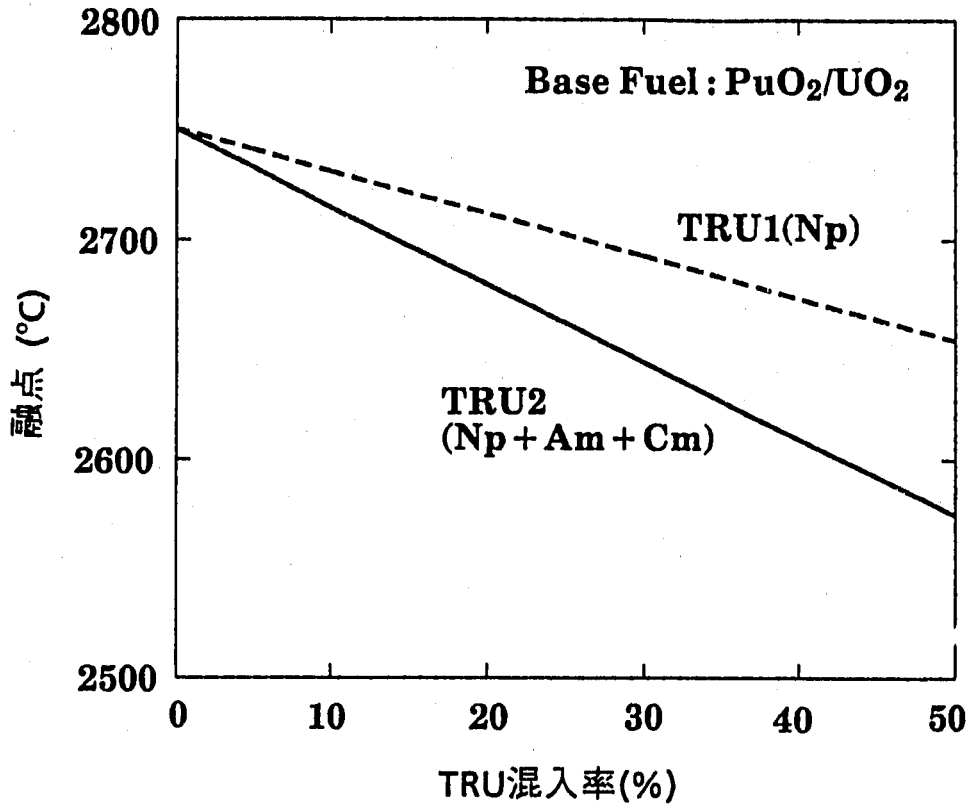


図2.1-1 TRU燃料融点のTRU混入率依存性

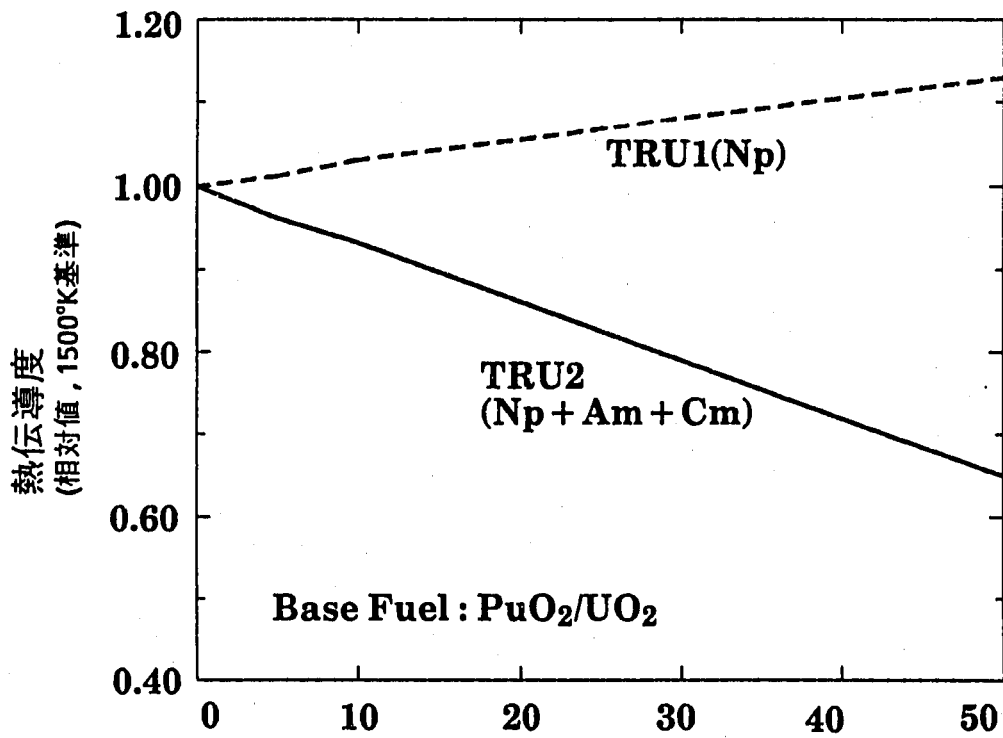


図2.1-2 TRU燃料熱伝導度のTRU混入率依存性

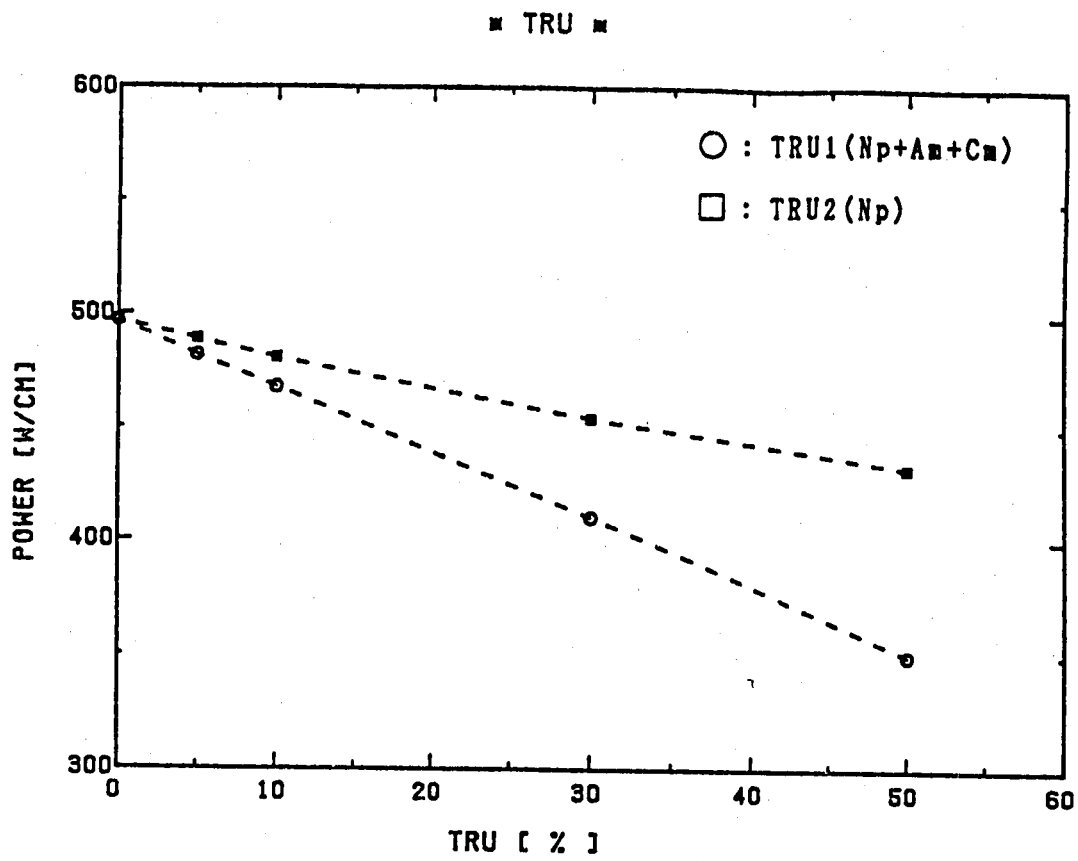


図 2.1-3 燃料溶融線出力の TRU 量依存性

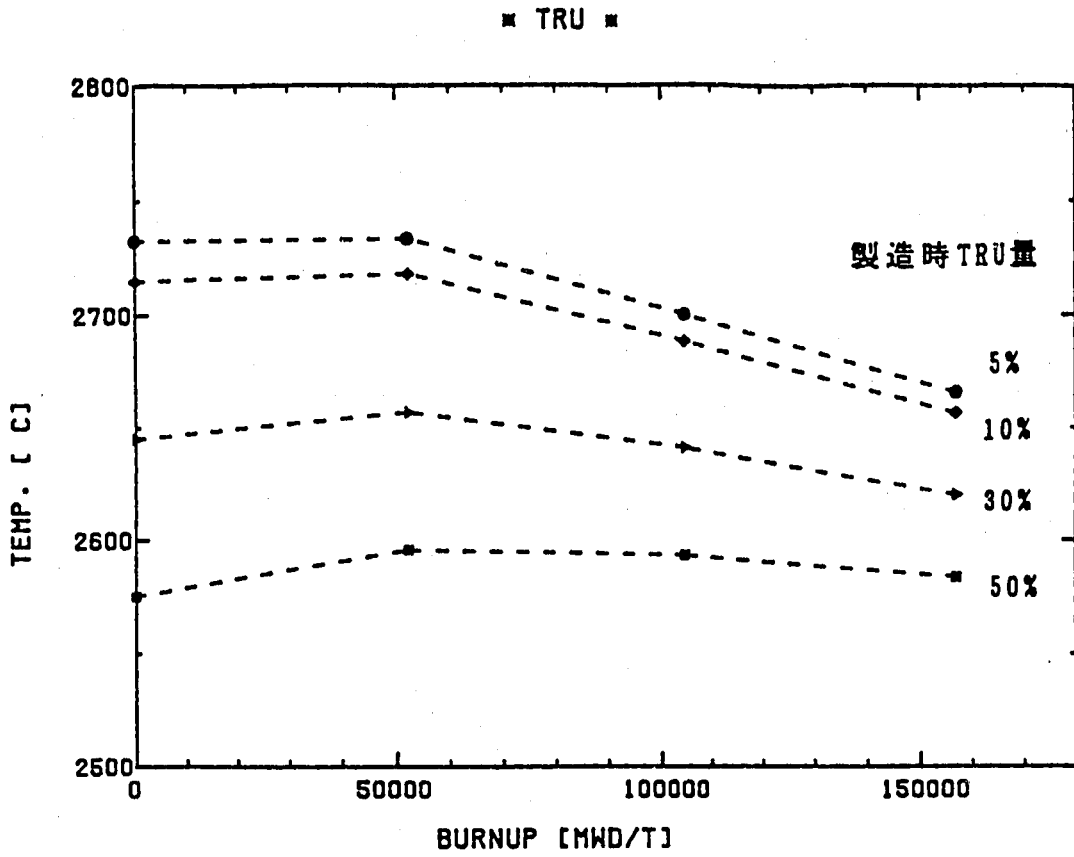


図2.1-4 TRU 1 (Np+Am+Cm) 混入燃料融点の燃焼度依存性

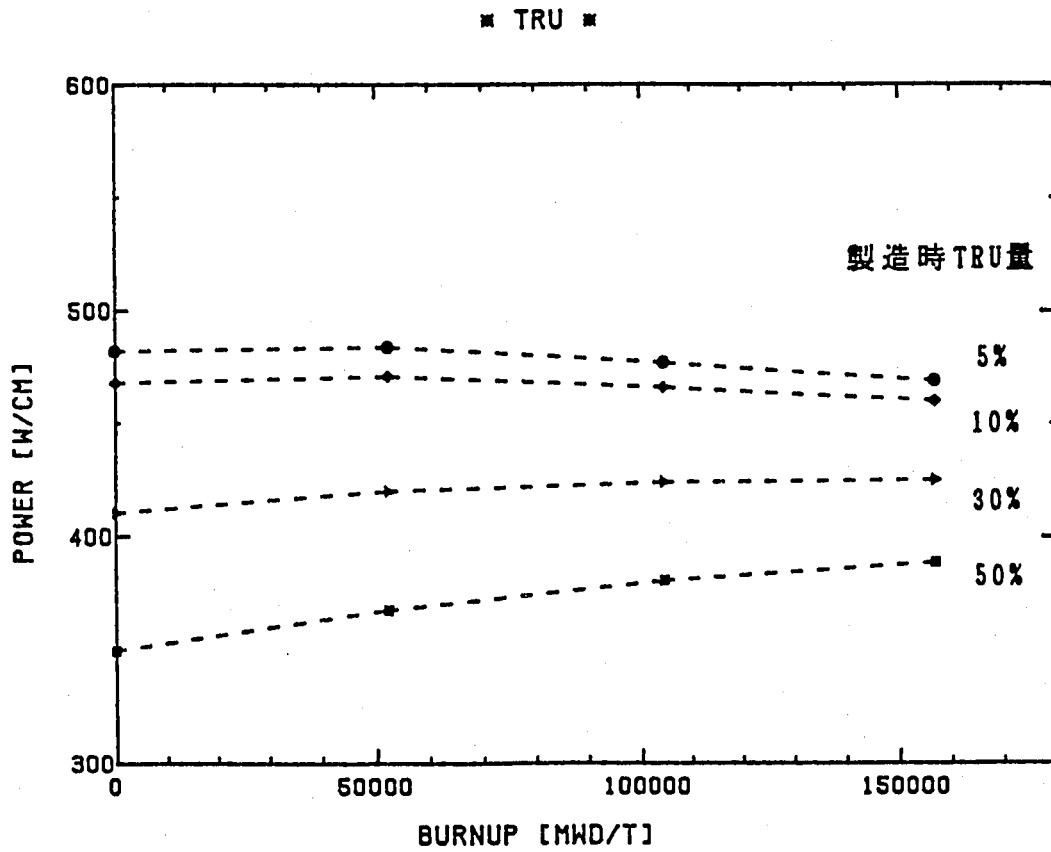


図2.1-5 TRU 1 (Np+Am+Cm) 混入燃料溶融線出力の燃焼度依存性

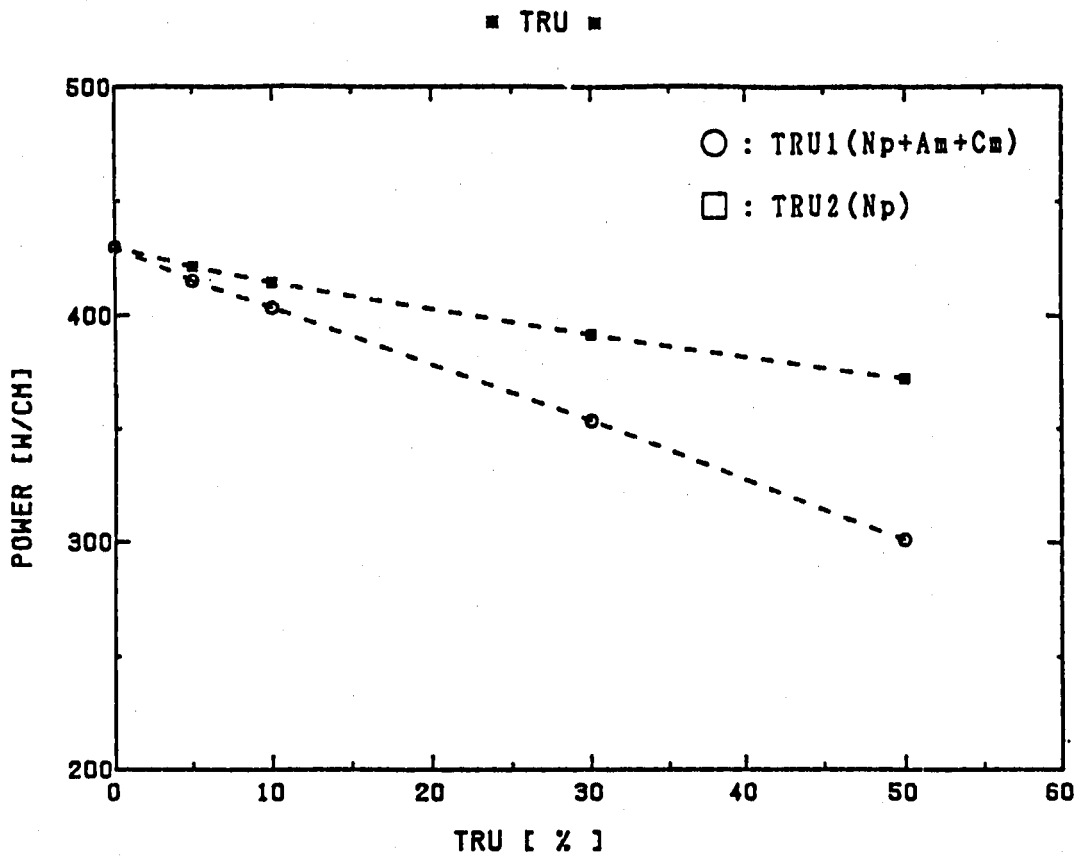


図2.1-6 燃料許容線出力のTRU量依存性

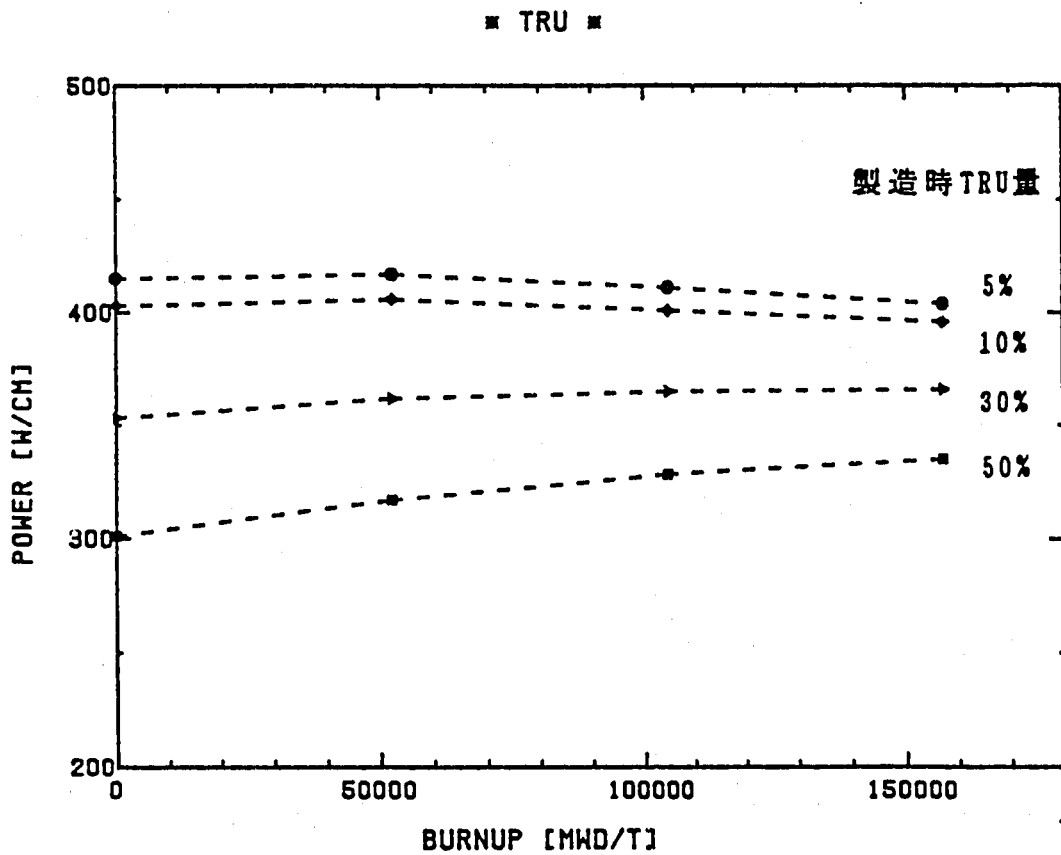


図2.1-7 TRU1 (Np+Am+Cm) 混入燃料許容線出力の燃焼度依存性

2.2 ターゲット集合体の構造の検討

ターゲット集合体の燃料ピン本数を炉心燃料と同じとした場合、本数増大を行った場合について構造検討を行った。

(1) 前提条件

(a) 燃料ペレットのスミア密度は、炉心燃料と同じとする。(87.58%)

$$92\%T.D. \times (7.22/7.4)^2 = 87.58 \%$$

(b) 燃料バンドル外形は、炉心燃料と同じとする。

$$D_B = \sqrt{3} \cdot (N-1) \cdot P_P + D_P + 2D_W$$

N : 10 (バンドルリング数)

P_P : 9.85mm (燃料ピン配列ピッチ)

D_P : 8.3mm (燃料ピン直径)

D_W : 1.5mm (ワイヤ直径)

$$= 164.846\text{mm}$$

(c) 燃料ピン配列ピッチは、燃料バンドル部の冷却材圧力損失が炉心燃料と等しくなることを目安に設定する。

(d) 被覆管肉圧は、製造時の肉圧から減肉分(200μと仮定)を引いた厚さがピン直径に比例するものとする。

(e) 燃料ワイヤ径は、Porosity/Ring が炉心燃料と等しくなることを目安に設定する。

(2) 検討結果

バンドルリング数11(ピン本数331本)及びバンドルリング数12(ピン本数397本)のケースについて検討した。

(a) 燃料配列ピッチ

前提条件の(a)(燃料ピンバンドル外形条件)から決定する。但し、燃料ピン直径とワイヤ径が未知数であるので、これらは燃料ピン配列数(2N-1)に反比例すると暫定して計算する。

	N=10	N=11	N=12	(mm)
D _P =	8.3	(7.51)	(6.86)	暫定値
D _W =	1.5	(1.36)	(1.24)	暫定値
P _P =	9.85	8.97	8.20	

(b) 燃料ピン径

(a)の燃料配列ピッチの下で、燃料バンドル部の圧損が炉心燃料と等しくなる被覆管径をサーベイした。(圧損計算はMITモデルによる。)

	N=10	N=11	N=12	(mm)
$D_p =$	8.3	7.44	6.73	

(c) 被覆管肉圧(Tc)

被覆管肉圧(Tc)は、前提条件(d)より決定する。

	N=10	N=11	N=12	(mm)
$T_c =$	0.45	0.425	0.405	

(d) スペーサワイヤ径は、Porosity/Ring が同程度となるように設定した。

	N=10	N=11	N=12	(mm)
$D_w =$	1.5	1.43	1.37	

(e) 燃料体積比

以上の条件で計算した燃料体積比を、他の燃料集合体仕様と合わせて以下に示す。

項目	N=10	N=11	N=12
燃料要素配列ピッチ(mm)	9.9	8.97	8.20
燃料要素数 (本)	271	331	397
燃料ペレット			
外径 (mm)	7.22	6.43	5.78
スミア密度 (%TD)	87.58	←	←
被覆管			
外径 (mm)	8.3	7.44	6.73
内径 (mm)	7.4	6.59	5.92
スペーサワイヤ径 (mm)	1.5	1.43	1.37
ラッパー管			
内対面間距離 (mm)	165.8	←	←
板厚 (mm)	4.0	←	←
体積比			
燃料 (%)	39.6	38.4	37.2
ギャップ (%)	2.0	1.9	1.8
構造材 (%)	20.9	21.4	22.0
冷却材 (%)	37.5	38.3	39.0
燃料ペレット断面積比	1.0	0.79	0.64
	(430)	(340)	(275)
燃料体積比相対比	1.0	0.97	0.94

3. ターゲット集合体の装荷方法の検討

3.1 検討方法

大型高速炉（1000MWe級プラント）の炉心²¹⁾を基準炉心として、TRU燃料の物性を考慮して核熱特性の観点から成立するターゲット集合体の装荷方法を検討する。

(1) 検討条件

計算方法、基準炉心、ターゲット集合体概念等の検討条件及び方法を以下に示す。

(a) ターゲット集合体の構造、組成

i) 集合体構造（ピン径・ピン本数等）とTRU混入率

ターゲット集合体の構造は、炉心燃料と同じ構造を基準とする。また、TRU混入率は、約50%を基準とする。但し、プルトニウム富化度等の調整によっても、許容線出力等に対する成立性が見通しが得られない場合には、(1)で得たTRU混入率と許容線出力の関係をもとに、集合体構造及びTRU混入率の見直しを行う。この場合の制約条件は次のとおりとする。

- ① 炉心全体のTRU混入率（平均）は5%とする。
- ② ターゲット集合体の装荷本数の上限を60体程度とする。（ターゲット集合体のTRUインベントリーは、炉心燃料集合体の燃料インベントリーの約30%以上。）

燃料集合体構造と考えられるターゲット集合体の構造を図3.1-2及び図3.1-3に示す。

ii) TRU組成

各種サーベイは $Np + Am + Cm$ （LWR取り出し）の組成で行うものとする。

iii) Pu富化度

炉心燃料と同一のPu富化度を基準として-40%、-50%についてサーベイする。（サーベイ結果を見ながら、適宜設定していく。）

(2) 検討手順

検討手順は次のとおりとする。（図3.1-1参照）

(a) ターゲット集合体のプルトニウム富化度の検討

前年度選定したCASE-Aの装荷位置において、ターゲット集合体の許容線出力を満足するようなプルトニウム富化度をサーベイする。

(b) (a)の検討において、許容線出力を満たす解が得られない場合は、(1)に述べた検討条件に基づいて、以下の線出力低減方策を検討する。

- ① 細径ピン
- ② TRU混入率低減

(c) ターゲット集合体装荷位置

ターゲット集合体の装荷位置は炉心にできるだけ均一に分散させることが出力分布の点で好ましいと思われるが、初めに選定した装荷位置（CASE-A等）は、炉心中心部（第2列6体）にやや偏在している。内側炉心と外側炉心の境界付近に装荷すれば炉心燃料の発熱量への影響を小さくできることがわかっており、この部分の装荷量を増やすような装荷パターンを検討する。

また、ターゲット集合体の線出力低減のために装荷本数を増大する場合には、これに応じた見直しを行う。

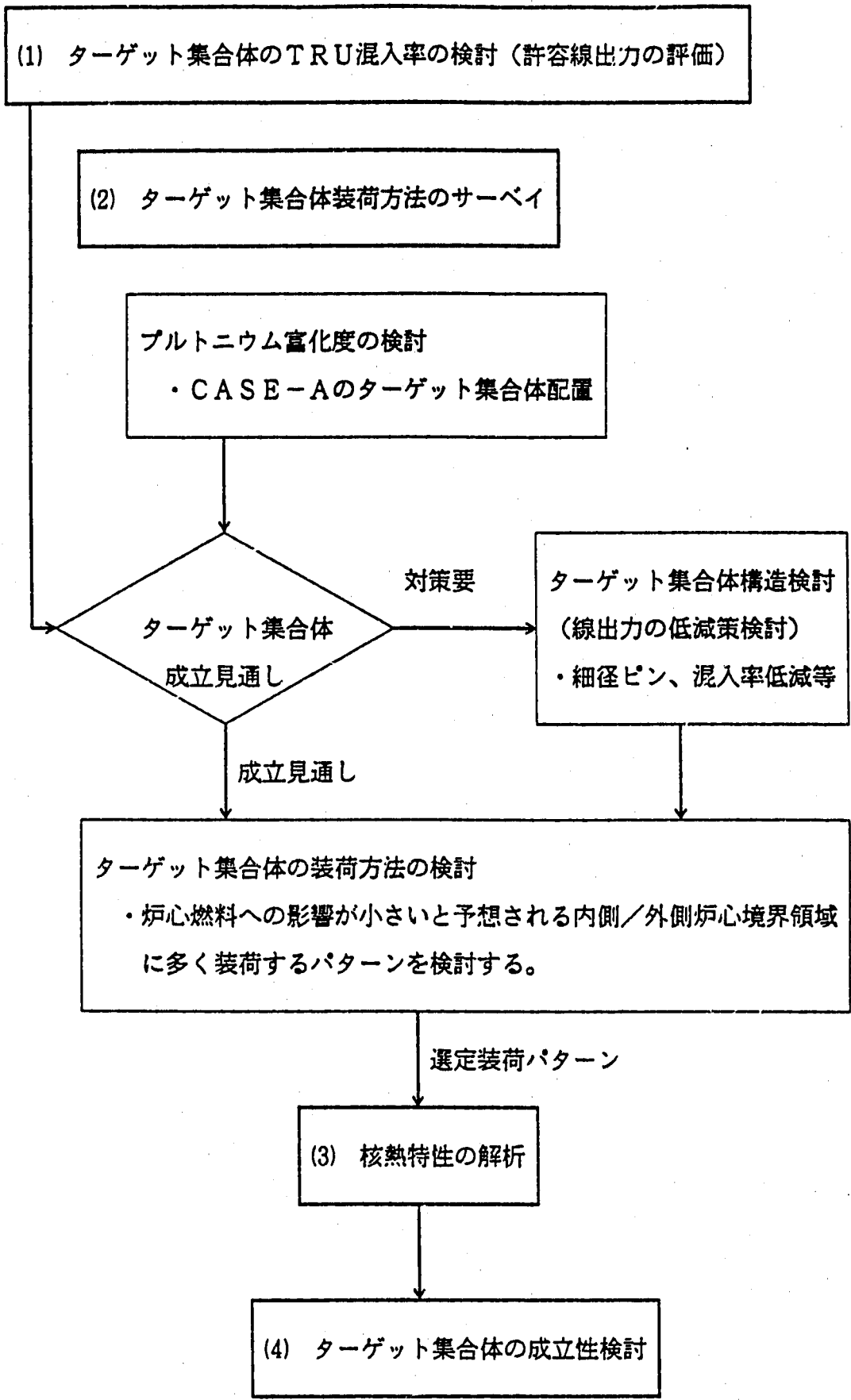
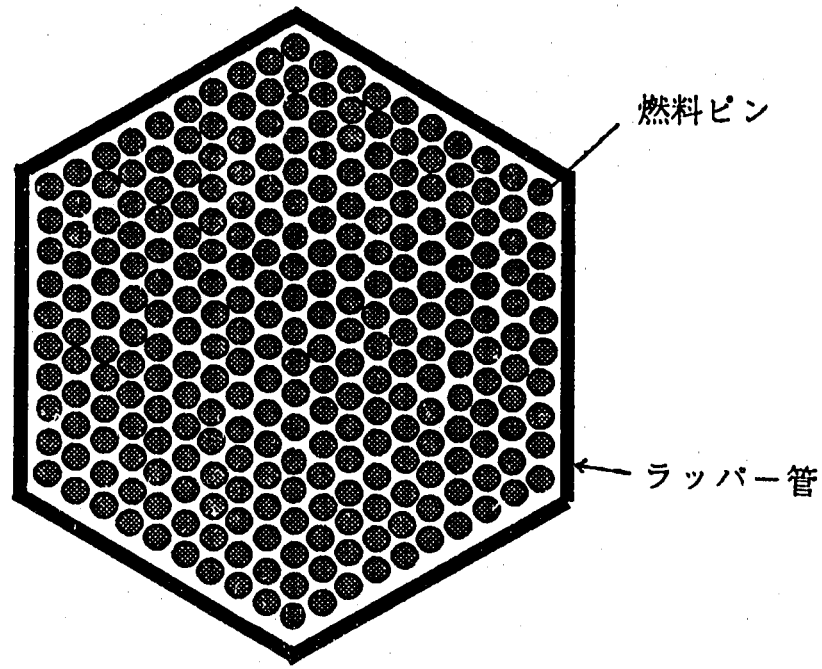
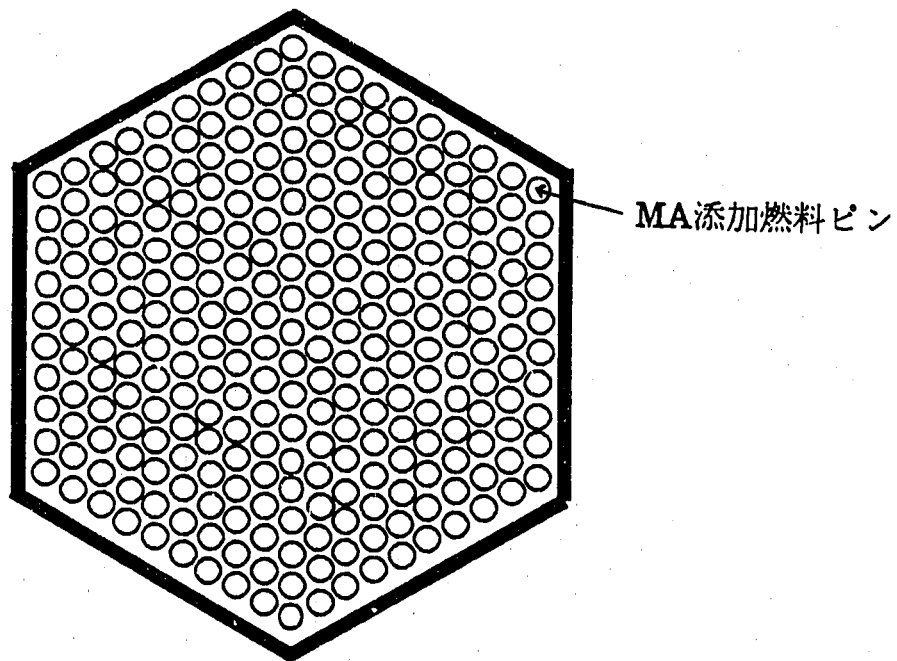


