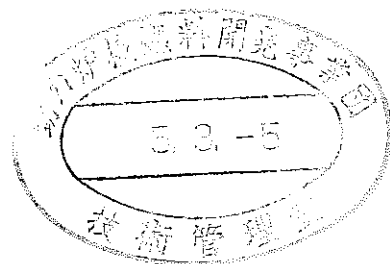


# 高速増殖原型炉もんじゅ 炉心特性の詳細評価

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)



1992年7月

三菱原子力工業株式会社

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

# 高速増殖原型炉もんじゅ

## 炉心特性の詳細評価

貝瀬與一郎\*, 金城 秀人\*,

矢野 真理\*, 伊藤 邦博\*

宝珠山 健\*

### 要 旨

FBRの開発推進の為に、高速増殖原型炉もんじゅ（以下、もんじゅとします）の更なる活用と言う観点から、炉心の高性能化を目指す必要がある。このため、「線出力の向上」、「燃焼度の向上」、「照射試験能力の向上」を目標とした炉心特性の詳細評価を行った。

#### 1) 燃料仕様の検討

出力の低い照射用特殊燃料集合体装荷に伴う炉出力低下を補う為の集合体出力増加（約7.5%）を被覆管許容最高温度の上昇で吸収する考え方を基準として、燃料仕様を下記観点から検討した。

- ① 燃料体積比
- ② 燃料健全性（主としてCDF）
- ③ 燃料集合体圧力損失

燃料体積比の点ではピン径の太径化が有利でありピン径7.8mmで炉心に必要な燃料体積比が得られる見通しを得た。但し、被覆管肉厚0.4mm、ペレット被覆管ギャップ140 $\mu$ m、中心空孔径1.8mm等、燃料製造側開発要素を伴った仕様である。この仕様のもとでCDF及び圧力損失が許容値内に納まることを確認した。

#### 2) 炉心核特性の解析・評価

- (1) 1) で設定した燃料仕様に基づき炉出力を維持しつつ、照射用特殊燃料集合体を2

---

本報告書は、三菱原子力工業株式会社が動力炉・核燃料開発事業団の契約により実施した研究の成果である。

契約番号 : 031C0193

事業団担当課 : 動力炉建設運転本部 原子炉課 竹内 則彦

\* 新型炉統括部

0体装荷出来る様に炉心高さを1mと高くした炉心仕様のもとで、照射用特殊燃料集合体の本数をパラメータに炉心のサーベイを行い、目標性能（最大線出力 480W/cm以下、炉心部取出平均燃焼度10万MWd/t）を達成する炉心を構成した。

これをもとに、炉中心に計測線付き集合体（INTA）を1体、照射用特殊燃料集合体を9体を装荷する炉心を選定し一連の炉心特性解析を実施した。

選定炉心（以下、MK2選定炉心と略す）の主要特性をもんじゅ基準炉心（以下、MK1標準炉心と略す）と比較して下記に示す。

	MK2選定炉心	MK1標準炉心
燃焼欠損反応度	3.6% $\Delta k/kk'$	2.6% $\Delta k/kk'$
最大線出力	445 W/cm	346 W/cm
炉心部取出平均燃焼度	10万MWd/t	8万MWd/t

(2) 制御棒（調整棒、後備炉停止棒）の $B^{10}$ 重量をMK1標準炉心と同一とした場合の選定炉心の制御棒反応度値解析を高燃焼度平衡炉心初期を対象に行った結果、次のことが明らかになった。

- ① 選定炉心の各制御棒値は、MK1標準炉心に比べ、10%~20%小さくなる。これはMK1標準炉心に比べ、MK2選定炉心は燃料の高密度化により燃料体積比が2.6%大きくなっていることが主な理由である。
- ② この対策として主炉停止系の制御棒については、 $B^{10}$ 重量を増やす事、制御棒の吸収体を長くすること等が考えられるが、制御棒の吸収体長さについては、引き抜きストロークの制限から、吸収体長さを長くすることはできない。 $B^{10}$ 濃縮度については十分余裕がある為、濃縮度を上げて $B^{10}$ 重量を増やす事で対応が可能である事が確認出来た。
- ③ 後備炉停止棒については、もともとMK1標準炉心の時から既にワンロードスタック時でも1.65%  $\Delta k/kk'$  の余裕を持っていた為、選定炉心で約1%  $\Delta k/kk'$  制御棒値が減少したが、問題ない。

(3) 高燃焼度平衡炉心末期を対象に、選定炉心の反応度係数（ドップラー係数、密度係数、温度係数、出力係数等）を解析した結果、定格出力時の温度係数及び出力係数は負に保たれており原子炉に固有の安全性を与えていることが確認できた。

### 3) 炉心熱特性の解析・評価

高度化炉心の燃料仕様及び炉心出力・燃焼特性評価結果に基づき、炉心熱特性を評価し熱設計上の成立性を検討した。

主な結果は以下のとおりである。

- (1) 流量領域毎の高温集合体内被覆管及び冷却材最高温度特性を評価し、熱的制限値（被覆管温度700℃以下）を満たす冷却材必要流量を求めた結果、領域全体では0.4%程度の余裕があり、現行の炉心部全流量を変えずに出力増をほぼ吸収しうる見通しを得た。

今後本流量の範囲内で、被覆管温度の高くなる内側炉心領域の一部と径ブランケット燃料領域への流量配分調整を行う必要がある。

- (2) 工学的安全係数の評価では高度化炉心にて考慮すべき因子の抽出、検討を行い、このうち、中空ペレット内径（中心空孔径）変動効果を燃料温度計算により求めた結果、約5%の温度上昇効果（HSF=1.05）となった。
- (3) 径ブランケット燃料削除炉心の検討を行い、径ブランケット領域を反射体で置換した炉心の必要流量を評価した結果、約3%の流量余裕により被覆管温度の低減が図れることを確認した。

#### 4) 研究開発計画の立案

今回選定した高度化炉心を達成するために必要な研究開発計画を立案し、今後の研究開発計画を明確化した。

目 次

要 旨

図表リスト

1. まえがき
2. 燃料仕様の検討
  - 2.1 燃料仕様の検討方法
  - 2.2 燃料体積比からの仕様要求
  - 2.3 燃料健全性からの仕様要求
  - 2.4 圧力損失特性からの仕様要求
  - 2.5 燃料仕様の設定
  - 2.6 結論
3. 炉心核特性の解析・評価
  - 3.1 炉心サーベイ計算
  - 3.2 選定炉心の出力分布・燃焼解析
  - 3.3 選定炉心の制御棒反応度価値解析
  - 3.4 選定炉心の反応度特性解析
4. 炉心熱特性の解析・評価
  - 4.1 炉心熱特性の評価
  - 4.2 工学的安全係数の評価
  - 4.3 径ブランケット燃料削除炉心の熱特性
5. 研究開発計画の立案
  - 5.1 燃料設計
  - 5.2 核設計
  - 5.3 熱設計
  - 5.4 流量配分
6. まとめ

付録 A 中空ペレットの燃料温度特性

## 図リスト

- 図2- 1 燃料仕様選定の考え方
  - 図2- 2 燃料体積比, スミヤ密度のピン径依存性  
管肉厚5.8mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%
  - 図2- 3 燃料体積比, スミヤ密度の管肉厚依存性  
ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%
  - 図2- 4 燃料体積比, スミヤ密度のP/C キップ依存性  
ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%
  - 図2- 5 燃料体積比, スミヤ密度の空孔径依存性  
ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%
  - 図2- 6 燃料体積比, スミヤ密度の燃料密度依存性  
ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%
  - 図2- 7 CDFサーベイのまとめ 改良オーステナイト鋼
  - 図2- 8 CDFの温度依存性 ピン径7.8mm, 肉厚0.4mm, 改良オーステナイト鋼
  - 図2- 9 CDFサーベイスus316相当鋼
  - 図2-10 ピンバンドル部圧力損失 ピン径の影響
- 
- 図3.1-1 炉心構成図 (特殊燃料集合体なし)
  - 図3.1-2 炉心構成図 (特殊燃料集合体10体)
  - 図3.1-3 炉心構成図 (特殊燃料集合体20体)
  - 図3.1-4 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体なし)
  - 図3.1-5 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体10体)
  - 図3.1-6 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体20体)
  - 図3.1-7 特燃本数と最大線出力 (予測値) の関係 (炉心高さ93cmの場合)
- 
- 図3.2-1 炉心構成図 (MJ-MK1 標準炉心)
  - 図3.2-2 炉心構成図 (MJ-MK2 特燃9本 (IC; 6体, OC; 3体))
  - 図3.2-3 炉心構成図 (MJ-MK2 特燃9本 (IC; 3体, OC; 6体))
  - 図3.2-4 2次元RZ全炉心体系 (MJ-MK1 標準炉心)
  - 図3.2-5 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体9体、炉中心; INTA)
- 
- 図3.4-1 温度係数及び出力係数評価用領域分割モデル (MJ-MK2 選定炉心)
- 
- 図4- 1 ワイヤ型燃料集合体内の流量配分係数 $X_2$ , 周辺の流れ効果係数 $f_w$ の設計評価式による値と実測値の比較

表リスト (1/2)

表2- 1	スミヤ密度、燃料体積比等のピン径依存
表2- 2	スミヤ密度、燃料体積比等の被覆管肉厚依存
表2- 3	スミヤ密度、燃料体積比等のペレット/クラッド間ギャップ依存性
表2- 4	スミヤ密度、燃料体積比等の中心空孔依存性
表2- 5	スミヤ密度、燃料体積比等のペレット密度依存性
表2- 6	燃料仕様候補案
表2- 7	CDF計算結果のまとめ
表2- 8	CDFの温度依存性
表2- 9	CDF計算 SUS316相当鋼
表2-10	燃料バンドル圧力損失評価のまとめ
表2-11	燃料仕様候補案
表3.1-1	MJ-MK2標準炉心の仕様及びサーベイ炉心の条件
表3.1-2	特殊燃料集合体装荷時 最大線出力データ (予測)
表3.1-3	主要炉心特性一覧 (MJ-MK2 サーベイ炉心)
表3.1-4	最大線出力 (MJ-MK2 サーベイ炉心)
表3.1-5	制御棒の必要反応度
表3.1-6	特燃装荷本数と最大線出力の関係 (サーベイに基づく予測値)
表3.2-1	主要炉心特性一覧 (選定炉心)
表3.2-2	主要炉心特性一覧 (PNC仕様)
表3.3-1	制御棒の仕様 (MJ-MK1標準炉心)
表3.3-2	主炉停止系及び後備炉停止系制御棒の原子数密度
表3.3-3	RZ体系の各リング毎の制御棒挿入状態
表3.3-4	平衡炉心初期における制御棒価値の比較
表3.4-1	ドップラー係数
表3.4-2	形状係数
表3.4-3	燃料密度係数
表3.4-4	冷却材密度係数
表3.4-5	構造材密度係数
表3.4-6	温度係数 (100%出力時)
表3.4-7	温度係数の内訳 (100%出力時)
表3.4-8	炉心領域毎の出力係数 (100%出力時)
表3.4-9	成分毎の出力係数 (100%出力時)
表3.4-10	ドップラー係数分布



表リスト (2/2)

- 表3.4-11 燃料密度係数分布
- 表3.4-12 冷却材密度係数分布
- 表3.4-13 構造材密度係数分布

- 表4.1-1(a)領域積分出力と出力分担率
- 表4.1-1(b)領域積分出力の比較
- 表4.1-2 燃料集合体最高温度評価用工学的安全係数
- 表4.1-3 流量領域毎最高温度特性
- 表4.1-4 炉内流量配分表 (100%電気出力, 公称値)

- 表4.3-1 流量領域毎最高温度特性－径ブランケット削除炉心－

- 表5- 1 「もんじゅ」炉心高性能化のタイムスケジュール
- 表5- 2 燃料設計の要検討項目の概要
- 表5- 3 核設計の要検討項目の概要
- 表5- 4 熱特性の要検討項目の概要
- 表5- 5 流量配分の要検討項目の概要

## 1. まえがき

FBRの開発推進のために、もんじゅの更なる活用と言う観点から、炉心の高性能化を目指す必要があり、線出力の向上、燃焼度の向上及び照射試験能力の向上した炉心を検討した。検討の前提条件としては、炉心の出力及び流量は変えないものとした。この炉心を達成するための研究開発計画をまとめた。

## 2. 燃料仕様の検討

### 2.1 燃料仕様の検討方法

図2- 1に燃料仕様検討の流れを示す。MK- 2 炉心では特殊燃料集合体の装荷を可能とするために、炉心燃料集合体数の削減をねらうので、集合体出力が約7. 5%増加する（炉心高さが $100/93=1.075$ 倍となる）ことになる。

ここで被覆管最高温度の考え方によって仕様選定の流れに大きな差を生ずる。一方は従来の675℃を最高温度とする。この時集合体流量は出力増に比例し、約1.075倍に増加する必要がある（最大発熱集合体で約21kg/s→約23kg/s）。この方法においては、燃料ピンバンドル部の圧力損失をMK- 1の3.5kg/cm<sup>2</sup>の+0.5kg/cm<sup>2</sup>（オリフィスでの調節範囲）に納めるためにはピン径を7.55mm以下に抑える必要がある（後述の圧力損失評価結果結果参照）。その場合燃料体積比を大きくとることが困難であり、反応度の維持限界からサイクル期間を長くとることが難しい。但し、被覆管温度制限等はMK- 1と同等であり、許認可取得上は非常に有利であるといえる。

被覆管材料として、今後実証炉に採用が予定され、データの蓄積が進んでいる改良オーステナイト鋼を使用する場合は、その高温強度が期待でき、被覆管許容最高温度を上昇することは十分可能である。そういう立場から、集合体流量をMK- 1並とすることも考えられる（被覆管温度は従来通りの計算からは696℃となる）。この場合、圧損の増加は緩和されるので、ピンの太径化が可能で、燃焼サイクル期間の増加が可能となる。許認可性は前記の場合ほど容易ではないが現状のR&Dの進行を考慮すれば十分に対処しうると考えられる。

本検討は上記2種類の方向のうち後者の燃料被覆管温度の上昇を取り込んだ考え方で燃料仕様の設定を行う。

燃料仕様を、以下の3つの要求の観点から成立範囲を絞り込む。

- ① 燃料体積比
- ② 燃料健全性
- ③ 圧力損失

燃料体積比の観点からの検討は、①主として製造性からの要求仕様（中心空孔径等製造側要求を想定して設定）をリファレンスとした場合の成立するピン径範囲のサーベイ、②燃料体積比に対する各種仕様の感度解析（相対的效果を見るためピン径は7.55mmに固

定)、 ④上記感度解析結果を取り込んでの燃料体積比の観点からのピン仕様の設定、の順で検討を進める。

燃料健全性はガス圧によるCDFについての設計成立の観点から被覆管温度、燃料寿命をパラメータとして解析を行い、燃料仕様との整合を見る。

圧力損失はピン径をパラメータとしたバンドル部の圧力損失の変動量を解析し、設計仕様との整合を見る。

以上の検討結果を総合し、今後の検討のベースとしうる燃料仕様をまとめる。

## 2.2 燃料体積比からの仕様要求

### (1) 保守的燃料仕様をベースとした燃料体積比へのピン径の影響

検討のベース（リファレンス仕様）を以下とし、ピン径の燃料体積比への影響を調べた。

本仕様は燃料製造実績、海外の実用実績、従来の被覆管材を使用することを想定した場合の暫定仕様である。

- ・被覆管肉厚：0.58mm
- ・中心空孔径：1.95mm
- ・ペレット密度：95%TD
- ・ペレットクラッド：間ギャップ180 $\mu$ m

表2-1にピン径をパラメータとした時のスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比（集合体配列ピッチ115.6mmの正六角面積に対する比率）及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。最後の数値は必要炉心反応度をサイクル長さ期間中維持するために必要な値としての目安を示すものである。これまでの設計経験から、燃焼度10万MWd/tを狙う場合に必要となると考えられる15カ月サイクル長さを維持するには約4200とする必要があると考える。10カ月サイクル炉心の目安値は約3000である。

図2-2に横軸をピン径としたスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。

被覆管肉厚が0.58mmと厚く、中心空孔径が1.95mm、ペレット-被覆管ギャップが180 $\mu$ mと大

きいため、スミヤ密度はMK-1程度と低い値となっている。燃料体積比はピン径と共に増加する。しかしピン径を増加することは圧損制限から限界があり、このような燃料体積値では長期サイクルの実現は困難と考えられる。

故に、保守的燃料スベックのもとでは成立性が得られないことが判明したので、燃料スベックを改善することの感度を明らかにするために以下において、ピン径を7.55mmと固定した場合の燃料仕様の燃料体積比への影響解析を実施した。

## (2) 燃料仕様の燃料体積比への感度解析 (ピン径7.55mmへの検討)

ここでは、後述するように、集合体流量を増加させるものとした場合(被覆管温度675℃を守る立場:相対的傾向をみるのが主目的)、圧力損失をMK-1並に抑制するためには採用が必須となるピン径7.55mmにおけるスミヤ密度、燃料体積比向上方策検討結果を示す。この結果はピン径を変更した場合の傾向把握にも使えるものである。

### (i) 被覆管肉厚の影響

表2-2に被覆管肉厚をパラメータとした時のスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。最後の数値は必要炉心反応度をサイクル長さ期間中維持するために必要な値としての目安を示すものである。これまでの設計経験から15カ月サイクルを維持するには約4200程度とする必要があると考える。

図2-3に横軸を被覆管肉厚としたスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。

被覆管肉厚を減ずることはスミヤ密度、燃料体積比両者の増加要因となる。後述するように、被覆管材料に改良オーステナイト鋼を用いることにすれば、肉厚が0.4mmでも被覆管健全性を確保できる見通しがある。

### (ii) パレット-グラッド間ギャップの影響

表2-3にパレット-グラッド間ギャップをパラメータとした時のスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。最後の数値は必要炉心反応度をサイクル長さ期間中維持するために必要な値としての目安を示すものである。これまでの設計経験から15カ月サイクルを維持するには約4200程度とする必要

があると考える。

図2- 4に横軸をペレット-クラッド間ギャップとしたスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。

ペレット-クラッド間ギャップを広くすることはPCMIの観点からは望ましいことではあるが、スミヤ密度を大きく減ずる要因となる。穴明きペレットの採用を前提としているので、PCMIは中心空孔におけるグループダウン効果で緩和が期待できるので、ペレット-クラッド間ギャップは燃料製造性の観点から主に決定すれば良いと考える。現状は管口マスクの厚さ制限からギャップ160 $\mu$ mと設定し、大量生産を行っている。ここではこれまでの照射試験用として製造実績のある140 $\mu$ m程度とする。但し、将来の大量生産の観点からはR&Dが必要と考えられる。

### (iii) 中心空孔径の影響

表2- 4に中心空孔径をパラメータとした時のスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。最後の数値は必要炉心反応度をサイクル長さ期間中維持するために必要な値としての目安を示すものである。これまでの設計経験から15カ月サイクルを維持するには約4200程度とする必要があると考える。

図2- 5に横軸を中心空孔径としたスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。

中心空孔径はスミヤ密度に非常に大きな影響を及ぼす。密度増加の観点からは空孔が小さいことが必要である。480w/cmの成立性との兼ね合いで、最小の空孔径とする必要がある。1.8mm程度とすれば公差を加味しても480W/cmの設計が成立する見通しである。

### (iv) ペレット密度の影響

表2- 5に燃料ペレット密度をパラメータとした時のスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。最後の数値は必要炉心反応度をサイクル長さ期間中維持するために必要な値としての目安を示すものである。これまでの設計経験から15カ月サイクルを維持するには約4200程度とする必要があると考える。

図2- 6に横軸を燃料ペレット密度としたスミヤ密度、被覆管内径で定義した燃料体積比及び燃料体積比とスミヤ密度を乗じた値を示す。

ペレット密度はスミヤ密度に直接比例関係を有するので、高く設定することが有利となる。しかし燃料の振る舞い、製作性等から95%以上とすることは適切ではないと考える。

### (3)スミヤ密度、燃料体積比向上方策

反応度維持の炉心特性の観点から、スミヤ密度、燃料体積比を向上させるには、ペレット-クラッド間ギャップ140 $\mu$ m、被覆管肉厚0.4mm、燃料密度95%の組み合わせが候補案となる。表2- 6に、各ピン径(7.55mm~8mm)におけるスミヤ密度、燃料体積比及び両者を乗じた値を示す。これらの値から、ピン径7.55mmで10カ月サイクル炉心、太径(7.8mm)で12カ月以上のサイクル長さの炉心達成の可能性があると考えられる。

## 2.3 燃料健全性からの仕様要求

CDFを主体に燃料健全性からの燃料仕様を検討する。

### (1) CDF

#### (i) 検討条件

#### ・被覆管強度、物性

改良オーステナイト鋼

- ※ クリープ強度
- ※ クリープ強度低減係数
- ※ 内面腐食
- ※ 外面腐食

(参考値としてSUS316相当鋼使用の場合も計算した。)

#### ・燃料寿命

- ※ 10ヶ月×3サイクル
- ※ 1年×3サイクル
- ※ 1.25年×3サイクル

#### ・形状

- ※ 炉心高さ 100cm

- ※ ブランケット高さ 28.5/31.5cm
- ※ ガスプレナム長さ 116cm (空間有効率85%)

・パラメータ

- ※ ピン径
- ※ 被覆管肉厚

(ii) 計算結果

表2-7にCDF計算結果の纏めを示す。

図2-7に横軸燃料寿命、縦軸をCDFとしてピン径、肉厚を変えた場合の計算値を示す。

(被覆管温度675℃の場合：流量増加)

改良オーステナイト鋼のクリープ強度は非常に優れており、肉厚を0.4mm以上確保すれば、ピン径によらず15カ月サイクル3バッチ炉心(燃料寿命1368日)でもCDFは0.3以下となり、成立性が見込める。極端に肉厚0.3mmの場合でも10カ月サイクル3バッチ炉心(燃料寿命912日)なら成立する結果となっている。

(被覆管温度696℃の場合：流量変更なし)

集集体流量をMK-1と同等とすると被覆温度は696℃となるが、この場合のCDFは12カ月サイクル3バッチ炉心(燃料寿命1095日)において0.539であり、ほぼ設計成立性が得られる(通常時のCDFを0.5程度に抑えれば、過渡も含めて設計成立があると判断する)。熱設計の合理化により温度低減が図れれば(例えば685℃)15ヶ月炉心の設計成立性がある。

表2-8、図2-8にCDFの被覆管温度依存性を示す。被覆管最高温度が700℃でも、肉厚0.4mmで10カ月炉心が成立する。685℃であれば15ヶ月炉心が成立することが示されている。

表2-9、図2-9に、被覆管がSUS316相当鋼の場合のCDF値を参考に示す。肉厚が0.45mmあれば10カ月サイクル炉心が成立する。

(2) その他の健全性課題

CDFの他に、BDI、DDI等の問題も考えられるが、改良オーステナイト鋼の優れた耐スエリング性が確認されてきており、ここで考慮する燃料寿命範囲では殆ど問題とならないと考える。



## 2.4 圧力損失特性からの仕様要求

表2-10に燃料ピンバンドル部圧力損失評価の纏めを示す。図2-10に横軸集合体流量とした時のピンバンドル圧力損失を示す。MK-1ではピンバンドル圧力損失が、流量約21kg/sで3.5kg/cm<sup>2</sup>であり、ここでもオフイスでの調整限界からこの値の+0.5kg/cm<sup>2</sup>以内に抑制する必要がある。

被覆管温度をMK-1と同等の675℃にキープするとき、集合体流量は約23kg/sに増加するので、ピン径を7.5mm程度に小さくしないと圧力損失制限を満足することが不可能である。ピン径が増すと圧力損失が大きくなるのは流路面積減少に伴う流速増加に起因している。

集合体流量がMK-1程度であれば（被覆管温度を高くすることになる）、ピン径が7.8mm程度となっても圧力損失制限はクリアできる。ラップ管対面間距離を1mm程度広げることも効果がある。

## 2.5 燃料仕様の設定

炉心性能を向上化する観点から炉心運転サイクルの増加を可能とする太径ピンを採用する立場をとるものとし、また燃料体積比向上方策として今後の設計、製造技術の進歩を想定し、ノミナル仕様としてペレット・被覆管キャップ<sup>°</sup>140μm、中心空孔径1.8mmとする。このとき選定しうる燃料の仕様を表2-11に示す。

## 2.6 結論

ピン径を7.55mm程度とする場合、被覆管温度がMK-1と殆ど同等で設計ができ許認可性が極めて高い設計結果を得ることができる見通しである。但し、燃焼サイクル期間はあまり長くすることはできない。