図3.1-1 検討の流れ



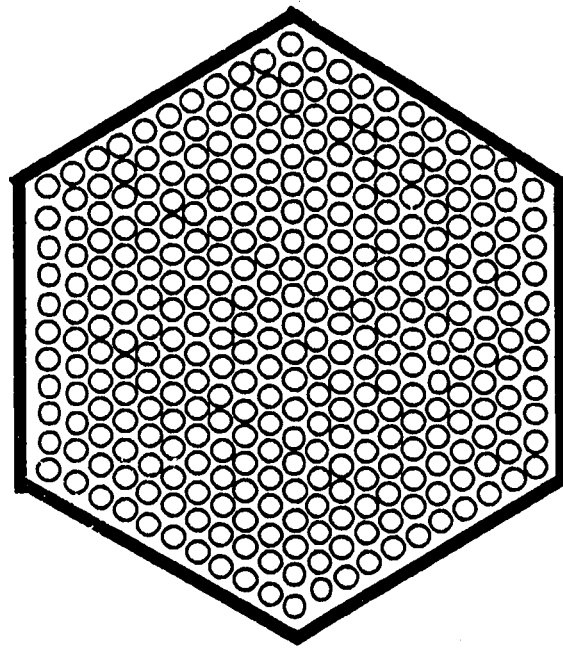
(a)炉心燃料集合体(271本)

図3.1-2 燃料集合体例

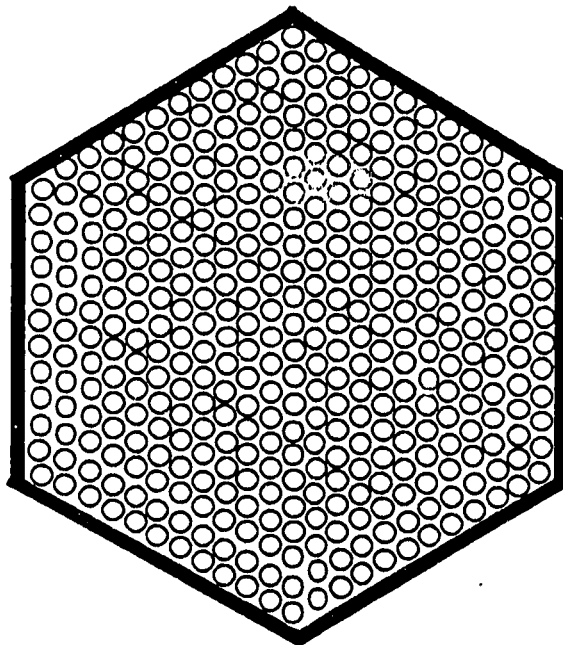


(a)TRUターゲット燃料集合体(271本)

図3.1-3 TRUターゲット燃料集合体例(1)



(b)TRUターゲット燃料集合体(331本)



(c)TRUターゲット燃料集合体(397本)

図3.1-4 TRUターゲット燃料集合体例(2)

3.2 解析条件

(1) 基準炉心

大型FBRレファレンスプラントの1000MWe炉心²¹⁾を基準炉心とする。基準炉心の炉心構成を図3.2-1に示す。また、炉心主要仕様を表3.2-1に、炉心構成要素主要仕様を表3.2-2にそれぞれ示す。さらに、構造材組成データを表3.2-3に、構造材密度データを表3.2-4にそれぞれ示す。

(2) ターゲット集合体の組成

TRU燃料については、プルトニウム・ウラン燃料と同一の構造・組成のものが製作可能として、計算上は仮想的に炉心燃料の重金属をすべてTRUで置き換えたTRU燃料を仮定し、このTRU燃料と炉心燃料とを所定の割合で混合した。TRU燃料の原子数密度の計算では、TRU燃料の重金属の原子数密度が炉心燃料と同じであると仮定した。

核計算においては、このTRU燃料を炉心燃料と所定の混合比(体積比)で均質に混合した。

TRUの組成比は、ORIGEN-2²²⁾によるLWR取出し燃料の計算結果を用いた。但し、原子炉から取出した後TRU燃料として再装荷するまでの時間は、5年と仮定した。表3.2-5にTRU燃料の組成を示す。

(3) 計算方法

(a) 炉定数

JENDL-2ライブラリ²³⁾をベースにして原研で作成された「JFS-3-J2」70群定数²⁴⁾を基本定数とし、燃焼の初期(初期炉心)において縮約した7群定数を用いる。

7群のエネルギー群構造を表3.2-6に示す。この群構造は、高速中性子によるTRUの核分裂を考慮して、従来FBR炉心の解析で用いてきた6群構造の第2群(約100keV~1.4MeV)を2分割したものである。

(b) 燃焼チェーン

燃焼計算における燃焼チェーンを図3.2-2に示す。

半減期及び²⁴²Amの崩壊の分岐比は、Table of Isotopes (7th EDN.)²⁵⁾を用いる。

(c) 基準計算体系

基準体系の計算体系(二次元XY三角メッシュ体系、1/6炉心。)を、図3.2-3に示す。

計算条件を、表3.2-7にまとめて示す。

表3.2-1 炉心主要仕様 (1/3)

項 目	仕 様	備 考
1. 基本プラント仕様		
1) 出 力		
原子炉熱出力 (MW)	2517	
2) 一次主冷却系冷却材		
原子炉入口温度 (°C)	375	
原子炉出口温度 (°C)	530	
冷却材流量 (kg/s)	$1.272_2 \times 10^4$	
3) プラント運転		
プラント計画寿命 (年)	30	
稼働率 (-)	約0.87	
燃焼期間 (EFPD/サイクル)	456	
2. 炉 心		
1) 炉心型式	均質炉心	
2) 炉心富化度領域数	2	
3. 炉心構成		
1) 炉心構成要素数		
a) 内側炉心燃料集合体 (体)	175	
b) 外側炉心燃料集合体 (体)	180	
c) フランジ外燃料集合体 (体)	72	(1層)
d) 主炉停止系制御棒 (体)	18	
e) 後備炉停止系制御棒 (体)	6	
f) SUS遮蔽体 (体)	78	(1層)
g) B, C遮蔽体 (体)	270	(3層)
h) 合 計 (体)	799	

表3.2-1 炉心主要仕様 (2 / 3)

項 目	仕 様	備 考				
2) 炉心寸法						
a) 高 さ (mm)	1,000					
b) 等価直径 (mm)	約3,680	制御棒を含む				
c) 高さ/等価直径比 (-)	0.272					
d) 容 積 (l)	約10,640	制御棒を含む				
3) ブランケット厚さ						
a) 軸方向厚さ(上/下) (mm)	200/200					
b) 半径方向等価厚さ (mm)	約167	1層分				
4) 遮蔽体厚さ						
a) 軸方向上部遮蔽 (mm)	615					
b) 軸方向下部遮蔽 (mm)	230					
c) 径方向遮蔽(等価厚さ)(mm)	約689	4層分 (Na層を含む)				
5) 炉心構成要素配列						
a) 集合体配列ピッチ (mm)	179.8					
b) 集合体全長 (mm)	約3,500					
6) 炉心外接円						
a) 炉心外接円 (mm)	約3,850					
b) 制御棒外接円 (mm)	約2,793					
7) 組成体積比 (v/o)						
	燃 料	ギャップ	構造材	冷却材	吸収材	
a) 炉心燃料集合体	39.6	2.0	20.9	37.5	-	
b) ブランケット燃料集合体	54.9	1.8	16.2	27.1	-	
c) 主炉停止径制御棒	-	3.2	12.7	48.2	35.9	吸収体部
d) 後備炉停止系制御棒	-	3.2	12.7	48.2	35.9	吸収体部
e) SUS遮蔽体	-	-	80.0	20.0	-	
f) B, C遮蔽体	-	-	20.0	20.0	60.0	

表3.2-1 炉心主要仕様 (3/3)

項 目	仕 様	備 考
4. 燃 料		
1) 燃料ペレット材料		
炉 心	$\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$	$\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$
半径方向ブランケット	UO_2	UO_2
軸方向ブランケット	UO_2	UO_2
2) プルトニウム富化度 (w/o)		$\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2)$
平衡炉心 (内側/外側炉心)	15.4/18.6	
3) プルトニウム同位元素化 (w/o)	$\text{Pu}^{239} : \text{Pu}^{240} : \text{Pu}^{241} : \text{Pu}^{242}$	
初装荷炉心	58 : 24 : 14 : 4	
平衡炉心	58 : 24 : 14 : 4	
4) ウラン同位元素化 (w/o)	$\text{U}^{235} : \text{U}^{238}$	
炉 心	0.3 : 99.7	
ブランケット	0.3 : 99.7	
5) 燃料ペレット密度 (%TD)		
炉 心	92	
ブランケット	94.5	
5. 燃料交換		
1) 燃料交換方式		
a) 炉 心	固定3バッチ分散方式	
b) 半径方向ブランケット	固定4バッチ分散方式	
6. 炉心構成要素計画寿命		
1) 炉心燃料集合体 (サイクル)	3	
2) ブランケット		
燃料集合体 (サイクル)	4	
3) 主炉停止系		
制御棒 (サイクル)	3	
4) 後備炉停止		
制御棒 (サイクル)	3	
5) SUS 遮蔽体 (年)	30	
6) B, C 遮蔽体 (年)	30	

表3.2-2 炉心構成要素主要仕様 (1/4)

項 目	仕 様	備 考
1. 炉心燃料		
1) 炉心燃料ペレット		
a) 材 質	プルトニウム・ウラン 混合酸化物	
b) プルトニウム富化度 (W/O) 平衡炉心 (内側/外側)	15.4/18.6	$\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2)$
c) 外 径 (mm)	7.22	
d) 密 度 (%TD)	92	
e) O/M比 (-)	1.98	
2) 軸方向ブランケット燃料ペレット		
a) 材 質	劣化ウラン酸化物	
b) ウラン 235含有率 (W/O)	0.3	
c) 外 径 (mm)	7.22	
d) 密 度 (%TD)	94.5	
e) O/M比 (-)	2.0	
3) 被覆管		
a) 材 質	改良オーステナイト鋼	
b) 外 径 (mm)	8.3	
c) 内 径 (mm)	7.4	
e) ペレット間ギャップ (mm)	0.18	直径ギャップ
4) 燃料要素		
a) 型 式	インテグラル密封型 下部ガスプレナム	
b) 全 長 (mm)		
i) 炉心燃料体長さ (mm)	1.000	
ii) ブランケット (mm) 燃料体長さ (上部/下部)	200/200	
c) スペーサワイヤ径 (mm)	1.50	
d) ワイヤ巻付けピッチ (mm)	165	

表3.2-2 炉心構成要素主要仕様 (2 / 4)

項 目	仕 様	備 考
5) 燃料集合体		
a) 形 状	正六角形断面	
b) 燃料要素配列ピッチ (mm)	9.9 正三角形配列	$p/d = 1.19$
c) 燃料要素数 (本)	271	
d) ラPPER管		
i) 材 質	フェライト/ マルテンサイト鋼	
ii) 内対面間距離 (mm)	165.8	
iii) 板 厚 (mm)	4.0	
e) 全 長 (mm)	3.500	
2. 半径方向ブランケット		
1) ブランケット燃料ペレット		
a) 材 質	劣化ウラン酸化物	
b) ウラン 235含有率 (w/o)	0.3	
c) 外 径 (mm)	12.4	
d) 密 度 (%TD)	94.5	
e) O/M比 (-)	2.0	
2) 被覆管		
a) 材 質	改良オーステナイト鋼	
b) 外 径 (mm)	13.4	
c) 内 径 (mm)	12.6	
c) ペレット間ギャップ (mm)	0.2	直径ギャップ
3) 燃料要素		
a) 型 式	密封型 下部ガスプレナム	
b) 全 長 (mm)		
c) 燃料部長さ (mm)	1.400	
d) スペーサワイヤ径 (mm)	1.0	
e) ワイヤ巻付けピッチ (mm)	165	

表3.2-2 炉心構成要素主要仕様 (3 / 4)

項 目	仕 様	備 考
4) 燃料集合体		
a) 形 状	正六角形断面	
b) 燃料要素配列ピッチ (mm)	14.46	p / d = 1.08
	正三角形配列	
c) 燃料要素数 (本)	127	
d) ラPPER管		
i) 材 質	改良オーステナイト鋼	
ii) 内対面間距離 (mm)	165.8	
iii) 板 厚 (mm)	4.0	
e) 全 長 (mm)	3.500	
3. 主炉停止系制御棒		
a) 集合体数 (体)	18	
b) 中性子吸収材	B, C	
c) B-10濃縮度 (w/o)	33.3	
d) B-10装荷量 (kg/集合体)	6.55	
e) 制御要素数 (本/集合体)	37	
f) 吸収体有効長 (mm)	1.000	
g) 被覆材材質	改良オーステナイト鋼	
h) B, Cペレット密度 (XTD)	95	
4. 後備炉停止系制御棒		
a) 集合体数 (体)	6	
b) 中性子吸収材	B, C	
c) B-10濃縮度 (w/o)	84.7	
d) B-10装荷量 (kg/集合体)	15.76	
e) 制御要素数 (本/集合体)	37	
f) 吸収体有効長 (mm)	1.000	
g) 被覆材材質	改良オーステナイト鋼	
h) B, Cペレット密度 (XTD)	95	

表3.2-2 炉心構成要素主要仕様 (4 / 4)

項 目	仕 様	備 考
5. SUS遮蔽体		
a) 集合体数 (体)	78	
b) 遮蔽材		
c) 遮蔽要素数 (本/集合体)		
d) 遮蔽要素径 (mm)		
e) 遮蔽要素長 (mm)		
6. B, C遮蔽体		
a) 集合体数 (体)	270	
b) 遮蔽材	B, C	
c) B, C密度 (%TD)		
d) 遮蔽要素数 (本/集合体)		
e) 遮蔽要素径 (mm)		
f) 遮蔽要素長 (mm)		
g) 被覆管材質	改良オーステナイト鋼	
h) 被覆管肉厚 (mm)		
i) 型 式	密度型 下部ガスプレナム	
7. 炉心構成要素共通事項		
a) 配列ピッチ (mm)	179.8	
b) 炉心構成要素全長 (mm)	3.500	
c) 炉心中心位置(軸方向)(mm)	1.990	支持板上端から
	1.510	集合体頂部から
d) スペーサパッド中心位置と幅		
上部パッド (mm)	200	集合体頂部から
	(40)*	* : ()内はパッド幅
中間パッド (mm)	910	集合体頂部から
	(40)*	* : ()内はパッド幅
e) スペーサパッドの対辺間寸法		
上部パッド (mm)	179.1	
	(0.7)**	** : ()内はパッド間
中間パッド (mm)	178.8	ギャップ
	(1.0)**	

表3.2-3 構造材組成データ

[W/O]

核 種	改良オーステナイト鋼	フェライト/ マルテンサイト鋼
Fe	60.97	85.46
Cr	15.05	11.8
Ni	19.5	0.57
Mo	2.51	0.94
Mn	1.97	0.54
C		0.17
W		0.52

表3.2-4 構造材密度データ

構 造 材	密 度
改良オーステナイト鋼	$\rho = 7.977 - 3.547 \times 10^{-4} \cdot T$ <p>ここで ρ 密度 (g/cm³) T 温度 (°C) 適用範囲 室温 ~ 850°C</p>
フェライト/ マルテンサイト鋼	$\rho = 7.679 - 2.291 \times 10^{-4} \cdot T$ <p>ここで ρ 密度 (g/cm³) T 温度 (°C) 適用範囲 室温 ~ 850°C</p>

表3.2-5 TRU燃料の組成一覧

[$\times 10^{24}$ atm/cc]

核種	LWR取出 (Np+Am+Cm) H ₂ O燃料ベース ☆	FBR取出 (Np+Am+Cm) H ₂ O燃料ベース	Np H ₂ O燃料ベース	LWR取出 (Am+Cm) H ₂ O燃料ベース
Mn	3.40392 $\times 10^{-4}$			
O	1.81578 $\times 10^{-2}$			
Na	8.33549 $\times 10^{-3}$			
Cr	2.74760 $\times 10^{-3}$			
Fe	1.03634 $\times 10^{-2}$			
Ni	3.15397 $\times 10^{-3}$			
Mo	2.48348 $\times 10^{-4}$			
²³⁷ Np	4.55341 $\times 10^{-3}$	6.59056 $\times 10^{-4}$	9.17068 $\times 10^{-3}$	—
²⁴² Am	6.93043 $\times 10^{-6}$	8.10173 $\times 10^{-5}$	—	1.37650 $\times 10^{-5}$
²⁴¹ Am	2.73249 $\times 10^{-3}$	6.19937 $\times 10^{-3}$	—	5.42719 $\times 10^{-3}$
²⁴³ Am	1.40099 $\times 10^{-3}$	1.91104 $\times 10^{-3}$	—	2.78260 $\times 10^{-3}$
²⁴² Cm	7.95432 $\times 10^{-8}$	2.80871 $\times 10^{-7}$	—	1.57986 $\times 10^{-7}$
²⁴³ Cm	4.57033 $\times 10^{-6}$	8.18608 $\times 10^{-6}$	—	9.07745 $\times 10^{-6}$
²⁴⁴ Cm	4.49072 $\times 10^{-4}$	2.82023 $\times 10^{-4}$	—	8.91933 $\times 10^{-4}$
²⁴⁵ Cm	2.31393 $\times 10^{-5}$	2.97039 $\times 10^{-5}$	—	4.59586 $\times 10^{-5}$
TRU 合計	9.17068 $\times 10^{-3}$	9.17068 $\times 10^{-3}$	9.17068 $\times 10^{-3}$	9.17068 $\times 10^{-3}$

☆ 使用組成

表3.2-6 エネルギー群構造及び各分裂スペクトル (その1)

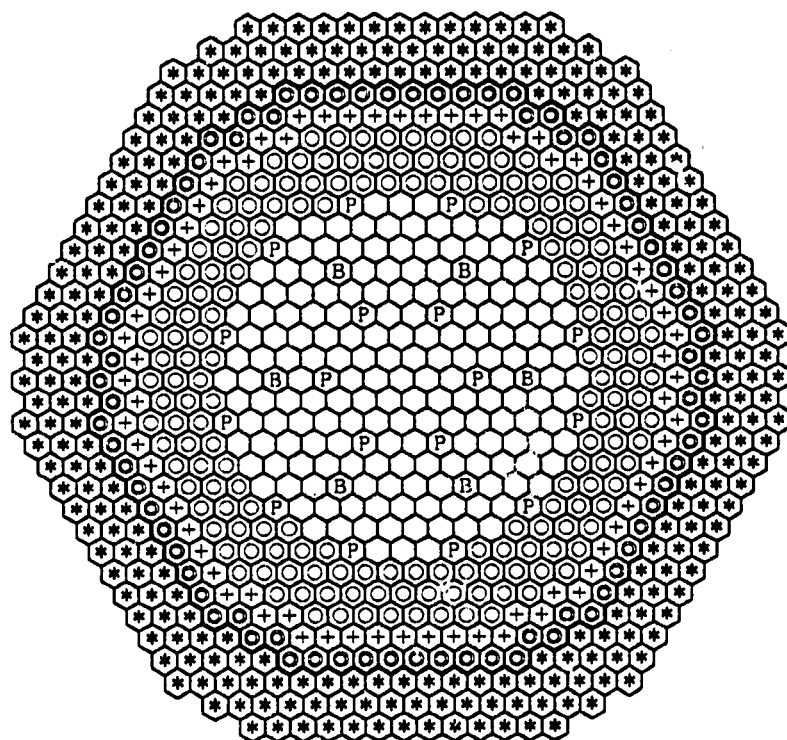
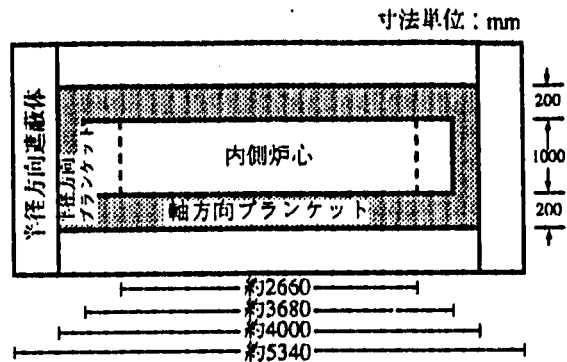
エネルギー範囲	70 群		7 群	
	群構造	核分裂スペクトル	群構造	核分裂スペクトル
10.0 (HeV) ~ 7.7880 (HeV)	1	8.3498×10^{-3}	1	5.8332×10^{-1}
7.7880 ~ 6.0653	2	2.2710×10^{-2}		
6.0653 ~ 4.7237	3	4.5869×10^{-2}		
4.7237 ~ 3.6788	4	7.3294×10^{-2}		
3.6788 ~ 2.8650	5	9.7428×10^{-2}		
2.8650 ~ 2.2313	6	1.1210×10^{-1}		
2.2313 ~ 1.7377	7	1.1520×10^{-1}		
1.7377 ~ 1.3534	8	1.0837×10^{-1}		
1.3534 ~ 1.0540	9	9.5137×10^{-2}		
1.0540 ~ 0.82085	10	7.9137×10^{-2}		
0.82085 ~ 0.63928	11	6.3114×10^{-2}		
0.63928 ~ 0.49787	12	4.8710×10^{-2}		
0.49787 ~ 0.38774	13	3.6643×10^{-2}		
0.38774 ~ 0.30197	14	2.7021×10^{-2}	3	8.2708×10^{-2}
0.30197 ~ 0.23518	15	1.9618×10^{-2}		
0.23518 ~ 0.18316	16	1.4072×10^{-2}		
0.18316 ~ 0.14264	17	9.9987×10^{-3}		
0.14264 ~ 0.11109	18	7.0524×10^{-3}		
0.11109 ~ 0.086517	19	4.9459×10^{-3}	4	1.0848×10^{-2}
86.517 (keV) ~ 67.379 (keV)	20	3.4531×10^{-3}		
67.379 ~ 52.475	21	2.4025×10^{-3}		
52.475 ~ 40.868	22	1.6671×10^{-3}		
40.868 ~ 31.828	23	1.1543×10^{-3}		
31.828 ~ 24.788	24	7.9794×10^{-4}		
24.788 ~ 19.305	25	5.5089×10^{-4}		
19.305 ~ 15.034	26	3.7995×10^{-4}		
15.034 ~ 11.709	27	2.6185×10^{-4}		
11.709 ~ 9.1188	28	1.8035×10^{-4}	5	3.8331×10^{-4}
9.1188 ~ 7.1017	29	1.2416×10^{-4}		
7.1017 ~ 5.5308	30	8.5444×10^{-5}		
5.5308 ~ 4.3074	31	5.8784×10^{-5}		
4.3074 ~ 3.3546	32	4.0433×10^{-5}		
3.3546 ~ 2.6126	33	2.7806×10^{-5}		
2.6126 ~ 2.0347	34	1.9120×10^{-5}		
2.0347 ~ 1.5846	35	1.3146×10^{-5}		
1.5846 ~ 1.2341	36	9.0376×10^{-6}		
1.2341 ~ 0.96112	37	5.3758×10^{-6}		

表3.2-6 エネルギー群構造及び各分裂スペクトル (その2)

エネルギー範囲	70 群		7 群	
	群構造	核分裂スペクトル	群構造	核分裂スペクトル
961.12 (eV)~748.52 (eV)	38	0.0	6	0.0
748.52 ~582.95	39	0.0		
582.95 ~454.00	40	0.0		
454.00 ~353.58	41	0.0		
353.58 ~275.36	42	0.0		
275.36 ~214.45	43	0.0		
214.45 ~167.02	44	0.0		
167.02 ~130.07	45	0.0		
130.07 ~101.30	46	0.0		
101.30 ~ 78.893	47	0.0		
78.893 ~ 61.442	48	0.0		
61.442 ~ 47.851	49	0.0		
47.851 ~ 37.267	50	0.0		
37.267 ~ 29.023	51	0.0		
29.023 ~ 22.603	52	0.0		
22.603 ~ 17.603	53	0.0		
17.603 ~ 13.710	54	0.0		
13.710 ~ 10.677	55	0.0		
10.677 ~ 8.3153	56	0.0		
8.3153 ~ 6.4760	57	0.0		
6.4760 ~ 5.0435	58	0.0		
5.0435 ~ 3.9279	59	0.0		
3.9279 ~ 3.0590	60	0.0		
3.0590 ~ 2.3824	61	0.0		
2.3824 ~ 1.8554	62	0.0		
1.8554 ~ 1.4450	63	0.0		
1.4450 ~ 1.1254	64	0.0		
1.1254 ~ 0.87642	65	0.0		
0.87642 ~ 0.68256	66	0.0		
0.68256 ~ 0.53158	67	0.0		
0.53158 ~ 0.41399	68	0.0		
0.41399 ~ 0.32242	69	0.0		
0.32242 ~ 10 ⁻⁵	70	0.0		

表3.2-7 出力分布・燃焼計算条件

項 目		2次元RZ計算	2次元XYZ計算
(a) 燃 焼 計 算	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 炉 心 + ブランケット </div> 出力	2517MW t	2DRZ計算により、炉心高さ相当部の出力を燃焼ステップ毎に求めて使用
	エネルギー群数	7群	7群
	制御棒状態 (各制御棒の軸方向位置は完全に揃っているとする)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> ○主炉停止棒 1) BOC : 炉心上端より33.3cm挿入 2) EOC : 炉心上端まで引抜 ○後備炉停止棒 炉心上端まで引抜 </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> ○主炉停止棒 1) BOC : 中途挿入 2) EOC : 全引抜 ○後備炉停止棒 全引抜 </div>
軸方向バックリング	<使用せず>	2DRZ計算より、燃焼ステップ毎に、炉心高さのバックリングを求めて使用。	
(b) 出力 分 布 計 算	制御棒状態		
	その他	上記(a)と同じ	上記(a)と同じ
	出力補正係数	XY, RZ計算の合成により得られた集合体出力に対して半径方向ブランケットに対しては、γ線輸送効果の補正を加える。 { 初期 +20% 末期 +15%	










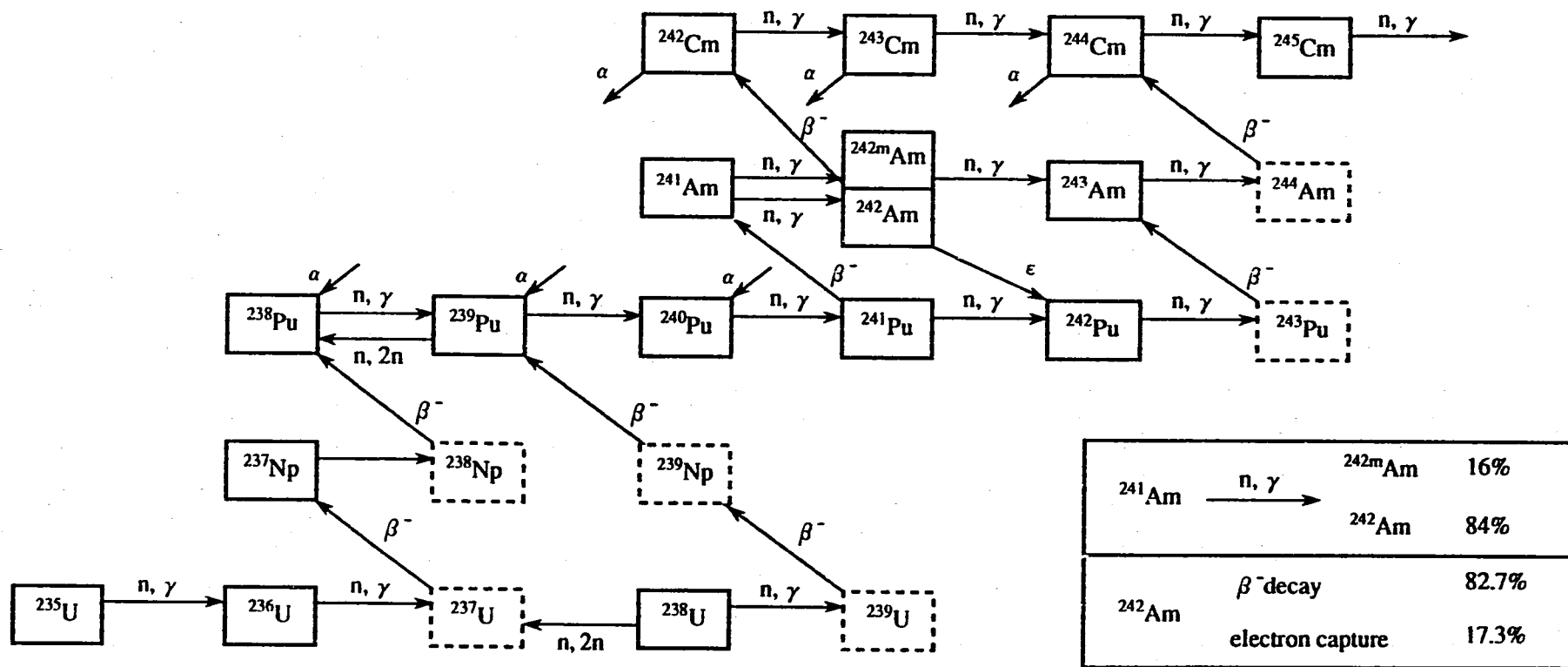
	内側炉心	175本
	外側炉心	180本
	主炉停止系制御棒	18本
	後備炉停止系制御棒	6本
	半径方向ブランケット	72本
	中性子遮蔽体 (SUS)	78本
	中性子遮蔽体 (B4C)	270本
<hr/>		合計 799本

図 3.2-1 レファレンス炉心の炉心構成図



☐ 内の核種は、生成後直ちに崩壊するものとする

図 3.2-2 TRU 燃焼チェーン (actinide build up path)

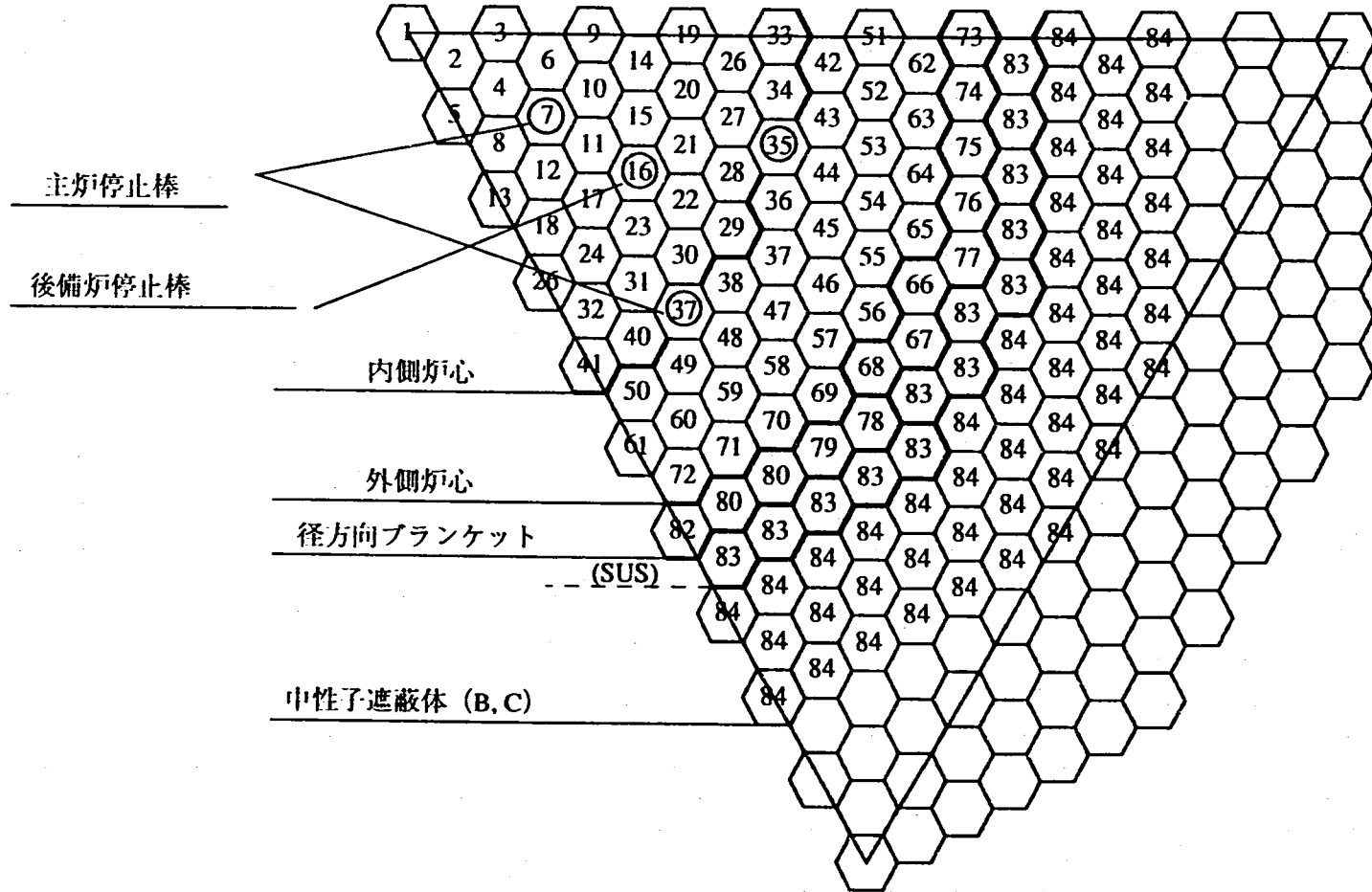


図 3.2-2 二次元 X Y、1 / 6 炉心体系 (基準体系)

3.3 ターゲット集合体のプルトニウム富化度に関する解析

(1) 解析内容

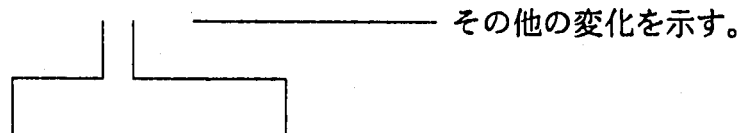
選定したCASE-Aの装荷位置において、ターゲット集合体の許容線出力を満足するようなプルトニウム富化度をサーベイした。CASE-Aの炉心配置を図3.3-1に示す。サーベイを行ったのは、下記のCASE-A3, -A4, -A5である。ここで、プルトニウム富化度は、TRUを除くウラン及びプルトニウム酸化物で定義している。下記のケースの場合、TRU混入率は約50%としているので、TRUを含めて定義したプルトニウム富化度は、下記の値の約1/2に相当する。

ターゲット集合体のプルトニウム富化度 (内側/外側)

CASE-A	15.4 / 18.6 wt %	炉心燃料と同じ
CASE-A1	20.0 / 24.2 wt %	CASE-Aの1.3倍
CASE-A2	10.8 / 13.0 wt %	CASE-Aの0.7倍
CASE-A3	7.8 / 9.4 wt %	CASE-Aの0.5倍
CASE-A4	4.6 / 5.6 wt %	CASE-Aの0.3倍
CASE-A5	0.0 / 0.0 wt %	CASE-Aの0.0倍

なお、サーベイ計算のケース名については、原則として次のルールに従った。

CASE-A1-a



ターゲット集合体の
配置を示す。

プルトニウム富化度
を示す。

- 無し —— 炉心燃料と同じ
- 1 —— 炉心燃料×1.3
- 2 —— 炉心燃料×0.7
- 3 —— 炉心燃料×0.5
- 4 —— 炉心燃料×0.3
- 5 —— 炉心燃料×0.0

その他の計算条件は次のとおりである。

- ・ターゲット集合体のTRU混入率は、49.3%とした。(炉心平均のTRU混入率が5%となる。)
- ・ターゲット集合体の燃料体積比等は、炉心燃料と同じとした。

(2) 結果及び考察

1/6体系での平衡炉心初期及び末期の各集合体の集合体出力及び最大線出力を図3.3-2～図3.3-7に示す。また、炉心燃料とターゲット集合体の最大線出力を表3.3-1に示す。同表において、括弧内の線出力は、線出力がピン本数比に逆比例するものとして、331ピン及び397ピンの集合体の値を推定したものである。(燃料ピン本数の変更による燃料体積比等の変化の効果は考慮されていない。)図3.3-8は、ターゲット集合体のプルトニウム富化度の変化に対する最大線出力の変化を示したものである。但し、この図においては、ターゲット集合体のピン本数が397本に外挿した場合の線出力を図示している。

これらの結果は以下のようにまとめることができる。

- ① 炉心燃料の最大線出力については、平衡初期の外側炉心において、制限値(430W/cm)を超える。
- ② ターゲット集合体については、TRU50%混入の場合の燃焼末期の線出力制限値(約335W/cm。表2.1-5参照。)をどのケースについても上回っており、ターゲット集合体のプルトニウム富化度調整のみで制限値を満足させることはできない。燃料ピン本数を増大させて線出力の低減を図る場合には、制限値を満たす可能性はある。
- ③ 図3.3-8に示すように、ターゲット集合体のプルトニウム富化度の変化に対して、炉心燃料の線出力の増大(減少)方向はターゲット集合体と逆の方向にある。炉心燃料とターゲット集合体の線出力の制限値を同時に満たすターゲット集合体のプルトニウム富化度は、サーベいの範囲ではみつからない。
- ④ 基準炉心(ターゲット集合体なし)と比較した場合、最大線出力のバランスからみて、これらのケースは外側炉心の出力が高すぎる傾向がある。

表3.3-1 炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果）

—ターゲット集合体のプルトニウム富化度の影響—

		内側炉心		外側炉心	
		平衡初期	平衡末期	平衡初期	平衡末期
CASE-A3 (Pu ×0.5)	炉心燃料	386 W/cm	383	437	340
	271	462	491	446	373
	ターゲット集合体 331	(378)	(402)	(365)	(305)
	397	(315)	(335)	(304)	(255)
CASE-A4 (Pu ×0.3)	炉心燃料	390	376	445	344
	271	448	468	431	365
	ターゲット集合体 331	(367)	(383)	(353)	(299)
	397	(306)	(319)	(294)	(249)
CASE-A5 (Pu ×0.0)	炉心燃料	397	375	456	350
	271	426	454	409	353
	ターゲット集合体 331	(349)	(372)	(335)	(289)
	397	(291)	(310)	(279)	(241)

許容線出力 { 炉心燃料 : 430 W/cm
 ターゲット集合体 : 335 W/cm (燃焼末期)

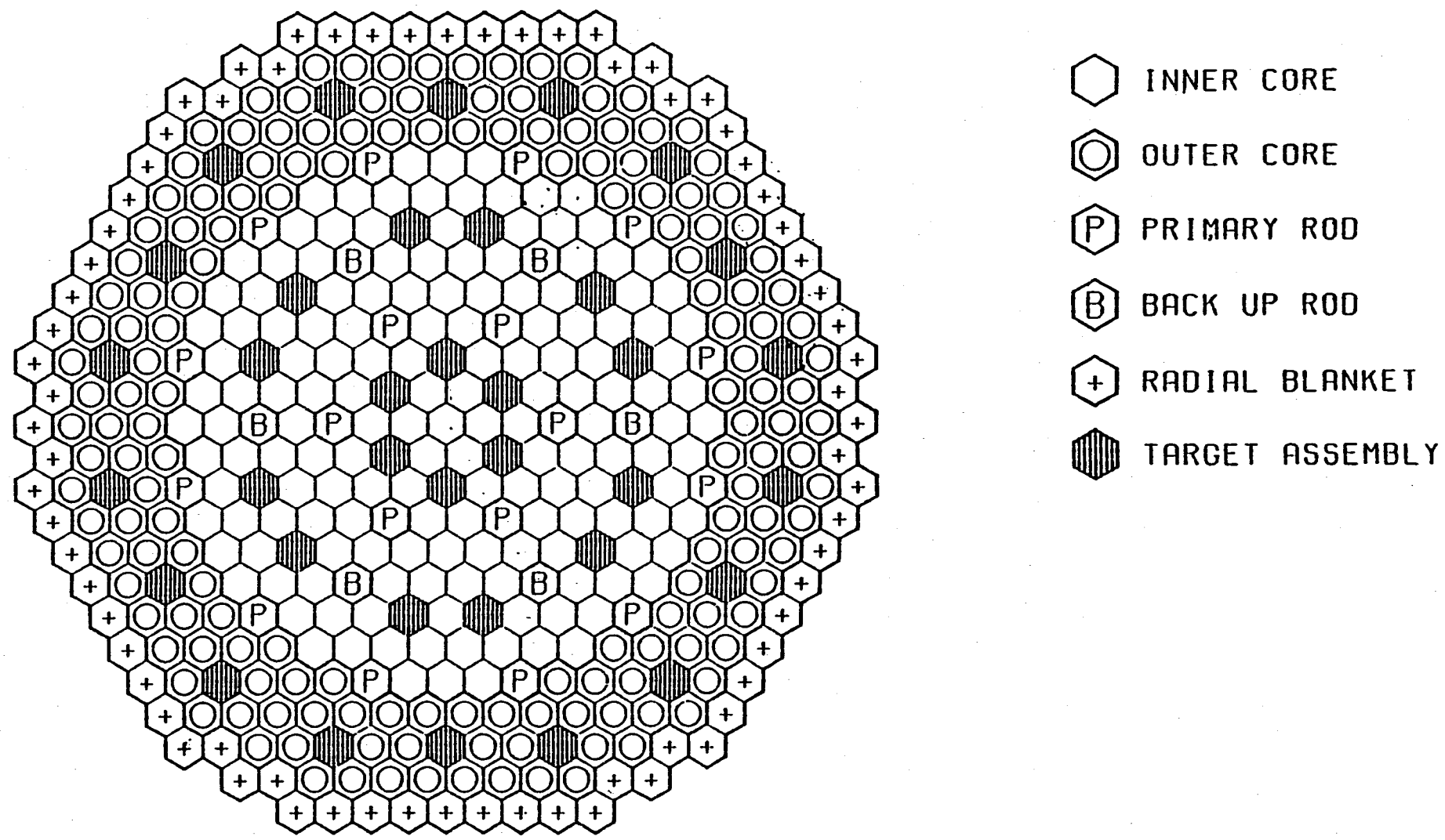
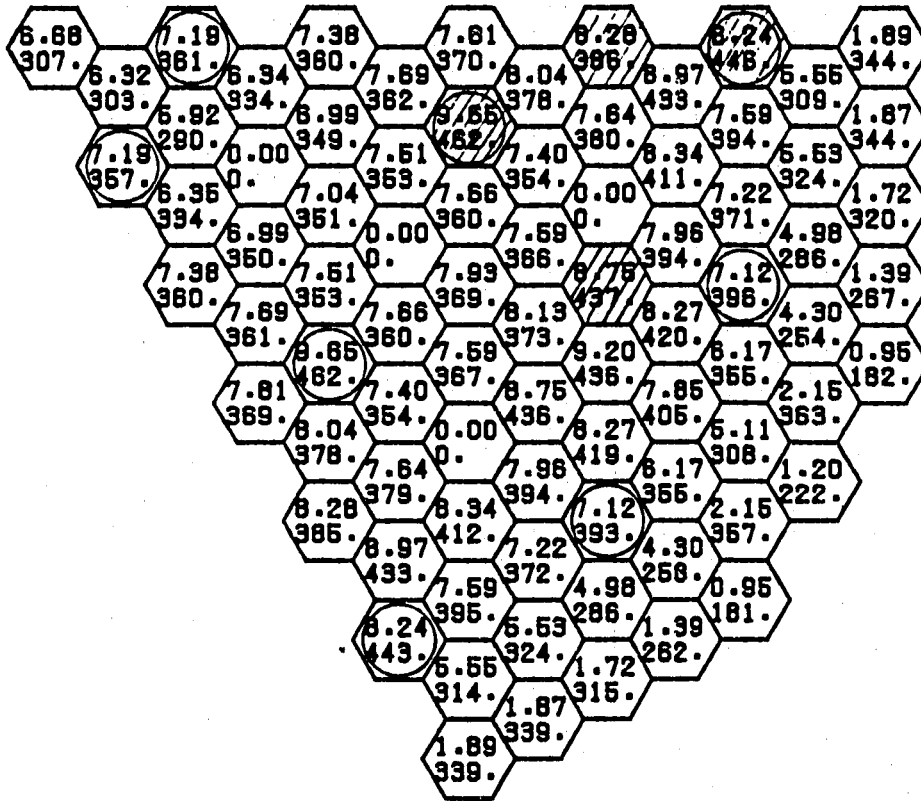


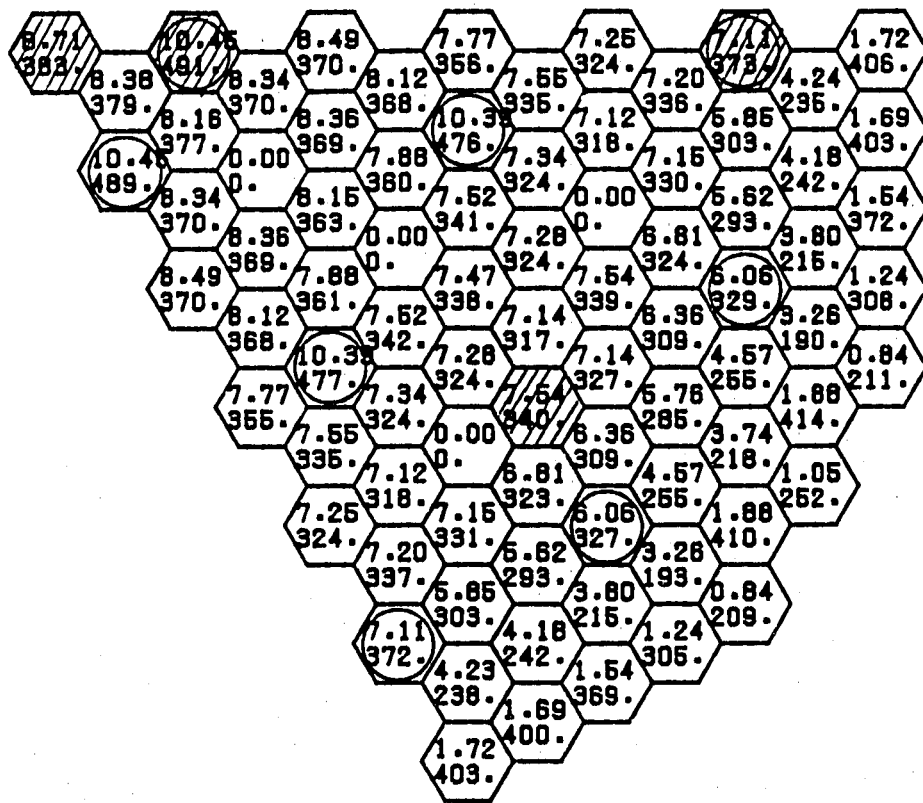
図 3.3-1 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-A)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

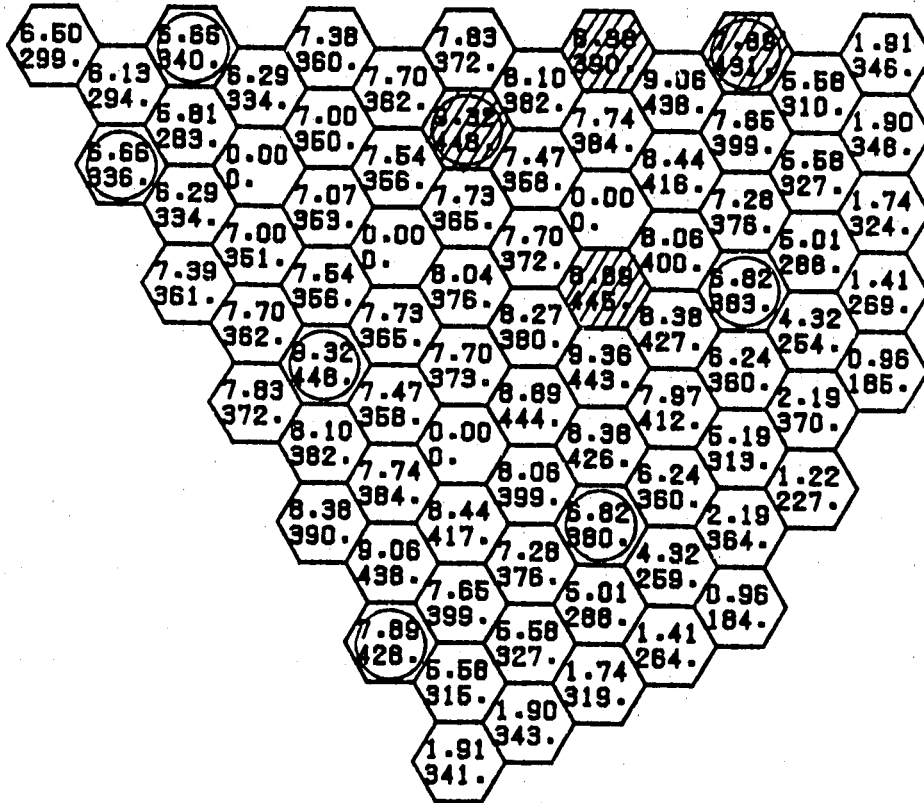
図3.3-2 CASE-A3 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN OUT

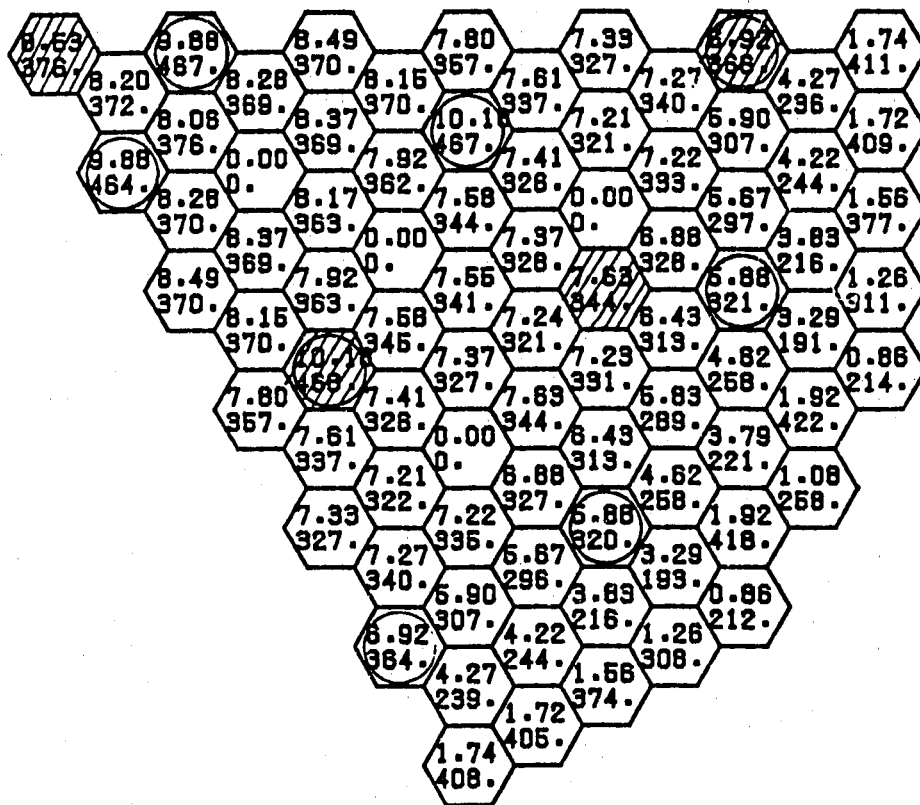
図3.3-3 CASE-A3 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

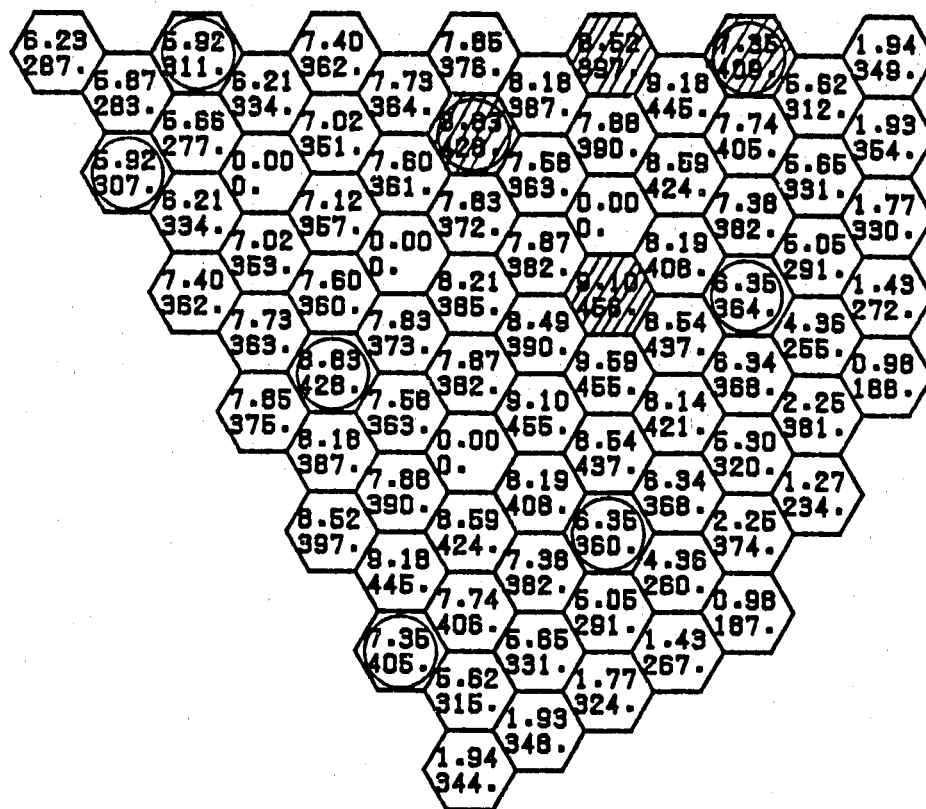
図3.3-4 CASE-A4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

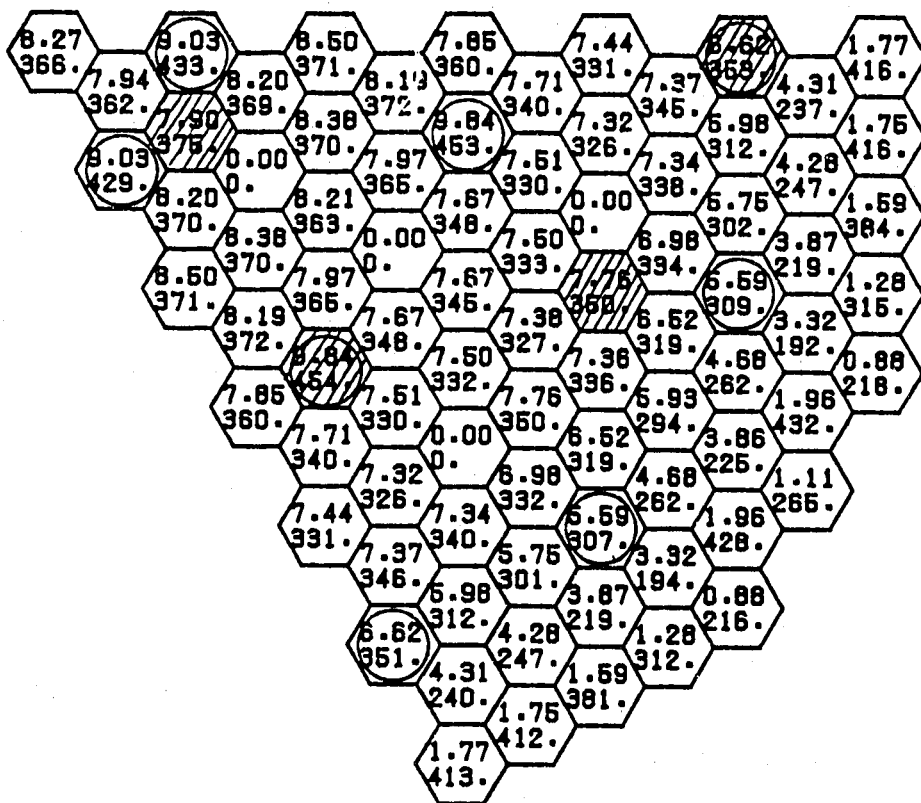
図3.3-5 CASE-A4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

図3.3-6 CASE-A5 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN OUT

図3.3-7 CASE-A5 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)