一方、ピン径をより太くすればサイクルの延長が可能である。この場合燃料被覆管許容温度を上げる必要があり、許認可取得に十分な対応が要求される。しかし改良オーステナイト鋼は実証炉での採用が予定されており、データ蓄積も今後期待できるので、成立見通しはあると考えられる。但し、燃料被覆管温度上昇は被覆管CDFの点で抑制が必要であり、今後熱設計手法の改良によるホットスポットファクタの低減が前提となる（被覆管最高温度を696から685℃へ低減）。

今後の検討のリファレンスとなる燃料仕様として、ピン径7.8mmと設定した。

表2-1 スミヤ密度、燃料体積比等のピン径依存

ピン径 (mm)	スミヤ密度 $\rho_s$ (%TD)	スミヤ燃料体積比 $Vf_s$ (%)	$\rho_s \times Vf_s$
7.5	80.7	34.64	2795.4
7.55	80.88	35.19	2846.2
7.6	81.05	35.75	2897.5
7.7	81.4	36.87	3001.2
7.8	81.73	38.0	3105.7
7.9	82.04	39.15	3211.9
8.0	82.34	40.32	3319.9

ペレット/クラッド間ギャップ 180  $\mu$ m

被覆管肉厚 0.58mm

中心空孔径 1.95mm

ペレット密度 95%TD

表2-2 スミヤ密度、燃料体積比等の被覆管肉厚依存

被覆管肉厚 (mm)	スミヤ密度 $\rho_s$ (%TD)	スミヤ燃料体積比 $Vf_s$ (%)	$\rho_s \times Vf_s$
0.58	80.88	35.19	2846.2
0.5	81.43	36.98	3011.3
0.45	81.76	38.12	3166.7
0.4	82.07	39.27	3222.9
0.35	82.37	40.44	3331.0

ペレット/クラッド間ギャップ 180  $\mu$ m

ピン径 7.55mm

中心空孔径 1.95mm

ペレット密度 95%TD

表2-3 スミヤ密度、燃料体積比等のペレット/クラッド間ギャップ依存性

ペレット/クラッド間 ギャップ (mm)	スミヤ密度 $\rho_s$ (%TD)	スミヤ燃料体積比 $Vf_s$ (%)	$\rho_s \times Vf_s$
100	83.2	35.19	2927.8
140	82.04	35.19	2887.0
180	80.88	35.19	2846.2

ピン径 7.55mm  
 被覆管肉厚 0.58mm  
 中心空孔径 1.95mm  
 ペレット密度 95%TD

表2-4 スミヤ密度、燃料体積比等の中心空孔依存性

中心空孔径 (mm)	スミヤ密度 $\rho_s$ (%TD)	スミヤ燃料体積比 $Vf_s$ (%)	$\rho_s \times Vf_s$
1.5	84.49	35.19	2973.2
1.8	82.19	35.19	2892.3
1.95	80.88	35.19	2846.2

ピン径 7.55mm  
 被覆管肉厚 0.58mm  
 パレット/クラッド間ギャップ 180 $\mu$ m  
 パレット密度 95%TD

表2-5 スミヤ密度、燃料体積比等のペレット密度依存性

ペレット密度 (%TD)	スミヤ密度 $\rho_s$ (%TD)	スミヤ燃料体積比 $Vf_s$ (%)	$\rho_s \times Vf_s$
93	79.17	35.19	2786.0
95	80.88	35.19	2846.2

ピン径 7.55mm

被覆管肉厚 0.58mm

ペレット/クラッド間ギャップ 180 $\mu$ m

中心空孔径 1.95mm

表2-6 燃料仕様候補案

燃料ビン本数/集合体		12本P/C キヤブ		.07 ヲハク管内厚 3 集合体間キヤブ		.5 被覆管内厚	
φ.4 中心空孔直径 1.8 燃料密度		95 %TD		cm <sup>3</sup> /kg		(mm)	
ビン径	7.55 mm						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	39.27	39.27	39.27	39.27	39.27	39.27	39.27
燃料体積比 (P)	34.87	34.87	34.87	34.87	34.87	34.87	34.87
スミア密度	84.34	84.34	84.34	84.34	84.34	84.34	84.34
P/R	34.86	27.89	20.92	13.95	10.47	6.98	3.50
VF*S密度	2940.75	2940.75	2940.75	2940.75	2940.75	2940.75	2940.75
目標	3646.66						
ビン径	7.6 mm						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	39.85	39.85	39.85	39.85	39.85	39.85	39.85
燃料体積比 (P)	35.44	35.44	35.44	35.44	35.44	35.44	35.44
スミア密度	84.47	84.47	84.47	84.47	84.47	84.47	84.47
P/R	31.66	24.69	17.72	10.75	7.26	3.78	0.29
VF*S密度	2993.50	2993.50	2993.50	2993.50	2993.50	2993.50	2993.50
目標	3646.66						
ビン径	7.7 mm						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	41.04	41.04	41.04	41.04	41.04	41.04	41.04
燃料体積比 (P)	36.59	36.59	36.59	36.59	36.59	36.59	36.59
スミア密度	84.72	84.72	84.72	84.72	84.72	84.72	84.72
P/R	25.25	18.28	11.31	4.34	0.86	-2.63	-6.11
VF*S密度	3100.24	3100.24	3100.24	3100.24	3100.24	3100.24	3100.24
目標	3646.66						
ビン径	7.8 mm						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23
燃料体積比 (P)	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77
スミア密度	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96
P/R	18.84	11.87	4.90	-2.07	-5.95	-9.03	-12.52
VF*S密度	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66
目標	3646.66						
ビン径	7.9						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	43.45	43.45	43.45	43.45	43.45	43.45	43.45
燃料体積比 (P)	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96
スミア密度	85.18	85.18	85.18	85.18	85.18	85.18	85.18
P/R	12.44	5.47	-1.50	-8.47	-11.96	-15.44	-18.93
VF*S密度	3318.75	3318.75	3318.75	3318.75	3318.75	3318.75	3318.75
目標	3646.66						
ビン径	8						
ワイヤ径 (MM)	1.00	1.10	1.20	1.30	1.35	1.40	1.45
燃料体積比 (S)	44.68	44.68	44.68	44.68	44.68	44.68	44.68
燃料体積比 (P)	40.17	40.17	40.17	40.17	40.17	40.17	40.17
スミア密度	85.40	85.40	85.40	85.40	85.40	85.40	85.40
P/R	6.03	-0.94	-7.91	-14.88	-18.36	-21.85	-25.33
VF*S密度	3430.50	3430.50	3430.50	3430.50	3430.50	3430.50	3430.50
目標	3646.66						

詳細

燃料ビン本数/集合体		12 P/C キヤブ		.07 ヲハク管内厚 3 集合体間キヤブ		.5 被覆管内厚	
φ.4 中心空孔直径 1.8 燃料密度		95					
ビン径	7.8						
ワイヤ径 (MM)	1.20	1.21	1.22	1.23	1.24	1.25	1.26
燃料体積比 (S)	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23
燃料体積比 (P)	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77
スミア密度	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96
P/R	4.90	4.21	3.51	2.81	2.12	1.42	0.72
VF*S密度	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66
目標	3646.66						
ビン径	7.8						
ワイヤ径 (MM)	1.27	1.28	1.29	1.30	1.31	1.32	1.33
燃料体積比 (S)	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23	42.23
燃料体積比 (P)	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77	37.77
スミア密度	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96	84.96
P/R	0.03	-0.67	-1.37	-2.07	-2.76	-3.46	-4.16
VF*S密度	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66	3208.66
目標	3646.66						

表2-7 CDF計算結果のまとめ

被覆温度	675℃				696℃	685℃
燃料寿命 日 月/サイクル	ピン径7.5 (mm) 肉厚0.4 (mm)	ピン径7.5 (mm) 肉厚0.3 (mm)	ピン径7.8 (mm) 肉厚0.4 (mm)	ピン径7.8 (mm) 肉厚0.45 (mm)	ピン径7.8 (mm) 肉厚0.4 (mm)	ピン径7.8 (mm) 肉厚0.4 (mm)
	912.5 (10)	0.026	0.161	0.023	0.013	0.168
1095.0 (12)	0.059	0.930	0.053	0.029	0.539	0.140
1368.8 (15)	0.178	95.05	0.159	0.080	17.37	0.565



表2-8 CDFの温度依存性

被覆管温度 (°C)	CDF
675	0.00227
685	0.05512
700	0.26698

ピン径                    7.80mm  
 被覆管肉厚            0.40mm  
 燃料寿命                912.5日

表2-9 CDF計算 SUS316相当鋼  
 被覆管最高温度675°C

燃料寿命 (日)	ピン径7.8mm 肉厚0.4mm	ピン径7.8mm 肉厚0.45mm
912.5	0.3397	0.1652
1095.0	0.9375	0.4380
1368.8	3.3530	1.4723

表2-10 燃料ピンバンドル圧力損失評価のまとめ

集合体流量(kg/s)	ピン径 7.8mm	ピン7.8mm ダクト+1mm	ピン径 7.65mm	ピン径 7.6mm	ピン径 7.55mm
5	0.326	0.288	0.277	0.263	0.251
10	1.15	1.02	0.977	0.93	0.887
15	2.4	2.13	2.04	1.95	1.85
20	4.06	3.59	3.45	3.28	3.13
22.2		4.34		3.97	3.79
25	6.09	5.39	5.18	4.93	4.7
30	8.49	7.51	7.21	6.87	6.55

kg/cm<sup>2</sup>

表2-11 燃料仕様候補案

項 目	仕 様
被覆管外径 (mm)	7.8
” 内径 (mm)	7.0
” 肉厚 (mm)	0.4
ペレット外径 (mm)	6.86
” 中心空孔径 (mm)	1.8
” 密度 (%TD)	95
ワイヤスペース径 (mm)	1.23
ピッチ/ピン径 (P/D)	1.16
ペレット/クラッド間 ギャップ (μm)	140
ラッパ管肉厚 (mm)	3
集合体間距離 (mm)	5

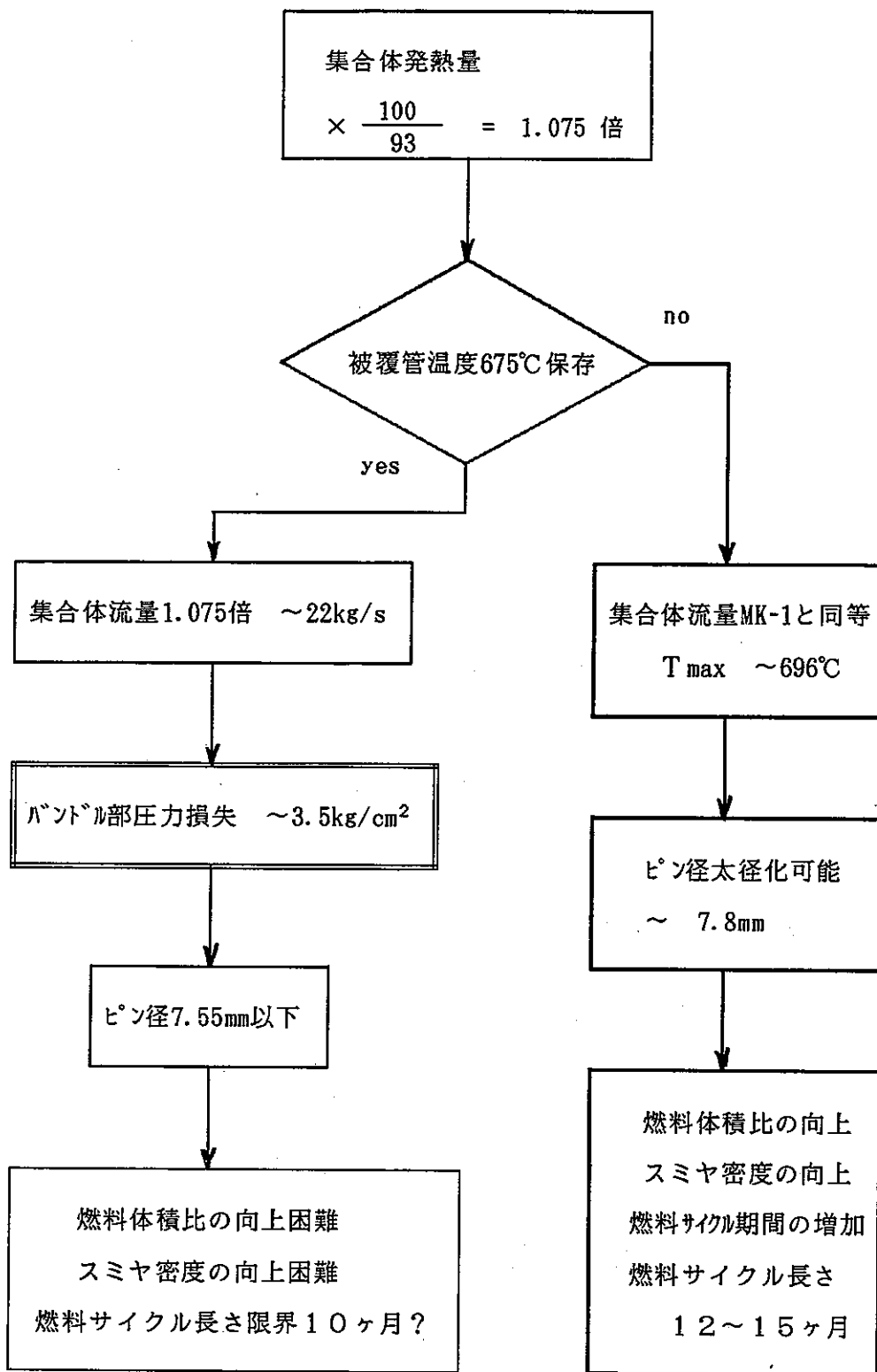


図2- 1 燃料仕様選定の考え方

体積比、スミヤ密度

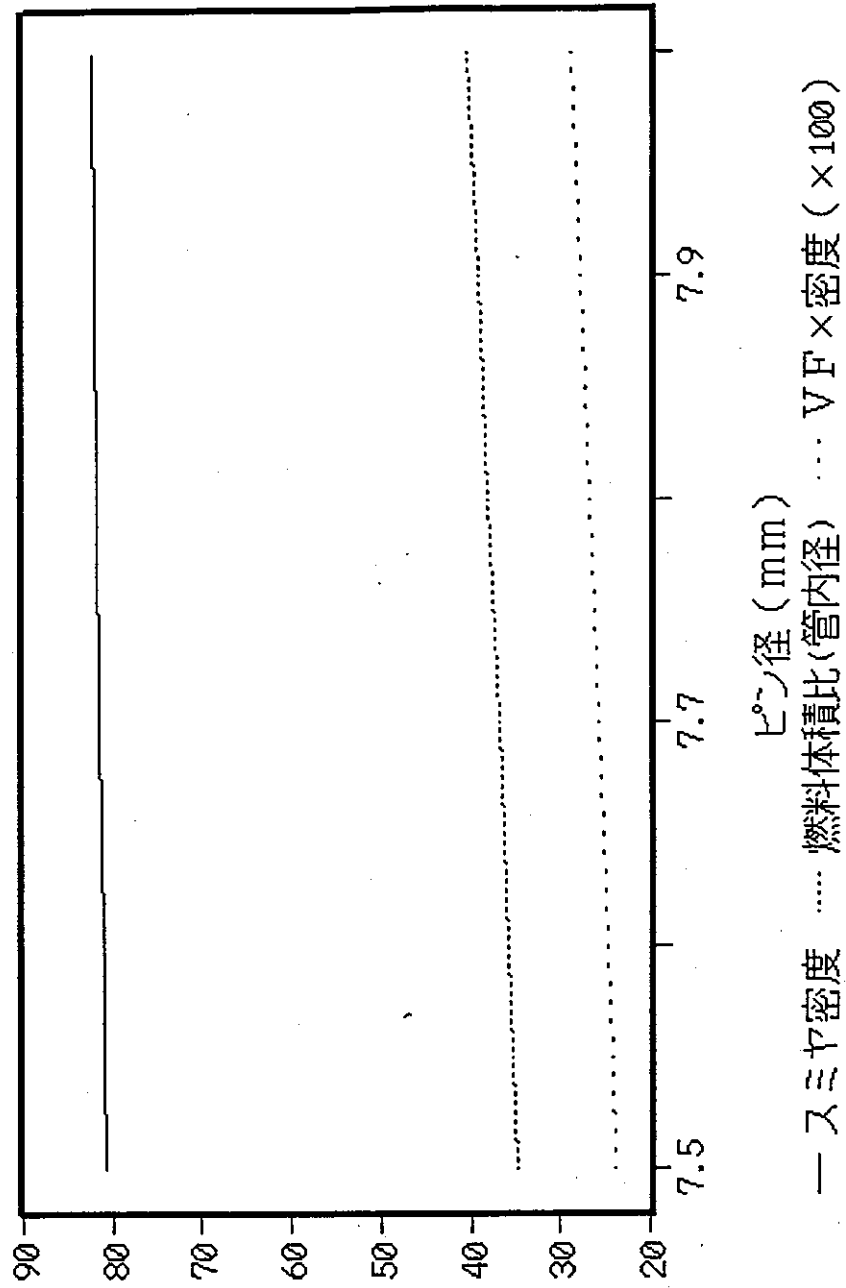


図2-2 燃料体積比, スミヤ密度のピン径依存性 管肉厚5.8mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%

体積比、スミヤ密度

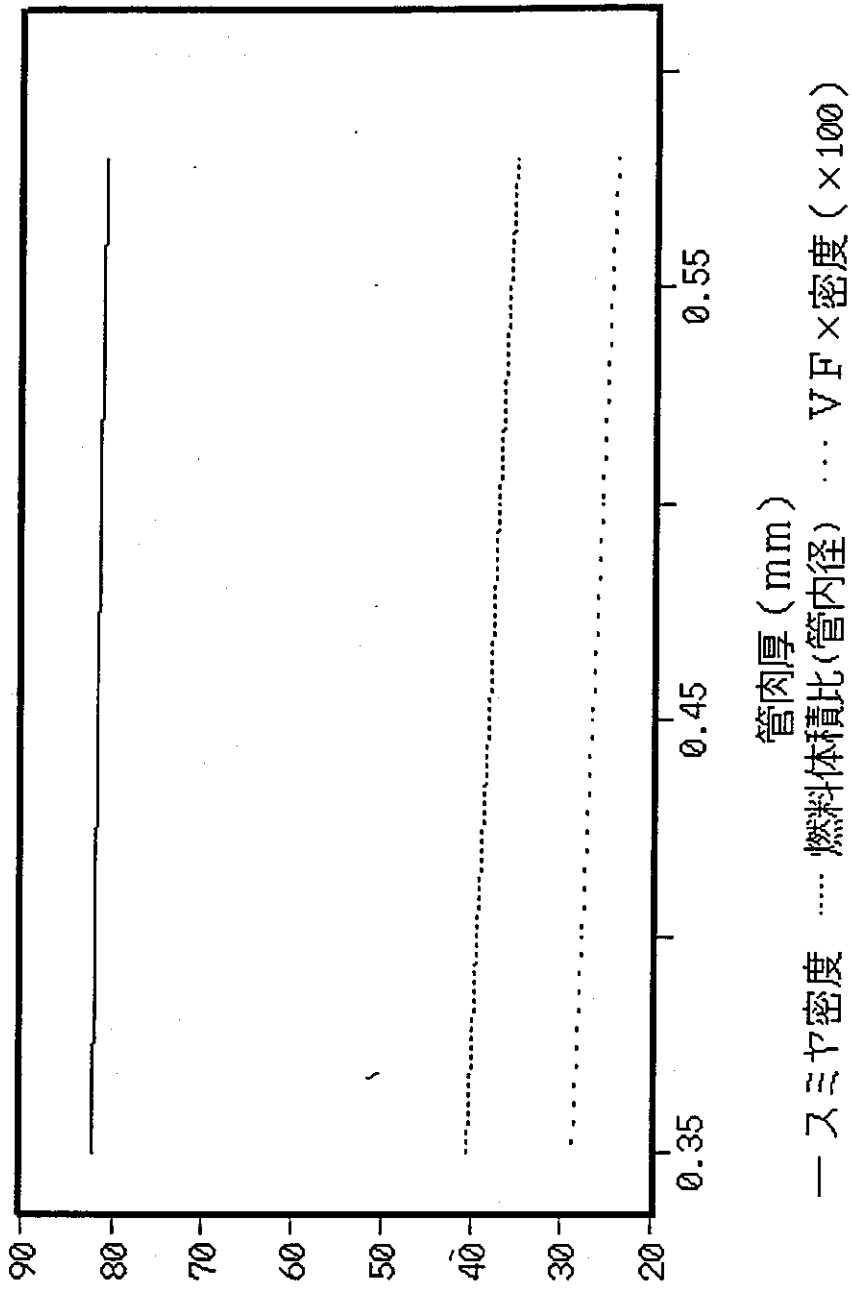


図2-3 燃料体積比、スミヤ密度の管肉厚依存性 ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%

体積比、スミヤ密度

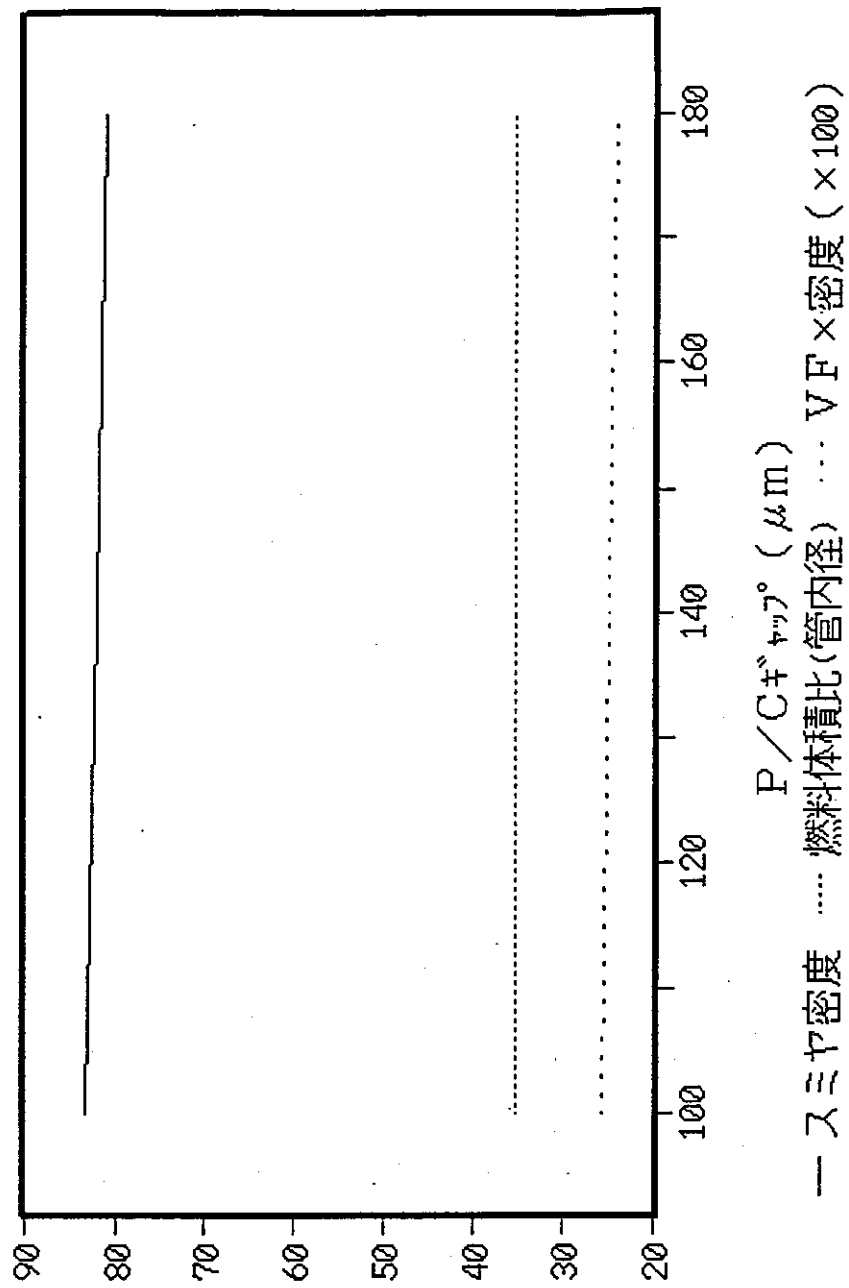


図2-4 燃料体積比, スミヤ密度のP/Cギャップ依存性    ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm, 密度95%