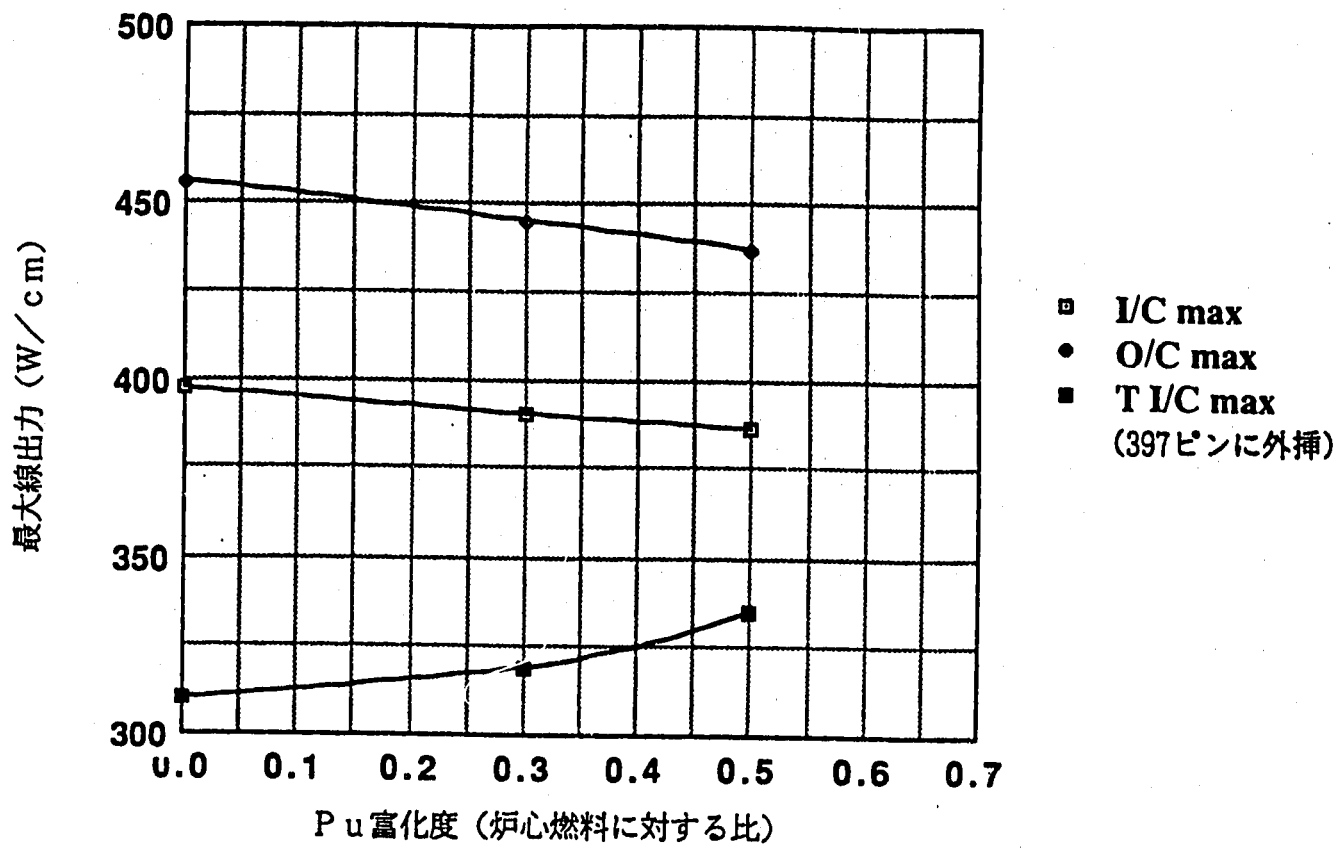


図3.3-8 ターゲット集合体のPu富化度の変化による最大線出力の変化 (CASE-A)

3.4 ターゲット集合体の装荷位置等に関する検討

ターゲット集合体の装荷位置は炉心にできるだけ均一に分散させることが出力分布の点で好ましいと思われるが、装荷位置（CASE-A等）は、炉心中心部（第2列6体）にやや偏在している。内側炉心と外側炉心の境界付近に装荷すれば炉心燃料の発熱量への影響を小さくできることがわかっており、この部分の装荷量を増やすような装荷パターンを検討した。

また、ターゲット集合体の線出力低減のために装荷本数を増大する場合には、これに応じた見直しを行った。さらに、ターゲット集合体の構造検討（燃料ピン本数の増大）結果を反映させ、燃料ピン本数の変更に伴う燃料体積比への影響も考慮した。

3.4.1 ターゲット集合体の装荷位置に関する検討

(1) 解析内容

以下のターゲット集合体装荷パターンについて解析を実施した。

- CASE-F（図3.4.1-1）

CASE-Aに対して、炉心第2列のターゲット集合体本数を6体から3体に減らし、内側炉心最外周に6体を追加した。（39体装荷）

- CASE-G（図3.4.1-2）

CASE-Fに対して、炉心第2列のターゲット集合体本数を6体に増やしたものの。（42体装荷）

- CASE-H

CASE-Gに対して、内側炉心最外周に更に6体追加。（48体装荷）

計算条件は次のとおりである。

- ターゲット集合体のプルトニウム富化度（Pu、U酸化物で定義。）は炉心燃料の0.3倍とした。
- ターゲット集合体のTRU混入率は、49.3%とした。（炉心平均のTRU混入率が5%となる。）
- ターゲット集合体の燃料体積比等は、炉心燃料と同じとした。

(2) 結果

計算結果をターゲット集合体のプルトニウム富化度が等しいCASE-A4と比較して、表3.4.1-1に示す。また、1/6体系での平衡炉心初期及び末期の各集合体の集合体出力及び最大線出力を図3.4.1-4～図3.4.1-9に示す。結果をまとめると以下のとおりである。

- CASE-FとCASE-Hにおいて、内側炉心と外側炉心の炉心燃料の最大線出力のバランスは大幅に改善されるが、許容線出力である430W/cmを僅かながら上回る。ターゲット集合体の最大線出力は、CASE-Aより増大し、ピ

ン本数の増加を見込んで許容線出力（末期335W/cm）を上回る。

- ・CASE-Gは外側炉心の炉心燃料の線出力が高すぎる。（442W/cm）

3.4.2 燃料ピン本数に関する検討

(1) 解析内容

CASE-F4に対して、燃料ピン本数の増大による構造データの変更を考慮したサーベイを行った。

燃料ピン本数を増大させると燃料体積比が減少するが、ターゲット集合体のTRU混入率は、炉心全体の混入率が5%となるように、表3.4.2-1に示すとおり設定した。また、ターゲット集合体のプルトニウム富化度（U、Puのみで定義）は炉心燃料の30%に固定した。

(2) 結果

計算結果を表3.4.2-2に示す。また、1/6体系での平衡炉心初期及び末期の各集合体の集合体出力及び最大線出力を図3.4.2-1～図3.4.2-4に示す。

計算結果をまとめると次のとおりである。

- ・ターゲット集合体のピン本数増大により線出力は低減されるが、TRUの量は一定に調整しているため、炉心燃料への影響は小さい。
- ・271ピンの結果からピン本数比に逆比例するとして推定した線出力と比較すると、内側炉心では最大線出力が減少（約10W/cm）、外側炉心では最大線出力が増大（約10W/cm）する。

3.4.3 装荷パターンの検討

前節までの結果を踏まえて、線出力の低減可能性のある以下のパターンのサーベイ計算を実施した。

サーベイ対象としたのは、CASE-F及びCASE-Aのターゲット集合体装荷パターンである。CASE-F4では内側炉心のターゲット集合体の出力低減、CASE-Aでは外側炉心の炉心燃料集合体の低減が課題である。

(1) CASE-Fに関する解析

(a) 解析内容

① CASE-F4-a

CASE-F4では、炉心第2列に装荷したターゲット集合体の線出力が高すぎたので、炉心第2列のターゲット集合体のPu富化度のみを零とした。

② CASE-F4-b

①と同様の狙いで、内側炉心に装荷するターゲット集合体のPu富化度をとした。

③ CASE-F5

CASE-Aのターゲット集合体の装荷パターンにおいて、ターゲット集合体のPu富化度を下げると外側炉心の炉心燃料の出力が低下することがわかった。これをCASE-Fに対しても期待することとし、CASE-Fのパターンでターゲット集合体のPu富化度を零とした。

④ CASE-I4

CASE-F4に対して、炉心中心に1体のターゲット集合体を追加した。狙いは、内側炉心のターゲット集合体の出力低減である。

(b) 結果

計算結果を表3.4.2-3に示す。また、1/6体系での平衡炉心初期及び末期の各集合体の集合体出力及び最大線出力を図3.4.2-5～図3.4.2-12に示す。

① CASE-F4-a

内側炉心のターゲット集合体の最大線出力は、371W/cmから366W/cmに低下した。内側炉心の炉心燃料の最大線出力も431W/cmに低下した。

② CASE-F4-b

ターゲット集合体の線出力は制限値を満足するが、炉心燃料の最大線出力は439W/cmに増大した（平衡初期、内側炉心）

図3.4.2-13に、内側炉心のターゲット集合体のPu富化度の変化に対する最大線出力の変化を示す。これによれば、内側炉心のターゲット集合体のPu富化度を変化させたとしても、炉心燃料とターゲット集合体の両方の線出力制限値を同時に満足させることはできない。また、仮にターゲット集合体の制限値を考えない場合でも、内側または外側炉心燃料のどちらかが制限を超えてしまう。

③ CASE-F5

内側炉心、外側炉心とも炉心燃料の最大線出力が制限を10W/cm以上上回った。ターゲット集合体は制限値を満足している。

④ CASE-I4

ターゲット集合体の最大線出力は356W/cmと制限を上回る。炉心燃料についても、平衡初期、外側炉心で435W/cmと制限を上回る。

(2) CASE-Aに関する解析

これまでに述べたCASE-Aのサーベイでは、燃料体積比が271ピン集合体のものを用いてきたが、397ピンの体積比を使うと内側炉心では最大線出力が減少（約10W/cm）、外側炉心では最大線出力が増大（約10W/cm）する効

果が前に述べたサーベイ計算でみられたので、397ピンの体積比を用いた計算を行った。また、ターゲット集合体のPu富化度については、図3.4.2-4に示す関係より、炉心燃料の線出力が制限値を満たす可能性のある値（炉心燃料の0.7倍）とした。

計算結果を表3.4.2-3に示す。また、1/6体系での平衡炉心初期及び末期の各集合体の集合体出力及び最大線出力を図3.4.2-15～図3.4.2-16に示す。

ターゲット集合体の最大線出力は350W/cmと制限を上回る。炉心燃料についても、平衡末期、内側炉心で431W/cmと制限を僅かに上回る。

(3) CASE-F-bの解析

CASE-F-bについて、ターゲット集合体のプルトニウム富化度及びTRU混入率に関するサーベイを実施した。

- ・ターゲット集合体のプルトニウム富化度——炉心燃料の0.3、0.5倍
- ・ターゲット集合体のTRU混入率———48.4%（基準）、29.0%

計算結果は表3.4.2-4に示すとおりであり、TRU混入率を下げた場合にはターゲット集合体の線出力は低下するが炉心燃料の最大線出力は増大するので、特性は改善されない。

表3.4.1-1 炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果）
 - TRU装荷パターンの影響（プルトニウム富化度0.3倍） -

		内側炉心		外側炉心	
		平衡初期	平衡末期	平衡初期	平衡末期
CASE-A4 (TRU36体) (Pu × 0.3)	炉心燃料	390	376	445	344
	271	448	468	431	365
	ターゲット集合体 331 397	(367) (306)	(383) (319)	(353) (294)	(299) (249)
CASE-F4 (TRU39体) (Pu × 0.3)	炉心燃料	396 W/cm	430	431	333
	271	464	559	410	352
	ターゲット集合体 331 397	(380) (317)	(458) (382)	(336) (280)	(288) (240)
CASE-G4 (TRU42体) (Pu × 0.3)	炉心燃料	395	388	442	337
	271	456	486	440	365
	ターゲット集合体 331 397	(373) (311)	(398) (332)	(360) (300)	(299) (249)
CASE-H4 (TRU48体) (Pu × 0.3)	炉心燃料	376	404	433	330
	271	495	508	440	364
	ターゲット集合体 331 397	(405) (338)	(416) (347)	(360) (300)	(298) (248)

許容線出力 { 炉心燃料 : 430 W/cm
 ターゲット集合体 : 335 W/cm (燃焼末期)

表3.4.2-1 ターゲット集合体のTRU混入率

ターゲット 燃料ピン本数 集合体装荷本数	331	397
36	50.8%	52.5%
39	46.9%	48.4%
42	43.6%	45.0%
48	38.1%	39.3%

注) 炉心平均のTRU混入率が5%となるように、ターゲット集合体のTRU混入率を設定した。

表3.4.2-2 炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果）
 - F4パターンでのターゲット集合体の燃料ピン本数の効果 -

		内側炉心		外側炉心	
		平衡初期	平衡末期	平衡初期	平衡末期
CASE-F4 (TRU39体)	炉心燃料	396 W/cm	430	431	333
	ターゲット集合体 271	464	559	410	352
CASE-F4 (TRU39体)	炉心燃料	398	432	431	340
	ターゲット集合体 331	368(380)	443(458)	323(336)	278(288)
CASE-F4 (TRU39体)	炉心燃料	397	432	431	339
	ターゲット集合体 397	309(317)	371(381)	271(280)	233(240)

() 内は271ピンを基準にして、ピン本数比で補正したもの。

許容線出力 { 炉心燃料 : 430 W/cm
 ターゲット集合体 : 335 W/cm (燃焼末期)

表 3.4.2-3 炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果）

- F, Aパターンでの追加検討(1) -

		内側炉心		外側炉心	
		平衡初期	平衡末期	平衡初期	平衡末期
CASE-F4 (TRU39体)	炉心燃料	397 W/cm	432	431	339
	ターゲット集合体 397	309	371	271	233
CASE-F4-a (TRU39体) #1	炉心燃料	397	431	430	339
	ターゲット集合体 397	305	366	271	233
CASE-F4-b (TRU39体) #2	炉心燃料	386	428	439	342
	ターゲット集合体 397	279	309	279	239
CASE-F5 (TRU39体)	炉心燃料	410	443	440	345
	ターゲット集合体 397	280	339	228	202
CASE-I4 (TRU40体)	炉心燃料	387	399	435	340
	ターゲット集合体 397	307	356	285	243
CASE-A2 (TRU36体)	炉心燃料	382	431	388	337
	ターゲット集合体 397	324	313	350	260

*1 炉心第2列のターゲット集合体のPu富化度を零。

*2 内側炉心のターゲット集合体のPu富化度を零。

許容線出力 { 炉心燃料 : 430 W/cm
 { ターゲット集合体 : 335 W/cm (燃焼末期)

表3.4.2-4 炉心燃料及びターゲット集合体の最大線出力（サーベイ結果）

- F, Aパターンでの追加検討(2) -

		内側炉心		外側炉心	
		平衡初期	平衡末期	平衡初期	平衡末期
CASE-F4 (TRU39体)	炉心燃料	397 W/cm	432	431	339
	ターゲット集合体 397	309	371	271	233
CASE-F4-b (TRU39体) #1	炉心燃料	386	428	439	342
	ターゲット集合体 397	279	309	279	239
CASE-F4-b' (TRU39体) #1, #2	炉心燃料	417	448	444	342
	ターゲット集合体 397	349	302	236	198
CASE-F3-b (TRU39体) #1	炉心燃料	394	428	435	334
	ターゲット集合体 397	286	354	314	257
CASE-F3-b' (TRU39体) #1, #2	炉心燃料	393	438	445	341
	ターゲット集合体 397	241	300	274	222

*1 内側炉心のターゲット集合体のPu富化度を零。

*2 TRU 混入率30%

許容線出力 { 炉心燃料 : 430 W/cm
 ターゲット集合体 : 335 W/cm (燃焼末期)

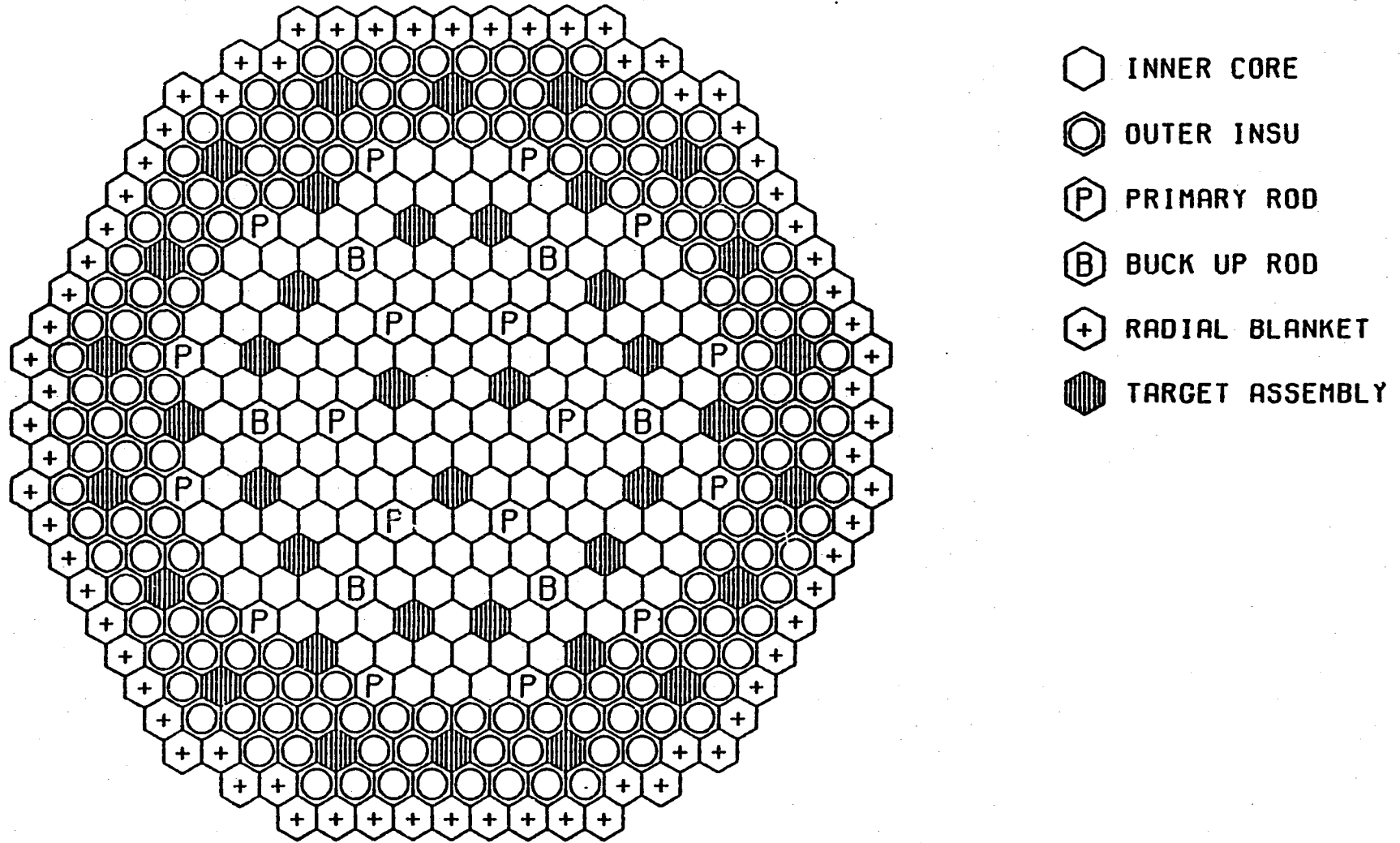
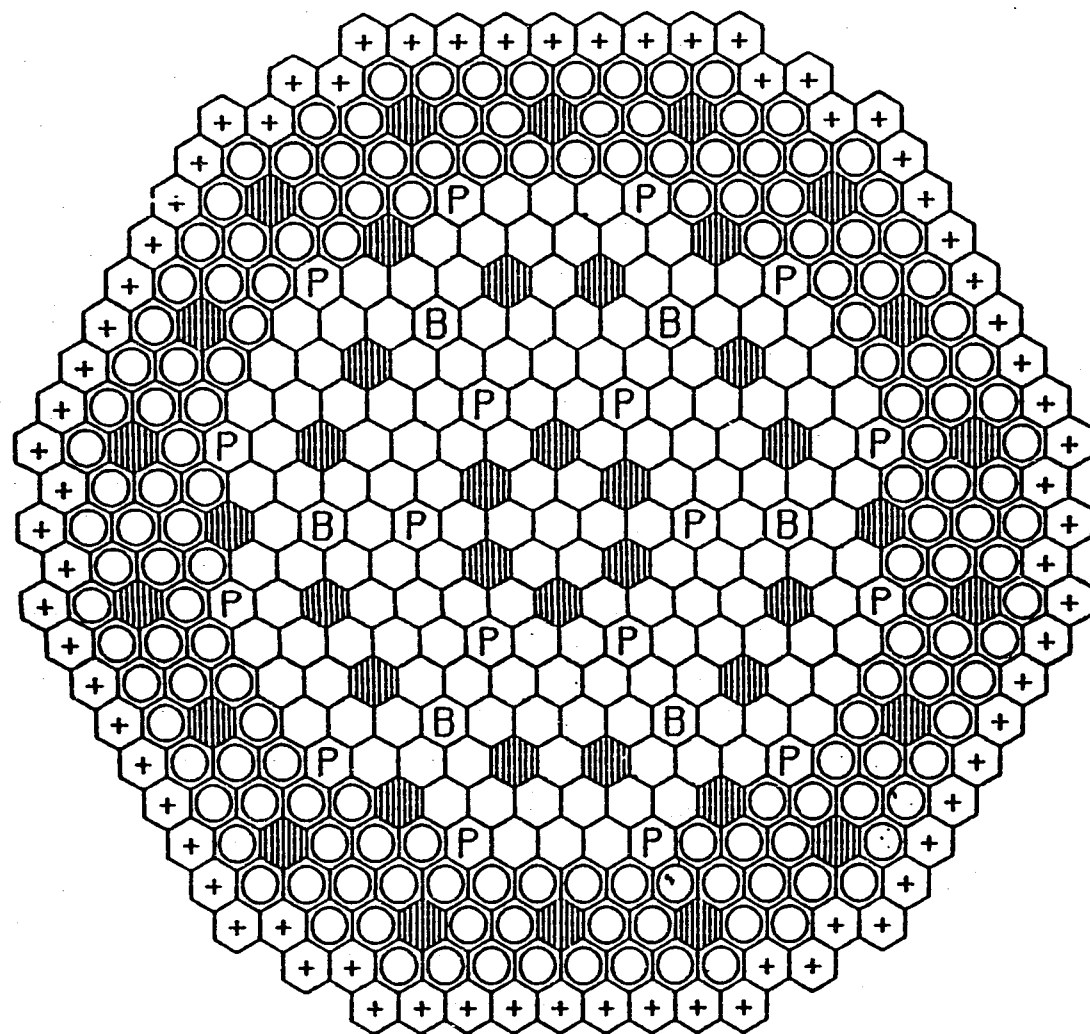


図3.4.1-1 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-F)



-  INNER CORE
-  OUTER INSU
-  PRIMARY ROD
-  BUCK UP ROD
-  RADIAL BLANKET
-  TARGET ASSEMBLY

図3.4.1-2 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-G)

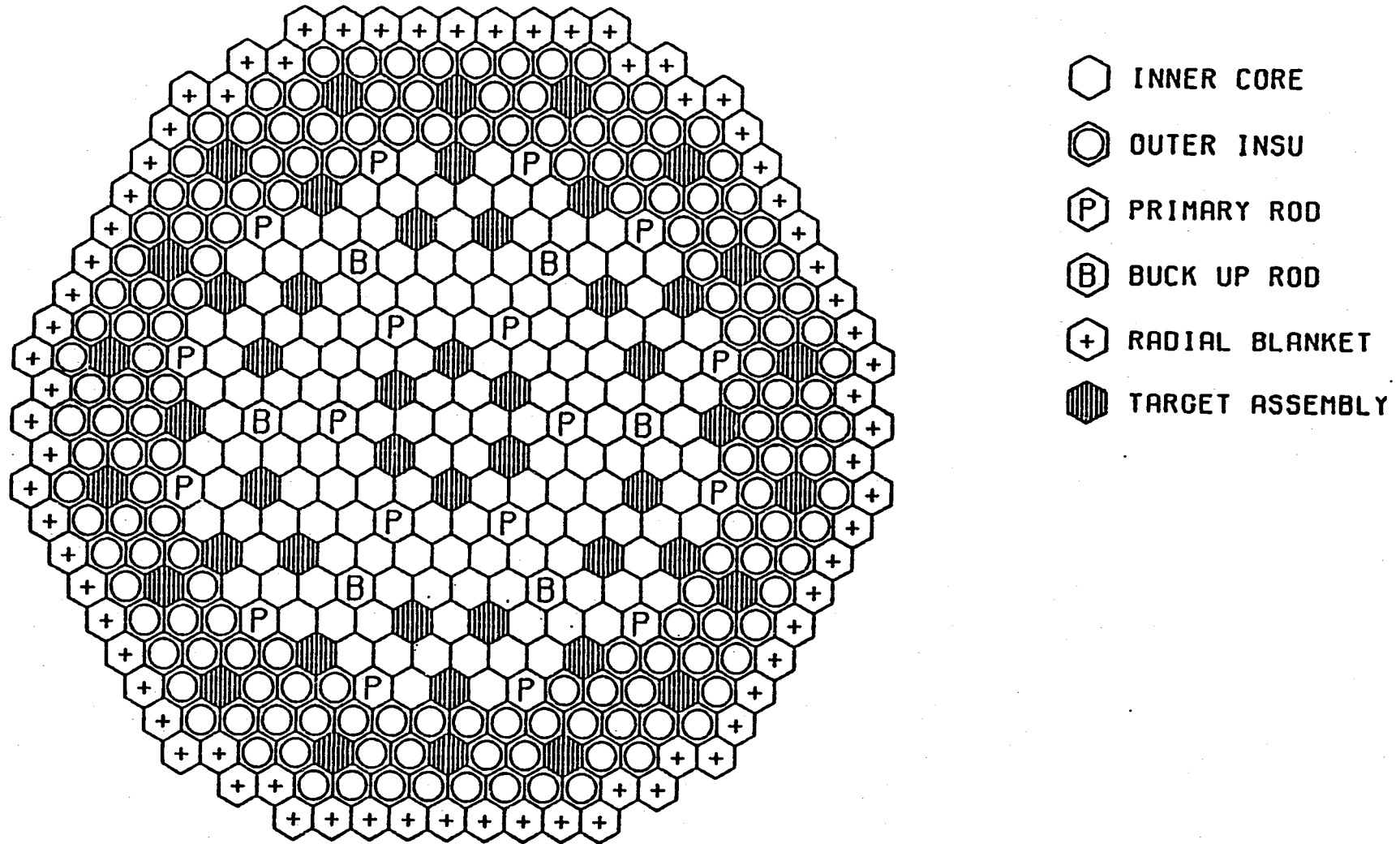
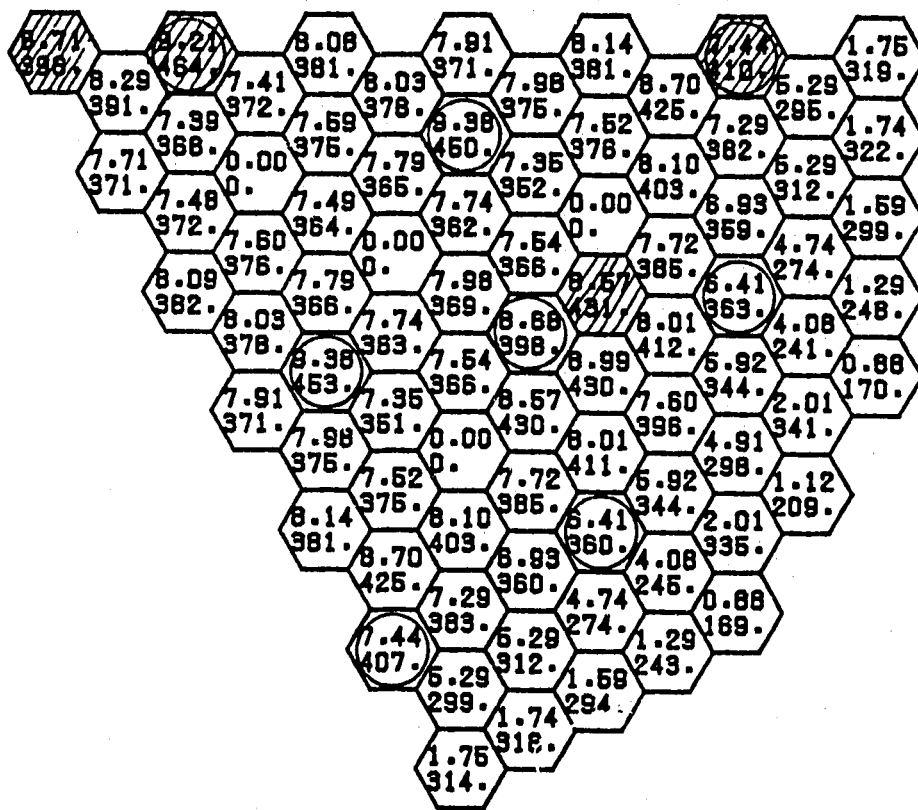


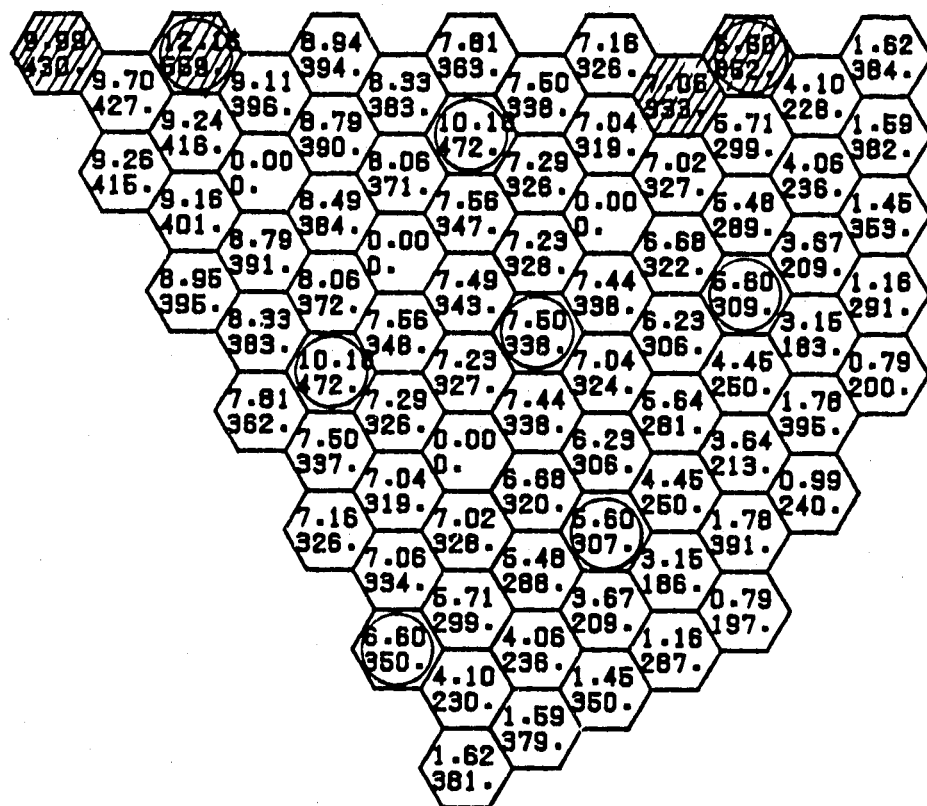
図3.4.1-3 ターゲット集合体の装荷パターン (CASE-H)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

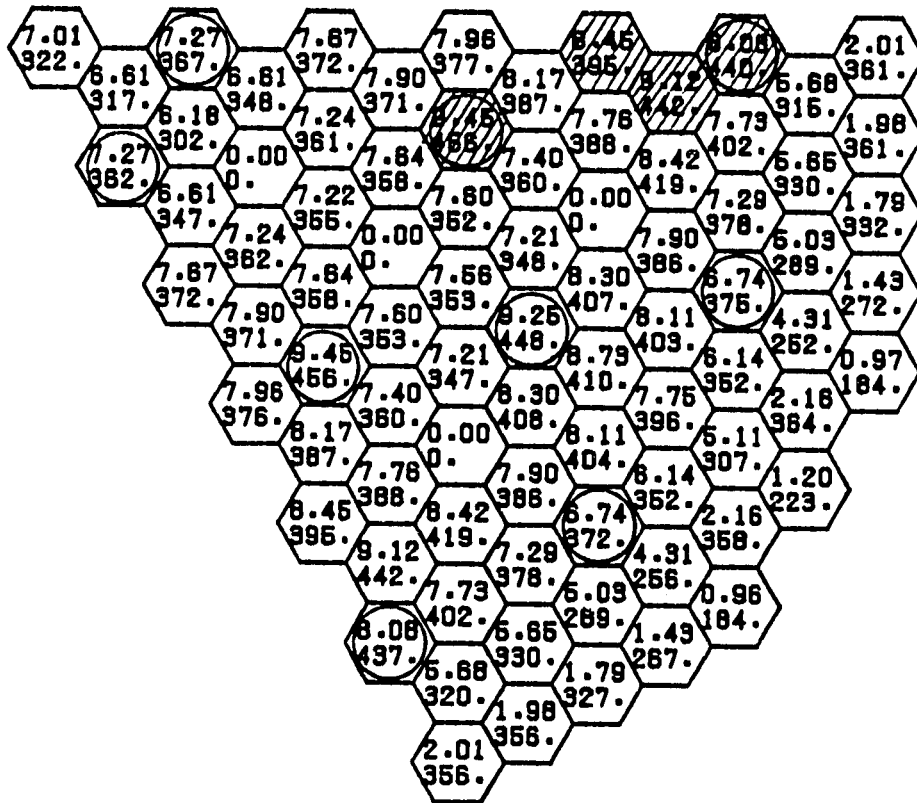
図3.4.1-4 CASE-F4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

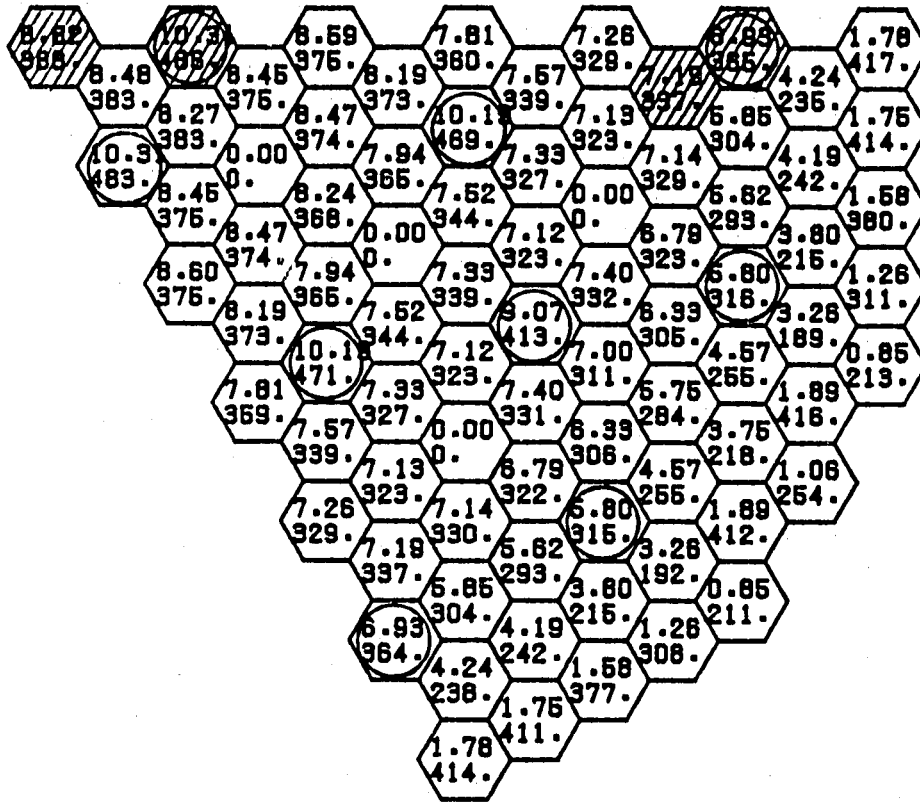
図3.4.1-5 CASE-F4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

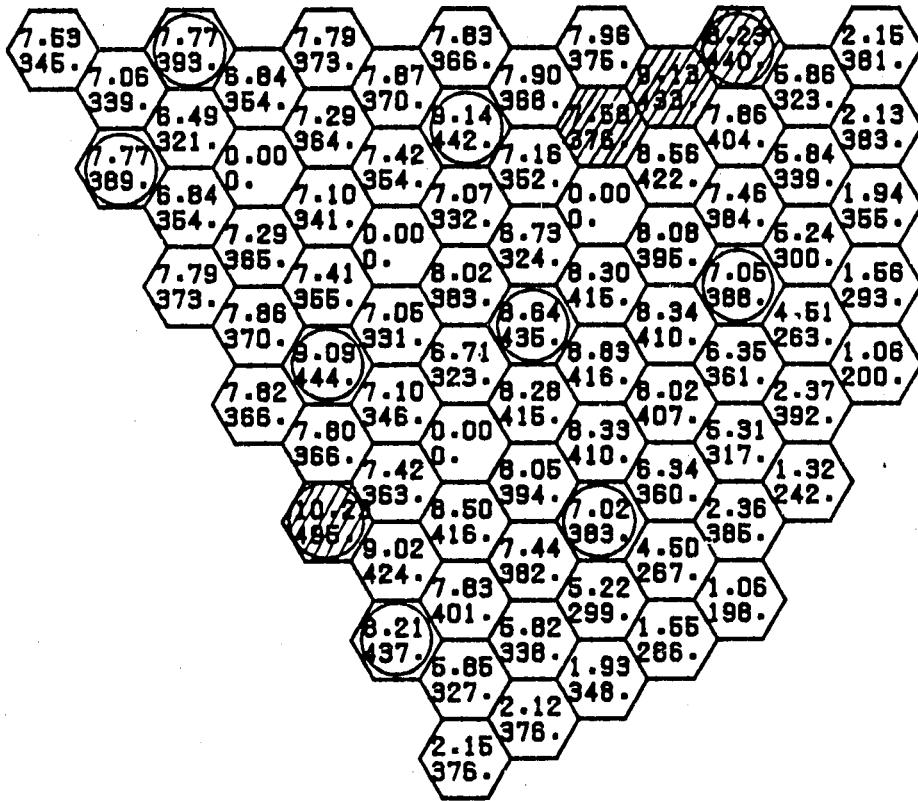
図 3. 4. 1 - 6 CASE-G4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

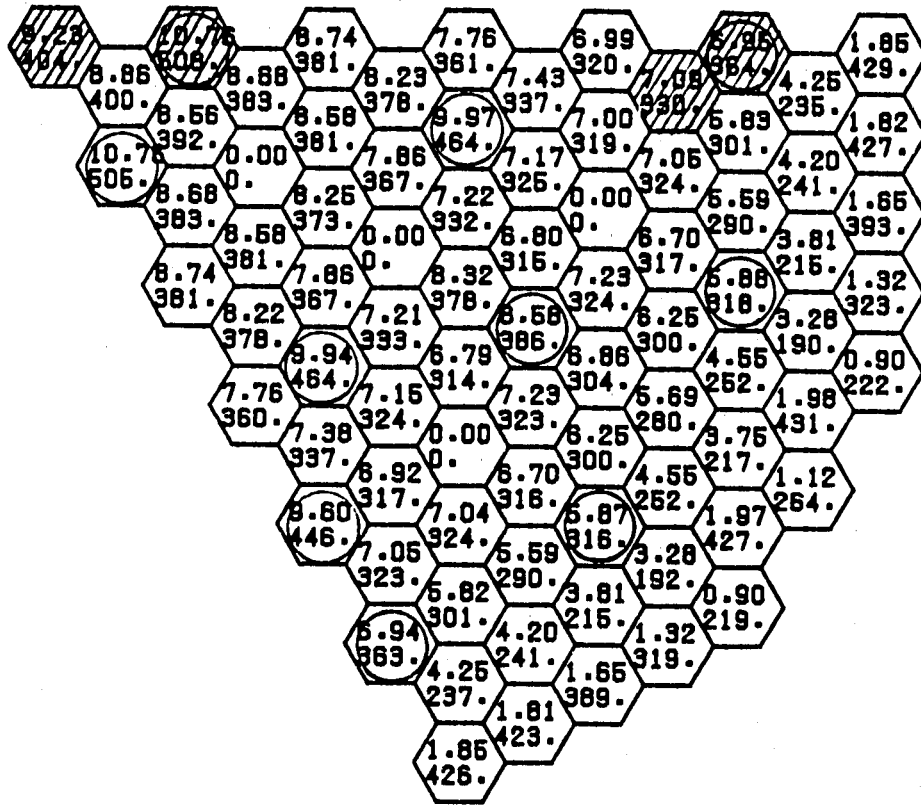
図3.4.1-7 CASB-G4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

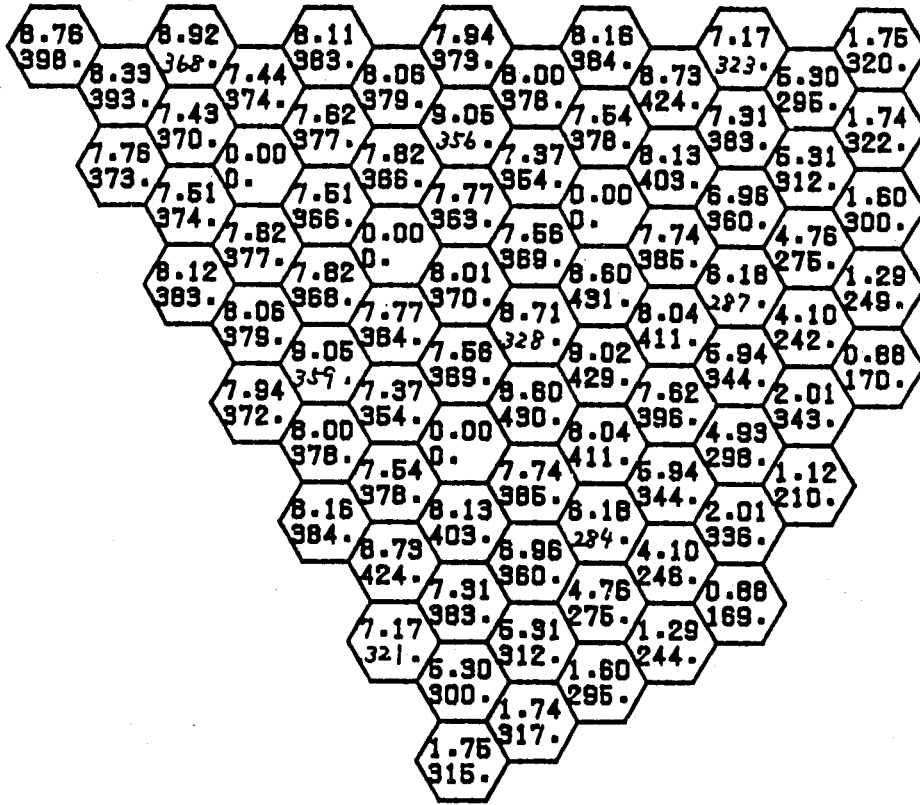
図3.4.1 - 8 CASE-H4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

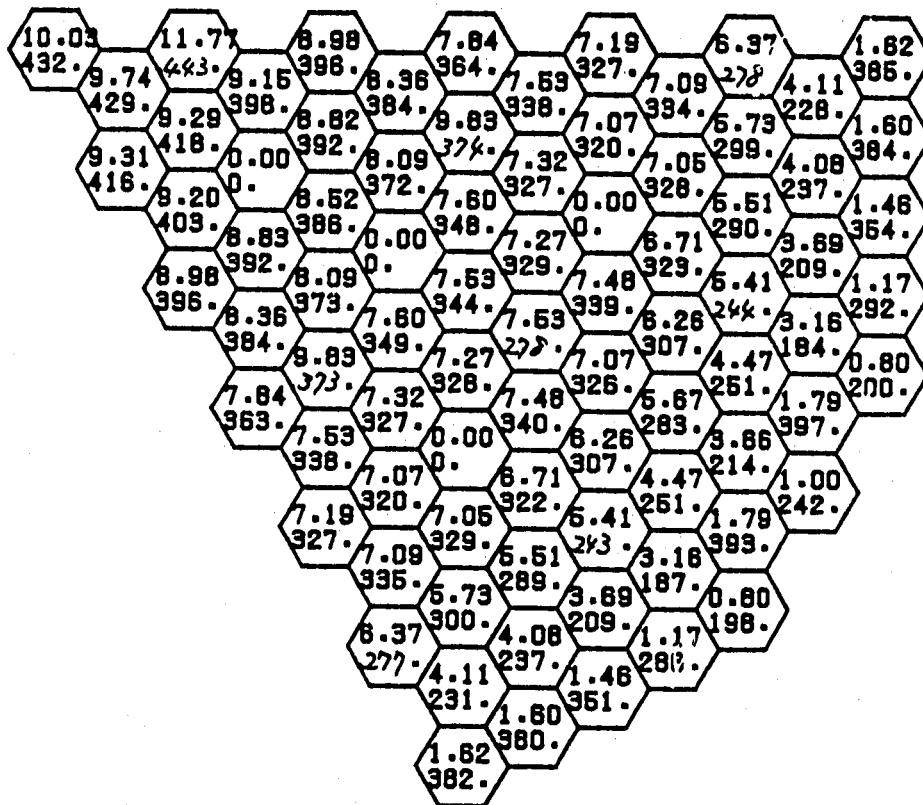
図3.4.1-9 CASE-H4 の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

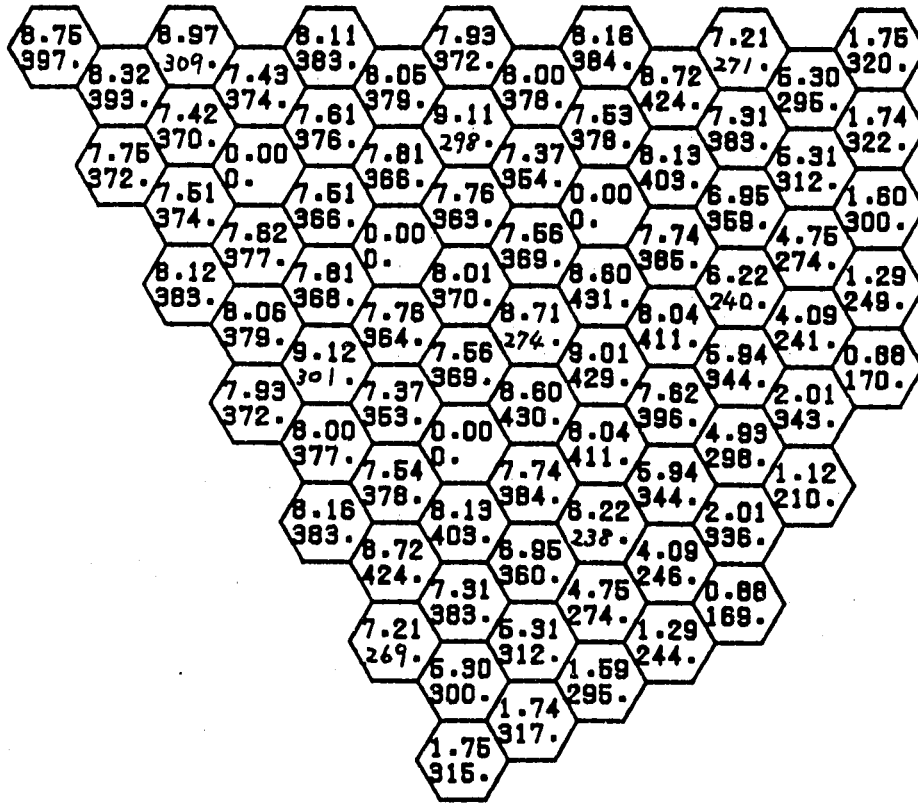
図3.4.2-1 CASE F4-331の集合体出力及び線出力(平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

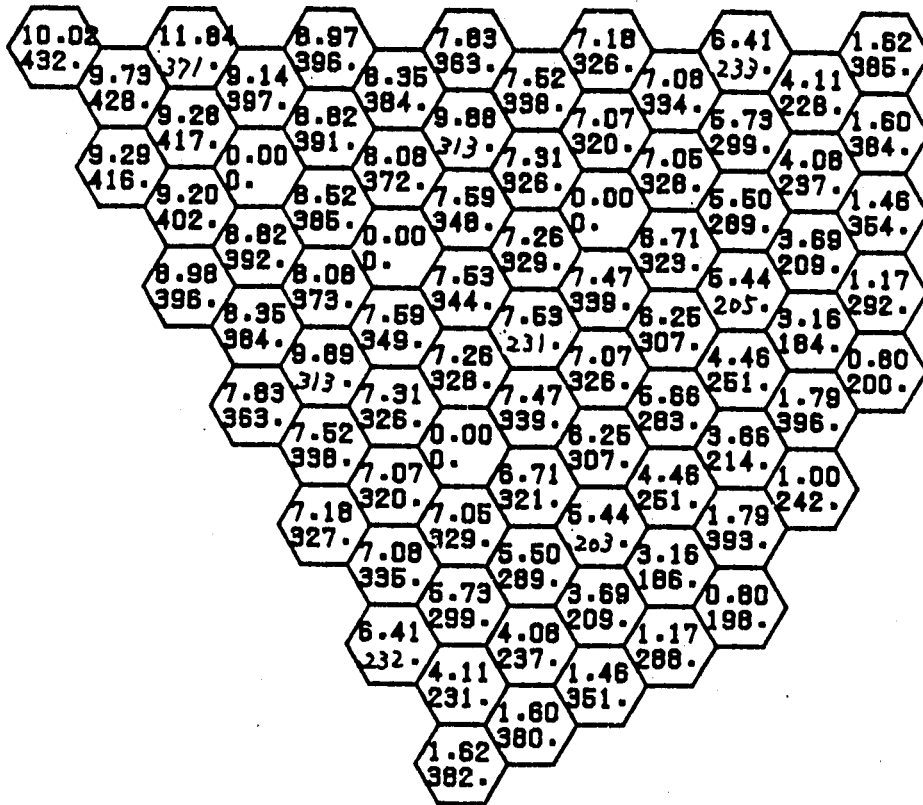
図3.4.2-2 CASE-F4-331の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY PCWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

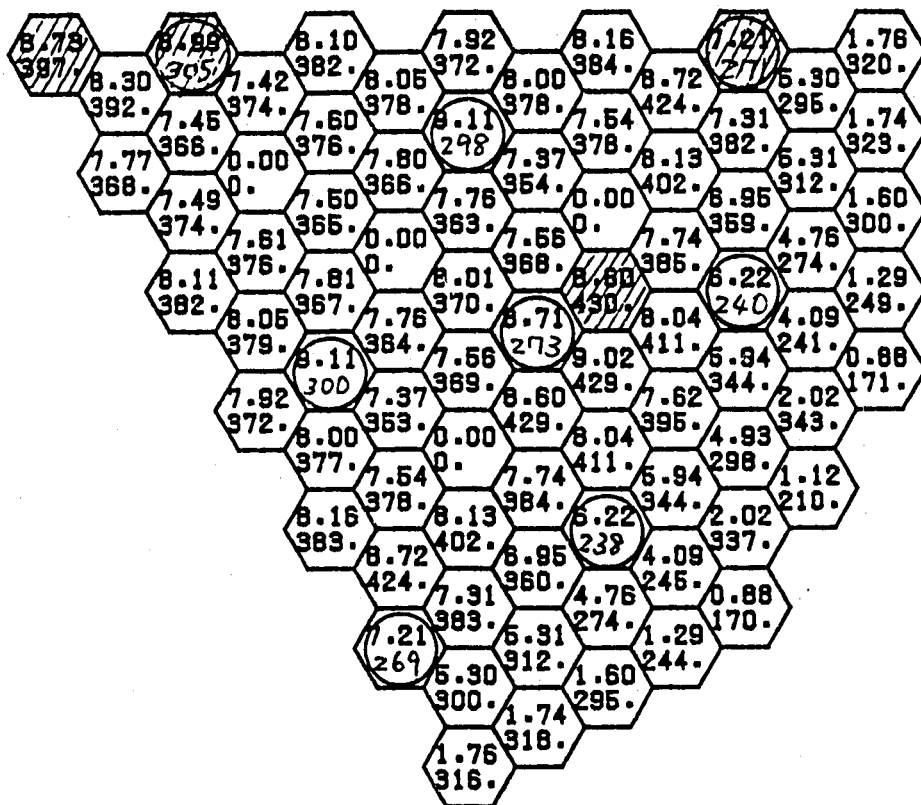
図3.4.2-3 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力(平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

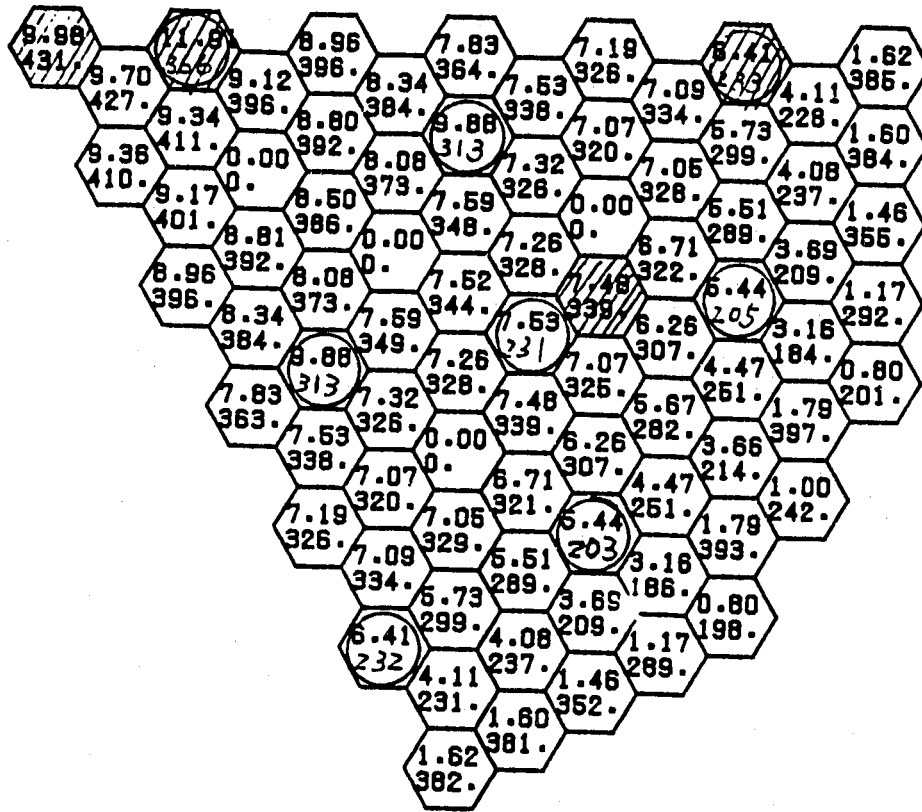
図3.4.2-4 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)


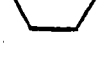


 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

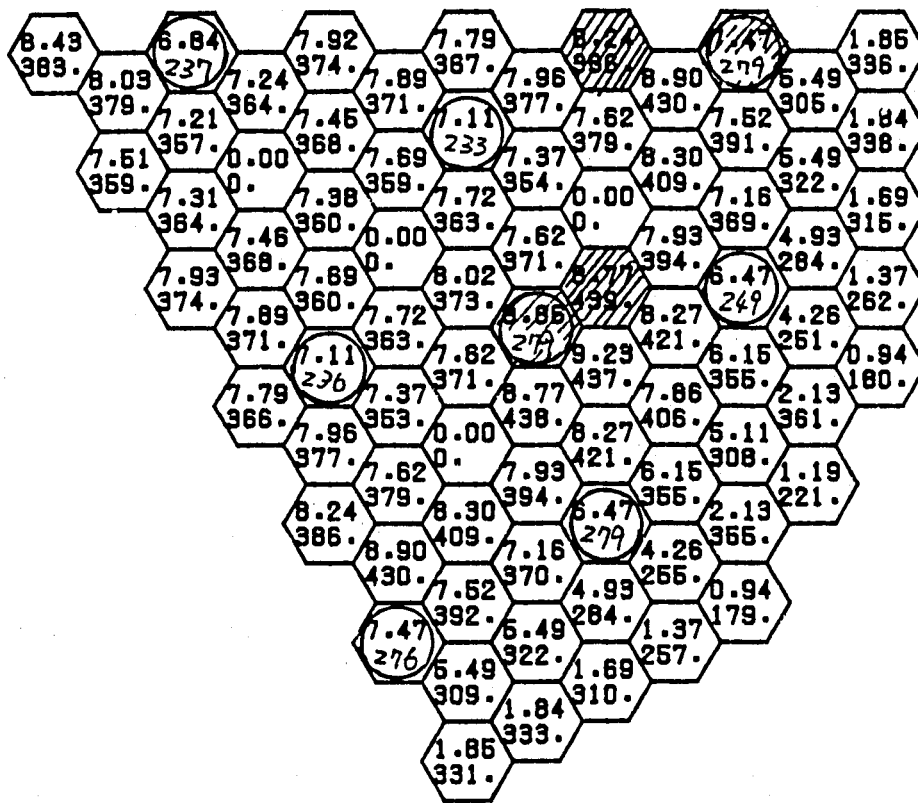
図3.4.2 - 5 CASE-F4-aの集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

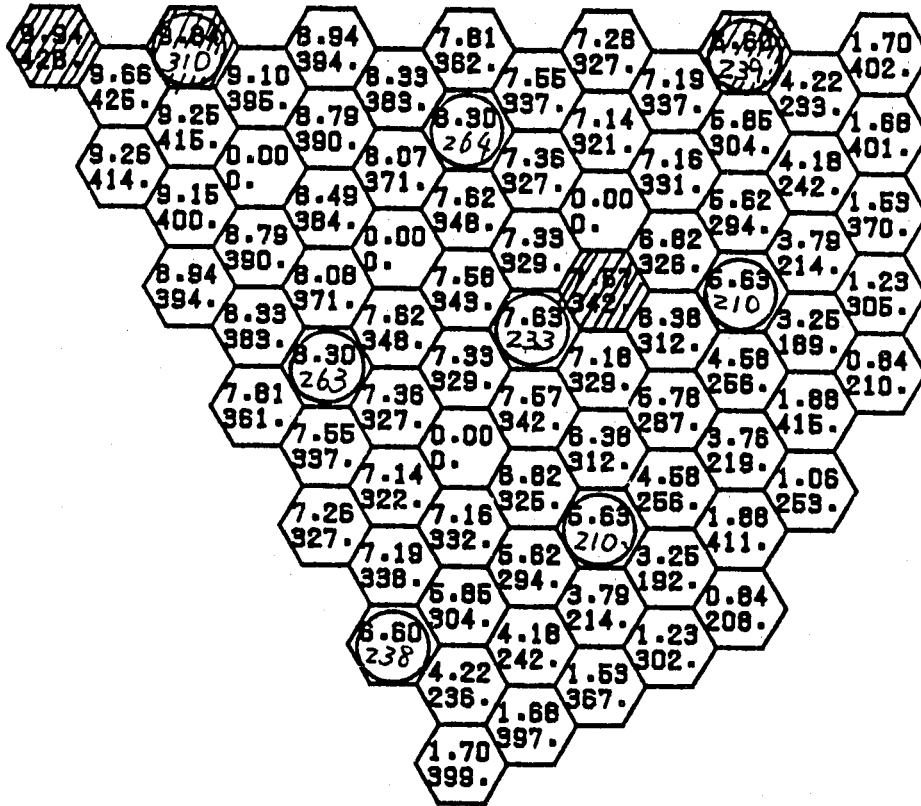
図3.4.2 - 6 CASE-F4-aの集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