体積比、スミヤ密度

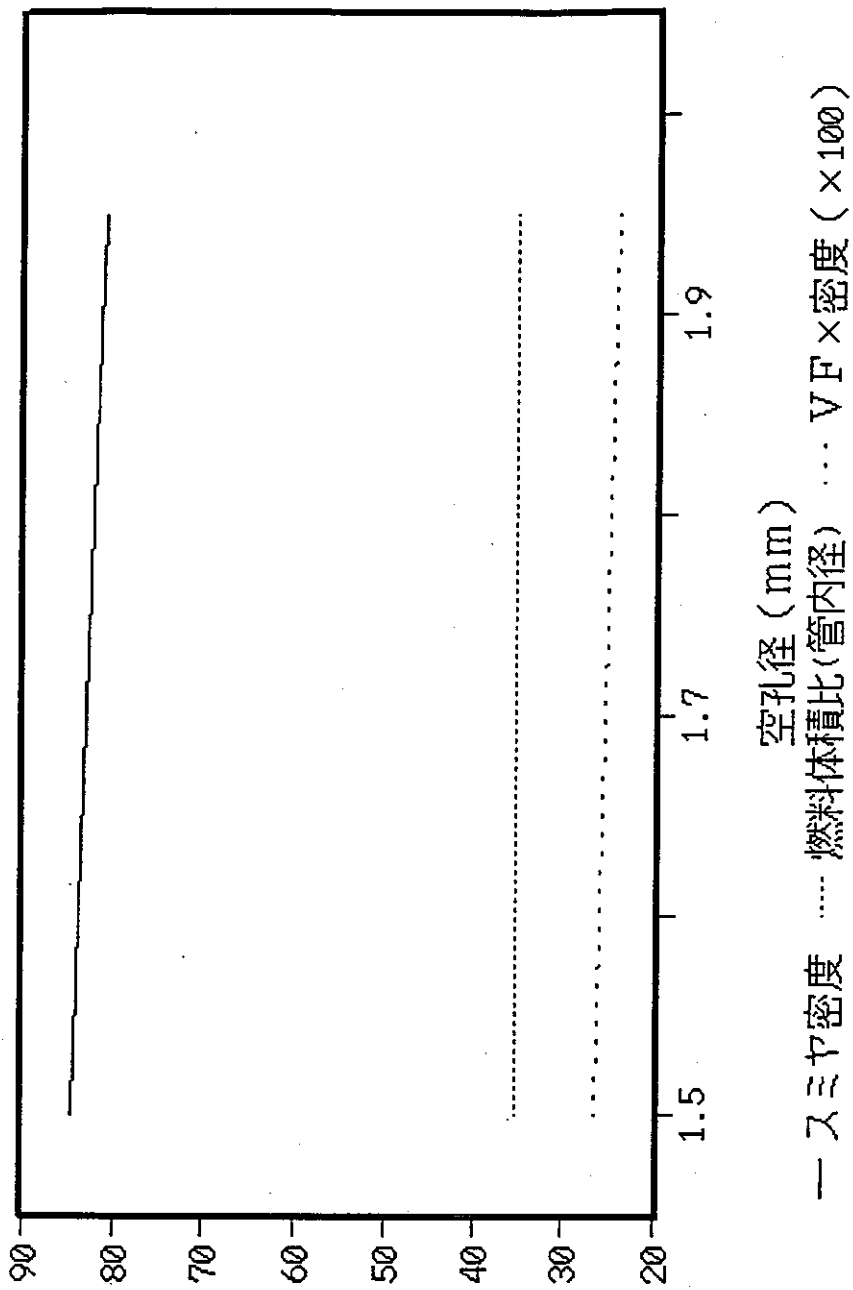


図2-5 燃料体積比, スミヤ密度の空孔径依存性    ピン径7.55mm, 密度95%



体積比、スミヤ密度

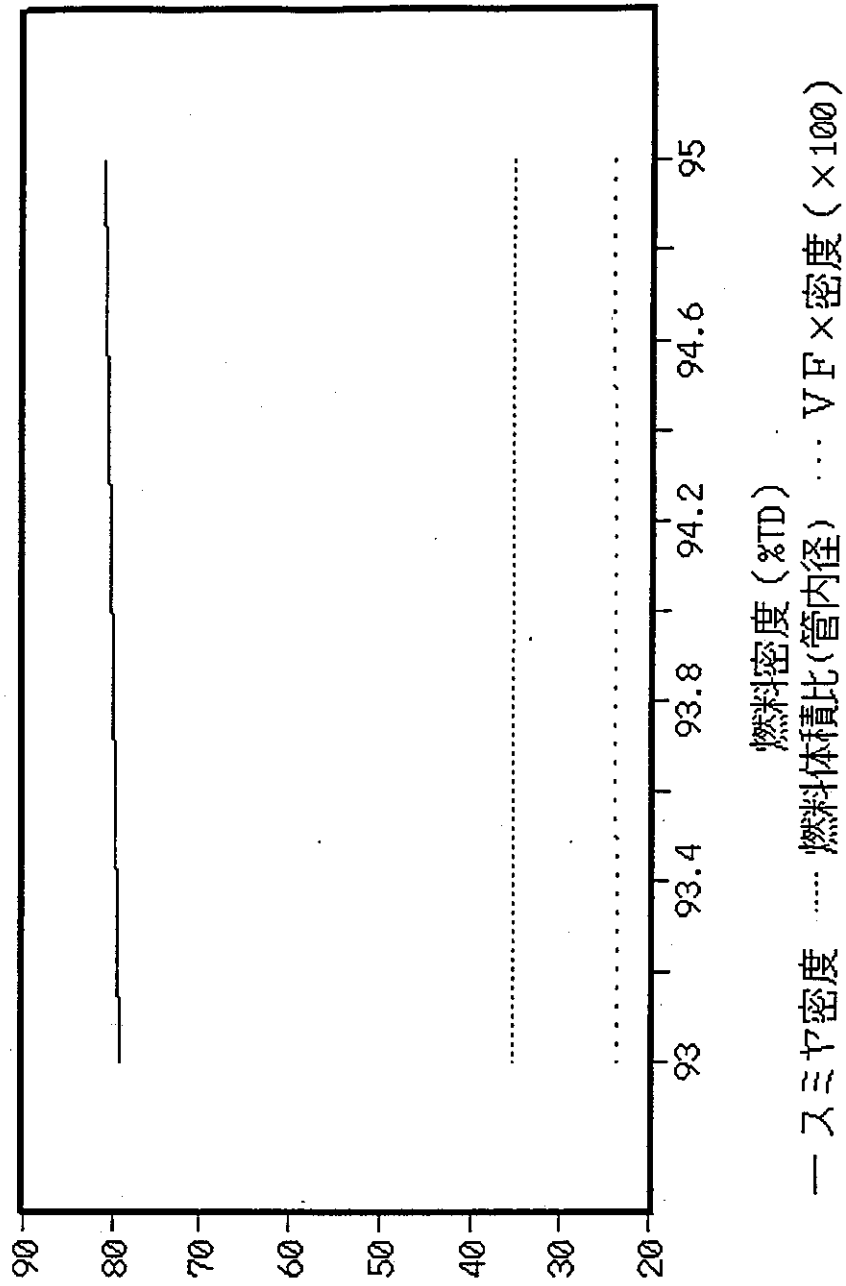
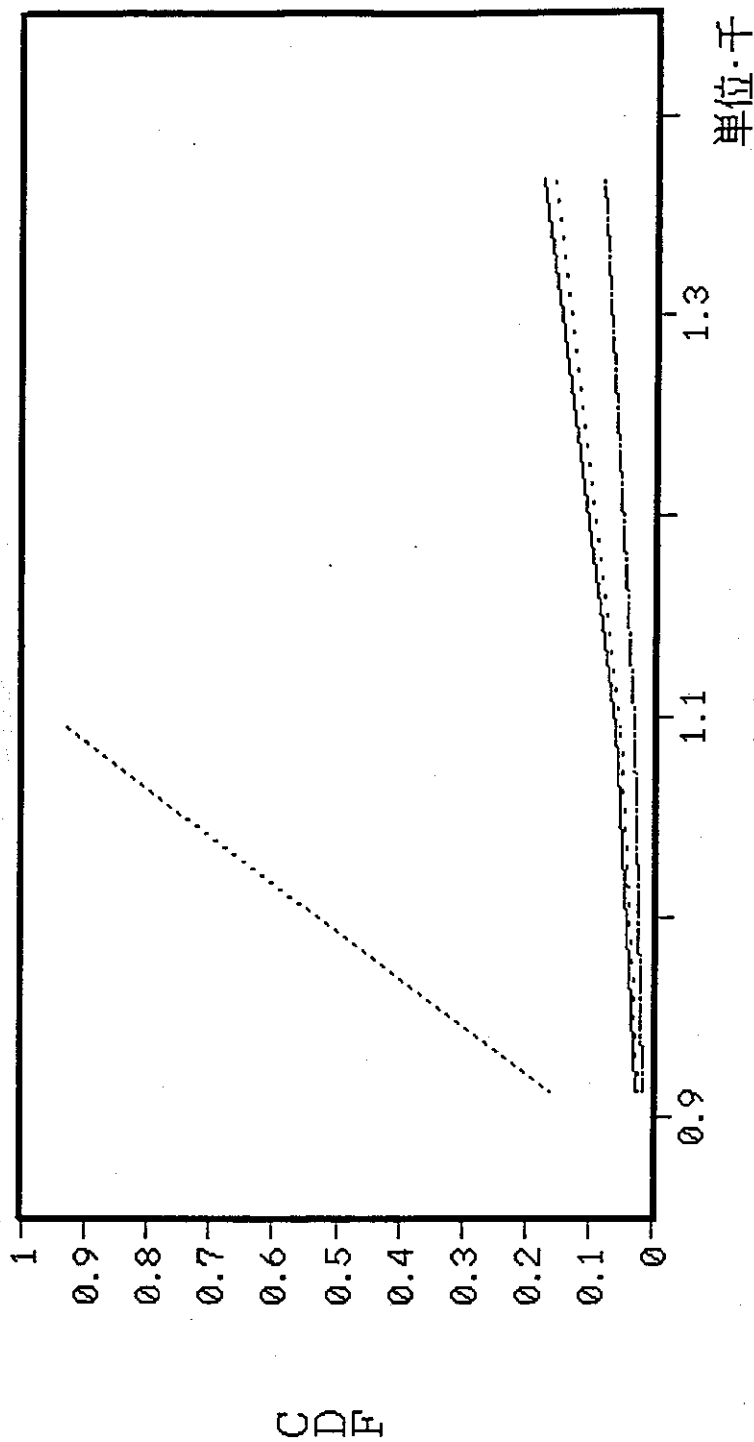


図2-6 燃料体積比、スミヤ密度の燃料密度依存性 ピン径7.55mm, 中心空孔径1.95mm



— ピン径7.5、肉厚0.4    ····· ピン径7.5、肉厚0.3    ····· ピン径7.8、肉厚0.4    - - - ピン径7.8、肉厚0.45

単位 mm

単位・千

燃料寿命 (日)

図2-7 CDFサーベイのまとめ 改良オーステナイト鋼  
(被覆管最高温度 675°C)

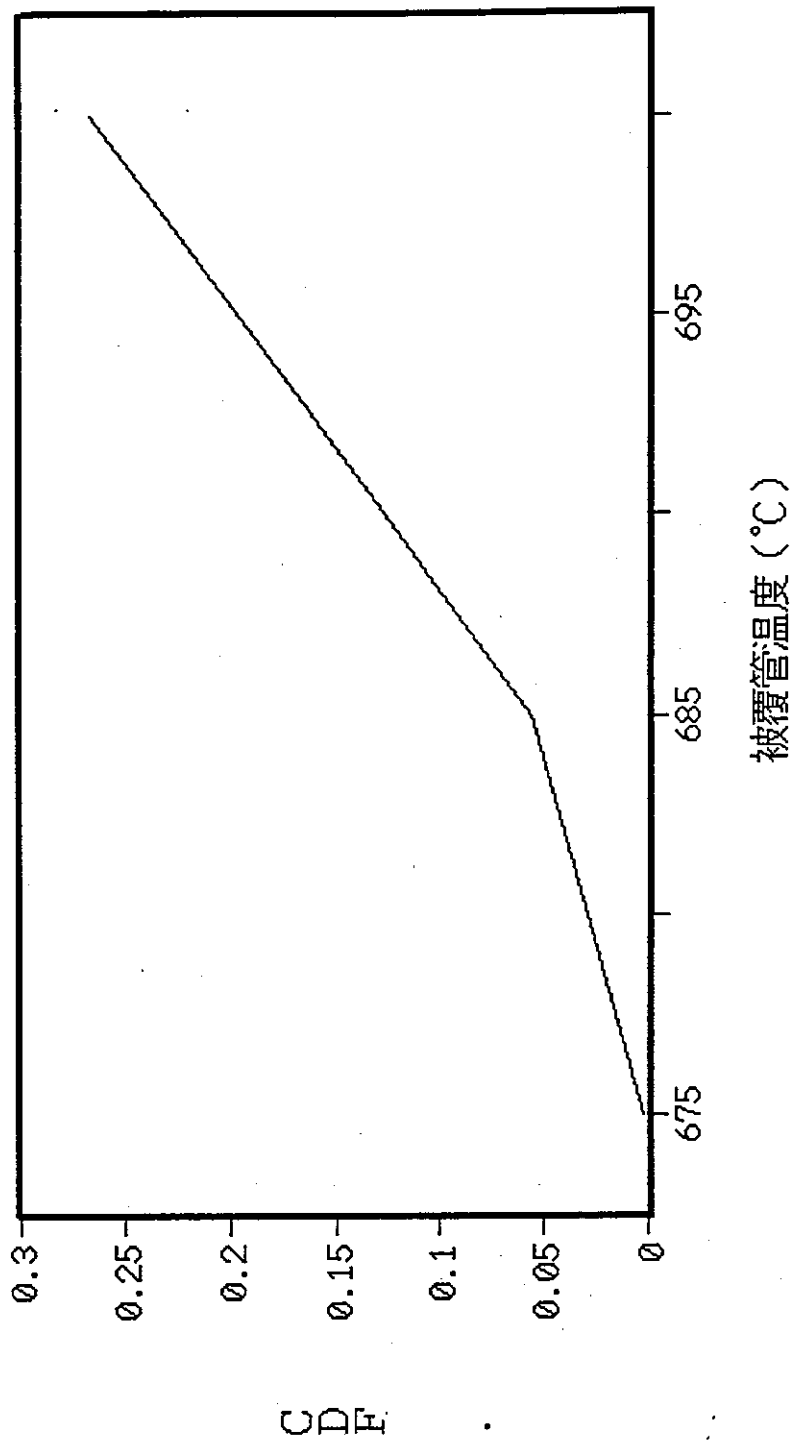
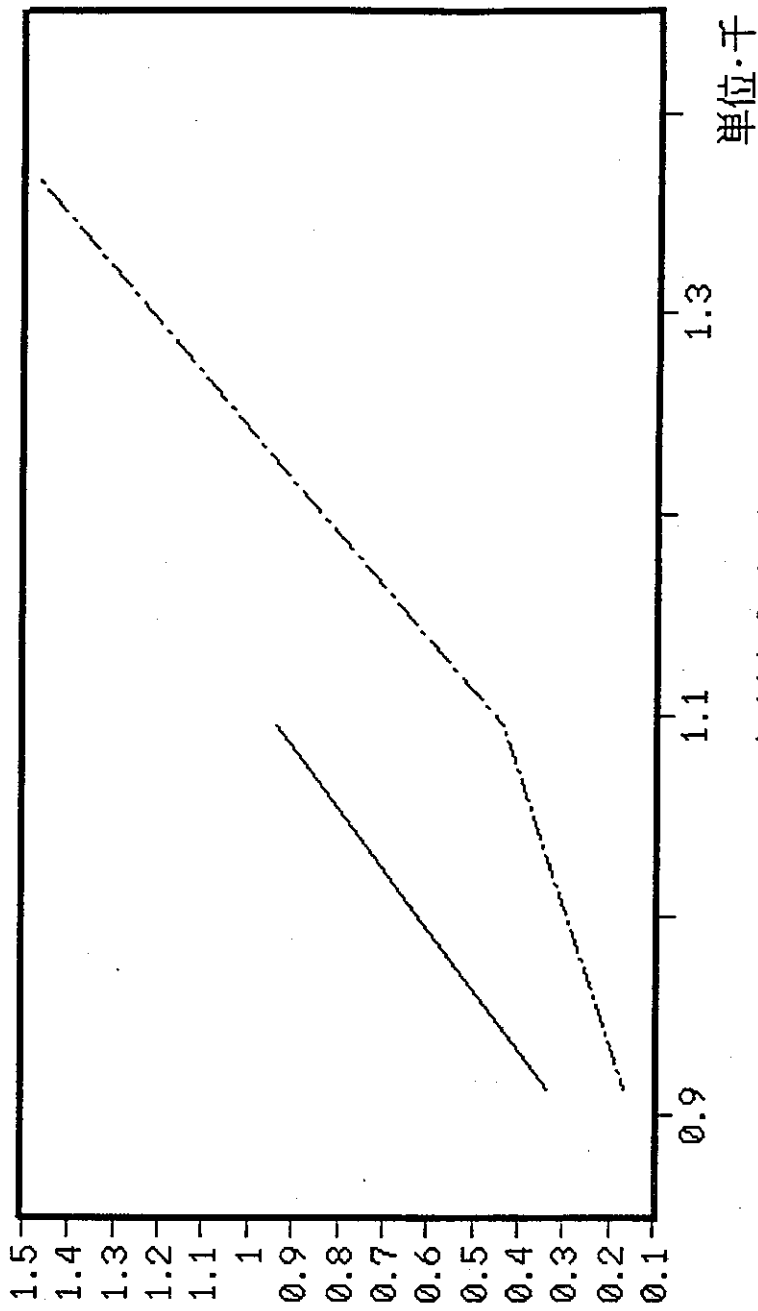


図2-8 CDFの温度依存性 ピン径7.8mm, 肉厚0.4mm, 改良オーステナイド鋼



燃料寿命 (日)

— ピン径7.8、肉厚0.4    ..... ピン径7.8、肉厚0.45

単位 mm

単位・千

図2-9 CDFサーベイ sus 316 相当鋼  
(被覆管最高温度 675°C)

CDF

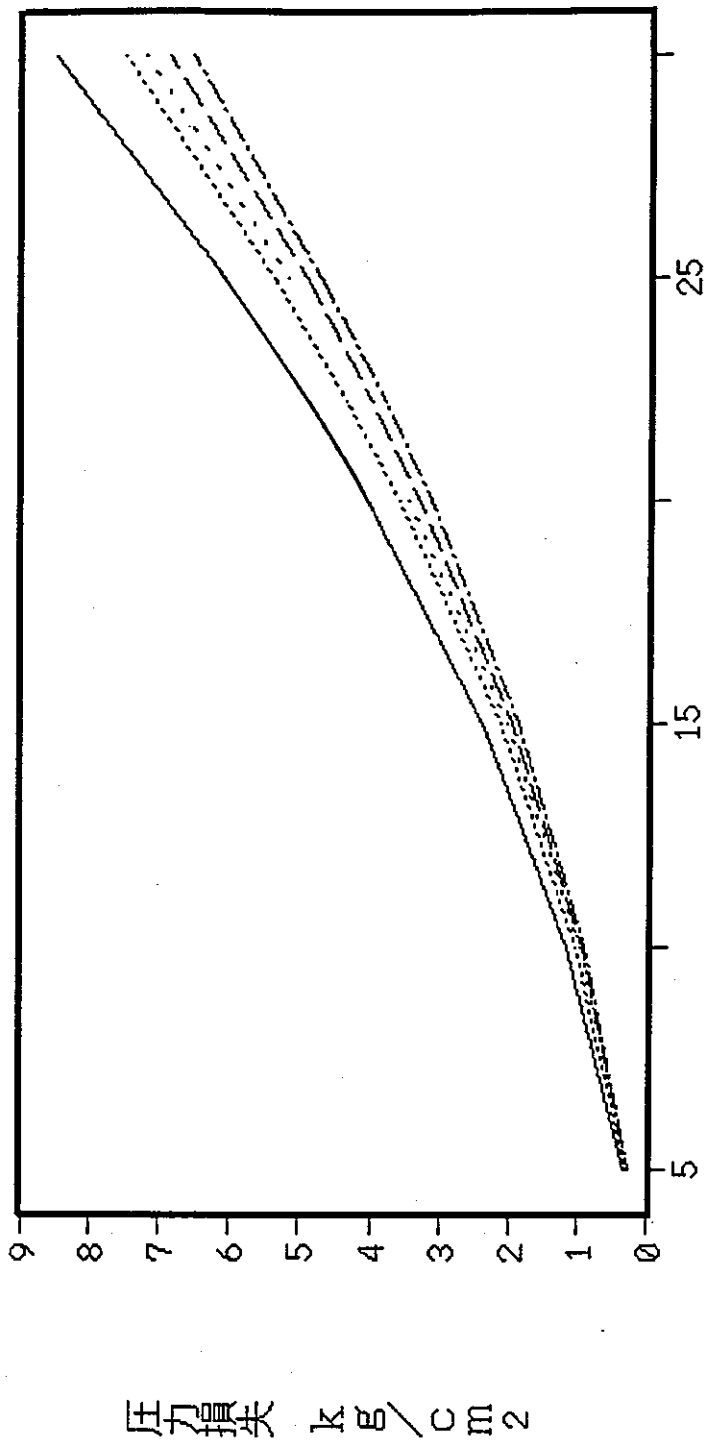


図2-10 ピンバンドル部圧力損失 ピン径の影響

### 3 炉心核特性の解析・評価

炉心の高度化の観点から、「線出力の向上」、「燃焼度の向上」、「照射試験能力の向上」を目標とした炉心特性の詳細評価として、炉心サーベイ計算によるMJ-MK 2 炉心の選定を行い、その選定炉心を対象に、制御棒反応度値解析及び反応度特性解析を実施した。

#### 3.1 炉心サーベイ計算

##### 3.1.1 前提条件

- (1) 最大線出力 480 W/cm 以下
- (2) 燃焼度 約10万MWd/t
- (3) ピン本数 127本/集合体 ← (太径ピンの採用)
- (4) 炉心高さ 100cm ← (特殊燃料集合体～20体装荷を想定)
- (5) 燃料密度 高密度
- (6) Pu組成  $\text{Pu}^{239}:\text{Pu}^{240}:\text{Pu}^{241}:\text{Pu}^{242}=58:24:14:4$

##### 3.1.2 サーベイ条件の設定

2章で実施した燃料仕様のサーベイ計算に基づき、サーベイ炉心の仕様を設定し、「もんじゅ」MK1標準炉心の仕様と比較し、表3.1-1に示した。

また同表に第3.2節で実施した燃料体積比検討サーベイ用の「PNC仕様」も併せて示した。

###### (a) 燃料ピン仕様の設定 (高密度、太径ピンの選定)

2章より、下記の燃料仕様が設定された。

- ① 高密度 スミア密度 : 85%
- ② 太径ピン : 7.8mm

###### (b) 燃料交換パターンの設定

サーベイ炉心の仕様にもとづき燃焼度10万MWd/tを満足させる燃料交換パターンを設定する。

MJ-MK1標準炉心の燃焼度を基に、まずサーベイ炉心の燃料滞在期間を設定する。

サーベイ炉心の炉心高さは、特燃装荷を考慮し100cmとする。

$$\frac{148 \times 5}{(5.56)^2 \times 169 \times 0.8 \times 93} \times \frac{10}{8} = \frac{N}{(7.0)^2 \times 127 \times 0.85 \times 100}$$

MJ-MK 1 標準炉心                      MJ-MK 2 サーベイ炉心

但し、N : MJ-MK 2 サーベイ炉心の燃料滞在期間とする。

これよりNは1259日となる。

バッチ数としては、下記より3バッチまたは4バッチが考えられる。

$$1259 \text{ 日} = (3 \text{ バッチ}) \times 420 \text{ 日} (\sim 13.8 \text{ カ月})$$

$$\text{又は} = (4 \text{ バッチ}) \times 315 \text{ 日} (\sim 10.4 \text{ カ月})$$

ここでは、燃焼欠損反応度を考慮し、燃料交換パターンは10ヵ月×4バッチに設定する。

### 3.1.3 主要解析条件

解析ケースは、特殊燃料集合体：無し／10体／20体の3ケースとする。

各ケースの炉心構成を図3.1-1～図3.1-3に示す。

また図3.1-4～図3.1-6に各ケースの2次元RZ全炉心体系を示す。

- (1) 炉心高さ                      : 100 cm
- (2) 燃焼度                        : 10万MWd/t
- (3) 運転サイクル                : 10ヵ月×4バッチ
- (4) 燃料集合体数
  - ・特燃本数                      : 0 / 10 / 20 (体)
  - ・ドライバー燃料 : 198 / 188 / 178 (体)
- (5) 特燃出力                      : 最大線出力の制限 (480W/cm)より、ドライバー燃料との出力比を0.3に設定。(表3.1-2参照)