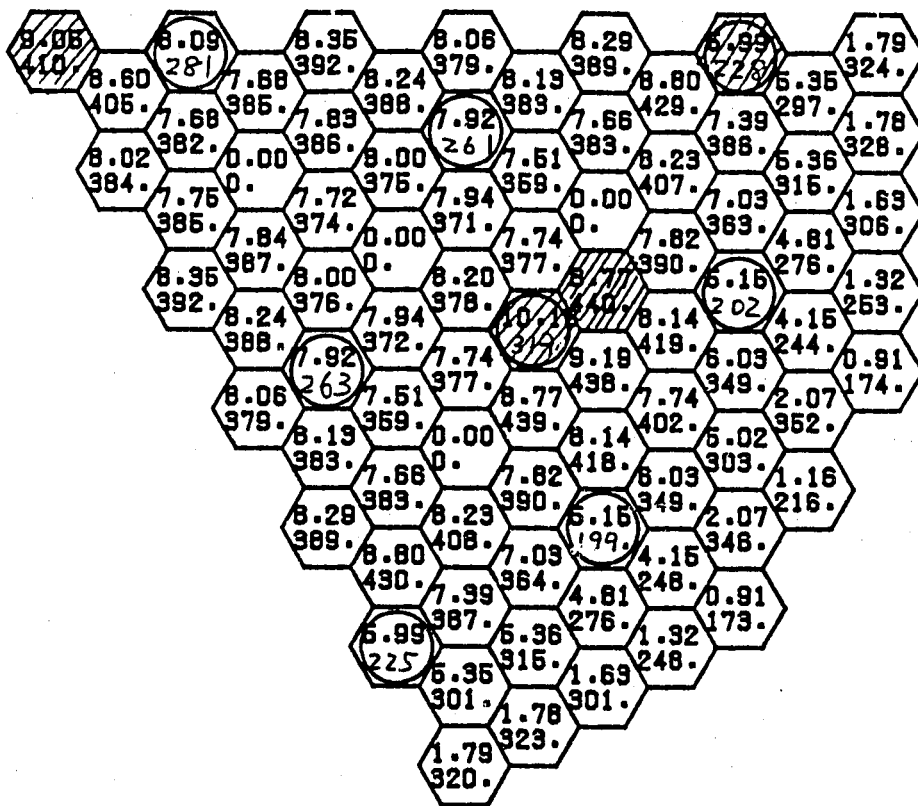
図3.4.2-7 CASE-F4-bの集合体出力及び線出力（平衡炉心初期）



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

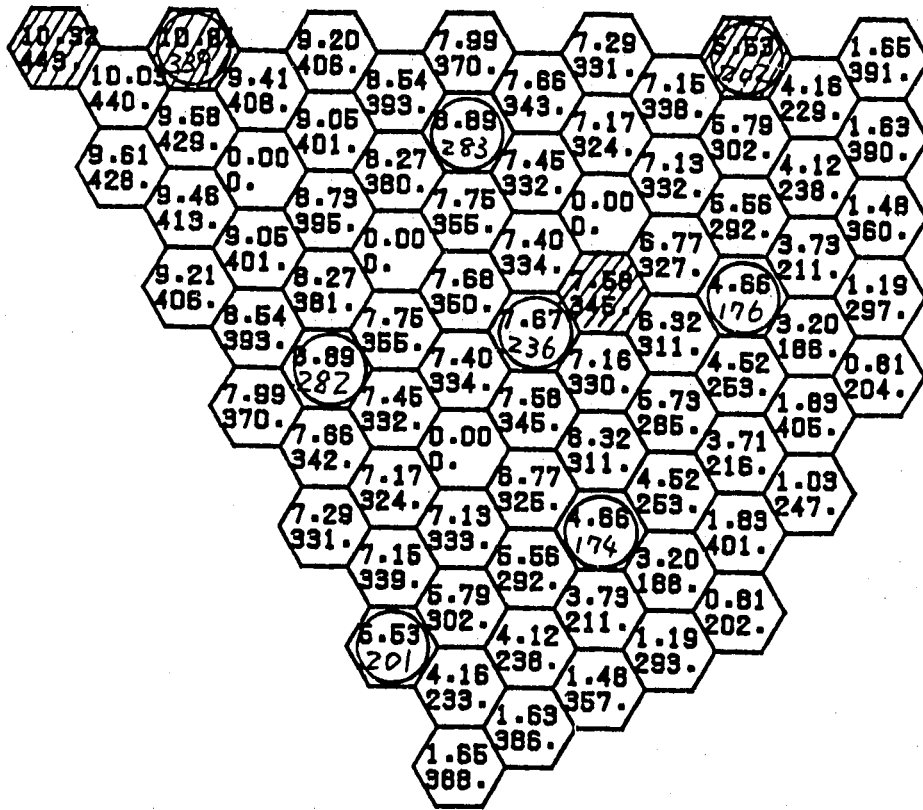
図3.4.2-8 CASE-F4-bの集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

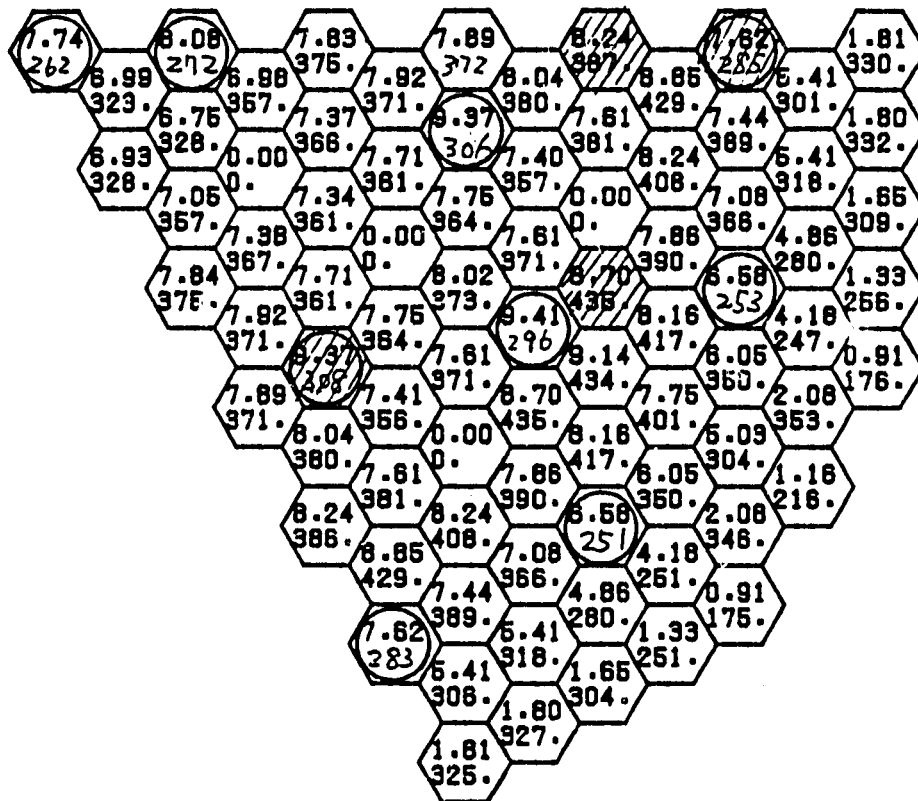
図3.4.2-9 CASE-F5の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)





 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

図3.4.2-10 CASE-F5の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

図3.4.2-11 CASE-F14の集合体出力及び線出力（平衡炉心初期）

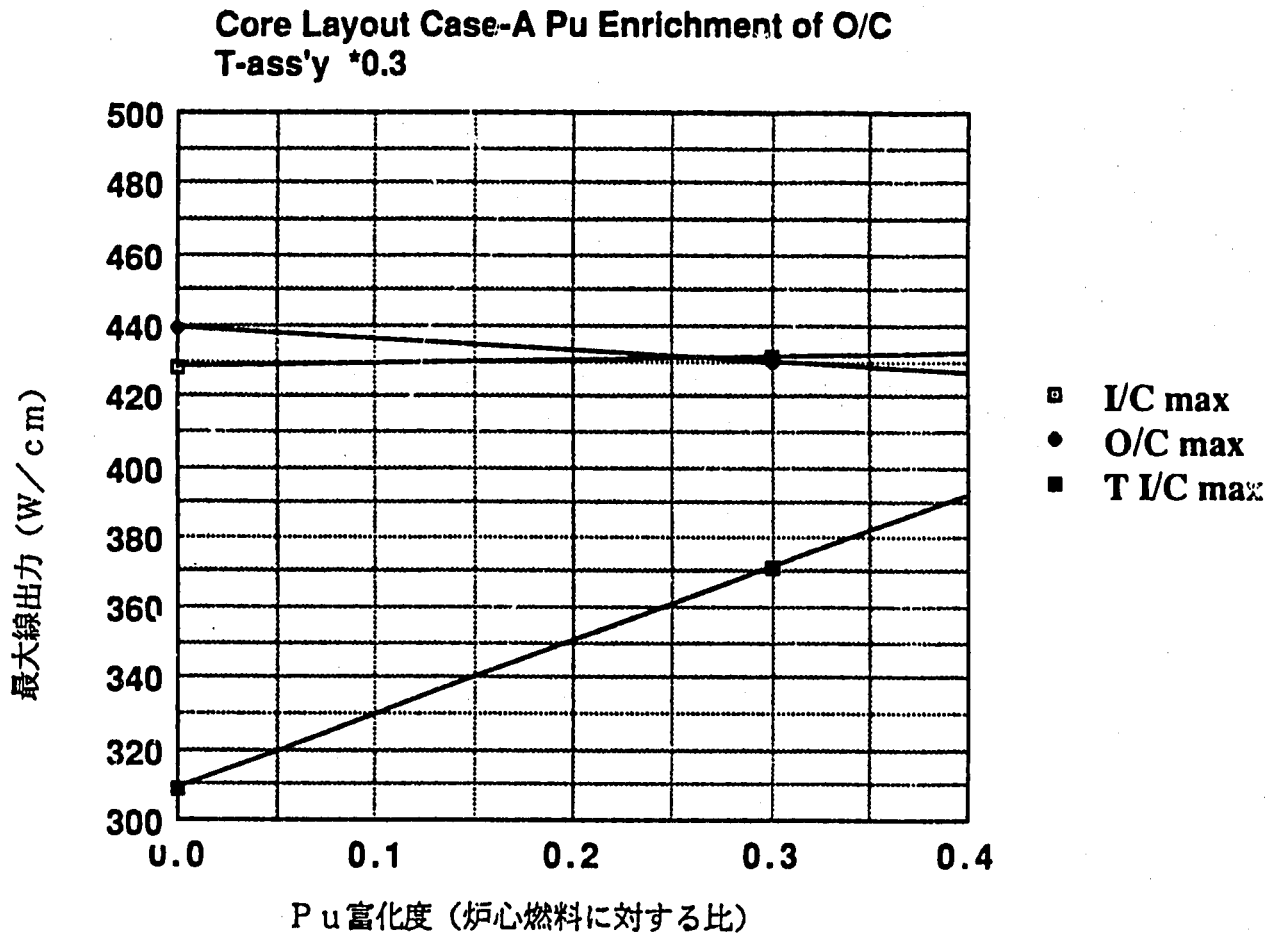


図3.4.2-13 CASE-F4-b体系での内側炉心のPu富化度(ターゲット集合体)の線出力に対する効果

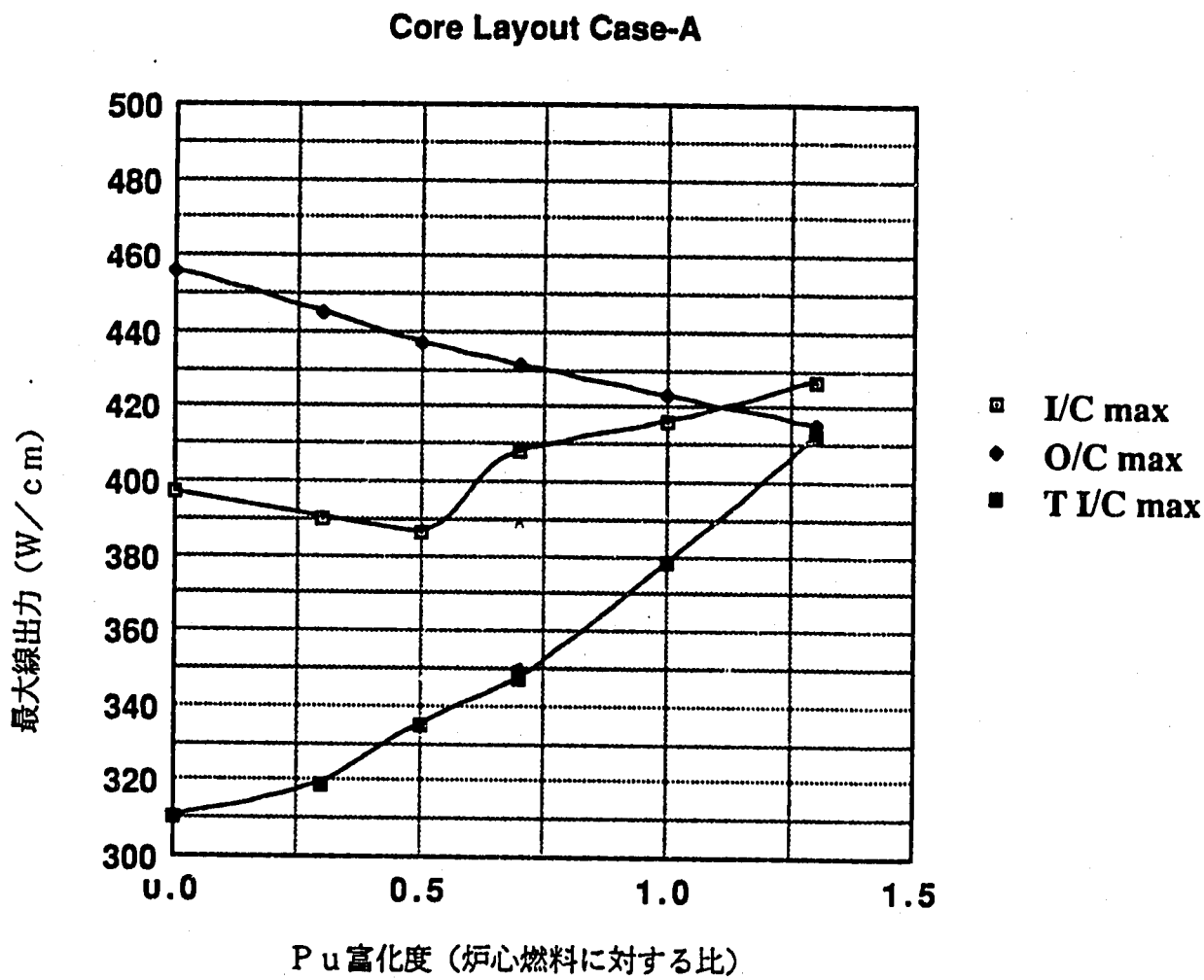
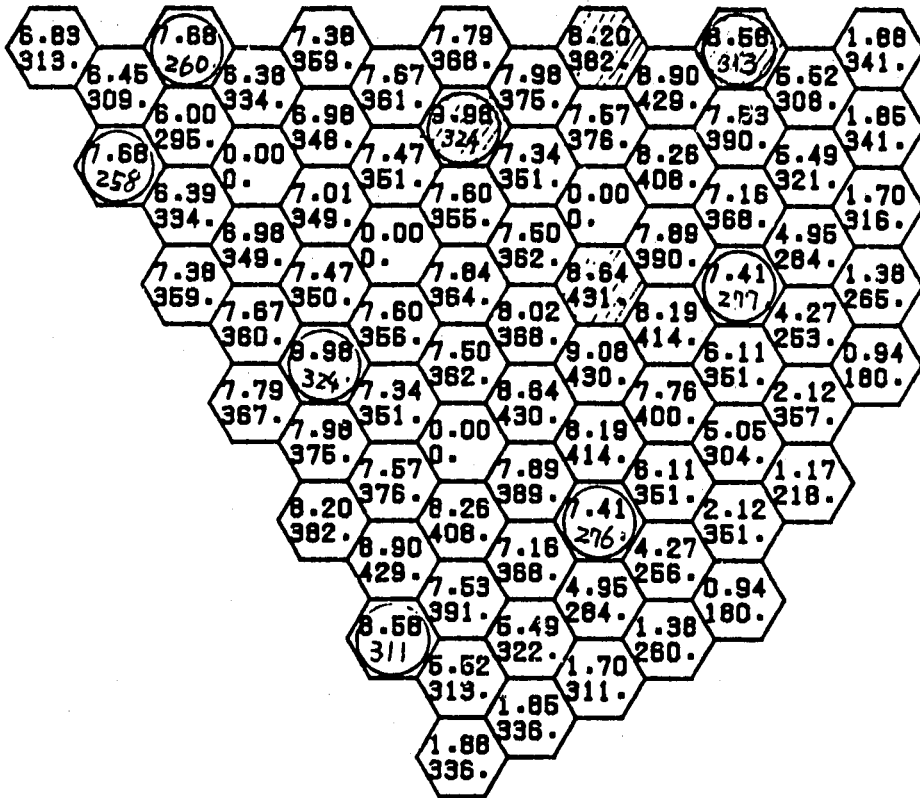


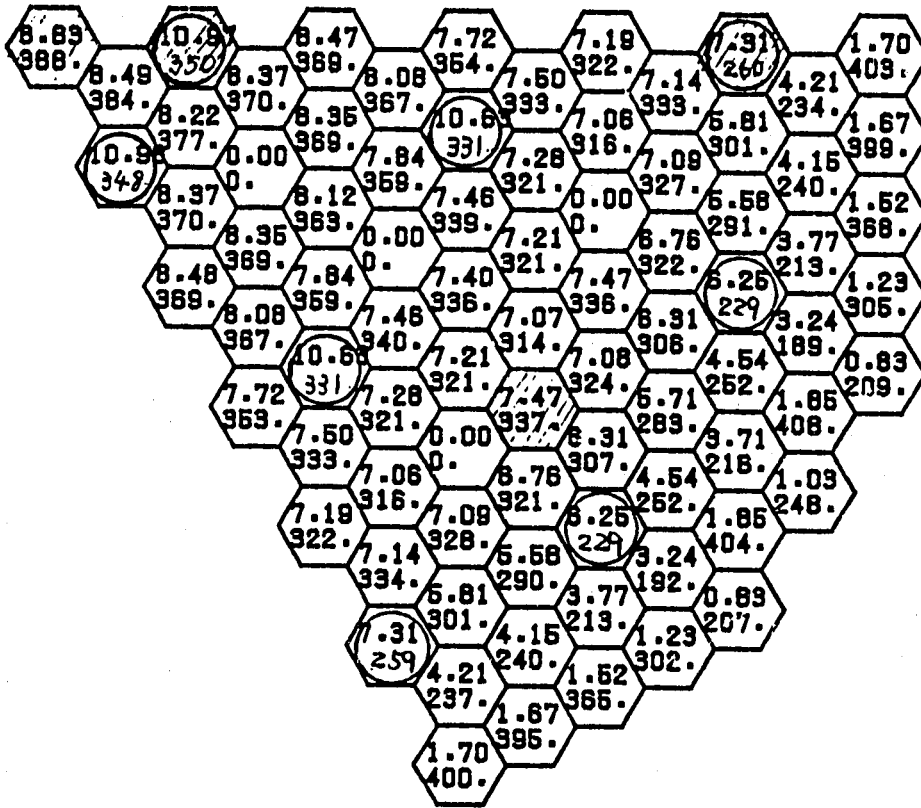
図3.4.2-14 CASE-A体系のターゲット集合体のPu富化度による最大線出力の変化



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

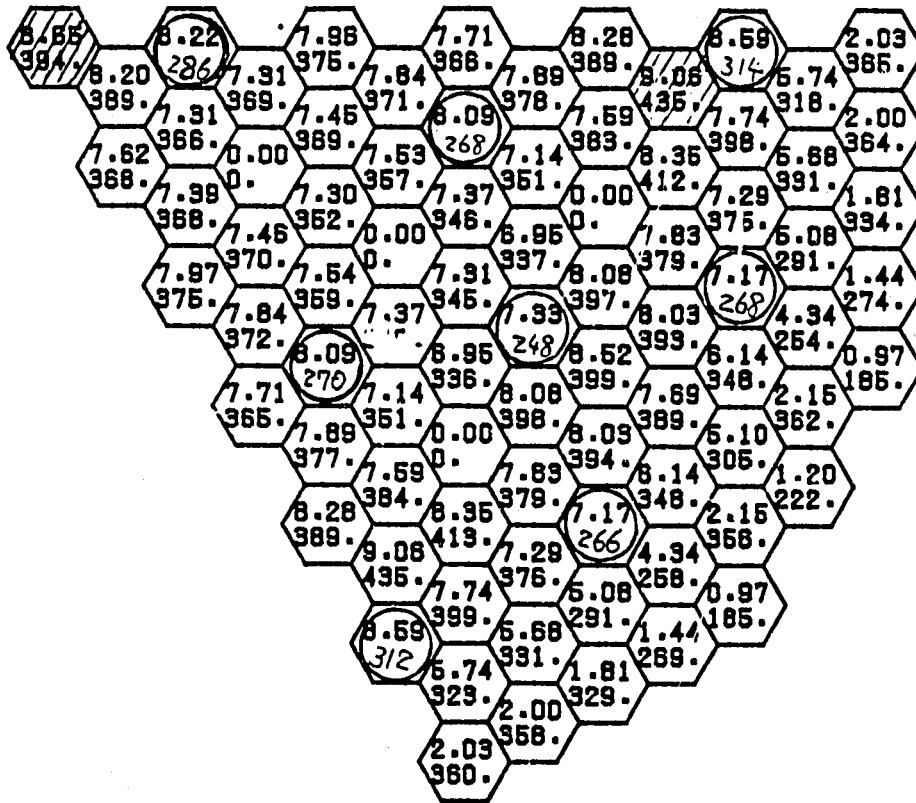
図3.4.2-15 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力(平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN OUT

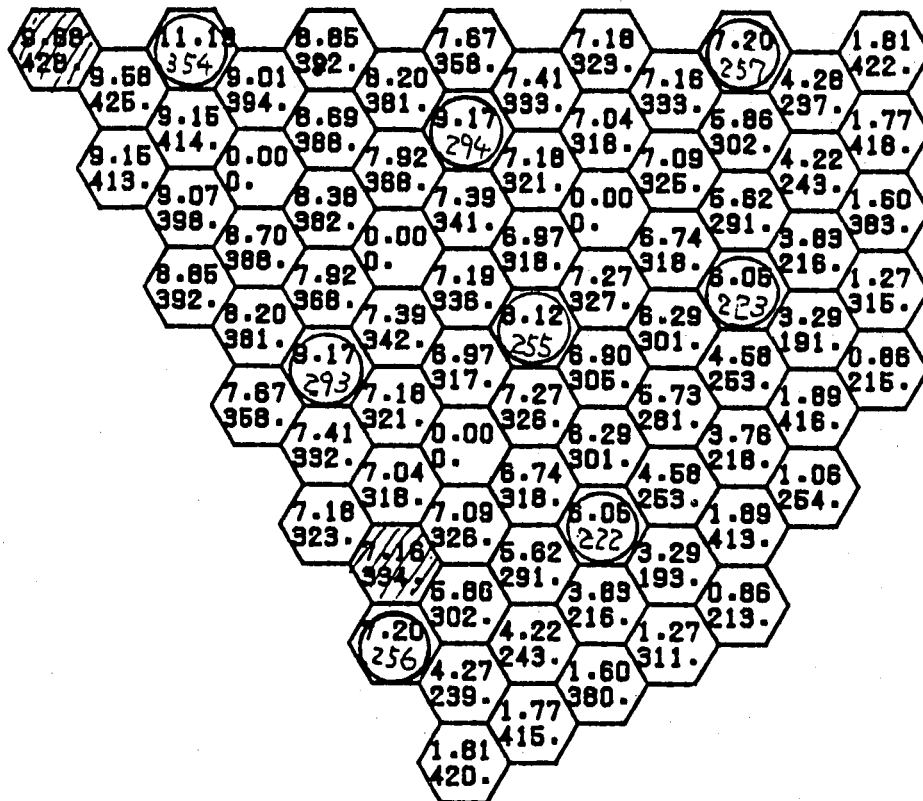
図3.4.2-16 CASE-F4-397の集合体出力及び線出力 (平衡炉心末期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC. NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

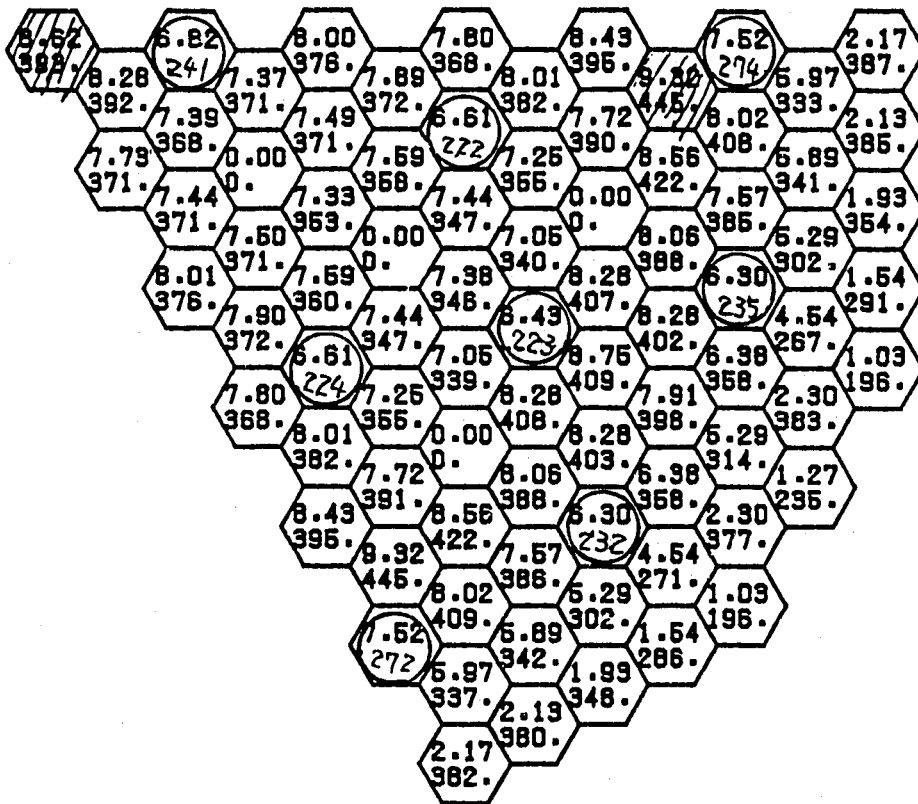
図3.4.2-17 CASE-F3-bの集合体出力及び線出力(平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

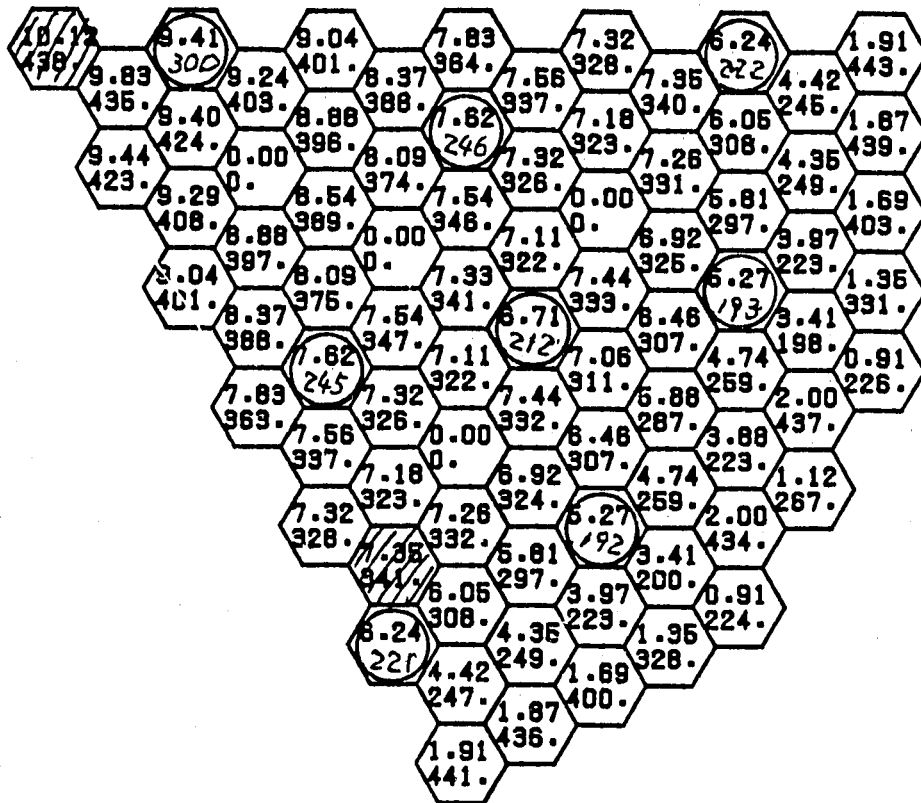
図3.4.2-18 CASE-F3-bの集合体出力及び線出力（平衡炉心末期）



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

図3.4.2-19 CASE-F3-b'の集合体出力及び線出力(平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

図3.4.2-20 CASE-F3-b'の集合体出力及び線出力(平衡炉心末期)

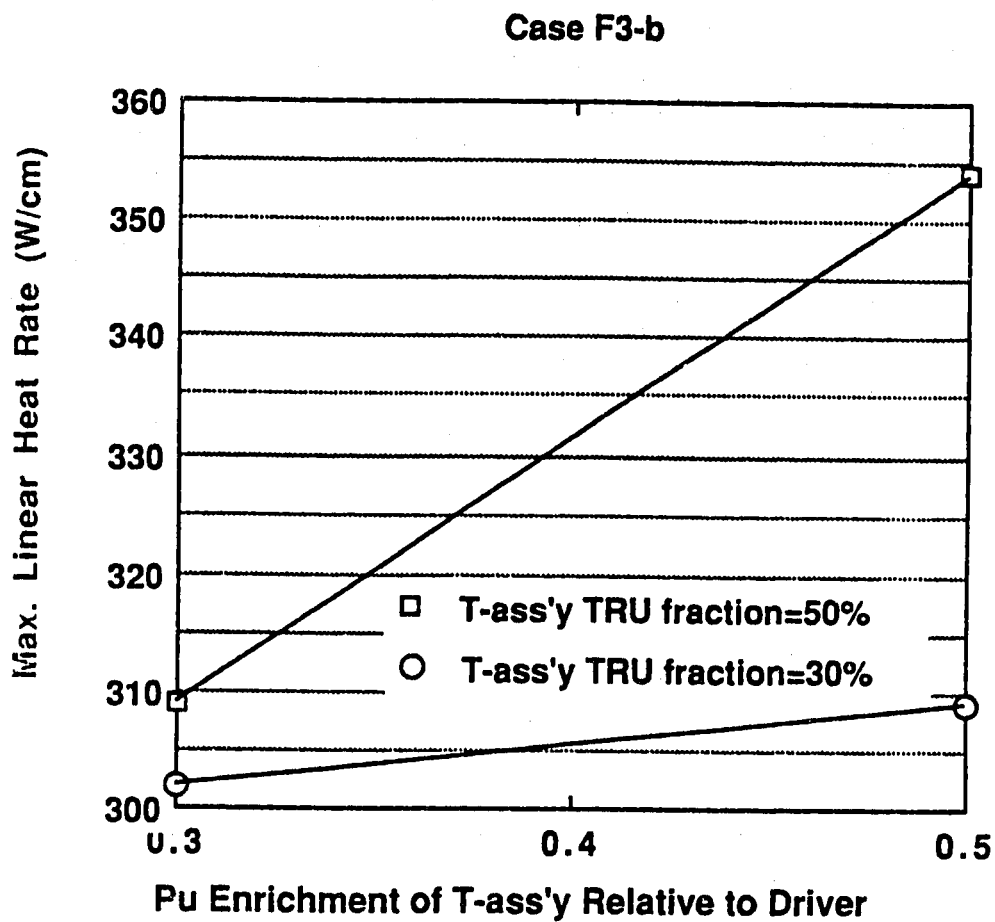


図3.4.2-21 ターゲット集合体のPU富化度変更に伴う燃料集合体の最大線出力の変化

Case F3-b

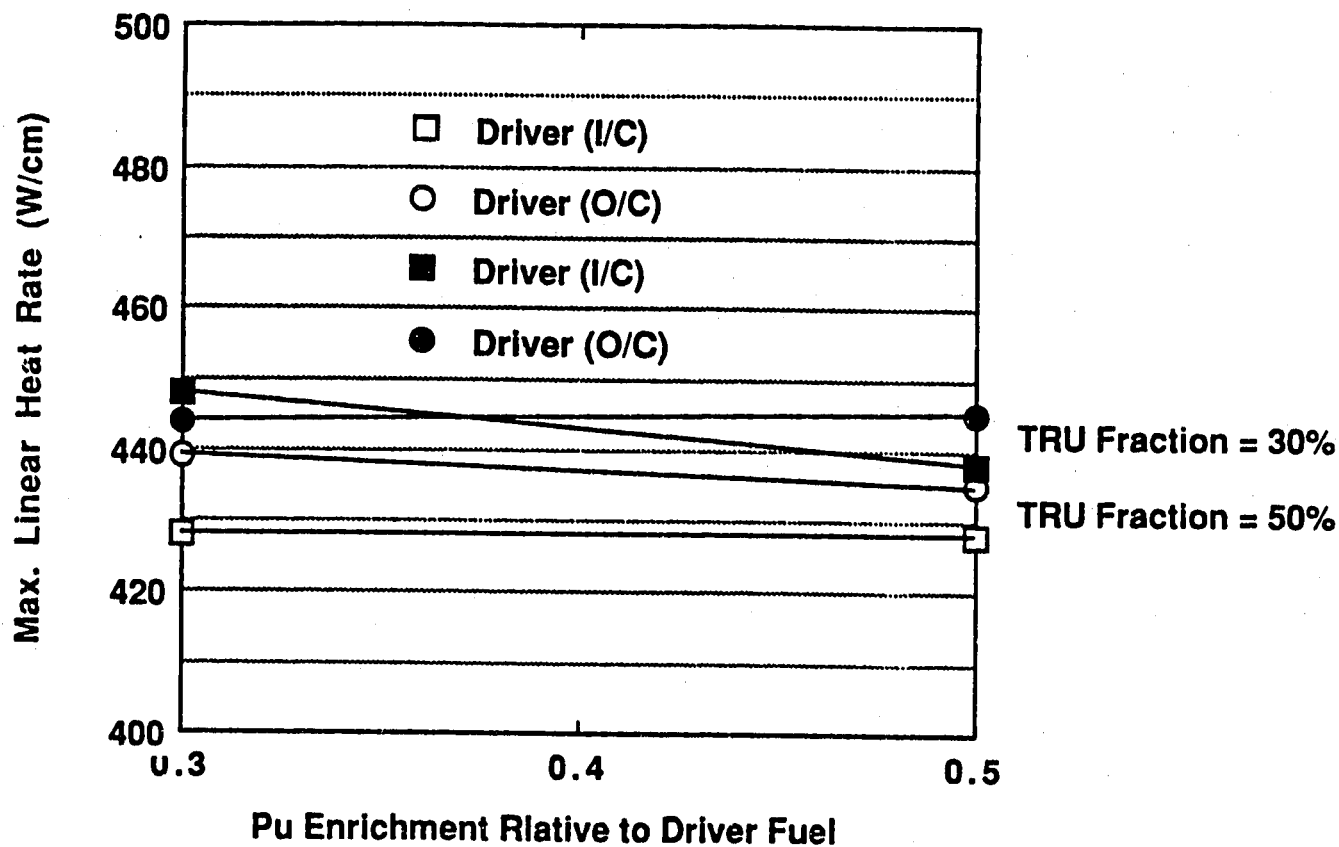


図3.4.2-22 ターゲット集合体のPU富化度変更に伴うターゲット集合体の最大線出力の変化

3.5 パラメータサーベイのまとめ

今回のサーベイ計算では、ターゲット集合体の構造検討の結果反映等により、特にターゲット集合体の最大線出力が大幅に低減された。

炉心燃料とターゲット集合体の両方について、最大線出力の低減を狙ってサーベイを実施し、内側炉心、外側炉心並びに炉心燃料、ターゲット集合体の間の出力バランスの最適化を行ったが、サーベイした範囲で許容線出力を全て満たす解を見つけることは出来なかった。但し、ターゲット集合体の許容線出力については不確かさが大きく、今後の関連研究の進捗如何で大幅に変更の可能性があること、炉心燃料の制限値オーバーは僅かであり、各種不確かさの見直しや運転方法の変更（出力の1%低減等）で対応の可能性があるので、以下に最も有望な装荷パターンの候補を挙げることにした。

- ① CASE-F（内側炉心のターゲット集合体のPu富化度は炉心燃料の0.1倍、外側炉心は0.3倍とする。図3.4.2-13参照。）

最大線出力

- ・炉心燃料 --- 437W/cm（制限値を2%超える。）
- ・ターゲット集合体 --- 335W/cm（制限値を満足）

- ② CASE-A（ターゲット集合体のPu富化度は炉心燃料の0.7倍。表3.4.2-3参照。）

最大線出力

- ・炉心燃料 --- 431W/cm（制限値を約0.3%超える。）
- ・ターゲット集合体 --- 350W/cm（制限値を約4%超える。）

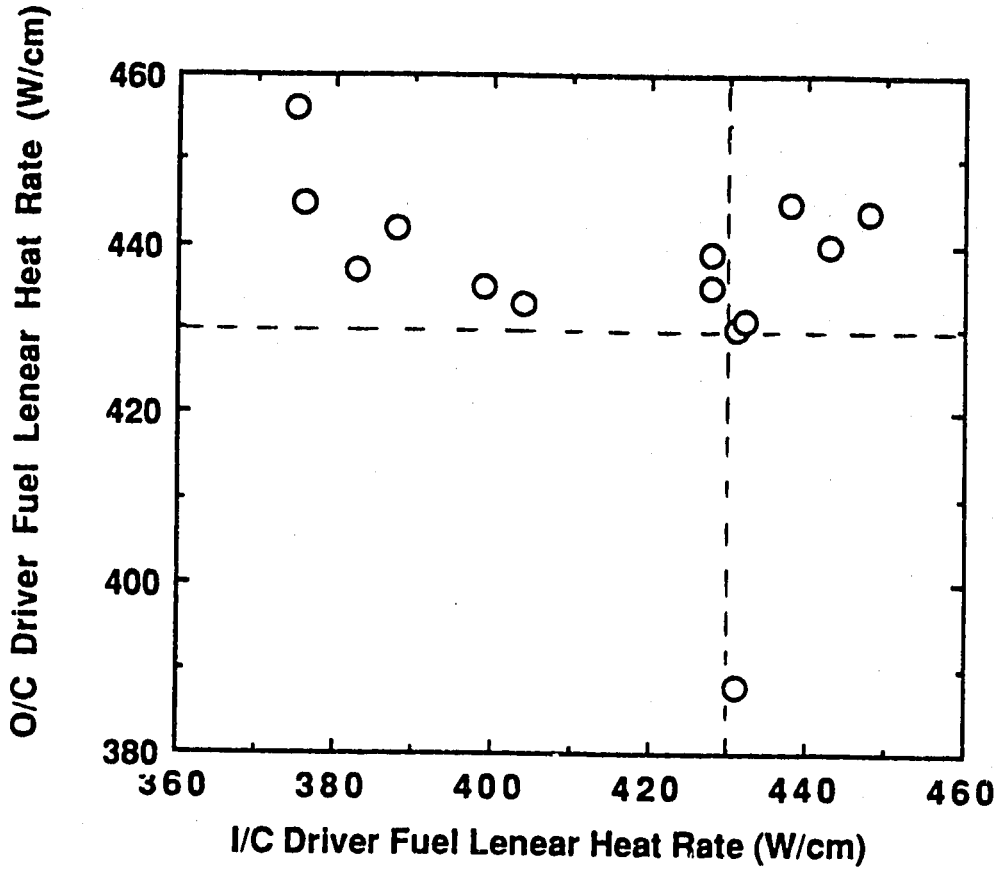


図3.5.1-1 内側炉心と外側炉心の最大線出力の関係 (炉心燃料)

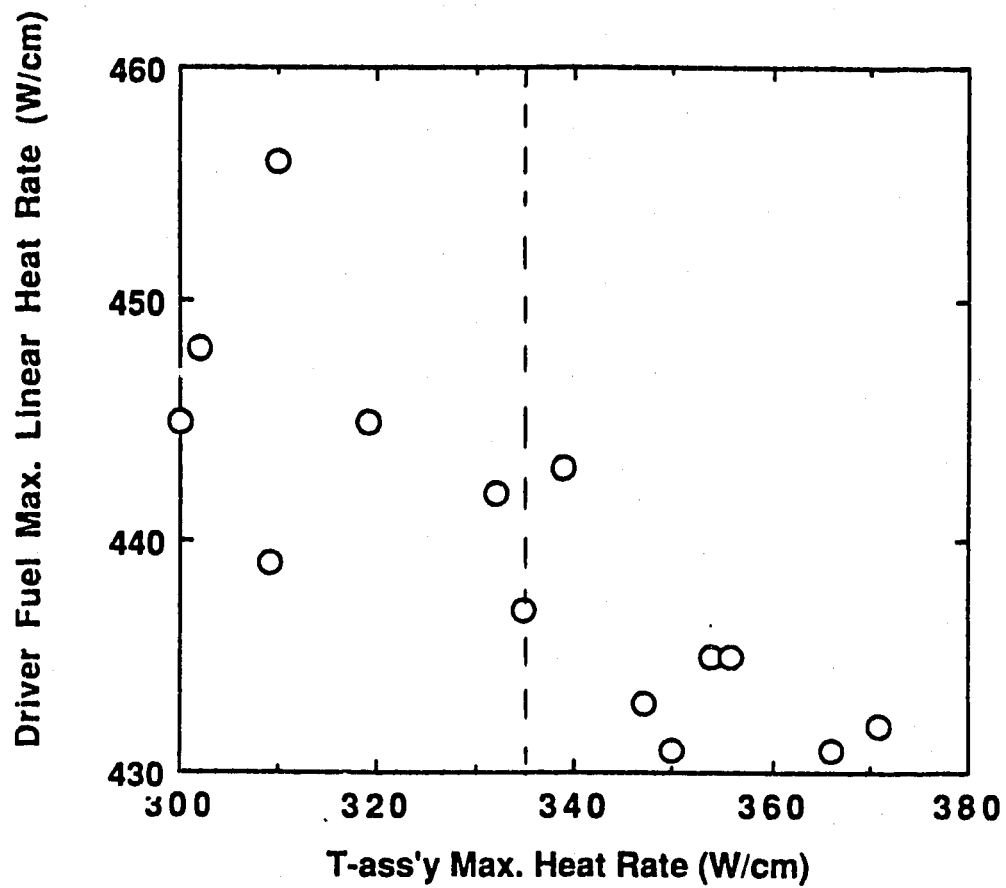


図3.5.1-2 炉心燃料とターゲット集合体の最大線出力の関係

4. 核熱特性の検討

3章のパラメーターサーベイの検討結果に基づいてターゲット集合体の装荷方法を設定し、その炉心の核熱特性を解析した。

4.1 解析対象炉心

均一混入炉心に対してターゲット集合体装荷炉心の大きな課題は出力分布特性、熱特性である。第3章の解析ケースにおいて、炉心燃料集合体とターゲット集合体の両方の許容線出力を満たすケースは無かったが、これらのケースの中で、最大線出力が目標に最も近いケースの一つであるCASE-F4-b（内側炉心のターゲット集合体のプルトニウム富化度が零、外側炉心のターゲット集合体のプルトニウム富化度〔ウランとプルトニウムで定義〕が炉心燃料の0.3倍）を解析対象として選定した。CASE-F4-bでは、ターゲット集合体の許容線出力を満足しており、炉心燃料集合体の最大線出力は許容線出力を約2%オーバーしている。CASE-F4-bのRZ計算体系を図4.1-1に示す。

4.2 核特性

(1) 実効増倍率

2次元RZ計算ベースの実効増倍率の計算結果は次のとおりである。

炉心状態	基準炉心	CASE-F4-b
BOEC (CR部分挿入)	1.0176	0.9971
EOEC (CR部分挿入)	0.9844	0.9792
EOEC (CR全引抜き)	1.0008	0.9938

ターゲット集合体装荷による実効増倍率への影響は、BOECで約 $-2\% \Delta k/k$ 、EOECで約 $-0.7\% \Delta k/k$ である。

(2) 燃焼欠損反応度

2次元RZ計算による燃焼欠損反応度の計算結果は次のとおりである。

炉心	燃焼欠損反応度
基準炉心	3.31% $\Delta k/k$
均一混入炉心	1.88% $\Delta k/k$
ターゲット集合体装荷炉心(CASE-F4-b)	1.83% $\Delta k/k$

(3) 出力分布

(a) 出力分担率

平衡炉心の出力分担率を表4.2-1 に示す。

サイクル初期とサイクル末期の出力分担の変化は次に示すとおりであり、ターゲット集合体装荷炉心の燃焼に伴う出力変動は、基準炉心、均一混入炉心とほぼ等しくなっている。

(燃焼末期出力分担) / (燃焼初期出力分担) の比較

	基準炉心	均一混入炉心	ターゲット集合体装荷	
			①	②
内側炉心	1.09	1.07	1.03	1.07
外側炉心	0.87 _a	0.88 _a	0.87 _r	0.88 _a

①炉心燃料のみ ②炉心燃料+ターゲット集合体

(b) ピーキング係数及び線出力密度

平衡炉心の各領域毎の炉心燃料のピーキング係数及び最大線出力を、標準炉心及び均一混入炉心と比較して、表4.2-2 及び表4.2-3 に示す。

ターゲット集合体装荷炉心において炉心燃料の最大線出力が出現するのは平衡初期の外側炉心であり、最大線出力は439W/cmである。また、ターゲット集合体の最大線出力は平衡炉心初期の内側炉心において約310W/cmであり、第2章に示した許容線出力約330W/cm (TRU混入率約50%、2サイクル燃焼) を下回っている。

ブランケット集合体の最大線出力は415W/cmであり、基準炉心の最大線出力(427W/cm) を下回っている。

(4) 制御棒価値

二次元RZ計算のBOECの制御棒部分挿入状態と全引抜き状態の実効増倍率の差から、各炉心の制御棒価値の相対値を求めた。この結果は以下のとおりである。

炉心	部分制御棒価値	相対値
基準炉心	1.67% Δk/k	1.00
均一混入炉心	1.46% Δk/k	0.87
ターゲット集合体(CASE-F4-b)	1.50% Δk/k	0.90

均一混入炉心の出力分布は基準炉心と大きな差がないので、炉心のスペクトルの違いが制御棒価値に影響していると考えられる。ターゲット集合体装荷炉心（CASE-F4-b）は、二次元RZモデルでターゲット集合体装荷位置と主炉停止系制御棒位置が離れており、僅かながら均一混入炉心より制御棒価値が改善されているが、基準炉心より約10%小さくなっている。

(5) ドップラー係数

定格出力状態の燃料温度から500°C上昇させた温度での実効断面積を作成して、この断面積による実効増倍率を計算した。定格出力状態の燃料温度での実効断面積による実効増倍率との差からドップラー係数を求めた。計算条件は次のとおりである。

計算体系	2次元RZ体系
エネルギー群	18群
燃焼状態	平衡炉心末期
制御棒状態	全引き抜き

計算は直接計算でおこなった。

計算結果は次に示すとおりであり、基準炉心に比べて約30%小さくなっている。この原因は、TRU装荷炉心のスペクトルが基準炉心に比べて硬いためと考えられる。

炉 心	ドップラー係数($T \frac{dk}{dT}$)
基準炉心	-1.05×10^{-2}
TRU均一混入炉心	-7.08×10^{-3}
ターゲット集合体装荷炉心(CASE-F4-b)	-7.40×10^{-3}

(5) Naボイド反応度

炉心及び上部軸ブランケット領域のNaがボイド化した場合の反応度変化を、(4)と同じ2次元RZ体系における18群直接計算により求めた。

計算体系	2次元RZ体系
エネルギー群	18群
燃焼状態	平衡炉心末期
制御棒状態	全引き抜き

Naボイド反応度の計算結果は2.78% $\Delta k/k$ (約7.5%) であり、100万kWe

クラスの炉心としてはやや大きな値となっている。Naボイド反応度が大きい理由としては、TRU装荷による中性子スペクトルの硬化が考えられる。

(6) 増殖比

ターゲット集合体装荷炉心の増殖比と炉心各部の増殖比の分担を基準炉心と比較して表4.2-4 に示す。

ターゲット集合体装荷炉心の増殖比は基準炉心に比べて約5～8%増大しているが、これについてもTRU装荷による中性子スペクトルの硬化が原因と考えられる。

(7) TRU消滅率

表4.2-5 にターゲット集合体装荷炉心のTRU消滅率(CASE-F4-b)を示す。TRU消滅率は1サイクル約12.1%であり、均質装荷炉心のTRU消滅率とほぼ同じ値が得られた。

表4.2-1 平衡炉心の出力分担率

領域		炉心		基準炉心 ⁽²⁾		均一混入炉心 ⁽²⁾		ターゲット集合体装荷炉心 ⁽³⁾	
		燃焼状態		初期 ^{*1}	末期 ^{*2}	初期	末期	初期	末期
炉心部	内側炉心	炉心	0.468	0.509	0.499	0.535	0.441	0.456	
		TRU					0.056	0.075	
	外側炉心	炉心	0.476	0.418	0.447	0.395	0.408	0.358	
		TRU					0.040	0.039	
	合計		0.944	0.927	0.947	0.930	0.946	0.929	
	ブランケット	軸方向		0.030	0.043	0.030	0.044	0.030	0.044
半径方向		0.026	0.031	0.023	0.026	0.024	0.027		
合計		0.056	0.074	0.053	0.070	0.054	0.071		
合計			1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	

- *1 主炉停止系中途挿入
- *2 制御棒全引抜き
- *3 CASE-F4-b

表4.2-2 平衡炉心の出力分布係数及び最大線出力

項目		炉心		基準炉心		均一混入炉心		ターゲット集合体装荷炉心*4	
		燃焼状態		初期*1	末期*2	初期	末期	初期	末期
内側炉心	平均線出力 (W/cm)		248	270	258	284	266 (169)	275 (226)	
	出力ピーキング係数	径方向	1.21 [1.043]*3	1.26 [1.036]	1.15 [1.034]	1.22 [1.031]	1.12	1.27	
		軸方向	1.27	1.23	1.27	1.24	1.29 (1.29)	1.23 (1.25)	
	最大線出力 (W/cm)		380	419	376	431	386 (279)	428 (310)	
外側炉心	平均線出力 (W/cm)		246	216	231	204	234 (141)	201 (137)	
	出力ピーキング係数	径方向	1.34 [1.081]	1.37 [1.064]	1.40 [1.070]	1.43 [1.057]	1.47	1.39	
		軸方向	1.27	1.21	1.29	1.22	1.28 (1.28)	1.22 (1.26)	
	最大線出力 (W/cm)		420	357	416	355	439 (279)	342 (239)	
半径方向 ブランケット	平均線出力 (W/cm)		51	59	45	49	47	53	
	出力ピーキング係数	径方向	4.81 [1.453]	3.87 [1.297]	5.28 [1.448]	4.35 [1.295]	4.39	4.45	
		軸方向	1.74	1.74	1.73	1.73	1.75	1.76	
	最大線出力 (W/cm)		427	397	411	369	361	415	

*1 主炉停止系中途挿入

*2 制御棒全引抜き

*3 ()はターゲット集合体を示す。

*4 CASE-A1

表4.2-3 全炉心の出力分布係数

項目	炉心	基準炉心		均一混入炉心		ターゲット集合体装荷炉心	
	燃焼状態	初期	末期	初期	末期	初期	末期
平均線出力 (W/cm)		247	243	248	244	250(156)	239(185)
半径方向出力配分係数		1.34	1.40	1.30	1.42	1.37	1.46
軸方向出力配分係数		1.27	1.23	1.29	1.24	1.28(1.28)	1.23(1.25)
最大線出力 (W/cm)		420	419	416	431	439(279)	428(310)

()内はターゲット集合体を示す。

許容線出力 (炉心燃料: 430 W/cm)

ターゲット集合体: 約300 W/cm (燃焼初期)

約335 W/cm (燃焼末期)

表4.2-4 平衡炉心の増殖比

領域		炉心	基準炉心		ターゲット集合体装荷炉心	
		燃焼時期	初期	末期	初期	末期
		制御棒状態	主炉停止系半挿入	制御棒全引抜	主炉停止系半挿入	制御棒全引抜
炉心部	内側炉心	0.451	0.489	0.495	0.520	
	外側炉心	0.367	0.337	0.376	0.328	
	計	0.818	0.826	0.871	0.848	
燃料部	軸方向ブランケット	0.146	0.157	0.167	0.175	
	径方向ブランケット	0.114	0.104	0.122	0.106	
	計	0.260	0.261	0.289	0.281	
合計		1.078	1.086	1.160	1.129	

(注) 上記の値は核分裂物質として²³⁹Pu, ²⁴¹Pu を対象とし、²⁴¹Pu の自然崩壊を考慮した値である。

表4.2-5 ターゲット集合体装荷炉心のTRU消滅率 (CASE-F4-b)

Element	装荷量 (kg/cycle)	平衡初期 (kg/core)	平衡末期 (kg/core)	取り出し量 (kg/cycle)	消滅量 (kg/cycle)	消滅率 (%)
Np	289.2	720.6	592.7	161.3	127.9	17.7
Am	268.2	704.0	612.9	177.1	91.1	12.9
Cm	31.2	140.4	170.8	61.6	-30.4	-21.7
Total	588.6	1565.0	1376.4	400.0	188.6	12.1

4.3 熱特性

熱特性については、基準炉心における炉心燃料集合体の流量配分に基づいて解析した。また、炉心燃料集合体及びターゲット集合体の必要流量を求め、ターゲット集合体の装荷による炉心流量への影響を検討した。

解析した熱特性値は次のとおりである。

- | | | |
|---|---|-------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ① 被覆管、冷却材最高温度 ② 燃料最高温度 ③ 必要流量 | } | 基準炉心の流量配分条件 |
|---|---|-------------|

(a) 解析方法

基準炉心の熱特性解析においては、図4.3-1 に示す流量配分評価領域毎に表4.3-1 に示すように燃料集合体の必要最小流量を決定した。また、計画流量配分は炉心流量領域を2領域とし、表4.3-2 に示すように計画流量を定めている。ここで必要最小流量は、 $CDF \leq 0.3$ 、被覆管最高温度 $\leq 720^{\circ}\text{C}$ を満足する条件から求められたものである。

CASE-F4-bのターゲット集合体装荷炉心の熱特性解析は、まず、基準炉心の必要最小流量に基づいて炉心燃料集合体の被覆管温度を解析した。この解析においては、基準炉心の必要最小流量における被覆管最高温度をベースにし、炉心入口温度から被覆管最高温度点までの温度上昇幅が各流量領域の最大発熱集合体の発熱量に比例するものとした。次に、 $CDF \leq 0.3$ 、被覆管最高温度 $\leq 720^{\circ}\text{C}$ を満足する必要流量を計算し、計画流量との比較により成立性を検討した。なお、CDF基準を満足しているかどうかの判断は、CDFが被覆管内圧が高い寿命末期の被覆管温度に強く依存するので、基準炉心の寿命末期の被覆管温度をめやすにした。また、ターゲット集合体の発熱量は各流量領域で炉心燃料集合体の発熱量に包絡されるため、炉心燃料集合体のみを対象にして解析した。

(b) 解析結果及び考察

表4.3-3 にターゲット集合体装荷炉心(CASE-F4-b)の解析結果を示す。ターゲット集合体装荷炉心(CASE-F4-b)に装荷されているターゲット集合体の燃焼に伴う出力変動が大きく、最大線出力の制限から最大出力が制限されてしまうため、ターゲット集合体の燃焼期間中の平均的な集合体出力は炉心燃料と比べて低くなっている。その結果、炉心燃料集合体の出力は基準炉心と比べて高く、基準炉心の必要最小流量での被覆管最高温度は、ほとんどの流量領域で 720°C を超えてしまう。一方、寿命末期(サイクル末期)についてはターゲット集合体の出力分担が大きくなり相対的に炉心燃料集合体の出力分担が減るので、CDFへの寄与

が大きい寿命末期の温度は基準炉心と比べても緩和される方向にある。その結果、炉心燃料集合体については、被覆管最高温度が必要最小流量の決定因子になっており、各流量領域の被覆管最高温度はほとんどが720℃となっている。表4.3-3に示すターゲット集合体装荷炉心の炉心燃料集合体一体当たりの必要最小流量の最大は32.5kg/s/集合体であり、基準炉心の必要最小流量(31.9kg/s/集合体)を僅かながら上回る。

一方、ターゲット集合体の必要流量は、寿命末期において出力が増大するためCDF制限が温度制限因子となっている。ターゲット集合体と炉心燃料集合体の出力履歴は大きく異なるため、CDF制限をみただかどうかについては詳細解析が必要であるが、ここでは末期の被覆管温度が炉心燃料集合体の末期の温度を超えないという条件でターゲット集合体の必要流量を見積もった。その結果、炉心第1列のターゲット集合体の必要流量は34.5kg/sとなり、基準炉心の同位置の炉心燃料の必要流量より2.5kg/s(約8%)上回り、計画流量と比べても0.1kg/s(約0.3%)上回る。

炉心全体の必要流量は、炉心燃料のみを考慮(ターゲット集合体には炉心燃料と同じ流量を流すと仮定。)すれば基準炉心の約1%増となり、ターゲット集合体を考慮すれば、少なくとも炉心全体の必要流量は2%増となる。

基準炉心の計画流量(11,410.4kg/s)と比較すれば、ターゲット集合体装荷炉心の必要流量は、ターゲット集合体を考慮した場合が9,975.2kg/s、ターゲット集合体を考慮しない場合が9,876.5/sであり、いずれも計画流量を下回っている。

各流量領域の必要流量と計画流量を比較すると、炉心燃料集合体については、必要流量は計画流量を下回っており、問題ない。ターゲット集合体については、炉心第1列に装荷したターゲット集合体については、計画流量より0.1kg/s(約0.3%)流量増を図る必要がある。また、外側炉心のターゲット集合体については、計画流量28.2kg/sに対して必要流量31.9kg/sであり、内側炉心の計画流量(34.4kg/s)並の流量が確保することにより、成立の見通しがある。

表4.3-2 流量配分 (計画流量)

燃料区分		集合体数	必要最小流量 (kg/s)	計画流量 (kg/s)	流量領域全流量 (kg/s)		
内側炉心	1	13	31.9	34.4	8909.6		
	2	24	31.9				
	3	60	30.1				
	4	42	29.1				
	5	48	28.2				
外側炉心	6	42	29.9			28.2	2707.2
	7	30	28.1				
	8	18	26.2				
	9	12	25.4				
	10	12	24.3				
	11	24	23.7				
	12	30	21.4				
小計					11616.8 (91.3%)		
燃料	13	42		6.3	264.6		
	14	30		4.4	132.0		
	小計				396.6		
中性子遮蔽体	SUS	78		0.50	39.0		
	B, C	270		0.30	81.0		
	小計				120.0		
制御棒	主系統	18		4.0	72.0		
	後備系	6		1.8	10.8		
	小計				82.8		
漏洩・その他					503.8		
全一次冷却材流量					1.272 × 10 ⁴ (100.0%)		