### 3.1.4 解析手法及び結果

2次元RZ出力分布・燃焼解析によりサーベイ炉心の解析を行い、主要特性の結果を表3.1-3に、また最大線出力の内訳を表3.1-4にまとめた。

燃焼欠損反応度はMJ-MK1標準炉心(2.6% $\Delta k/k'$ )に比べ、特燃を装荷しないケースで約0.8% $\Delta k/k'$ 増加し、特燃を20体装荷したケースで、約1.3% $\Delta k/k'$ 増加した。

これは、MK2炉心では燃料の高密度化により、内部転換比は増加しているが一方、燃焼度が増大(燃料インベントリは増大しているが、燃焼サイクル期間が増加していることによる)している為、内部転換比の増加による燃焼欠損反応度の低減効果に比べ、燃焼度の増大による燃焼欠損反応度の増加の効果が大きい為である。

また、特燃本数の増加に伴って燃焼欠損反応度が増加しているのは、特燃本数の増加で燃料のインベントリが減り、燃焼度が増大すると、Pu富化度の増大により内部転換比が減少する事による。

この燃焼欠損反応度の増大に対する対応として以下の案が考えられる。

- ① 制御棒のB10重量を増加させる。
- ② 制御棒価値及び余剰反応度の設計余裕を見直す。

等

制御棒が制御すべき反応度(所要反応度)を、表3.1-5に示す。

このうち、下記の2項目については、以下のように見直す余地が残されている。

即ち、

- (1) 炉の反応度の誤差余裕の1.0% $\Delta k/k'$ については、これまでの経験並びに、MJ-MK2の時期までにはPu富化度の調整方法も向上していることを考慮すると、0.5% $\Delta k/k'$ 位まで低減出来ると予想される事。
- (2) 炉停止余裕の1.4% $\Delta k/k'$ は、設置許可上は1.0% $\Delta k/k'$ であり、すでに0.4% $\Delta k/k'$ の余裕を持っている事。

から、合計0.9% $\Delta k/k'$ までは、設計余裕の見直しで対応が可能である。

従って、燃焼欠損反応度が3.5% $\Delta k/k'$ を越える場合(表3.1-5より、特燃~5体以上に相当)は、制御棒のB10重量を増加させる事になる。

また中心制御棒(CCR)1体を、INTAに置き換えて、CCRが9体に減った場合でも、MJ-MK1標準炉心のCCRは、B10濃縮度に十分余裕がある為、濃縮度を上げてB10重量を増やすことで対応が可能である。



### 3.1.5 炉心高さの検討

#### (1) 線出力

炉心高さを100cmとしたサーベイ計算の結果得られた、各炉心毎の最大線出力データを基に、炉心高さを「MK1-標準炉心」並の93cmとした場合の、特燃の本数と最大線出力及び特燃の出力割合の関係を表3.1-6に示した。

また、図3.1-7に特燃本数と最大線出力の関係を示した。

同表より、最大線出力の制限(480W/cm以下)から下記の事がいえる。

- ① 特燃を3体装荷する場合、特燃の出力割合は0.3程度必要となる。
- ② 特燃を5体装荷する場合、特燃の出力割合は0.5程度必要となる。
- ③ 特燃を10体装荷する場合、特燃の出力割合は0.7も必要となる。

従って、炉心高さ93cmの場合、その他の設計余裕を考えると、特燃の装荷は難しいと考えられる。

#### (2) 燃焼度及び燃焼欠損反応度

炉心高さを「MK1-標準炉心」並の93cmとした場合、運転サイクルをサーベイ炉心と同じ(10ヵ月×4バッチ)とすると、燃料インベントリーが少なくなった分、燃焼度は増大する。

$$10\text{万MWd/t} \times \frac{100}{93} = 10.8\text{万MWd/t}$$

しかし同時に、燃焼欠損反応度も増大する。

燃焼度が10万MWd/t程度で良いのであれば、運転サイクルは下記より

$$\begin{aligned} 4\text{バッチ} \times 304\text{日}(10\text{ヵ月}) \times \frac{93}{100} &= 1131\text{日} : \text{炉内滞在日数} \\ &= (4\text{バッチ}) \times 283\text{日} (\sim 9.3\text{ヵ月}) \\ &= (3\text{バッチ}) \times 377\text{日} (\sim 12.4\text{ヵ月}) \end{aligned}$$

となる。

そこで、(3バッチ)×12ヵ月を採用した場合、燃焼度は10万MWd/tを多少下回る程度だが、燃焼欠損反応度は、サーベイ炉心の結果より大幅に増える。

(4バッチ)×9ヵ月の場合も燃焼度は10万MWd/tを多少下回るが、燃焼欠損反応度は大幅に増える事はない。

表3.1-1 MJ-MK2標準炉心の仕様及びサーベイ炉心の条件

	MJ-MK1	MJ-MK2 サーベイ炉心	
	標準炉心	設定仕様	PNC仕様
(1)熱出力	714MW (th)	714MW (th)	714MW (th)
(2)燃料滞在期間	740日	1216日 (*)	1216日 (*)
燃交パターン			
{ 炉心	148日×5バッチ	304日×4バッチ	304日×4バッチ
{ 径方向ブランケット	148日×5バッチ	304日×4バッチ	304日×4バッチ
(3)ピン仕様			
被覆管外径	6.5mm	7.8mm (太径ピン)	7.55mm
被覆管内径	5.56mm	7.0mm	6.39mm
肉厚	0.47mm	0.4mm	0.58mm
(4)炉心高さ	93cm	100cm	100cm
(5)ピン本数/集合体	169本	127本	127本
(6)ペレット仕様			
製作密度	85%TD	95%TD	95%TD
スミア密度	80%TD	85%TD (高密度)	85%TD (高密度)
(7)スミアの燃料体積比	28.43v%	35.90v%	33.38v%
(8)最大線出力	360W/cm	表3.1-3 (サーベイ炉心) 表3.2-1 (選定炉心)	表3.2-2

(\*) 取出平均燃焼度10万MWd/tを満足するよう設定

表3.1-2 特殊燃料集合体装荷時 最大線出力データ (予測)

(W/cm)

特燃 装荷本数(N)	出力割合 (f)	0.0	0.1	0.2	0.3
0 体		<u>4 4 6</u>	—	—	—
1 0 体		4 6 9	4 6 7	4 6 4	<u>4 6 2</u>
2 0 体		4 9 6	4 9 0	4 8 5	<u>4 7 9</u>

但し、  $360 \times 169 \times 93 \times 198 = Q \times 127 \times 100 \times \{(198 - N) + N \times f\}$

N : 特燃装荷本数

f : 特燃の出力割合 (通常ドライバー燃料 S/A に対する比)

Q : 特燃の最大線出力

表3.1-3 主要炉心特性一覧 (MJ-MK2 サーベイ炉心)

特殊燃料集合体体数			0体	10体	20体
Pu富化度 (w/o)			19.0 / 25.0	20.0 / 26.0	21.0 / 27.0
k <sub>eff</sub> *	BOEC		1.0473	1.0503	1.0518
	EOEC		1.0117	1.0115	1.0101
燃焼欠損反応度(%Δk/kk')			3.36	3.65	3.92
最大線出力 (W/cm)	BOEC	IC	441	456	480
		OC	392	403	413
	EOEC	IC	410	420	437
		OC	366	376	386
増殖比	BOEC		1.159	1.131	1.107
	EOEC		1.182	1.160	1.141
	(平均)		(1.17)	(1.15)	(1.12)
炉心部出力 (MWt)	BOEC	IC	388.42	388.10	388.61
		OC	260.30	259.51	257.83
		合計	648.72	647.61	646.44
	EOEC	IC	376.16	374.46	373.47
		OC	253.43	253.32	252.38
		合計	629.59	627.78	625.85
装荷時重金属 燃料インベントリ (kg)	IC		4350.289	4211.809	4072.315
	OC		3635.084	3495.604	3355.410
	合計		7985.373	7707.413	7427.725
炉心部取出平均燃焼度 (MWd/t)			9.73×10 <sup>4</sup>	10.06×10 <sup>4</sup>	10.41×10 <sup>4</sup>

\* Naフローア体系

表3.1-4 最大線出力 (MJ-MK2 サーベイ炉心)

特殊燃料 集合体体数	時期	領域	最大出力密度 (W/cc) (領域)	B. U. F.	最大線出力 (W/cm)
0体	BOEC	IC	440 (R3)	1.1006	441
		OC	384 (R39)	1.1193	392
	EOEC	IC	414 (R3)	1.0852	410
		OC	363 (R39)	1.1070	366
10体	BOEC	IC	450 (R3)	1.1137	456
		OC	392 (R39)	1.1258	403
	EOEC	IC	420 (R3)	1.0959	420
		OC	370 (R39)	1.1131	376
20体	BOEC	IC	467 (R3)	1.1276	480
		OC	400 (R39)	1.1319	413
	EOEC	IC	433 (R3)	1.1075	437
		OC	378 (R39)	1.1188	386

表 3.1 - 5 制御棒の必要反応度

単位：%Δk / k k'

高燃焼度炉心

系 統 制 御 棒 (本数) 必 要 反 応 度		主 炉 停 止 系			後 備 炉 停 止 系
		粗調整棒 (10本)	微調整棒 (3本)	主炉停止系 (12本)	後備炉停止系 (6本)
内 訳	出力補償 (0~30%出力)	1.16/1.10	—	1.16/1.10	1.16/1.10
	出力補償 (30~102%出力)	—	0.67/0.63	0.67/0.63	0.67/0.63
	燃焼補償	2.6	—	2.6	—
	反応度の誤差余裕	1.0	—	1.0	—
	運転余裕	—	0.3	0.3	—
	炉停止余裕	1.4	—	1.4	1.4
合 計		6.16/6.10	0.97/0.93	7.13/7.03	3.23/3.13

(上段/下段：初装荷炉心/平衡炉心)

表3.1-6 特燃装荷本数と最大線出力の関係 (サーベイに基づく予測値)

—— 炉心高さを100 cmから93 cmにした場合 ——

(W/cm)

特燃装荷本数 (N)	特燃出力割合 (f)			線出力の制限 ( $\leq 480/\text{cm}$ ) を満足する f
	0.0	0.3	0.5	
0 体	474 (441)	—	—	—
1 体 (*)	477	476	475	f = 0.0
2 体 (*)	<u>479</u>	478	477	f = 0.0
3 体 (*)	481	<u>479</u>	478	f = 0.3
5 体 (*)	486	483	<u>480</u>	f = 0.5
10 体	498	490 (456)	485	f = 0.7
20 体	534	516 (480)	505	Hc=93cm では 特燃装荷不可

( ) 内はサーベイ炉心 (炉心高さ100 cm) の最大線出力値 (解析結果)

但し、

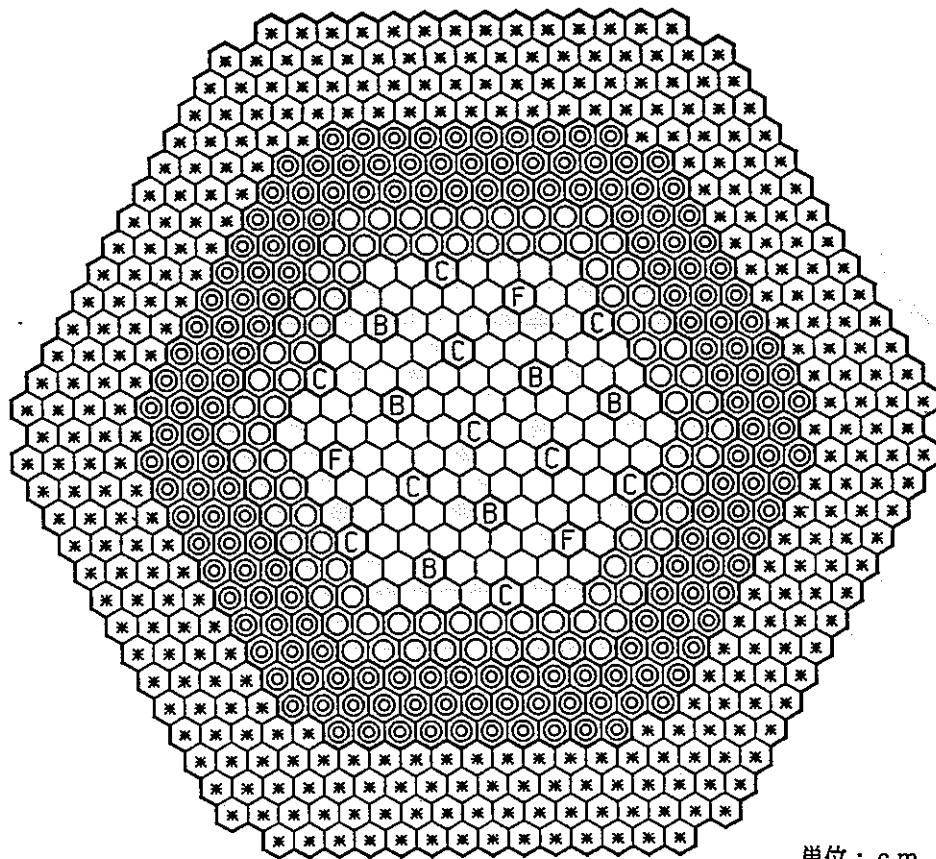
N : 特燃装荷本数

f : 特燃の出力割合 (通常ドライバー燃料 S/A に対する比)

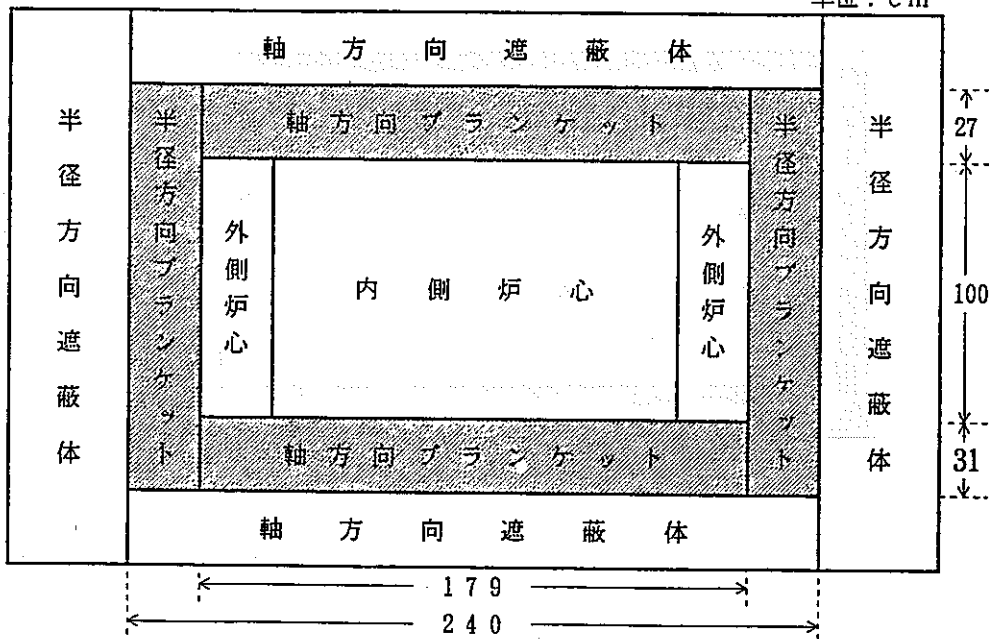
Q : 特燃の最大線出力

(\*) 特燃0体のサーベイ炉心の最大線出力より算出

$$441 \times 100 \times 198 = Q \times 93 \times [(198 - N) + N \times f]$$



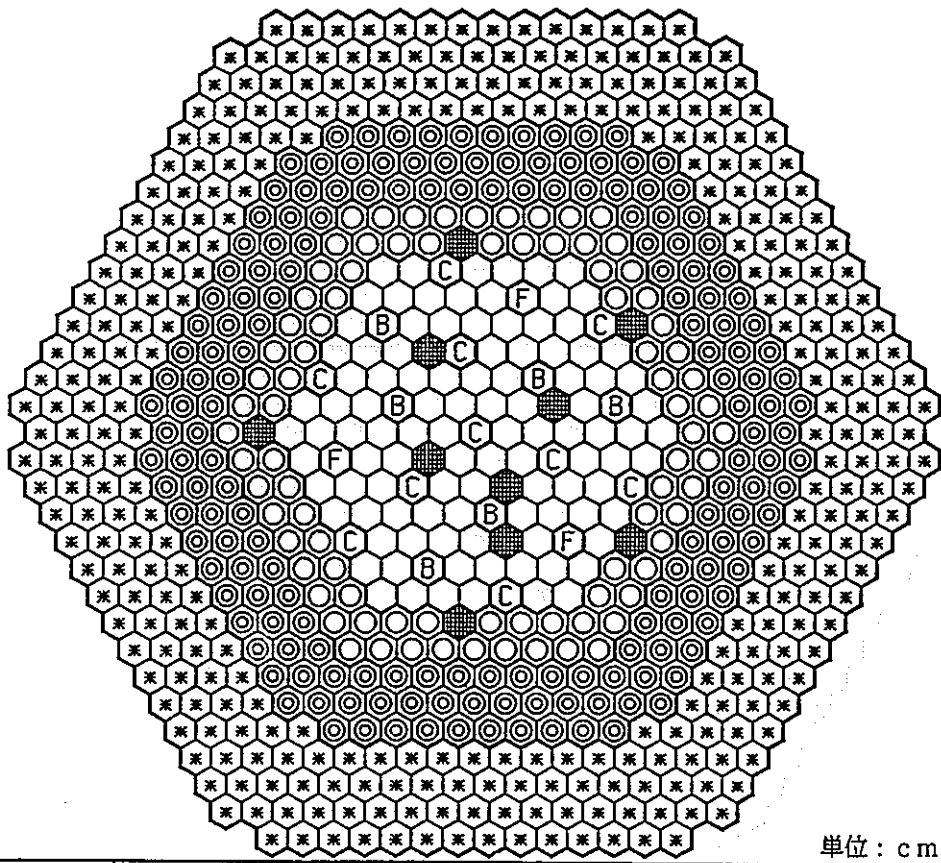
単位：cm



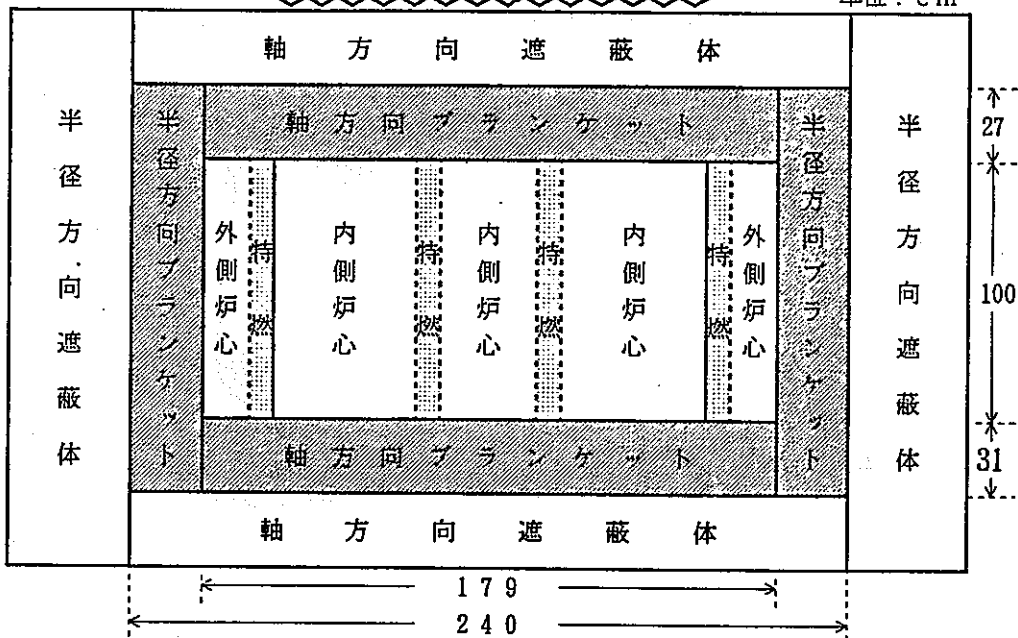
	内側炉心	108体	198体
	外側炉心	90体	
	微調整棒	3体	
	粗調整棒	10体	
	後備炉停止棒	6体	
	半径方向ブランケット	172体	
	半径方向遮蔽体	324体	

図3.1-1 炉心構成図 (特殊燃料集合体なし)



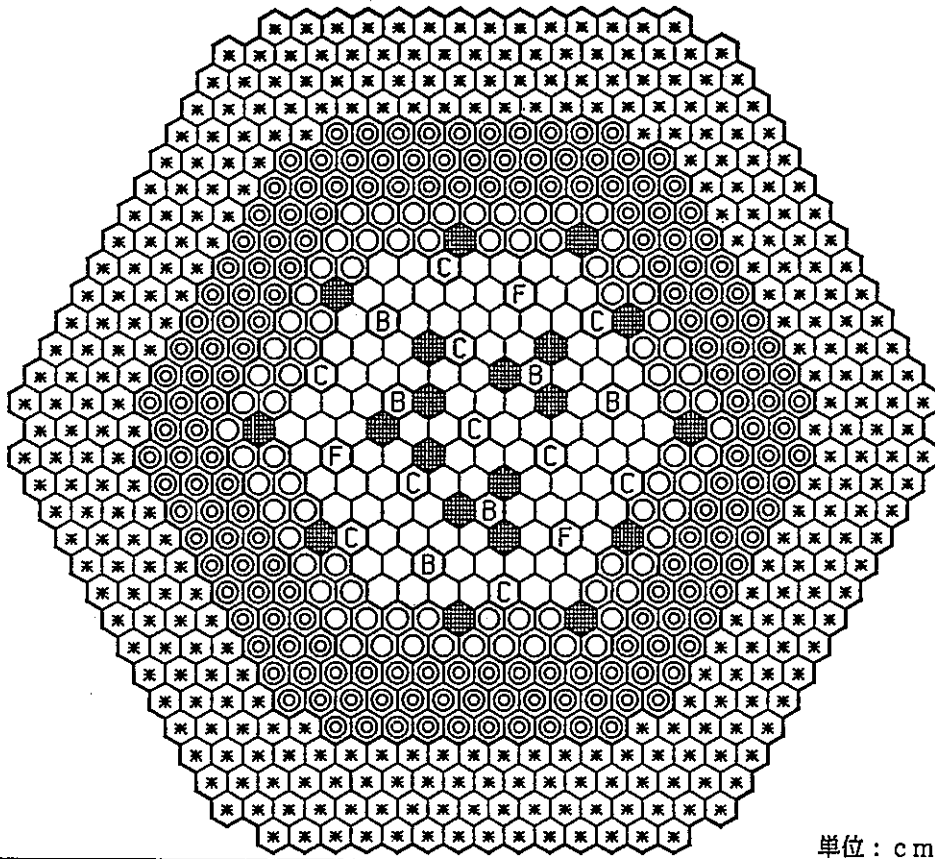


単位：cm

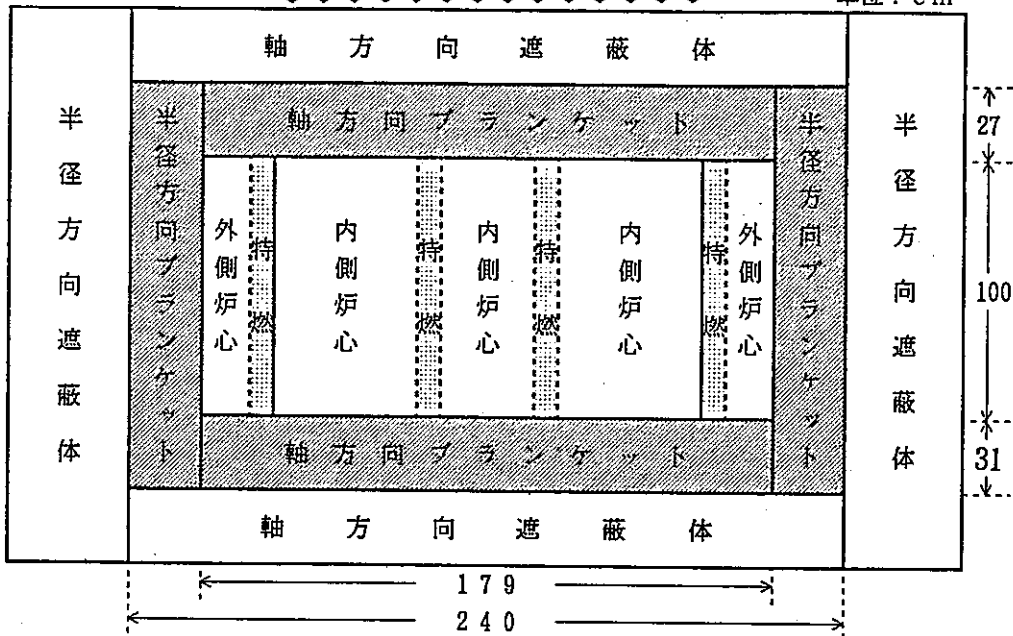


	内側炉心	103体	188体
	外側炉心	85体	
	微調整棒	3体	
	粗調整棒	10体	
	後備炉停止棒	6体	
	半径方向ブランケット	172体	
	半径方向遮蔽体	324体	
	特殊燃料集合体	10体	

図3.1-2 炉心構成図 (特殊燃料集合体10体)



単位：cm



	内側炉心	98体	178体
	外側炉心	80体	
	微調整棒	3体	
	粗調整棒	10体	
	後備炉停止棒	6体	
	半径方向ブランケット	172体	
	半径方向遮蔽体	324体	
	特殊燃料集合体	20体	

図3.1-3 炉心構成図 (特殊燃料集合体20体)

1 ~ 36 : 内側炉心 49 66, 99 ~ 110 : 半径方向ブラケット 111 ~ 115 : 遮蔽体  
 37 ~ 48 : 外側炉心 67 ~ 98 : 軸方向ブラケット 116 ~ 139 : C/R又はCRP

集合体数  
 48 - 198.0

3\*6.667

45 - 178.0

2\*4.5

43 - 169.0

1\*4.5

42 - 164.5

3\*4.0

39 - 152.5

1\*1.5

38 - 151.0

1\*1.5

37 - 149.5

4\*3.8

33 - 134.3

1\*4.174

32 - 130.2

1\*4.175

31 - 126.0

2\*4.175

29 - 117.6

1\*4.175

28 - 113.5

2\*4.175

26 - 105.1

1\*4.1

25 - 101.0

4\*4.1625

21 - 84.4

4\*4.1625

17 - 67.7

4\*3.8

13 - 52.5

1\*1.5

12 - 51.0

1\*1.5

11 - 49.5

3\*4.5

8 - 36.0

4\*4.0

4 - 20.0

3\*6.667

1 - 0.0

113												115						
122	70	74	78	130	78	82	86	139	90	94	98	102	106	110	114			
	69	73	77	129	77	81	85	138	89	93	97	101	105	109				
121	6	12	18	128	18	24	30	137	36	42	48	54	60	66				
120	5	11	17	127	17	23	29	136	35	41	47	53	59	65				
119				126				135										
118				125				134										
117	4	10	16	124	16	22	28	133	34	40	46	52	58	64				
	3	9	15		15	21	27		33	39	45	51	57	63				
116	2	8	14	123	14	20	26		32	38	44	50	56	62				
	1	7	13		13	19	25	181	31	37	43	49	55	61				
	68	72	76		76	80	84		88	92	96	100	104	108				
	67	71	75		75	79	83		87	91	95	99	103	107				
112												111						

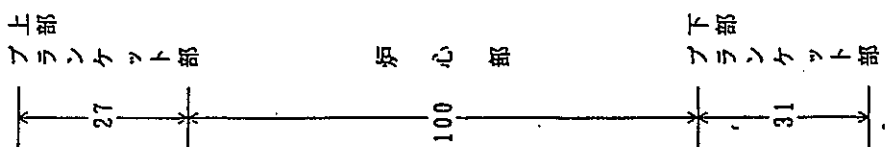
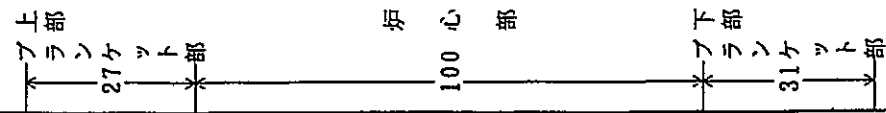


図3.1-4 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体なし)

- 2 - 0.0
- 3\*2.0231
- 5 - 6.069
- 8 - 16.058
- 2\*5.19895
- 10 - 26.456
- 2\*1.16105
- 12 - 28.778
- 2\*1.8067
- 14 - 32.992
- 2\*2.26365
- 16 - 36.919
- 2\*5.24245
- 18 - 47.404
- 2\*4.2766
- 20 - 55.957
- 2\*1.91
- 22 - 59.777
- 2\*4.31105
- 24 - 68.399
- 2\*5.25175
- 26 - 78.903
- 2\*5.2529
- 28 - 89.408
- 1\*1.5
- 29 - 90.908
- 3\*3.00237
- 32 - 99.915
- 3\*3.50273
- 35 - 110.424
- 3\*3.1972
- 38 - 120.015
- 4\*5.0
- 42 - 140.015

1~36: 内側炉心  
 37~48: 外側炉心  
 142~147, 152~157: 特殊燃料  
 49~66, 99~110: 半径方向ブランクケット  
 67~98: 軸方向ブランクケット  
 140~141, 148~151, 158~159: 軸方向ブランクケット (特殊燃料上下位置)  
 111~115: 遮蔽体  
 116~139: C/R又はCRP

集合体数	(1)	(6)	(12)	(5)	(6)	(7)	(24)	(24)	(12)	(30)	(5)	(37)	(48)	(54)	(60)	(60)	(141)
48-198.0	122	70	74	149	130	78	82	86	139	90	159	94	98	102	106	110	115
45-178.0		69	73	148	129	77	81	85	138	89	158	93	97	101	105	109	
43-169.0	121	6	12	147	128	18	24	30	187	36	157	42	48	54	60	66	
42-164.5		5	11	146	127	17	23	29	136	35	156	41	47	53	59	65	
39-152.5		4	10	145	126	16	22	28	135	34	155	40	46	52	58	64	111
38-151.0		3	9	144	125	15	21	27	134	33	154	39	45	51	57	63	
37-149.5		2	8	143	124	14	20	26	133	32	153	38	44	50	56	62	
33-134.3		1	7	142	123	13	19	25	132	31	152	37	43	49	55	61	
32-130.2	116	68	72	141		76	80	84	131	88	151	92	96	100	104	108	
31-126.0		67	71	140		75	79	83		87	150	91	95	99	103	107	
29-117.6																	
28-113.5																	
26-105.1																	
25-101.0																	
(炉中心)																	
21-84.4																	
17-67.7																	
13-52.5																	
12-51.0																	
11-49.5																	
8-36.0																	
4-20.0																	
1-0.0																	



2 - 0.0  
 3\*2.0231  
 5 - 6.069  
 3\*3.3296  
 8 - 16.058  
 2\*5.19895  
 10 - 26.456  
 2\*1.63899  
 12 - 29.734  
 2\*1.75481  
 14 - 33.244  
 2\*1.83768  
 16 - 36.919  
 2\*5.24245  
 18 - 47.404  
 2\*4.2766  
 20 - 55.957  
 2\*1.91  
 22 - 59.777  
 2\*4.31105  
 24 - 68.399  
 1\*1.33344  
 25 - 69.732  
 2\*4.58508  
 27 - 78.903  
 2\*5.2529  
 29 - 89.408  
 1\*1.5  
 30 - 90.908  
 3\*3.00237  
 33 - 99.915  
 3\*3.50273  
 36 - 110.424  
 3\*3.1972  
 39 - 120.015  
 4\*5.0  
 43 - 140.015

図3.1-5 2次元RZ金炉心体系 (特殊燃料集合体10体)



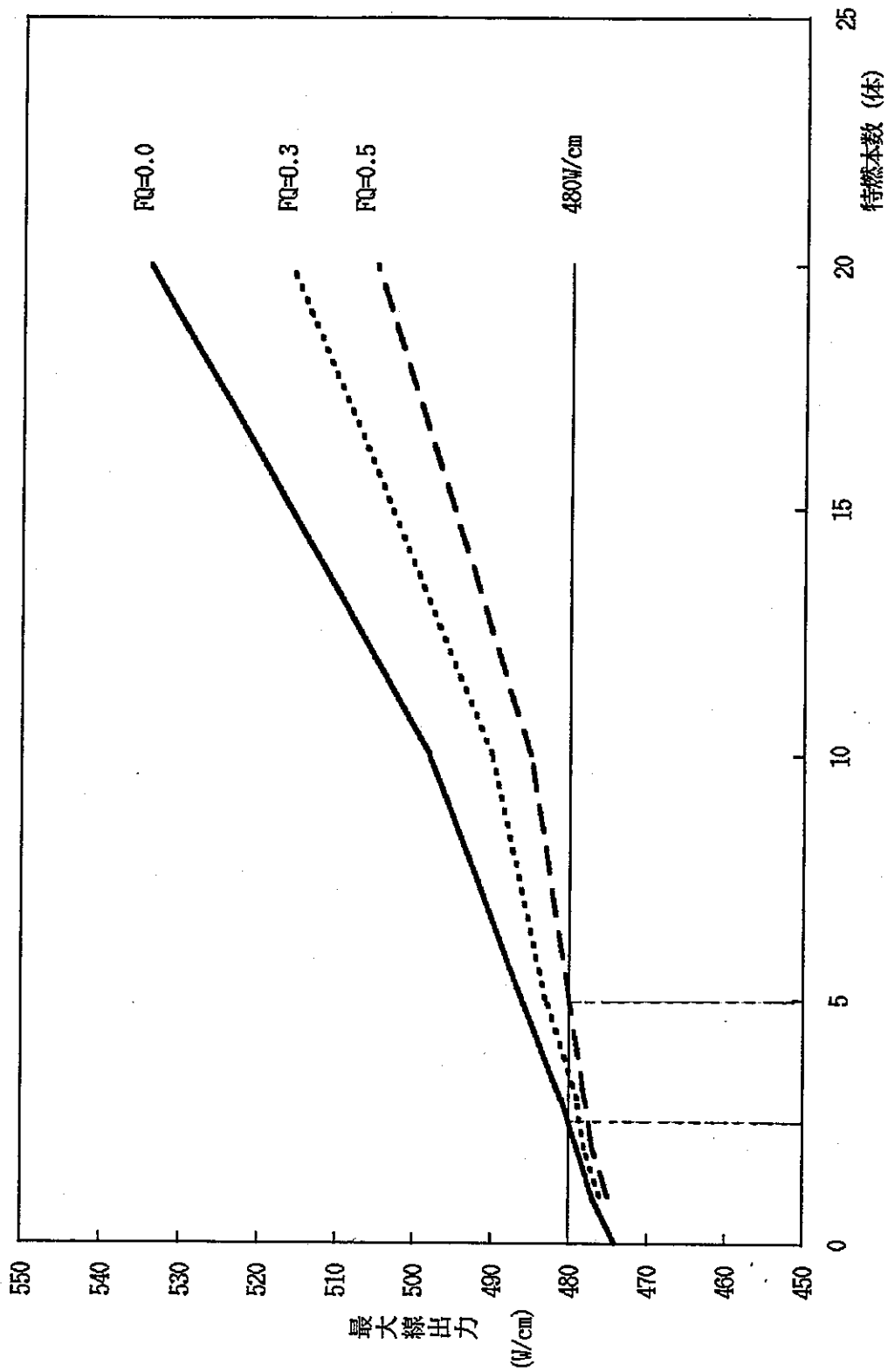


図3.1-7 待燃本数と最大線出力 (予測値) の関係 (炉心高さ 9.3 cm の場合)

### 3.2 選定炉心の出力分布・燃焼解析

#### 3.2.1 選定炉心の主要特性解析

3.1節のサーベイ計算に基づき、MK 2の選定炉心として、炉中心にINTAを1体、炉心部に特殊燃料集合体を全部で9体装荷することとした。

この選定したMK 2炉心及びMK 1標準炉心の出力分布・燃焼解析を、2次元RZ体系で行い、その主要炉心特性を比較しまとめた。

##### (1) 炉心構成

比較用にMK 1標準炉心の炉心構成を図3.2-1に示す。

MK 2選定炉心は、炉中心にINTAを1体、炉心部に特殊燃料集合体を9体装荷する炉心構成である。

特燃9体の装荷パターンとして、内側炉心に6体、外側炉心に3体装荷する場合の炉心構成を図3.2-2に、内側炉心に3体、外側炉心に6体装荷する場合の炉心構成を図3.2-3に示す。

##### (2) 主要条件 (MK 2選定炉心)

炉心高さ : 100 cm

燃焼度 : 10万MWd/t

運転サイクル : 10ヵ月×4バッチ

燃料集合体数 : 198体

特殊燃料	:	9体	}	内側炉心 : 6体
				外側炉心 : 3体
ドライバー燃料	:	189体		

中心集合体 : INTA

計算モデル : 2次元RZ体系

}	MK 1標準炉心	.....	図3.2-4
	MK 2選定炉心	.....	図3.2-5

### (3) 解析結果のまとめ

MJ-MK 2 選定炉心の主要炉心特性を、MJ-MK 1 標準炉心と比較して、表 3.2-1 にまとめた。MJ-MK 2 選定炉心は、炉心の目標性能（最大線出力：480W/cm以下、炉心部取出平均燃焼度：10万MWd/t）をいずれも満足した。MJ-MK 2 選定炉心の燃焼欠損反応度は3.6% $\Delta k/kk'$  となり、MJ-MK 1 標準炉心より約1% $\Delta k/kk'$  増加した。

3.1.4の考察から、制御棒のB-10重量を増加させる必要がある。

### 3.2.2 燃料体積比の検討

2章で検討した燃料仕様の中から、スミアの燃料体積比が選定炉心の仕様に比べ、2.5%少ない「PNC仕様」で炉心の主要特性を解析し、燃料体積比の影響を調べた。表 3.2-2 に主要特性をまとめて示した。

Pu富化度を選定炉心と同一にしたケースの結果を同表の左欄に、Pu富化度調整後の結果を右欄に示した。

選定炉心の主要特性（表 3.2-1）と比較すると、次のことがいえる。

「PNC仕様」炉心で臨界性を保つためには、Pu富化度は、選定炉心より内側炉心で1.5%、外側炉心で2%増加させる必要がある。「PNC仕様」炉心は、Pu富化度の増加に伴い燃焼欠損反応度は増大し4% $\Delta k/kk'$  を超え、選定炉心に比べると約0.5% $\Delta k/kk'$  増加し、更に増殖性能も低下し、増殖比はMK 1 標準炉心よりも小さくなり、炉心性能はかなり低下するといえる。

また中心空孔径を大きくして、スミア燃料体積比を小さくした場合も、「PNC仕様」の場合と同様、燃料体積比を小さくした事により、Pu富化度は、選定炉心より増加させる必要があり、従ってPu富化度の増加に伴い増殖性能も低下し、燃焼欠損反応度は増加し、炉心性能は低下するといえる。

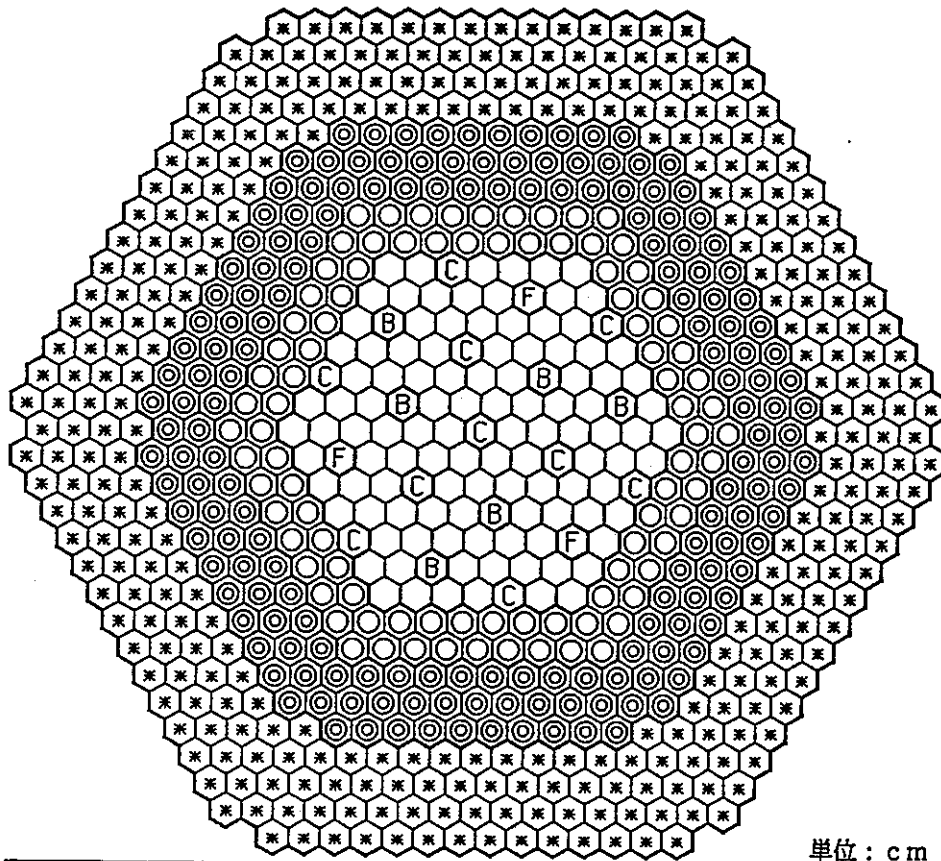


表3.2-1 主要炉心特性一覧 (選定炉心)

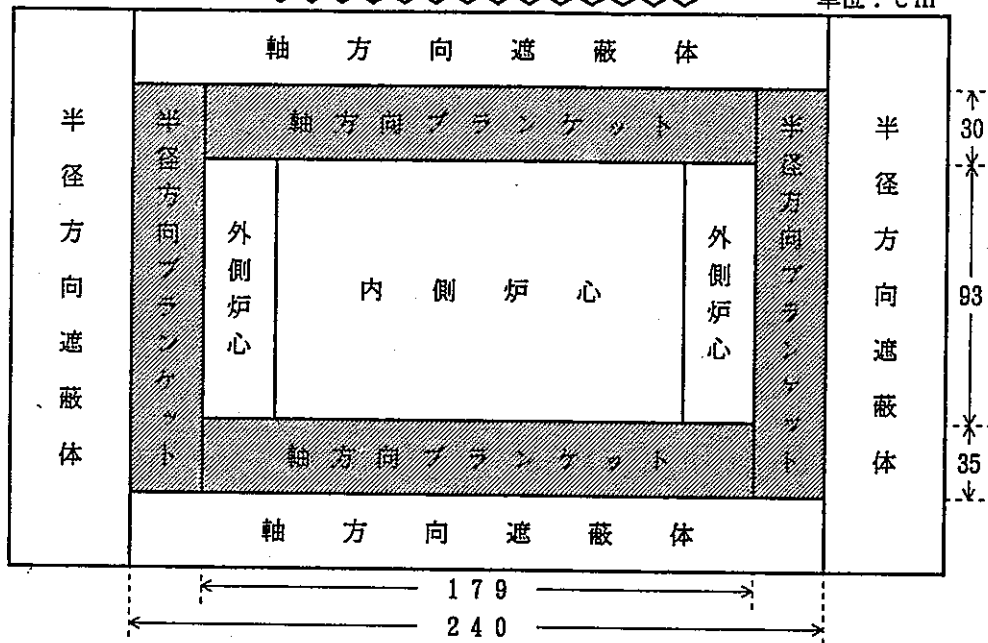
ケース		M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心 (特燃9体)	
Pu富化度 (IC/OC) (W%)		22.251/29.800	20.0/26.0	
k e f f	BOEC	1.0355	1.0522	
	EOEC	1.0085	1.0135	
燃焼欠損反応度 (% $\Delta k/kk'$ )		2.59	3.63	
最大線出力 (W/cm)	BOEC	IC	346	445
		OC	313	407
	EOEC	IC	326	411
		OC	300	379
増殖比	BOEC	1.120	1.130	
	EOEC	1.145	1.159	
	(平均)	(1.13)	(1.14)	
炉心部出力 (MWt)	BOEC	IC	379.94	381.95
		OC	265.09	265.68
		合計	645.03	647.63
	EOEC	IC	369.92	368.98
		OC	261.29	258.90
		合計	631.21	627.88
装荷時重金属 燃料インベントリー (kg)	IC	3213.739	4183.030	
	OC	2687.345	3552.578	
	合計	5901.084	7735.612	
炉心部取出平均燃焼度 (MWd/t)		$8.00 \times 10^4$	$10.03 \times 10^4$	

表3.2-2 主要炉心特性一覧 (PNC仕様)

			MJ-MK2 サーベイ炉心 (特燃9体)	
スミアの燃料体積比			33.38 v% (PNC仕様)	
Pu富化度 (IC/OC) (W%)			20.0/26.0	21.5/28.0
k e f f	BOEC		1.0217	1.0580
	EOEC		0.9828	1.0139
燃焼欠損反応度 (%Δk/kk')			3.87	4.11
最大線出力 (W/cm)	BOEC	IC	442	446
		OC	401	409
	EOEC	IC	405	407
		OC	371	380
増殖比	BOEC		1.164	1.094
	EOEC		1.193	1.132
	(平均)		(1.18)	(1.11)
炉心部出力 (MWt)	BOEC	IC	378.33	378.62
		OC	262.63	266.55
		合計	640.96	645.17
	EOEC	IC	363.42	363.86
		OC	254.86	259.96
		合計	618.28	623.82
装荷時重金属 燃料インベントリ (kg)	IC	3895.553	3897.472	
	OC	3305.633	3307.966	
	合計	7201.186	7205.438	
炉心部取出平均燃焼度 (MWd/t)			$10.63 \times 10^4$	$10.71 \times 10^4$

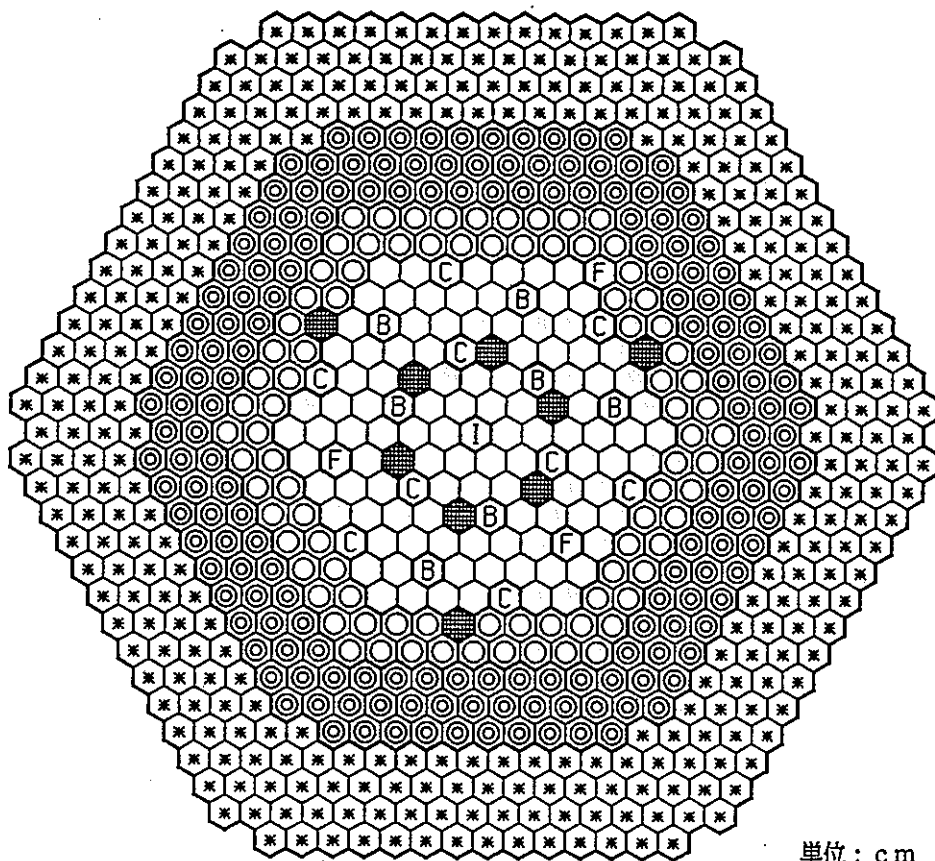


単位：cm

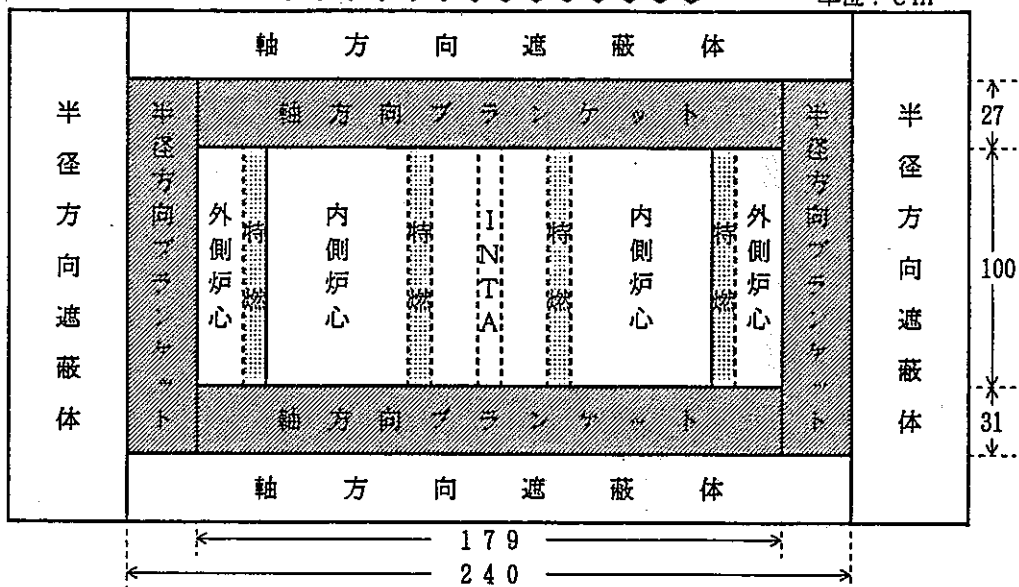


	内側炉心	108体	198体
	外側炉心	90体	
	微調整棒	3体	
	粗調整棒	10体	
	後備炉停止棒	6体	
	半径方向ブランケット	172体	
	半径方向遮蔽体	324体	