表4.3-3 ターゲット集合体装荷炉心 (CASE-F4-b) 温度評価結果

流量領域 区分	集合体 本数 ^{*3}	基 準 炉 心				C A S E - F 4 - b				計 画 流 量 (集合体) (kg/s)	
		最大発熱量 (MW/ass' y)	被覆管最高 温度 (°C)	末期被覆管 最高温度 (°C)	集合体必要 最小流量 (kg/s)	最大発熱量 (MW/ass' y)	被覆管最高 温度 ^{*1} (°C)	末期被覆管 最高温度 ^{*1} (°C)	集合体必要 最小流量 ^{*2} (kg/s)		
1	10 (3)	9.65	714	614	31.9	9.66(9.84)	719(695)	610(614)	31.4(34.5)	34.4	
2	24	9.08	720	584	31.9	9.25	720	579	32.5		
3	42 (12)	8.57	720	595	30.1	8.79(8.30)	720(701)	589(595)	30.9(30.8)		
4	42	8.07	693	628	29.1	8.02	707	627	27.7		
5	42 (6)	7.99	699	634	28.2	8.77(8.85)	720(712)	624(634)	29.1(30.0)		
6	42	8.87	720	653	29.9	9.23	720	638	31.1		
7	24 (6)	8.06	720	647	28.1	8.27(7.47)	720(675)	614(647)	28.8(30.0)		
8	18	7.26	713	629	26.2	7.86	720	611	27.8	28.2	
9	0 (12)	6.89	720	633	25.4	-(6.47)	-(639)	-(633)	25.4(31.9)		
10	12	6.17	720	622	24.3	6.15	719	608	24.2		
11	24	5.67	720	605	23.7	5.49	720	599	22.9		
12	30	5.08	720	603	21.4	5.11	720	596	21.5		
炉心合計					9759.1	炉心合計				9876.5(9975.2)	

1%(2%)増

- *1 CASE F4-bの必要最小流量による被覆管温度。カッコ内はターゲット集合体を示す。
 *2 CDF ≤ 0.3、被覆管最高温度 ≤ 720°Cを満たす流量。但し、カッコ内はターゲット集合体の冷却を考慮した場合を示す。
 *3 カッコ無しは炉心燃料集合体、カッコ付きはターゲット集合体を示す。

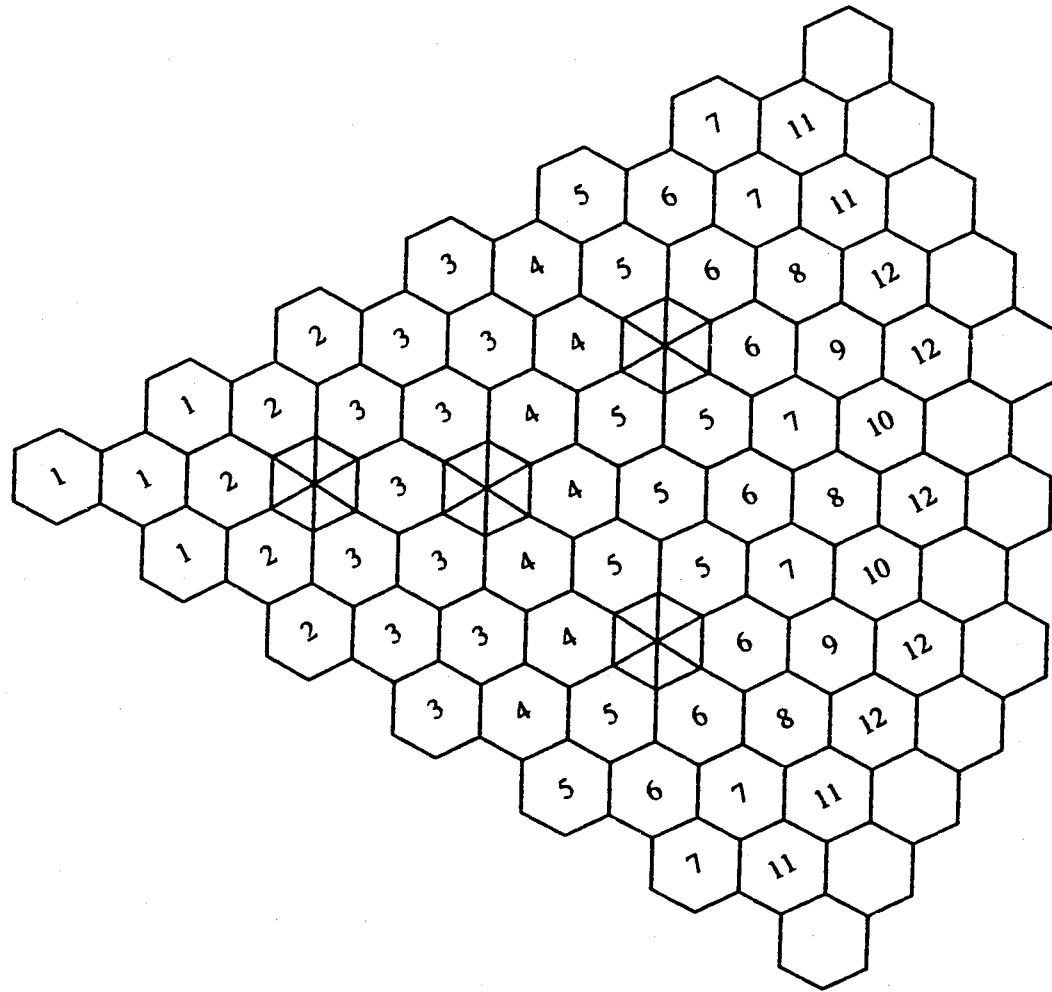


图4.3-1 流量领域区分

5. ターゲット集合体の成立性の考察

今までの検討により得られた知見に基づいて、ターゲット集合体装荷炉心の成立性を考察する。

5.1 核特性

ターゲット集合体を装荷した場合の炉心特性への影響は、以下のとおりである。

(1) 実効増倍率

平衡炉心末期の余剰反応度に及ぼすターゲット集合体装荷の影響は、本検討において選定した装荷パターンにおいて、約 $-0.7\% \Delta k/k$ と比較的小さいので、余剰反応度の面からは、ターゲット集合体を装荷する場合において炉心燃料集合体のプルトニウム富化度調整は微調整で運転可能である。

(2) 反応度制御

ターゲット集合体装荷炉心では、制御棒価値が約10%低下すると推定される。一方、炉心の最大過剰反応度は、基準炉心の約 $5.2\% \Delta k/k$ に対して、燃焼欠損反応度の低下により約 $1.8\% \Delta k/k$ 低下し、約 $3.4\% \Delta k/k$ 程度（基準炉心の約70%）になる。このことから、炉停止余裕等を考慮したとしても、制御棒の設計変更、運用変更等なしでの反応度バランスの成立見込みはあると推定できる。

なお、制御棒価値の低下に対して、同じTRU混入率であれば、制御棒から離してターゲット集合体を装荷することが可能なターゲット集合体装荷炉心の方が、均一混入炉心より僅かながら有利である。

(3) 反応度係数（安全性）

炉心にTRUを装荷した場合、中性子スペクトルが硬化して、①ドップラ係数が低下し、②（正の）Naボイド反応度が增大する。これらのことは、炉心の負の反応度係数が小さくなることを意味している。また、最大線出力が増大し、TRUを装荷した燃料では許容線出力が低下し、燃料溶融に対する裕度が小さくなる方向である。

一方、安全性向上の特性としては、燃焼欠損反応度の低下がある。

安全性に対しては、更に詳細な検討が必要であるが、負の反応度係数については、均一混入炉心とターゲット集合体装荷炉心との間に大きな差はない。

(4) 出力分布特性

選定したターゲット集合体の分散配置では、燃焼に伴う炉心の出力スイング（内側／外側炉心の出力分担の変動）を基準炉心以下に抑えることができた。また、ターゲット集合体の集合体出力増大と線出力低減を狙って、約6.7mm、397ピン／集合体の細径ピンを採用し、ターゲット集合体の最大発熱量は炉心燃料集合体並でか

つ最大線出力は許容線出力（約330W/cm）以下とすることができた。

しかしながら、ターゲット集合体は燃焼に伴う出力変動が大きく、最大出力を抑えると結果的に寿命平均の出力分担が低下してしまうため、炉心燃料集合体の出力分担が大きくなってしまうことになる。

そのため、炉心燃料の最大線出力は約439W/cmであり、制限値（430W/cm）を若干上回っている。

炉心燃料の最大線出力を下げる方法としては、ターゲット集合体に更に細径ピンを採用して出力分担を大きくする方法が考えられるが、圧力損失増大で冷却材流量が確保できるかどうかという問題が生じ、またピン径も極端に細くなりすぎるので、以下に述べる方策を考察した。

(a) 炉心領域の拡大

最大線出力の低減策の一つとして、径ブランケットを燃料集合体に置換して炉心領域を拡大することが考えられる。選定したターゲット集合体装荷炉心に対して、成立性が見通しがある炉心配置として、径ブランケット18体を外側炉心燃料集合体に置換した炉心配置（以下、「ターゲット集合体装荷拡大炉心」という。）を選び、出力分布解析を実施した。炉心配置を図5.1-1に示す。出力分布解析の結果は、表5.1-2及び表5.1-3に示すとおりであり、第4章で選定したCASE-F4-bとの最大線出力の比較結果は次のとおりである。

炉心状態	CASE-F4-b	ターゲット集合体拡大炉心
炉心燃料		
内側炉心（平衡初期／末期）	386/428	369/408 W/cm
外側炉心（平衡初期／末期）	439/342	416/329
ターゲット集合体		
内側炉心（平衡初期／末期）	279/309	284/337
外側炉心（平衡初期／末期）	279/239	275/235

ターゲット集合体拡大炉心において、炉心燃料集合体の最大線出力は416W/cmであり、許容線出力（430W/cm）を下回っている。また、ターゲット集合体の最大線出力は337W/cmであり、表2.1-5に示す燃焼末期（第3サイクル）の許容線出力（337.5W/cm、TRU混入率48.4%に直線内挿。）を超えない。

(b) 原子炉出力の低減

原子炉出力の低減により許容線出力を満足させる場合には、ターゲット集合体

装荷期間中の原子炉出力を97%以下にすれば良い。

(c) 中空ペレットの採用

炉心燃料又はTRU燃料ピンを中空ペレットにすることにより、許容線出力を増大させることができる。この適用例として、ターゲット集合体に中空ペレットを採用することにより、ターゲット集合体の集合体出力を増大させ、その分、炉心燃料集合体の発熱負荷を低減させることが考えられる。

5.2 熱特性

(1) 流量配分への影響

炉心流量については、基準炉心の必要流量に対して、ターゲット集合体装荷炉心では必要流量が約2%増大するが、基準炉心の計画流量に対しては十分な余裕がある。

集合体毎の流量については、炉心燃料の必要流量は基準炉心に比べて僅かに増大するが計画流量以下である。ターゲット集合体については、必要流量が炉心燃料に対する計画流量を僅かに上回る集合体もあるが、ターゲット集合体の構造設計対応で解決可能と考えられる。

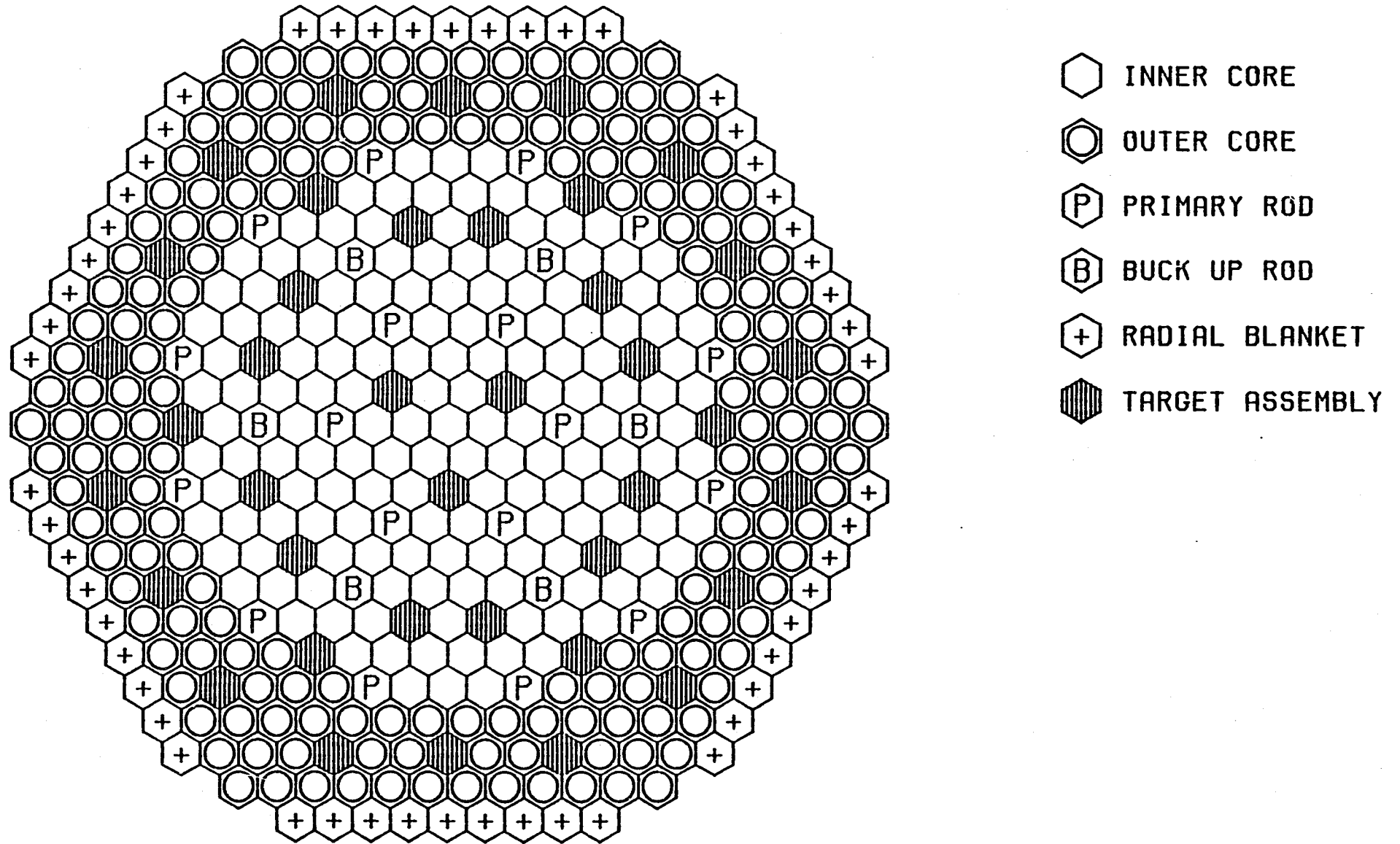
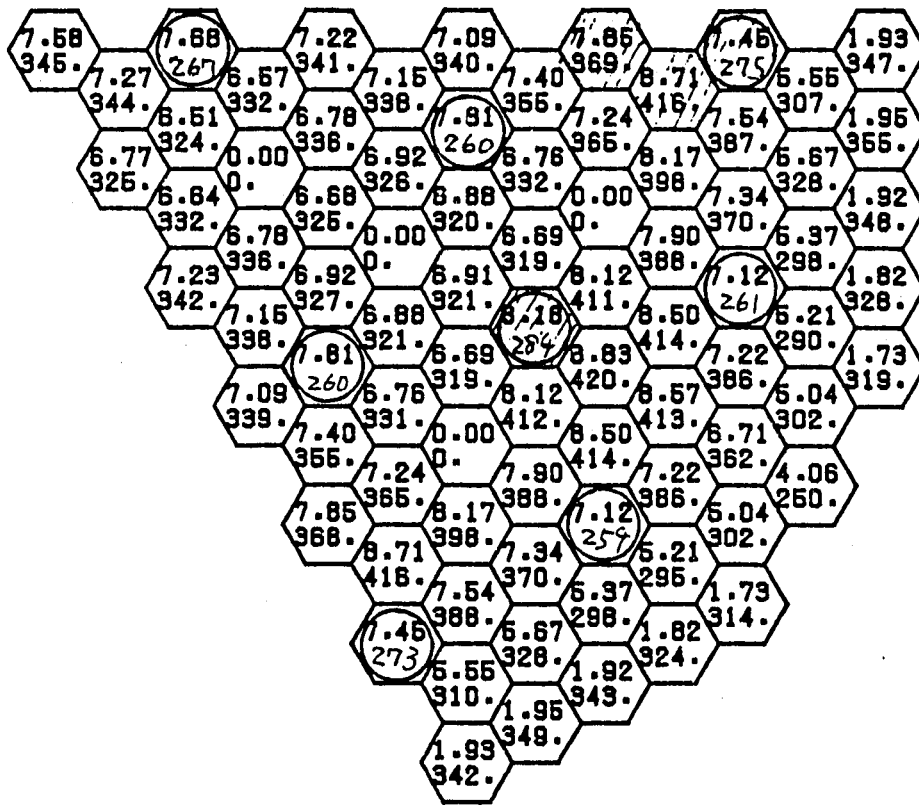


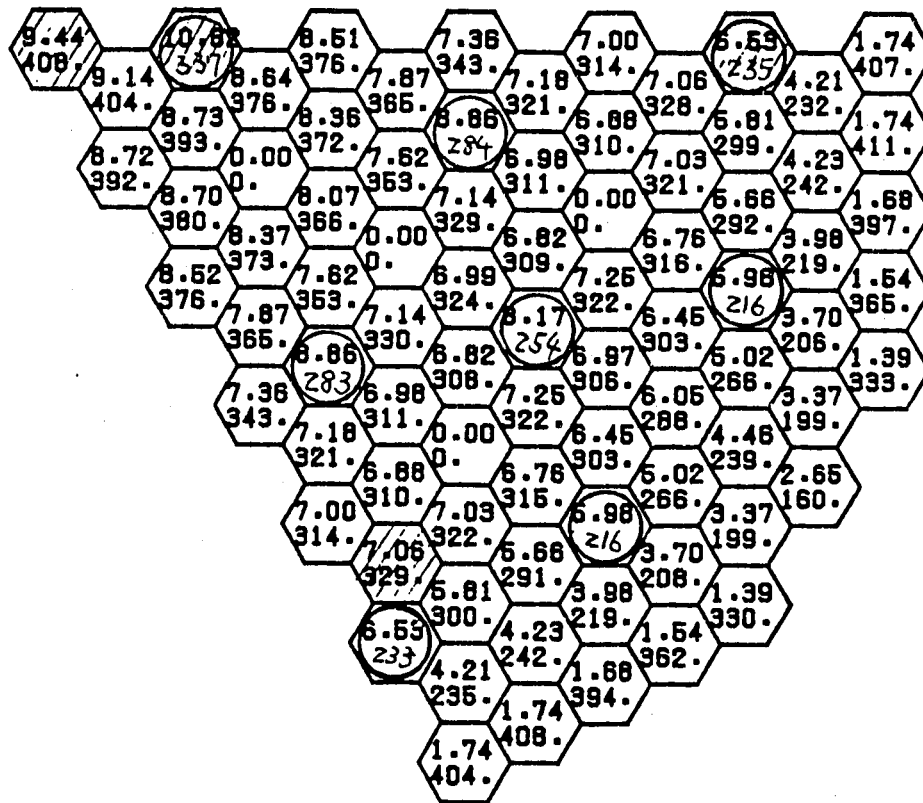
図5.1-1 ターゲット集合体装荷拡大炉心の炉心構成



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE BOC
 C/R PATTERN IN

図5.1-2 ターゲット集合体装荷拡大炉心の集合体出力及び線出力 (平衡炉心初期)



 UPPER = ASSEMBLY POWER (MW)
 LOWER = PEAK LINEAR HEAT RATE (W/CM)

CYC NO. 1
 TIME IN CYCLE EOC
 C/R PATTERN IN

図5.1-3 ターゲット集合体装荷拡大炉心の集合体出力及び線出力（平衡炉心末期）

6. 結 論

本研究では、TRU混入量の多いターゲット集合体を少数体炉心に非均質に装荷する方法について、炉心設計の成立性を検討した。今回の検討では、TRUを混入することによる燃料物性（融点、熱伝導度）の変化を、今まで公開されている物性データを基に推定し、それを基にしてTRU混入量依存の燃料許容線出力を算出し、この許容線出力を条件として、ターゲット集合体を分散装荷した方式について核・熱特性を解析・評価した。

その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) TRUを約50%混入させたターゲット集合体の許容線出力は約330W/cmと推定される。
- (2) ターゲット集合体外形を炉心燃料集合体と同じにし、燃料ピン外径6.7cm、集合体内の燃料ピン本数を397とするとともに、ターゲット燃料集合体の炉心内配置及び流量配分の最適化により、ターゲット集合体の許容線出力を満足することができる。
- (3) Naボイド反応度及びドップラー係数は、同じTRU混入率の均質装荷炉心と同程度である。

これらのことより、分散装荷方式によるTRU燃料集合体非均質装荷炉心は成立可能であることが分かった。

今後の検討課題としては、以下のことが挙げられる。

- (a) TRU核種の核特性計算精度の確認及び向上
- (b) TRU化合物の物性値の精度向上
- (c) ターゲット集合体の燃料設計成立性の評価
- (d) ターゲット集合体の燃料製造、取扱い上の問題点（発熱、放射線強度等）の検討

謝 辞

本報告書の作成にあたっては、三菱原子力工業株式会社 河北孝司氏、宝珠山健氏、ニュークリア・デベロップメント株式会社 池田一生氏に多大な御協力を頂いた。ここに、厚く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) J.W. Watcher and A.G. Croff, "Actinide Partitioning-Transmutation Program Final Report III. Transmutation Studies", Oak Ridge National Laboratory report, ORNL/TM-6983, 1980.1.
- 2) 原、若林、「高性能FBR炉心の検討—TRU添加による高度化—」、PNC SN9410 89-134、1989年8月。
- 3) M.Yamaoka, et al., "Characteristics of TRU Transmutation in an LMFBR", presented at Workshop on the P-T of Minor Actinides, Mito, Ibaraki, Japan, Oct.16-18, 1990.
- 4) 山岡、石川、林、若林、「高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(I)—TRU消滅炉心概念の検討—」、PNC SN9410 91-365、1991年11月。
- 5) M.Yamaoka et al., "Feasibility Study of TRU Transmutation by LMFBRs", Proc. Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles (FR'91), Vol. III, Oct, 28; Nov.1, Kyoto (1991).
- 6) T.Wakabayashi et al., "Status of Study on TRU Transmutation in LMFBRs", Trans. Am. Nucl. Soc., 64, 556 (1991).
- 7) 若林、山岡、小無、高下、「高速炉および加速器による核変換研究の現状」、動燃技報、No.82、1992年6月。
- 8) T.Wakabayashi et al., "Characteristics of TRU Transmutation in an LMFBR", IWGFR Specialists Meeting on Use of Fast Breeder Reactors for Actinide Transmutation, September 22-24, Obninsk, Russia, 1992.
- 9) M.Yamaoka et al., "Design Study of A Super Long Life Core Loaded with TRU Fuel", Proc. Int. Conf. on Design and Safety of Advanced Nuclear Power Plants (ANP'92), Vol. I, October 25-29, Tokyo (1992).
- 10) 若林、山岡、「高速炉によるTRU消滅特性」、機械学会シンポジウム 動力・エネルギー技術の最前線'92講演論文集、B16、1992年11月13日。
- 11) 山岡、若林、「高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(II)—TRU消滅超長寿命炉心及びTRU断面積不確かさの影響に関する検討—」、PNC SN9410 92-371、1992年12月。
- 12) 菰田、若林、「TRU燃料の基本特性評価」、PNC SN9410 91-082、1991年2月。
- 13) D.Taylor, "Thermal Expansion Data:2 Binary Oxides with the Fluorite and Rutile Structures, MO_2 , and the Antifluorite Structure, M_2O ", Trans. J. Br. Ceram. Soc. 83, 1984.

- 14) K. Richter et al, "Phase Relationship in the Neptunium-Oxygen System", J. Nucl. 148, 1987.
- 15) R. E. Mchenry, "Melting Points of Curium and Americium Oxides", Trans. Am. Nucl. Soc. 8, 1965.
- 16) P. K. Smith, "Melting Point of Cm_2O_3 ", J. Inorg. Nucl. Chem. 31, 1969.
- 17) R. D. Baybarz, "High-Temperature Phases Crystal Structures and the Melting Points for Several of the Transplutonium Sesquioxides", J. Inorg. Nucl. Chem. 35, 1973
- 18) R. L. Gibby et al, "Thermal Diffusivity, Thermal Conductivity and Transformation Temperatures of Curium Sequioxide", J. Nucl. Mat. 34, 1970.
- 19) H. E. Schmidt et al, "The Thermal Conductivity of Oxides of Uranium, Neptunium and Americium at Elevated Temperatures", J. Less-Comm. Met. 121, 1986.
- 20) E. E. Ketchen, "Thermal Conductivity of Cm_2O_3 ", ORNL-TM-2915, 1970.
- 21) 金城他、「高速増殖炉大型炉設計研究-100万kWeレファレンス・プラント-」、PNC ZN9410 89-17.
- 22) A. G. CROFF, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code", Oak Ridge National Laboratory report, ORNL/TM-7175, 1980.
- 23) T. NAKAGAWA, "Summary of JENDL-2 General Purpose File", Japan Atomic Energy Research Institute report, JAERI-M 84-103, 1984.
- 24) H. TAKANO, et al., "Revision of Fast Reactor Group Constant Set JFS-3-J2", Japan Atomic Energy Research Institute report, JAERI-M 89-141, 1989.
- 25) "Table of Isotopes, 7th edition"

付録-1 使用物性値

融 点	
TRU1 + (U, Pu) O ₂	(1/2)
(1) BU ≤ 50,000 MWD/T	
$MP = 2750 \cdot (1 - Z) + 2400 \cdot Z$	
$MP_{\text{MOX}} = 2750$	
$MP_{\text{TRU1}} = 2400$	
<p>ここで,</p>	
$MP : \text{TRU1 混入燃料融点 (}^\circ\text{C)}$	
$MP_{\text{MOX}} : \text{(U, Pu) O}_2 \text{融点 (}^\circ\text{C)}$	
$MP_{\text{TRU1}} : \text{TRU1 融点 (}^\circ\text{C)}$	
$Z : \text{TRU1 混入量 (fraction)}$	
(2) BU > 50,000 MWD/T	
$MP = (2750 - 7 \cdot [Bu - 50,000] / 10,000) \cdot (1 - Z) + 2400 \cdot Z$	

融 点	
TRU2 + (U, Pu) O ₂	(2 / 2)
<p>(1) $Bu \leq 50,000 \text{ MWD/t}$</p> $MP = 2750 \cdot (1 - Z) + 2560 \cdot Z$ $MP_{\text{MOX}} = 2750$ $MP_{\text{TRU2}} = 2560$ <p>ここで,</p> <p>MP : TRU2 混入燃料融点 (°C)</p> <p>MP_{MOX} : (U, Pu) O₂ 融点 (°C)</p> <p>MP_{TRU2} : TRU2 融点 (°C)</p> <p>Z : TRU2 混入量 (fraction)</p> <p>(2) $Bu > 50,000 \text{ MWD/t}$</p> $MP = (2750 - 7 \cdot [Bu - 50,000] / 10,000) \cdot (1 - Z) + 2560 \cdot Z$	

熱 伝 導 度

TRU1 + (U, Pu) O₂

(1/2)

$$K = K_{\text{MOX}} - \frac{Z}{0.5} (K_{\text{MOX}} - K_{\text{TRU1.50}})$$

$$K_{\text{MOX}} = 0.01169 + \frac{1}{\left[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1 - \rho)}{\text{O/M} - 1.90}\right] \cdot T} + 7.214 \times 10^{-13} \cdot T^3$$

$$K_{\text{TRU1.50}} = \frac{1}{36 + 0.0218\theta} (1 - 1.4 \times 10^{-8} T^2 + 1.923 \times 10^{-14} T^4)$$

K : TRU1 混入燃料熱伝導度 (W/cm°C)

K_{MOX} : (U, Pu) O₂ 熱伝導度 (W/cm°C)

K_{TRU1.50} : TRU1 50%混入時の熱伝導度 (W/cm°C)

ρ : 対理論密度比

T : 温度 (°C)

O/M : 化学量論比

θ : T < 1600°C θ = T
T ≥ 1600°C θ = 1600°C

Z : TRU1 混入量 (fraction)
0 ≤ Z ≤ 0.5

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

ρ : 0.84 ~ 0.99

T : 800 ~ 2800

O/M : 1.93 ~ 2.00

熱 伝 導 度

TRU2 + (U, Pu) O₂

(2/2)

K_{MOX} > K_{TRU2.50} の場合

$$K = K_{MOX} - \frac{Z}{0.5} (K_{MOX} - K_{TRU2.50})$$

K_{MOX} ≤ K_{TRU2.50} の場合

$$K = K_{MOX} + \frac{Z}{0.5} (K_{TRU2.50} - K_{MOX})$$

$$K_{MOX} = 0.01169 + \frac{1}{[0.06717 + \frac{0.02226 \times (1 - \rho)}{O/M - 1.90}]} + 7.214 \times 10^{-13} \cdot T^3$$

$$K_{TRU2.50} = \frac{1}{0.861 + 1.9 \times 10^{-4} T_k} \cdot F \cdot \beta$$

- K : TRU2 混入燃料熱伝導度 (W/cm°C)
 K_{MOX} : (U, Pu) O₂熱伝導度 (W/cm°C)
 K_{TRU2.50} : TRU2 50%混入時の熱伝導度 (W/cm°C)
 ρ : 対理論密度比
 T : 温度 (°C) , T_k : 温度 (K)
 O/M : 化学量論比
 F : F = 0.92
 β : 補正係数 (β = 0.95)
 Z : TRU2 混入量 (fraction)
 0 ≤ Z ≤ 0.5

ただし、MOX部の適用範囲は以下の通り

- ρ : 0.84 ~ 0.99
 T : 800 ~ 2800
 O/M : 1.93 ~ 2.00