図3.2-1 炉心構成図 (MJ-MK1 標準炉心)

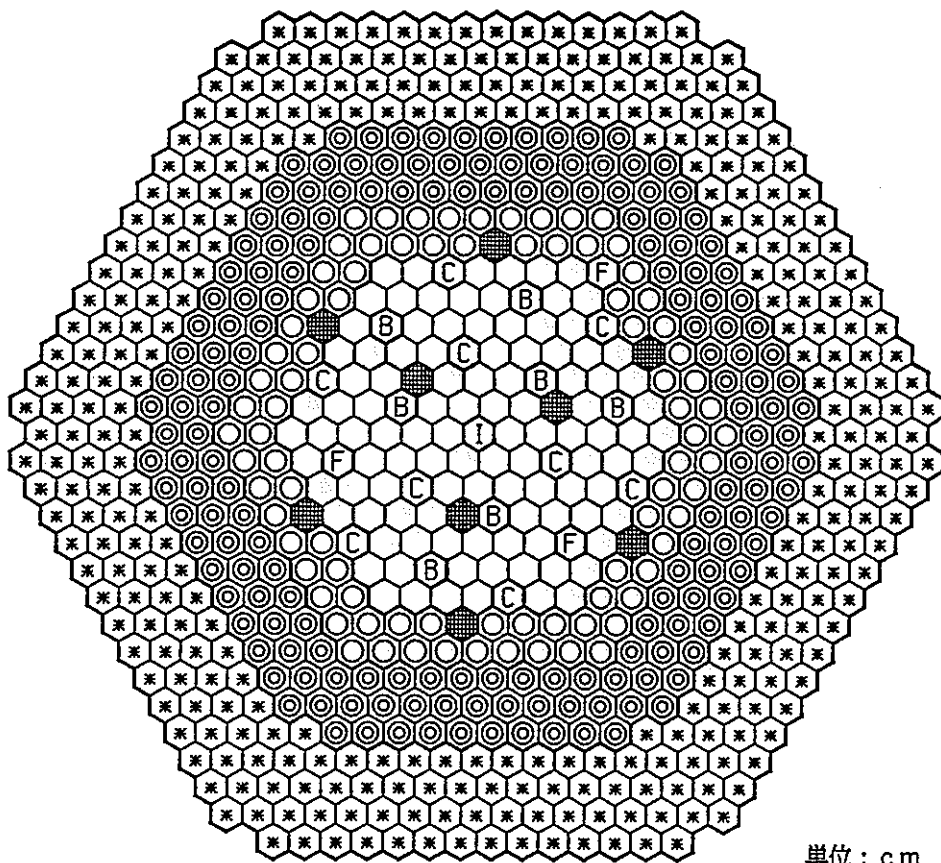


単位: cm

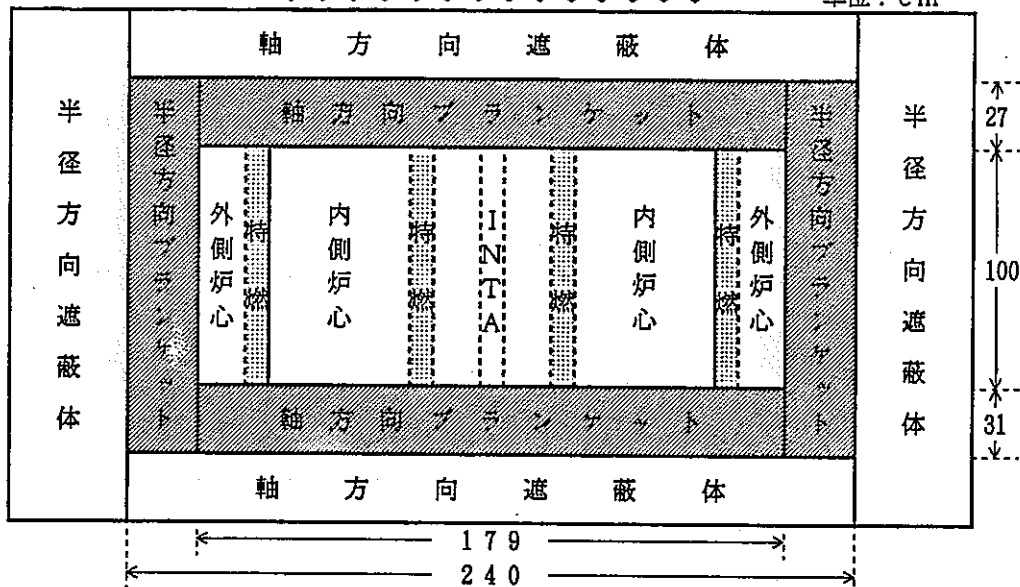


①	I N T A	1体
②	内側炉心(IC)	102体
③	外側炉心(OC)	87体
④	微調整棒	3体
⑤	粗調整棒	9体
⑥	後備炉停止棒	6体
⑦	半径方向ブランケット	172体
⑧	半径方向遮蔽体	324体
⑨	特殊燃料集合体	9体

図3.2-2 炉心構成図 (MJ-MK 2 特燃9本 (IC: 6体, OC: 3体))



単位：cm



①	I N T A	1体	
②	内側炉心 (IC)	105体	189体
③	外側炉心 (OC)	84体	
④	微調整棒	3体	
⑤	粗調整棒	9体	
⑥	後備炉停止棒	6体	
⑦	半径方向ブランケット	172体	
⑧	半径方向遮蔽体	324体	
⑨	特殊燃料集合体	9体	

図3.2-3 炉心構成図 (MJ-MK2 特燃9本 (IC ; 3体, OC ; 6体))

1 ~ 36 : 内側炉心 49 ~ 66, 99 ~ 110 : 半径方向ブラケット 111 ~ 115 : 遮蔽体  
 37 ~ 48 : 外側炉心 67 ~ 98 : 軸方向ブラケット 116 ~ 139 : C/R又はCRP

集合体数

- 48 - 198.0 2\*7.5
- 46 - 183.0 1\*5.0
- 45 - 178.0 2\*6.5
- 43 - 165.0 1\*3.5
- 42 - 161.5 3\*4.0
- 39 - 149.5 1\*1.5
- 38 - 148.0 1\*1.5
- 37 - 146.5 2\*3.5
- 35 - 139.5 2\*4.25
- 33 - 131.0 1\*3.0
- 32 - 128.0 1\*1.5
- 31 - 126.5 2\*4.75
- 29 - 117.0 1\*3.0
- 28 - 114.0 2\*4.5
- 26 - 105.0 1\*3.5
- 25 - 101.5 4\*3.875
- 21 - 86.0 4\*3.875
- 17 - 70.5 4\*3.5
- 13 - 56.5 1\*1.5
- 12 - 55.0 1\*1.5
- 11 - 53.5 3\*4.5
- 8 - 40.0 4\*5.0
- 4 - 20.0 1\*5.0
- 3 - 15.0 2\*7.5
- 1 - 0.0

113												115			
122	70	74	78	130	78	82	86	139	90	94	98	102	106	110	
	69	73	77	129	77	81	85	138	89	93	97	101	105	109	
121	6	12	18	128	18	24	30	137	36	42	48	54	60	66	
120	5	11	17	127	17	23	29	136	35	41	47	53	59	65	
119				126				135							
118				125				134							
117	4	10	16	124	16	22	28	133	34	40	46	52	58	64	
	3	9	15		15	21	27		33	39	45	51	57	63	
116	2	8	14	123	14	20	26	131	32	38	44	50	56	62	
	1	7	13		13	19	25		31	37	43	49	55	61	
	68	72	76		76	80	84		88	92	96	100	104	108	
	67	71	75		75	79	83		87	91	95	99	103	107	
112												114			

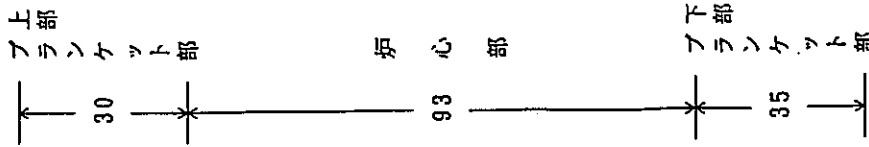


図3.2-4 2次元RZ全炉心体系 (MJ-MK 1 標準炉心)

1~36: 内側炉心  
 37~48: 外側炉心  
 142~147, 152~157: 特殊燃料  
 49~66, 99~110: 半徑方向ブランキングレット  
 67~98: 軸方向ブランキングレット  
 140~141, 148~151, 158~159: 軸方向ブランキングレット (特殊燃料上下位置)  
 111~115: 遮蔽体  
 116~139: C/R又はCRP

集合体数  
 48-198.0 (1) (6) (11) (6) (6) (24) (24) (30) (8) (39) (48) (54) (60) (60) (141)

48-198.0	3*6.667	113												115						
		122	70	74	149	130	78	82	86	139	90	159	94	98	102	106	110			
45-178.0	2*4.5	121	69	73	148	128	77	81	85	137	89	158	93	97	101	105	109			
43-169.0	1*4.5		6	12	147	127	18	24	30	136	36	157	42	48	54	60	66			
42-164.5	3*4.0		5	11	146	126	17	23	29	135	35	156	41	47	53	59	65			
39-152.5	1*1.5		4	10	145	125	16	22	28	134	34	155	40	46	52	58	64			
38-151.0	1*1.5		3	9	144	124	15	21	27	133	33	154	39	45	51	57	63			
37-149.5	4*3.8		2	8	143	123	14	20	26	132	32	153	38	44	50	56	62			
33-134.3	1*4.174	116	1	7	142		13	19	25	131	31	152	37	43	49	55	61			
32-130.2	1*4.175		68	72	141		76	80	84		88	151	92	96	100	104	108			
31-126.0	2*4.175		67	71	140		75	79	83		87	150	91	95	99	103	107			
29-117.6	1*4.175																			
28-113.5	2*4.175																			
26-105.1	1*4.1																			
25-101.0	4*4.1625																			
21-84.4	4*4.1625																			
17-67.7	4*3.8																			
13-52.5	1*1.5																			
12-51.0	1*1.5																			
11-49.5	3*4.5																			
8-36.0	4*4.0																			
4-20.0	3*6.667																			
1-0.0	3*2.0231																			

上部  
 プラ  
 シン  
 ケッ  
 ト部  
 27ヶ

炉  
 心  
 部  
 100ヶ

下部  
 プラ  
 シン  
 ケッ  
 ト部  
 31ヶ

43-140.015  
 39-120.015  
 36-110.424  
 33-99.915  
 30-90.908  
 29-89.408  
 27-78.903  
 25-69.202  
 24-68.399  
 22-59.777  
 20-55.957  
 18-47.404  
 16-36.919  
 14-33.244  
 12-29.734  
 10-25.750  
 8-16.058  
 5-6.069  
 2-0.0

図3.2-5 2次元RZ全炉心体系 (特殊燃料集合体9体、炉中心: INTA)

### 3.3 選定炉心の制御棒反応度値解析

制御棒（調整棒、後備炉停止棒）の、B10量をMK1標準炉心と同一とした場合の選定炉心の制御棒反応度値解析を高燃焼度平衡炉心初期を対象に、2次元RZ計算により概略評価し、MJ-MK1標準炉心との比較を行った。

#### 3.3.1 主要条件

##### ① 解析ケース

MJ-MK1標準炉心

MJ-MK2選定炉心

##### ② 対象炉心

高燃焼度 平衡炉心初期

##### ③ 制御棒配置

MJ-MK1標準炉心 ..... 図3.2-1

MJ-MK2選定炉心 ..... 図3.2-2

##### ④ 計算モデル

2次元RZ体系

⑤ 制御棒の仕様 ..... 表3.3-1

⑤ 制御棒原子数密度 ..... 表3.3-2

⑥ 制御棒本数 CCR/FCR/BCR

MJ-MK1標準炉心 10体 3体 6体

MJ-MK2選定炉心 9体 3体 6体

#### 3.3.2 評価項目

(1) 主炉停止系反応度値 制御棒挿入パターン

① 基準状態（制御棒引抜） ..... 表3.3-3 (1/5)

② CCR全挿入 ..... 表3.3-3 (2/5)

③ FCR全挿入 ..... 表3.3-3 (3/5)

(2) 後備炉停止系反応度値

① 基準状態

制御棒引抜（但しCCR中途挿入） ..... 表3.3-3 (4/5)

② BCR全挿入 ..... 表3.3-3 (5/5)



### 3.3.3 解析結果

表 3.3-4 に、MJ-MK1 標準炉心と MJ-MK2 選定炉心の各制御棒の反応度値を比較しまとめた。同表の MJ-MK2 選定炉心の各制御棒の反応度値は、3次元補正後のノミナル値である。

同表より、下記の事が明らかになった。

#### (1) CCRの反応度値

MJ-MK2 選定炉心の主炉停止系の CCR 全挿入時の反応度値は、MJ-MK1 標準炉心に比べ、約 23% 小さくなる。

これは、MK2 選定炉心では、MK1 標準炉心の炉中心 CCR に対応した集合体を、INTA とするため CCR が 1 体少ない事と、更に MK2 選定炉心では燃料の高密度化により、燃料体積比が MK1 標準炉心に比べ 26% 大きい事により、制御棒値が減少する効果の方が、炉心高さが 100 cm (8%) 高くなったことによる制御棒値が増大する効果よりも大きかった為と言える。

#### (2) FCRの反応度値

MJ-MK2 選定炉心の主炉停止系の FCR 全挿入時の反応度値は、MJ-MK1 標準炉心に比べ、約 9% 小さくなる。FCR の装荷本数および装荷位置は両炉心とも同一であるので、ここでは、MK2 選定炉心の炉心高さが高くなったことによる制御棒値が増大する効果に比べ、燃料体積比の増大による制御棒値が減少する効果の方が、大きかった為である。

#### (3) BCRの反応度値

MJ-MK2 選定炉心の後備炉停止系の FCR 全挿入時の反応度値は、MJ-MK1 標準炉心に比べ、約 14% 小さくなる。これは、FCR と同様、MK2 選定炉心の炉心高さが高くなったことによる制御棒値が増大する効果よりも、燃料体積比の増大による制御棒値が減少する効果が大きかった事と、更に、CCR との干渉効果の違いが考えられる。

### 3.3.4 まとめ

制御棒（調整棒、後備炉停止棒）の、 $B_{10}$ 量をMK 1標準炉心と同一とした場合の選定炉心の制御棒反応度値解析を高燃焼度平衡炉心初期を対象に行った結果、次のことが明らかになった。

- (1) MJ-MK 2選定炉心は特殊燃料集合体を9体、INTAを1体装荷し、高線出力化、高燃焼度化の観点から、燃料ピン径を太径化し燃料体積比を増大させているため、各制御棒値は、MK 1標準炉心に比べ、10%~20%小さくなる。この対策として制御棒の $B_{10}$ 濃縮度を増加させること、制御棒の吸収体を長くすること等が考えられる。
- (2) 主炉停止系の制御棒の吸収体長さについては、引き抜きストロークの制限から、吸収体長さを高くすることは出来ないが、 $B_{10}$ 濃縮度に十分余裕がある為、濃縮度を上げて $B_{10}$ 重量を増やす事で対応が可能である。  
具体的には、CCRの場合は、 $B_{10}$ 重量はMK 1での3.9wt%から6.6wt%に増加させれば、MK 1標準炉心とほぼ同等の制御棒値が得られる。  
またFCRについては、 $B_{10}$ 重量を3.9wt%から4.7wt%程度にすればMK 1標準炉心とほぼ同等の制御棒値が得られる。
- (3) 後備炉停止棒については、もともとMK 1標準炉心の時から既にワンロードスタック時でも1.65% $\Delta k/kk'$ の余裕を持っていた為、選定炉心で約1% $\Delta k/kk'$ 制御棒値が減少したが、問題ない。
- (4)  $B_{10}$ 重量を増加させた場合、特に平衡炉心初期で出力分布の歪みが大きくなることが予想されるため、今後燃料交換パターン等を含めた出力分布特性の検討が必要になる。

表3.3-1 制御棒の仕様 (MJ-MK 1 標準炉心)

	主炉停止系		後備炉停止系
	CCR	FCR	BCR
吸収体長さ	80 cm	80 cm	93 cm
B <sup>10</sup> 濃縮度	3.9 wt%	3.9 wt%	9.0 wt%
B <sup>10</sup> 装荷量	1260 g	1260 g	4390 g
B <sub>4</sub> C 装荷量	4180 g	4180 g	6330 g
B <sub>4</sub> C 製作密度	95% TD	95% TD	95% TD
組成体積比 (v%)			
ギャップ	2.3	2.3	2.6
構造材	30.1	29.3	22.9
冷却材	48.4	49.2	48.5
吸収体	19.2	19.2	26.0

表3.3-2 主炉停止系及び後備炉停止系制御棒の原子数密度

単位：atoms/cm/barn

核種	主炉停止系	後備炉停止系
1. Mn	3.8466E-03	2.9059E-04
2. <sup>10</sup> B	8.1971E-03	2.4469E-02
3. <sup>11</sup> B	1.1659E-02	2.4717E-03
4. C	5.0923E-03	6.7966E-03
5. O	0.0	0.0
6. Na	1.1039E-02	1.1039E-02
7. Cr	4.6061E-03	3.4797E-03
8. Fe	1.6523E-02	1.2483E-02
9. Ni	3.2406E-03	2.4481E-03
10. Mo	3.6711E-04	2.7734E-04

表3.3-3

R Z 体系の各リング毎の制御棒挿入状態(1 / 5)

— 制御棒引抜状態 —

制御棒位置 (体数)	炉 中 心		第 1 リン グ		第 2 リン グ		
	(1 体)	INTA	( 6 体 )		( 1 2 体 )		
炉 心	MK-1	MK-2	M K - 1 ・ M K - 2 共 通				
制御棒種類 (体数)	C C R (1 体)	—	C C R (3 体)	B C R (3 体)	C C R (6 体)	F C R (3 体)	B C R (3 体)
制御棒体積比	100%	—	50%	50%	50%	25%	25%
制 御 棒 挿 入 位 置   制御棒挿入 Na フォロア	122	122	130	130	139	139	139
			129	129	138	138	138
	121	121	128	128	137	137	137
	120	120	127	127	136	136	136
	119	119	126	126	135	135	135
	118	118	125	125	134	134	134
	117	117	124	124	133	133	133
	116	116	123	123	132	132	132
					131	131	131

注1) 各層毎に縦に付けられた番号はR Z 計算体系上の領域番号である。

注2) CCRと FCRは同一の組成である。

表3.3-3 R Z 体系の各リング毎の制御棒挿入状態(2 / 5)

—— 制御棒全挿入状態 (CCR 10 体挿入) ——

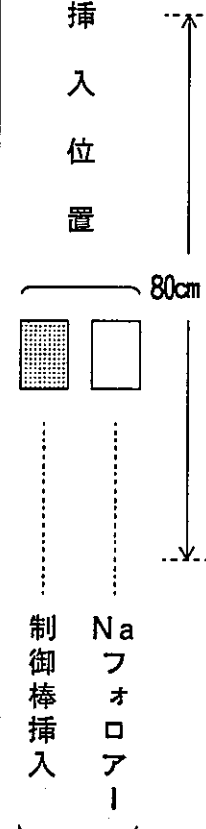
制御棒位置 (体数)	炉 中 心		第 1 リン グ		第 2 リン グ		
	(1 体)	INTA	( 6 体 )		( 1 2 体 )		
炉 心	MK-1	MK-2	M K - 1 ・ M K - 2 共 通				
制御棒種類 (体数)	CCR (1 体)	—	CCR (3 体)	BCR (3 体)	CCR (6 体)	FCR (3 体)	BCR (3 体)
制御棒体積比	100%	—	50%	50%	50%	25%	25%
制 御 棒 挿 入 位 置  80cm  	122	122	130	130	139	139	139
	121	121	129	129	138	138	138
	120	120	128	128	137	137	137
	119	119	127	127	136	136	136
	118	118	126	126	135	135	135
	117	117	125	125	134	134	134
	116	116	124	124	133	133	133
	123	123	123	123	132	132	132
	131	131	131	131	131	131	131
	131	131	131	131	131	131	131

注1) 各層毎に縦に付けられた番号はR Z計算体系上の領域番号である。

注2) CCRと FCRは同一の組成である。

表3.3-3 R Z体系の各リング毎の制御棒挿入状態(3 / 5)

—— 制御棒全挿入状態 (FCR 3体挿入) ——

制御棒位置 (体数)	炉 中 心		第 1 リン グ		第 2 リン グ		
	(1体)	INTA	(6体)		(12体)		
炉 心	MK-1	MK-2	M K - 1 ・ M K - 2 共 通				
制御棒種類 (体数)	C C R (1体)	—	C C R (3体)	B C R (3体)	C C R (6体)	F C R (3体)	B C R (3体)
制御棒体積比	100%	—	50%	50%	50%	25%	25%
制 御 棒 挿 入 位 置  	122	122	130	130	139	139	139
	121	121	129	129	138	138	138
	120	120	128	128	137	137	137
	119	119	127	127	136	136	136
	118	118	126	126	135	135	135
	117	117	125	125	134	134	134
	116	116	124	124	133	133	133
	116	116	123	123	132	132	132
	116	116	123	123	131	131	131
	116	116	123	123	131	131	131
	116	116	123	123	131	131	131

注1) 各層毎に縦に付けられた番号はR Z計算体系上の領域番号である。

注2) CCRとFCRは同一の組成である。

表3.3-3 R Z体系の各リング毎の制御棒挿入状態(4 / 5)

—— 制御棒引抜状態、但しCCR10体中途挿入 ——

制御棒位置 (体数)	炉 中 心		第 1 リン グ		第 2 リン グ		
	(1体)	INTA	(6体)		(12体)		
炉 心	MK-1	MK-2	M K - 1 ・ M K - 2 共 通				
制御棒種類 (体数)	CCR (1体)	—	CCR (3体)	BCR (3体)	CCR (6体)	FCR (3体)	BCR (3体)
制御棒体積比	100%	—	50%	50%	50%	25%	25%
制 御 棒 挿 入 位 置   制御棒挿入 Na フォロア	122	122	130	130	139	139	139
	121	121	129	129	138	138	138
	120	120	128	128	137	137	137
	119	119	127	127	136	136	136
	118	118	126	126	135	135	135
	117	117	125	125	134	134	134
	116	116	124	124	133	133	133
	116	116	123	123	132	132	132
	131	131	131	131	131	131	131
	131	131	131	131	131	131	131

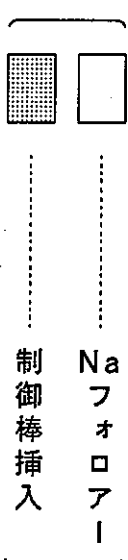
注1) 各層毎に縦に付けられた番号はR Z計算体系上の領域番号である。

注2) CCRと FCRは同一の組成である。



表3.3-3 R Z 体系の各リング毎の制御棒挿入状態(5 / 5)

—— CCR 10 体中途挿入かつ BCR 6 体挿入状態 ——

制御棒位置 (体数)	炉 中 心		第 1 リン グ		第 2 リン グ		
	(1 体)	I N T A	( 6 体 )		( 1 2 体 )		
炉 心	M K - 1	M K - 2	M K - 1 ・ M K - 2 共 通				
制 御 棒 種 類 ( 体 数 )	C C R ( 1 体 )	—	C C R ( 3 体 )	B C R ( 3 体 )	C C R ( 6 体 )	F C R ( 3 体 )	B C R ( 3 体 )
制 御 棒 体 積 比	1 0 0 %	—	5 0 %	5 0 %	5 0 %	2 5 %	2 5 %
制 御 棒 挿 入 位 置 93cm  制 御 棒 挿 入 Na フ オ ロ ア ー	122	122	130	130	139	139	139
	121	121	129	129	138	138	138
	120	120	128	128	137	137	137
	119	119	127	127	136	136	136
	118	118	126	126	135	135	135
	117	117	125	125	134	134	134
	116	116	124	124	133	133	133
	123	123	124	124	132	132	132
	131	131	123	123	131	131	131
	132	132	123	123	131	131	131
	133	133	123	123	131	131	131
	134	134	123	123	131	131	131

注1) 各層毎に縦に付けられた番号はR Z計算体系上の領域番号である。

注2) CCRと FCRは同一の組成である。

表3.3-4 平衡炉心初期における制御棒価値の比較

(% Δk/kk')

制御棒挿入状態 (表3.3-2参照)		MJ-MK1 <sup>(**)</sup> 標準炉心	MJ-MK2 <sup>(**)</sup> 選定炉心 (特燃9体、INTA)	<sup>(**)</sup> 制御棒価値比 (MK2/MK1)
主 炉 停 止 系	制御棒引抜 基準計算 (表3.3-3(1/5)参照)	—	—	—
	制御棒全挿入 (CCR10体) <sup>*1</sup> (表3.3-3(2/5)参照)	8.240	6.345	0.77
	制御棒全挿入 (FCR3体) (表3.3-3(3/5)参照)	2.284	2.078	0.91
後 備 炉 停 止 系	制御棒引抜 基準計算 但し { CCR10体 } <sup>*1</sup> 中途挿入 (表3.3-3(4/5)参照)	—	—	—
	制御棒全挿入 (BCR6体) 但し { CCR10体 } <sup>*1</sup> 中途挿入 (表3.3-3(5/5)参照)	7.835	6.738	0.86

\*1 MJ-MK2は、CCR9体（炉中心CCRをINTAとする為）。

\*2 2次元RZ解析値の比

\*3 MJ-MK1標準炉心の3次元解析値（ノミナル値）で規格化。

\*4 3次元解析値（ノミナル値）

### 3.4 選定炉心の反応度特性解析

MJ-MK2選定炉心について、平衡炉心末期の下記の反応度特性を解析し、MJ-MK1標準炉心と比較し評価した。

- ① ドップラー係数
- ② 形状係数
- ③ 密度係数（燃料、構造材、冷却材）
- ④ 温度係数
- ⑤ 出力係数

#### 3.4.1 評価方法

##### (1) 基準体系の中性子束分布

2次元RZ全炉心体系モデルにより、基準体系の16群の中性子束、随伴中性子束（ $\phi$ 、 $\phi^*$ ）を拡散計算により求める。

##### (2) ドップラー係数

エネルギー群は16群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

計算法は、定格出力運転時の燃料温度分布から、燃料温度が一様に500°K変化した場合の反応度変化を一次摂動計算により求める。

##### (3) 温度係数及び出力係数

温度係数は、形状係数と密度係数より算出する。

###### ① 密度係数

エネルギー群は16群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とする。

計算法は、（燃料、冷却材、構造材）の各密度が炉内各領域で一様に変化した場合の反応度変化の割合を、一次摂動計算により求める。

###### ② 形状係数

エネルギー群は6群、計算モデルは2次元RZ全炉心体系とし、制御棒は全引抜き状態とする。

計算法は、炉心組成を変えずに、炉心高さ、炉心半径（集合体配列ピッチ）を変化（5%変化）させた場合の反応度変化の割合を拡散計算による直接計算で求める。

軸方向形状係数 :  $KH = (\Delta k / k k') / (\Delta H / H)$

径方向形状係数 :  $KR = (\Delta k / k k') / (\Delta R / R)$

( $\Delta H / H$ ) : 炉心高さの変化割合

( $\Delta R / R$ ) : 炉心半径の変化割合

### ③ 温度係数

温度係数評価用炉心分割モデルを図3.4-1に示す。また定格出力状態における各部温度分布は、MJ-MK1標準炉心の温度を適用する。

計算法は、炉心、ブランケット内の燃料、構造材、冷却材の温度が変化し、膨張効果等により反応度が変化する割合を、上記の形状係数、密度係数及びMJ-MK1で適用した燃料、構造材の熱膨張率および冷却材の密度を用い求める。

### ④ 出力係数

出力係数評価用炉心分割モデルを図3.4-1に示す。

出力変化に伴う炉心各部の温度変化を算出し、温度係数、ドップラー係数により、反応度変化を算出し、単位出力当たりの反応度を算出し、これを出力係数とする。

## 3.4.2 解析結果

MJ-MK2選定炉心の各反応度係数の解析結果をMJ-MK1標準炉心と比較して以下に示す。

①	ドップラー係数	.....	表3.4-1
②	形状係数	.....	表3.4-2
③	密度係数 (燃料)	.....	表3.4-3
	(冷却材)	.....	表3.4-4
	(構造材)	.....	表3.4-5
④	温度係数	.....	表3.4-6
	(内訳)	.....	表3.4-7
⑤	出力係数 (領域毎)	.....	表3.4-8
	(炉心構成要素毎)	.....	表3.4-9
⑥	各種反応度係数分布	.....	表3.4-10～表3.4-13

### 3.4.3 評価検討

反応度係数のうち主要なものについて、MJ-MK1標準炉心と比較し検討した。

#### (1) ドップラー係数

表3.4-1より、ドップラー係数はMJ-MK2選定炉心のほうが2%小さくなった。これは、MJ-MK2選定炉心は、高密度化しているが、炉心集合体本数は減っている事、又、軸方向ブランケット厚さが薄くなっていることから、最終的にはU238の減った効果が大きく、ドップラー係数はTotalとしては、小さくなっている。

#### (2) 形状係数

MJ-MK2選定炉心はMJ-MK1標準炉心に比べ高密度化したことにより相対的にleakageが小さくなるため、形状係数は小さくなる。

表3.4-2より、MJ-MK2選定炉心の形状係数はMJ-MK1標準炉心に比べ、径方向で10%、軸方向で21%小さくなった。

ここで軸方向の減少効果が大きいのは、MJ-MK2選定炉心は、炉心部の軸方向高さが高いため、leakageが更に小さくなった為である。

#### (3) 密度係数

燃料密度係数は、fission(正)とleakage(正)と吸収(負)と減速(～0)のバランスにより決まる。

MJ-MK2選定炉心はMJ-MK1標準炉心に比べ高密度化したことにより相対的にleakageが小さくなるため、それに伴い燃料の反応度への寄与(fission)も小さくなり燃料密度係数は、約11%小さくなった。

### 3.4.4 まとめ

定格出力時の温度係数、出力係数は負に保たれており、原子炉に固有の安全性を与えている事が確認できた。

表3.4-1 ドップラー係数

単位： $10^{-4} * (\Delta k / k k') / (\Delta T / T)$

領 域	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
内 側 炉 心	-46.52	-44.29
外 側 炉 心	-14.80	-16.02
半径方向ブランケット	-10.45	-10.06
軸方向ブランケット	-8.26	-6.46
特燃（内側炉心）	—	-1.16
特燃（外側炉心）	—	-0.24
特燃（軸方向ブランケット）	—	-0.17
合 計	-80.03	-78.40

表3.4-2 形状係数

単位： $(\Delta k/k')/(\Delta X/X)$

	方向	実効増倍率		形状係数
		基準	$\Delta X = +3\%$	
MJ-MK1	径方向	1.0128	1.0185	0.165
標準炉心	軸方向		1.0179	0.185
MJ-MK2	径方向	1.0228	1.0275	0.149
選定炉心	軸方向		1.0274	0.146

表3.4-3 燃料密度係数

単位： $10^{-2} * (\Delta k / k k') / (\Delta \rho / \rho)$

領 域	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
内 側 炉 心	22.98	19.50
外 側 炉 心	15.69	14.32
半径方向ブランケット	0.79	0.79
軸方向ブランケット	0.24	0.35
特燃（内側炉心）	—	0.32
特燃（外側炉心）	—	0.16
特燃（軸方向ブランケット）	—	0.02
合 計	39.70	35.46



表3.4-4 冷却材密度係数

単位:  $10^{-4} * (\Delta k / k k') / (\Delta \rho / \rho)$

領 域	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
内 側 炉 心	- 8 7 . 9 3	- 9 9 . 5 4
外 側 炉 心	2 5 . 4 2	5 . 9 8
半径方向ブランケット	2 9 . 4 4	2 5 . 7 3
軸方向ブランケット	2 2 . 1 1	1 4 . 4 5
特燃 (内側炉心)	—	- 8 . 7 3
特燃 (外側炉心)	—	- 1 . 8 1
特燃 (軸方向ブランケット)	—	2 . 6 4
合 計	- 1 0 . 9 6	- 6 1 . 2 8

表3.4-5 構造材密度係数

単位： $10^{-4} * (\Delta k / k k') / (\Delta \rho / \rho)$

領 域	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
内 側 炉 心	- 3 9 7 . 7	- 3 4 6 . 5
外 側 炉 心	- 2 6 . 0	- 5 0 . 2
半径方向ブランケット	5 7 . 0	4 8 . 1
軸方向ブランケット	4 8 . 0	2 8 . 1
特燃（内側炉心）	—	- 3 0 . 6
特燃（外側炉心）	—	- 8 . 5
特燃（軸方向ブランケット）	—	5 . 4
合 計	- 3 1 8 . 8	- 3 5 4 . 2

表3.4-6 温度係数 (100%出力時)

単位:  $10^{-5} * \Delta k / k k' / ^\circ C$

	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
燃料温度係数	-0.349	-0.285
被覆管温度係数	0.037	0.062
ラッパ管温度係数	0.025	0.042
炉心支持板温度係数	-1.097	-0.995
冷却材温度係数	0.032	0.175
ドップラー温度係数	—	-0.670
合計	—	-1.671

表3.4-7 温度係数の内訳（100%出力時）

単位： $10^{-5} * \Delta k / k k^{\circ} C$

		M J - M K 2 (選定炉心)								
領域番号	領域名称	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	合計	
		内側炉心	外側炉心	軸方向 フランケット	半径方向 フランケット	特燃 (内側炉心)	特燃 (外側炉心)	特燃 (軸方向) (フランケット)		
	燃料温度係数	-0.158	-0.111	-0.004	-0.008	-0.003	-0.001	0.000	-0.285	
	被覆管温度係数	0.091	0.001	-0.011	-0.021	0.002	0.000	0.000	0.062	
	ラップ管温度係数	0.042	0.004	-0.004	-0.008	0.007	0.002	-0.001	0.042	
	炉心支持板温度係数	-0.530	-0.416	-0.015	-0.030	0.000	-0.002	-0.002	-0.995	
	冷却材温度係数	0.282	-0.017	-0.041	-0.072	0.025	0.005	-0.007	0.175	
	ドップラー温度係数	-0.323	-0.127	-0.078	-0.129	-0.008	-0.002	-0.002	-0.670	
	合計	-0.597	-0.665	-0.152	-0.268	0.022	0.002	-0.013	-1.671	

表3.4-8 炉心領域毎の出力係数（100%出力時）

単位： $10^{-5} * \Delta k/kk' / MW$

	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
内側炉心	-0.533	-0.609
外側炉心	-0.263	-0.400
半径方向ブランケット	-0.018	-0.070
軸方向ブランケット	-0.024	-0.108
特燃（内側炉心）	—	-0.001
特燃（外側炉心）	—	-0.001
特燃（軸方向ブランケット）	—	-0.005
合計	-0.868	-1.194

表3.4-9 成分毎の出力係数（100%出力時）

単位： $10^{-5} * \Delta k/kk' / ^\circ C$

	M J - M K 1 標準炉心	M J - M K 2 選定炉心
燃料出力係数	-0.332	-0.339
被覆管出力係数	0.005	0.029
ラッパ管出力係数	0.002	0.016
炉心支持板出力係数	-0.065	-0.302
冷却材出力係数	0.003	0.075
ドップラー出力係数	-0.482	-0.673
合計	-0.868	-1.194

表3.4-10 ドップラー係数分布

単位：(Δk/kk')/(ΔT/T)

WORTH RAPID DENSITY COEFFICIENT DOPPLER

J/I	内側炉心							外側炉心			
	1	2	特燃 3	4	5	6	7	特燃 8	9	10	
1	-2.254E-06	-4.299E-06	-4.396E-07	-1.475E-06	-6.825E-06	-3.836E-06	-3.674E-06	-1.540E-07	-5.904E-06	-4.918E-06	AX/BL(U)*
2	-1.397E-05	-2.477E-05	-4.544E-06	-1.461E-05	-4.001E-05	-2.570E-05	-2.544E-05	-8.231E-07	-3.197E-05	-2.569E-05	
3	-3.322E-05	-5.977E-05	-1.157E-05	-3.767E-05	-1.027E-04	-7.365E-05	-7.633E-05	-2.083E-06	-7.999E-05	-6.657E-05	炉心部
4	-5.604E-05	-1.019E-04	-1.969E-05	-6.566E-05	-1.856E-04	-1.650E-04	-1.732E-04	-4.052E-06	-1.497E-04	-1.224E-04	
5	-7.094E-05	-1.295E-04	-2.518E-05	-8.406E-05	-2.407E-04	-2.229E-04	-2.355E-04	-5.415E-06	-1.976E-04	-1.608E-04	
6	-7.213E-05	-1.317E-04	-2.564E-05	-8.564E-05	-2.455E-04	-2.282E-04	-2.410E-04	-5.535E-06	-2.017E-04	-1.638E-04	
7	-5.869E-05	-1.070E-04	-2.077E-05	-6.945E-05	-1.983E-04	-1.837E-04	-1.928E-04	-4.417E-06	-1.602E-04	-1.291E-04	
8	-3.706E-05	-6.708E-05	-1.324E-05	-4.335E-05	-1.230E-04	-1.131E-04	-1.169E-04	-2.744E-06	-9.545E-05	-7.483E-05	
9	-1.951E-05	-3.472E-05	-6.999E-06	-2.187E-05	-6.225E-05	-5.611E-05	-5.538E-05	-1.472E-06	-4.685E-05	-3.322E-05	AX/BL(L)*
10	-5.362E-06	-9.369E-06	-2.114E-06	-5.957E-06	-1.607E-05	-1.440E-05	-1.337E-05	-3.631E-07	-9.866E-06	-6.435E-06	

半径方向ブランケット			
J/I	11	12	13
1	-2.917E-06	-1.248E-06	-4.790E-07
2	-1.425E-05	-5.353E-06	-1.808E-06
3	-5.535E-05	-1.995E-05	-6.481E-06
4	-1.081E-04	-4.070E-05	-1.342E-05
5	-1.451E-04	-5.609E-05	-1.879E-05
6	-1.477E-04	-5.705E-05	-1.910E-05
7	-1.135E-04	-4.260E-05	-1.401E-05
8	-6.106E-05	-2.182E-05	-7.044E-06
9	-1.763E-05	-6.499E-06	-2.169E-06
10	-3.480E-06	-1.423E-06	-5.310E-07

\* AX/BL (U) : 上部軸方向ブランケット  
 \* AX/BL (L) : 下部軸方向ブランケット

INNER CORE = -4.429E-03  
 OUTER CORE = -1.602E-03  
 RADIAL BL. = -1.006E-03  
 AXIAL BL. = -6.461E-04  
 TOKUNEN IC = -1.161E-04  
 TOKUNEN DC = -2.425E-05  
 TOKUNEN AXBL = -1.691E-05

表3.4-11 燃料密度係数分布

単位：(Δk/kk')/(Δρ/ρ)

WORTH RAPID DENSITY COEFFICIENT FUEL											
J/I	内 側 炉 心						外 側 炉 心				
	1	2	特 燃 3	4	5	6	7	特 燃 8	9	10	
1	4.639E-05	7.281E-05	3.612E-05	5.768E-05	1.308E-04	1.172E-04	1.165E-04	7.826E-06	1.000E-04	7.292E-05	AX/BL(U)*
2	5.707E-05	8.633E-05	2.877E-05	4.936E-05	2.282E-04	2.088E-04	2.334E-04	2.135E-05	3.306E-04	3.202E-04	
3	1.613E-03	2.831E-03	3.850E-04	1.648E-03	5.636E-03	5.182E-03	5.357E-03	1.812E-04	7.748E-03	6.912E-03	炉 心 部
4	2.350E-03	4.159E-03	5.330E-04	2.440E-03	8.376E-03	7.752E-03	8.238E-03	2.743E-04	1.262E-02	1.191E-02	
5	2.800E-03	4.961E-03	6.372E-04	2.926E-03	1.007E-02	9.337E-03	1.000E-02	3.400E-04	1.566E-02	1.511E-02	
6	2.838E-03	5.031E-03	6.450E-04	2.971E-03	1.023E-02	9.484E-03	1.017E-02	3.453E-04	1.594E-02	1.538E-02	
7	2.433E-03	4.305E-03	5.480E-04	2.536E-03	8.712E-03	8.041E-03	8.566E-03	2.847E-04	1.324E-02	1.250E-02	
8	1.722E-03	3.032E-03	4.041E-04	1.776E-03	6.080E-03	5.527E-03	5.835E-03	1.949E-04	8.547E-03	7.595E-03	
9	1.681E-05	1.746E-05	1.063E-05	2.462E-06	8.116E-05	4.419E-05	1.393E-04	2.036E-05	3.055E-04	3.334E-04	AX/BL(L)*
10	1.155E-05	1.781E-05	1.871E-05	1.511E-05	4.510E-05	3.328E-05	7.213E-05	7.315E-06	7.281E-05	5.576E-05	

半径方向ブランケット			
J/I	11	12	13
1	2.999E-05	6.408E-06	-4.287E-07
2	1.319E-04	2.859E-05	3.017E-06
3	5.907E-04	1.204E-04	1.542E-05
4	1.012E-03	2.323E-04	3.375E-05
5	1.299E-03	3.081E-04	4.684E-05
6	1.320E-03	3.133E-04	4.763E-05
7	1.060E-03	2.430E-04	3.526E-05
8	6.406E-04	1.300E-04	1.658E-05
9	1.417E-04	3.098E-05	3.210E-06
10	2.244E-05	4.564E-06	-7.086E-07

\* AX/BL (U) : 上部軸方向ブランケット

\* AX/BL (L) : 下部軸方向ブランケット

INNER CORE = 1.950E-01  
 OUTER CORE = 1.432E-01  
 RADIAL BL. = 7.866E-03  
 AXIAL BL. = 3.492E-03  
 TOKUNEN IC = 3.152E-03  
 TOKUNEN OC = 1.621E-03  
 TOKUNEN AXBL = 1.511E-04



表3.4-12 冷却材密度係数分布

単位:  $(\Delta k/k')/(\Delta \rho/\rho)$

WORTH RAPID DENSITY COEFFICIENT NA

J/I	内 側 炉 心						外 側 炉 心					
	1	2	特 燃	3	4	5	6	7	特 燃	8		9
1	1.165E-05	1.909E-05	3.574E-05	1.287E-05	3.421E-05	2.731E-05	2.793E-05	8.047E-06	3.039E-05	2.419E-05	AX/BL(U)*	
2	2.119E-05	3.422E-05	6.192E-05	2.023E-05	7.696E-05	5.518E-05	6.807E-05	2.736E-05	1.166E-04	1.137E-04		
3	-1.946E-05	-3.027E-05	2.906E-05	-2.030E-05	-4.084E-05	-3.122E-05	-2.559E-05	2.820E-05	1.251E-04	3.004E-04	炉 心 部	
4	-1.446E-04	-2.442E-04	-1.554E-04	-1.438E-04	-4.773E-04	-3.813E-04	-3.830E-04	-3.573E-05	-2.032E-04	2.701E-04		
5	-2.312E-04	-3.949E-04	-2.894E-04	-2.329E-04	-7.825E-04	-6.306E-04	-6.416E-04	-7.888E-05	-4.280E-04	2.338E-04		
6	-2.366E-04	-4.046E-04	-2.981E-04	-2.387E-04	-8.028E-04	-6.462E-04	-6.571E-04	-8.151E-05	-4.405E-04	2.354E-04		
7	-1.557E-04	-2.644E-04	-1.740E-04	-1.559E-04	-5.185E-04	-4.024E-04	-4.034E-04	-4.073E-05	-2.243E-04	2.775E-04		
8	-2.861E-05	-4.724E-05	1.491E-05	-3.010E-05	-7.096E-05	-2.945E-05	-5.406E-06	2.810E-05	1.288E-04	3.228E-04		
9	1.750E-05	2.813E-05	6.094E-05	1.753E-05	7.273E-05	6.809E-05	9.790E-05	3.201E-05	1.352E-04	1.290E-04		
10	9.132E-06	1.524E-05	2.893E-05	1.065E-05	3.129E-05	2.782E-05	3.573E-05	8.822E-06	3.184E-05	2.328E-05		

半径方向ブランケット

J/I	11	12	13
1	9.961E-06	3.075E-06	6.124E-07
2	4.601E-05	1.328E-05	3.100E-06
3	1.879E-04	5.053E-05	1.175E-05
4	3.031E-04	9.211E-05	2.321E-05
5	3.639E-04	1.176E-04	3.126E-05
6	3.700E-04	1.196E-04	3.177E-05
7	3.171E-04	9.624E-05	2.421E-05
8	2.045E-04	5.476E-05	1.270E-05
9	5.268E-05	1.535E-05	3.622E-06
10	9.479E-06	3.008E-06	6.338E-07

\* AX/BL (U) : 上部軸方向ブランケット

\* AX/BL (L) : 下部軸方向ブランケット

INNER CORE = -9.954E-03  
 OUTER CORE = 5.981E-04  
 RADIAL BL. = 2.573E-03  
 AXIAL BL. = 1.445E-03  
 TOKUNEN IC = -8.729E-04  
 TOKUNEN OC = -1.805E-04  
 TOKUNEN AXBL = 2.638E-04

表3.4-13 構造材密度係数分布

単位：(Δk/k')/(Δρ/ρ)

WORTH RAPID DENSITY COEFFICIENT SUS											
J/I	内側炉心						外側炉心				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	2.997E-05	4.856E-05	8.961E-05	3.562E-05	8.710E-05	7.569E-05	7.525E-05	1.868E-05	7.283E-05	5.710E-05	AX/BL(U)*
2	3.506E-05	5.660E-05	1.242E-04	3.591E-05	1.455E-04	1.269E-04	1.499E-04	5.702E-05	2.283E-04	2.281E-04	
3	-1.308E-04	-2.150E-04	-4.257E-05	-1.312E-04	-3.612E-04	-2.426E-04	-2.642E-04	2.599E-05	-2.608E-05	4.314E-04	炉心部
4	-4.789E-04	-8.115E-04	-5.401E-04	-4.827E-04	-1.603E-03	-1.327E-03	-1.392E-03	-1.557E-04	-1.076E-03	1.219E-04	
5	-7.075E-04	-1.210E-03	-8.849E-04	-7.233E-04	-2.431E-03	-2.052E-03	-2.160E-03	-2.749E-04	-1.764E-03	-1.026E-04	
6	-7.226E-04	-1.237E-03	-9.087E-04	-7.403E-04	-2.492E-03	-2.105E-03	-2.214E-03	-2.831E-04	-1.809E-03	-1.109E-04	
7	-5.107E-04	-8.699E-04	-5.922E-04	-5.202E-04	-1.739E-03	-1.443E-03	-1.509E-03	-1.741E-04	-1.169E-03	1.113E-04	
8	-1.611E-04	-2.713E-04	-8.985E-05	-1.680E-04	-4.968E-04	-3.773E-04	-3.512E-04	1.433E-05	-7.813E-05	4.520E-04	
9	1.824E-05	2.824E-05	1.070E-04	1.799E-05	9.624E-05	8.851E-05	1.581E-04	6.257E-05	2.478E-04	2.553E-04	AX/BL(L)*
10	1.898E-05	3.212E-05	6.227E-05	2.258E-05	6.733E-05	5.861E-05	7.954E-05	1.970E-05	7.375E-05	5.548E-05	

半径方向ブランケット			
J/I	11	12	13
1	2.397E-05	7.938E-06	1.769E-06
2	9.823E-05	3.150E-05	7.713E-06
3	3.508E-04	1.103E-04	2.681E-05
4	5.280E-04	1.926E-04	5.002E-05
5	6.144E-04	2.408E-04	6.541E-05
6	6.243E-04	2.448E-04	6.646E-05
7	5.517E-04	2.012E-04	5.214E-05
8	3.809E-04	1.195E-04	2.892E-05
9	1.126E-04	3.658E-05	9.021E-06
10	2.334E-05	7.986E-06	1.870E-06

- \* AX/BL (U) : 上部軸方向ブランケット
- \* AX/BL (L) : 下部軸方向ブランケット

INNER CORE = -3.465E-02  
 OUTER CORE = -5.021E-03  
 RADIAL BL. = 4.812E-03  
 AXIAL BL. = 2.807E-03  
 TOKUNEN IC = -3.058E-03  
 TOKUNEN OC = -8.474E-04  
 TOKUNEN AXBL = 5.411E-04

炉中心

軸 方 向 遮 蔽 体						半 徑 方 向 遮 蔽 体
③	⑦	上部軸方向 ブランケット ③	⑦	③	④ 半 徑 方 向 ブ ラ ン ケ ッ ト	
① 内 側 炉 心	⑤ 特 殊 燃 料 集 合 体	① 内 側 炉 心	⑥ 特 殊 燃 料 集 合 体	② 外 側 炉 心		
③	⑦	下部軸方向 ブランケット ③	⑦	③		
軸 方 向 遮 蔽 体						

図3.4-1 温度係数及び出力係数評価用領域分割モデル (MJ-MK 2 選定炉心)

## 4. 炉心熱特性の解析・評価

### 4. 1 炉心熱特性の評価

#### 4.1.1 概要

炉心の高度化を狙ったMK-II炉心の燃料仕様検討結果及び炉心出力分布評価結果に基づき、炉心熱特性を評価しその成立性を検討する。

##### 1) 炉心熱特性の概略評価

流量領域内ホット集合体被覆管最高温度

及び冷却材最高温度

最大線出力密度燃料最高温度

##### 2) 工学的安全係数の評価結果

##### 3) 径ブランケット燃料削除炉心の熱特性

#### 4.1.2 前提条件

##### 1) 被覆管温度制限条件

被覆管材に高温強度に優れた改良オーステナイト鋼<sup><1></sup>の使用を前提とすることから、被覆管許容温度の上昇が期待出来、現行の675℃から700℃に設定する。<1>PNC TN1410 92-001「高速増殖炉研究開発の現状 平成3年」

2) 設計最高温度評価用の工学的安全係数は、中空ペレット採用に伴う温度上昇効果を評価し現行設計値に加える。その他は現行設計値をベースとする。

3) 集合体内伝熱流動パラメータの内、周辺流れ効果係数はMK-2炉心のピン本数(169→127本)を考慮して設定する。

冷却材混合係数は流量条件、燃料仕様条件共現設定値の適用範囲内にあるので、現行の保守的設定値を採用する。

4) 流量配分領域は現領域区分のままとする。

### 4.1.3 熱流力特性の評価

#### 〔1〕燃料被覆管、冷却材最高温度特性

##### (1) 評価条件

##### i) 炉心出力分布

集集体積分出力：表4.1-1

流量領域内最大発熱集合体の発熱量は表中の領域積分出力変動にほぼ比例する。

##### ii) 伝熱流動パラメータ

- ・冷却材混合効果係数：以下の値（現設計値）を与える。

$$\varepsilon / \nu = 0.15 \cdot \text{Re}^{0.8} \quad (\text{炉心燃料})$$

$$\varepsilon / \nu = 0.012 \cdot \text{Re}^{1.0} \quad (\text{径ブランケット})$$

炉心の流量条件、仕様共本データの適用範囲内。

- ・集集体内流量分布：周辺流れ効果係数( F w ) = 1.13 → 1.16。

本設定値は図4-1の流動試験データに集集体内ピン本数の変化(169 → 127)を考慮した値(～1.12)に、従来並の余裕分3～4%を見込んだ値である。

##### iii) 工学的安全係数

- ・表4.1-2（現設計値+中空ペレット効果（後述））

(2) 評価結果

i) 冷却材、被覆管温度

流量領域毎最高温度特性：表4.1-3

$$T(MK2) = (T(MK1) - T_{in}) * Q' * FW' * HSF' + T_{in}$$

Q'、FW' : 集合体出力、周辺流れ効果変動分

HSF' : HSF 変動分

内側炉心の一部と径ブランケット全領域で被覆管温度制限 (700 °C) を越える。これは燃焼期間延長により炉心 (燃焼初期) ブランケット (末期) 共に寿命中の最大出力増加と、周辺流れ効果の低下 (炉心) による。

流量領域毎の被覆管最高温度集合体流量の 700 °C に対する余裕分或いは不足分比率 R<sub>1</sub> (%) を右欄に示す。ここで、第 1 - 3 領域 (IC) 及び第 6 領域 (OC) に装荷する特燃の流量は通常燃料と同一の流量として、流量過不足分 R<sub>1</sub> を求めているが、実際は特燃の集合体出力が十分小さいので熱的には十分余裕がある。

領域全体の流量の過不足分は ~0.4 % 程度であり、被覆管温度条件緩和と元々の余裕分 (第 8 領域を除き 2 ~ 3 %) により、集合体出力増をほぼ吸収しうる見込みである。

特燃集合体毎に流量をきめ細かく割りあてる場合には更に 0.5 % 程度必要流量に余裕が生じ、燃料領域全体の余剰流量の増加分は ~0.9 % となる。

径ブランケットについては流量配分再調整、削除、工学的安全係数合理化等を図る必要がある。

## 4. 2. 工学的安全係数の評価

### 4.2.1 評価対象因子の抽出

MK-2 炉心の高線出力、長サイクル期間、高燃焼度化に対して考慮すべき因子として以下のものが考えられる

- ・①中空ペレットの効果 ← ペレット内径（空孔径）製造公差、偏心効果
- ②照射（流路）変形 ← 照射期間増、高燃焼度化
- ③出力分布誤差、集合体間流量配分誤差 ← 性能試験の反映
- ④燃料製作公差 ← 燃料製造実績の反映

この内、②は従来知見及び実証炉での評価例より、燃焼初期の値（1.03）が末期迄をほぼ包絡することから現行値を用いるとし、詳細評価は別途行うものとする。又、③、④は合理化案の抽出項目として第5章「研究開発計画立案-5.3 熱設計 C) 工学的安全係数評価手法合理化」で検討する  
従ってここでは①中空ペレットの効果を評価する。

### 4.2.2 中空ペレットの燃料温度特性

1) 中心空孔径の製造上のバラツキ（製作公差）や位置の偏り（偏心）によりペレット表面から中心迄の距離（肉厚）が増減し、ペレット内温度上昇幅が変動することに対する高温点効果をあらたに考慮する必要がある、この為の高温点係数（HSF）を以下により評価する。

$$HSF = \Delta T_{f_{u,0.1}} (\text{空孔径変動時}) / \Delta T_{f_{u,0.1}} (\text{製造仕様孔径(ノミナル)})$$

中空ペレット燃料温度評価条件、評価モデル及び結果を付録Aに示す。  
評価は最大線出力燃料要素（480w/cm）を対象とし、空孔径を $1.8 \pm 0.3$  mmと変えた時の燃料温度変動を求めた。

#### ギャップコンダクタンス

	hg=1000	1100	[BTU/hr. f. ft <sup>2</sup> ]
$\Delta T_{f_{u,0.1}}$ (製造仕様孔径)	1296	1296	[°C]
$\Delta T_{f_{u,0.1}}$ (空孔径変動時)	1362	1363	[°C]
燃料最高温度(ノミナル)	2260	2226	[°C]

以上の評価結果より

$$HSF = 1363/1296 = 1.05_1 \quad \text{となる。}$$

従って、中心空孔径の変動に対する温度上昇効果として約5%を見込む必要がある。

・ 中心空孔径（公差）の影響

本評価の中心空孔仕様条件は、確保すべき燃料体積比（スミヤ密度）と海外炉（SPX（仏）、BN-600（ソ連）、PFR（英国）等での使用実績を考慮して  $1.8 \pm 0.3$  mmと設定した。SPXではペレット外径 $\phi 7.14$ mm、内径が  $\phi 2.0 \pm 0.2$  mm、密度95.5%T.D（スミヤ密度約83%）で、最大線出力470/cm、燃焼度7万（初期）～10万MWd/tを狙っている。

本評価の公差幅（0.3 mm）を更に増加或いはSPX並に変えた場合、ペレット内温度上昇の変動よりHSFは概略以下ようになる。

	HSF
$1.8 \pm 0.18$ mm	1.03 <sub>1</sub>
$1.8 \pm 0.2$ mm	1.03 <sub>4</sub>
$1.8 \pm 0.3$ mm	1.05 <sub>1</sub>
$1.8 \pm 0.4$ mm	1.06 <sub>8</sub>

これらの値とペレット内温度上昇に関わるその他の因子との合計が現設計での余裕幅～1%に収まるためには、次の2) 偏心効果と併せて内径公差幅の影響が3%を越えないことが必要である。従って炉心設計上の許容公差幅としては  $1.8 \pm 0.2$  mm 程度に抑える必要がある。今後炉心設計から燃料製造側への要求条件として提示、調整するものである。



2) 空孔の偏心についても以下のようにペレット肉厚変動に置き直して1)と同様の評価を行うと約5%の温度増加を見込む必要が有る。(図A-2)  
(周方向の熱拡散を無視した保守側の評価)。

$$HSF = \frac{\Delta T_{fuel} \text{ (ペレット肉厚変動時 (偏心時))}}{\Delta T_{fuel} \text{ (製造仕様ペレット肉厚)}}$$

この場合には以下の関係から偏心量が中心空孔径の製造公差内に収まるように、ペレット肉厚を規定する必要がある。

$$\begin{aligned} \text{〔偏心時肉厚 (片側)〕} &< \text{〔製造公差込みの肉厚〕} \\ (D_p - d_h) / 2 + \varepsilon &< (D_p - (d_h - \delta d_h)) / 2 \\ \varepsilon &< \delta d_h / 2 \end{aligned}$$

ここで  $D_p$  : ペレット径 ;  $\varepsilon$  : 偏心量  
 $d_h$  : 中心空孔径 ;  $\delta d_h$  : 中心空孔径公差

従ってペレット中心空孔の効果としては、空孔径の変動と偏心の両方をHSFに含めることになり、表4.1-2に示すように各々HSF=1.05と設定する。

### 3) 燃料最高温度

以上の検討により本燃料仕様での燃料最高温度は、燃料組織変化効果を含めた結果各々以下ようになる。

	1.8-0.3mm	1.8mm(ミナル)	1.8+0.3mm
公称値	: 2230℃	2174℃	2114℃
定格時最高	: 2569℃	2503℃	2431℃
過出力時最高	: 2848℃	2773℃	2693℃

#### 4. 3 径ブランケット燃料削除炉心の熱特性

Pu需給への柔軟な対応を想定して径ブランケット燃料集合体を削除した炉心の熱特性を概略評価する。

径ブランケット燃料集合体の出力分担比は5.4% (BOEC) ~ 6.5% (EOEC) と燃焼末期で高く、流量配分もこの末期の出力に対して現設計では約10%の流量を配分している。

そこで径ブランケット燃料集合体を削除し、径方向反射体で置換した炉心の出力分布より流量配分の見直しを行い、熱設計上の裕度を評価する。

##### 1) 評価条件

出力分担

	標準炉心		MK-2炉心	
	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
炉心部	94.59	93.47	94.42	92.59
径ブラ	5.41	6.53	5.58	7.41

##### 2) 評価の考え方

- ①必要流量増加要因：・炉心部出力比増 (94.42 → 100%)  
 ・置換反射体部出力 (最外周炉心の2 ~ 1.4%)  
 $\text{反射体部流量} = \text{最外周炉心流量} * 0.02 * \text{集合体数}$   
 14.64 (KG/S) (54+60+60)

- ②必要流量減少要因：・径ブランケット部

①+②より余剰流量を炉心部に振り分け、被覆管温度低減を図る。

##### 3) 評価結果

- ①・炉心部必要流量 : + 5.9% (← 100/94.42)  
 ・反射体必要流量 : + 1.1%  
 ②径ブランケット削除分 : - 10.0%

---

計 : - 3%

本余裕分3%を炉心部に充てると一律9°C程度の温度低減となる。(表4.3-1)

表4.1-1(a)領域積分出力と出力分担率

(MW t)

領 域	M J - M K 1 標準炉心 (出力分担率〔%〕)		M J - M K 2 サーベイ炉心(特燃20体) (出力分担率〔%〕)	
	BOEC	EOEC	BOEC	EOEC
内側炉心(IC)	379.94	369.92	376.36	361.49
{ MJ-MK1(108体)	(53.51)	(52.10)	(53.01)	(50.91)
{ MJ-MK2(98体)				
外側炉心(OC)	265.09	261.29	247.02	241.73
{ MJ-MK1(90体)	(37.34)	(36.80)	(34.79)	(34.05)
{ MJ-MK2(80体)				
特殊燃料集合体(IC10体)	—	—	12.25 (1.73)	11.98 (1.69)
特殊燃料集合体(OC10体)	—	—	10.81 (1.52)	10.65 (1.50)
径方向ブランケット	38.42 (5.41)	46.36 (6.53)	39.63 (5.58)	52.59 (7.41)
軸方向ブランケット	26.55 (3.74)	32.43 (4.57)	23.93 (3.37)	31.56 (4.44)
合 計	710.00	710.00	710.00	710.00

但し { MJ-MK1: 炉心高さ 93 cm  
 MJ-MK2: 炉心高さ 100 cm

表4.1-1(b)領域積分出力の比較

(MW t)

		B O E C			E O E C			
		2DBURN REG. No	MJ-MK1 (A)	MJ-MK2 特燃20体 (B)	(B-A)/A ×100 [%]	MJ-MK1 (A)	MJ-MK2 特燃20体 (B)	(B-A)/A ×100 [%]
炉 心 部	内	1 - 6 (+AX/BL)	24.30 25.60	26.50 27.73	9.06 8.32	23.38 25.00	25.01 26.67	6.95 6.65
		7 - 12 (+AX/BL)	47.48 50.00	51.61 54.01	8.69 8.03	45.79 48.92	48.89 52.13	6.76 6.58
	側 炉	(集集体数) 13 - 18 (+AX/BL)	(12体) (46.05) (48.48)	(2体) (8.31) (8.71)		(12体) (44.55) (47.56)	(2体) (7.92) (8.45)	
		1体当たり の出力	3.84 4.04	4.16 4.36	8.33 7.92	3.71 3.96	3.96 4.23	6.74 6.82
	心	19 - 24 (+AX/BL)	87.43 91.77	96.26 100.53	10.10 9.55	84.95 90.31	92.08 97.81	8.40 8.32
		IC	25 - 30 (+AX/BL)	81.94 85.90	90.70 94.55	10.70 10.07	80.03 84.89	87.37 92.50
	31 - 36 (+AX/BL)		92.74 96.89	102.97 107.03	11.03 10.47	91.22 96.28	100.22 105.59	9.86 9.67
	外 側 炉 心	(集集体数) 37 - 42 (+AX/BL)	(42体) (140.19) (144.63)	(32体) (112.58) (115.77)		(42体) (137.20) (142.55)	(32体) (108.85) (113.03)	
		1体当たり の出力	3.34 3.44	3.52 3.62	5.39 5.23	3.27 3.39	3.40 3.53	3.98 4.13
	OC	43 - 48 (+AX/BL)	124.91 128.31	134.44 137.74	7.63 7.35	124.09 128.15	132.88 137.15	7.08 7.02
径 方 向 ラ ン ケ ット		49 - 54, 99 - 102	22.58	23.25	2.94	27.07	30.46	12.53
	55 - 60, 103 - 106	10.78	11.18	3.73	13.14	15.10	14.90	
	61 - 66, 107 - 110	5.06	5.20	2.83	6.15	7.03	14.28	
特 燃	IC	142-147 (+AX/BL)	—	10体 (12.25 12.99)	—	—	10体 (11.98 12.84)	—
	OC	152-157 (+AX/BL)	—	10体 (10.81 11.31)	—	—	10体 (10.65 11.24)	—
合 計			710	710	—	710	710	—

表4.1-2 燃料集合体最高温度評価用工学的安全係数

処理法	因子	炉心燃料集合体用係数値					ブランケット燃料集合体用係数値				
		$\Delta T_{na}$	$\Delta T_{film}$	$\Delta T_{clad}$	$\Delta T_{gap}$	$\Delta T_{fuel}$	$\Delta T_{na}$	$\Delta T_{film}$	$\Delta T_{clad}$	$\Delta T_{gap}$	$\Delta T_{fuel}$
乗算処理	出力分布誤差	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
	原子炉熱出力誤差		1.02	1.02	1.02	1.02		1.02	1.02	1.02	1.02
	流路変形効果	1.03					1.02				
	集合体間流量配分誤差*1	1.06					1.06				
	ワイヤ巻付効果	1.005	2.37				1.01	3.33			
	原子炉出入口温度誤差	1.02					1.02				
	流路断面積製作公差	1.021					1.016				
	ペレット製作公差	1.029	1.042	1.042	1.042	1.028	1.004	1.023	1.023	1.023	1.023
	被ふく管内厚製作公差			1.041					1.057		
	冷却材物性値誤差	1.02					1.02				
統計処理	被ふく材熱伝導度誤差			1.03					1.03		
	ペレット熱伝導度誤差					1.10					
	膜熱伝達率誤差		1.30		1.40			1.30			
	ギャップ熱伝達率誤差		1.20	1.07				1.20	1.07		
ペレット偏心効果											
中心空孔効果(公差幅/偏心)					1.05/1.05						

(空欄は全て1.0)

\*1 第1, 2, 3, 4, 6 流量領域に対して1.06,

第5, 7, 8 流量領域に対して1.07

\* 冷却材, 被ふく管, 燃料ペレットの最高温度評価に適用する。

表4.1-3 流量領域毎最高温度特性

流量領域	集合体数	MK 1 炉心		MK 2 炉心		流量過不足分 (%) R <sub>i</sub>
		冷却材温度	被覆管温度	冷却材温度	被覆管温度	
1	18 (4)*	641	666	669	697	1.0
2	12 (4)*	643	667	670	697	1.0
3	24 (2)*	643	666	674	700	0.0
4	24	644	666	677	702	-0.7
5	30	652	667	687	704	-1.3
6	42 (10)*	646	664	666	686	4.7
7	18	650	667	676	695	1.7
8	30	659	674	686	703	-1.0
9	54	676	679	711	714	-4.6
10	60	667	668	707	708	-2.7
11	60	680	680	720	721	-7.0

$$\Sigma W_i * N_i * R_i / W_{t.o.} (15360t/h) = 0.39 \%$$

(表4.1-4)

\* 特殊燃料集合体本数

(注) 特殊燃料集合体流量を分離した場合の余剰流量増加: +0.5%

表4.1-4 炉内流量配分表 (100%電気出力, 公称値)

流量領域	集合体本数	冷却材流量 (Kg / sec)		圧力損失 (Kg / cm <sup>2</sup> )		集合体
		集合体1体当り	領域流量	集合体部	高圧プレナム内管	
1	18	21.35	384.3	4.005	0.069	4.700
2	12	20.04	240.5	3.581	0.067	1.126
3	24	19.04	456.9	3.267	0.065	1.442
4	24	17.67	424.0	2.860	0.061	1.853
5	30	16.47	494.2	2.525	0.057	2.192
6	42	19.24	807.9	3.327	0.051	1.396
7	18	16.17	291.1	2.443	0.042	2.209
8	30	14.64	439.1	2.046	0.042	2.686
9	54	4.50	243.2	0.292	*****	0.503
10	60	2.12	126.9	0.075	*****	0.720
11	60	0.977	50.6	0.020	*****	0.775
N-	246	0.138	34.0	0.478	*****	0.317
SHIELD	38	0.177	6.8	0.795	*****	-0.000
ING	40	0.150	6.0	1.087	*****	-0.292
CCR	10	0.18	81.8	0.417	*****	0.378
FCR	3	8.18	24.6	0.417	*****	0.378
BCR	6	2.98	17.9	0.089	*****	0.706

注1) 本表の記号は以下に示す通りである。

- 1~8: 炉心燃料集合体第1~第8領域
- 9~11: ブランケット燃料集合体第1~第3領域
- 12: 標準型中性子しゃへい体
- 13: 標準型中性子しゃへい体が流量可変機構位置に装荷された時

- F/C: 流量可変機構型中性子しゃへい体
- CCR: 粗調整棒
- FCR: 微調整棒
- BCR: 後備炉停止棒

表4.3-1 流量領域毎最高温度特性ー径ブランケット削除炉心ー

流量 領域	集合 体数	MK 1 炉心		MK 2 炉心	
		冷却材温度	被覆管温度	冷却材温度	被覆管温度
1	18	641	666	669	688
2	12	643	667	663	688
3	24	643	666	666	692
4	24	644	666	669	694
5	30	652	667	670	696
6	42	646	664	658	678
7	18	650	667	668	687
8	30	659	674	678	695



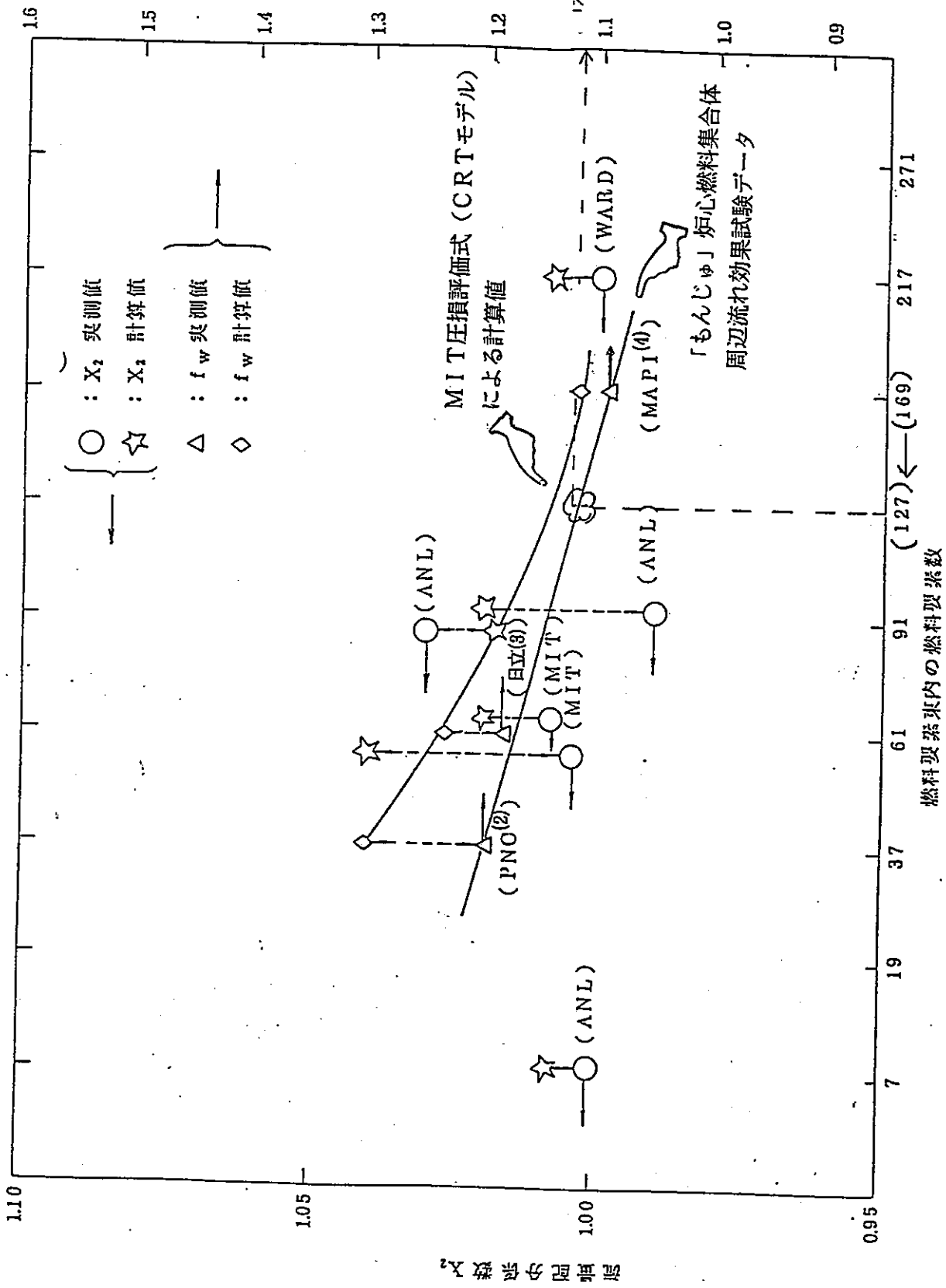


図4-1 ワイヤ型燃料集合体内の流量分配係数 $X_2$ 、周辺流れ効果係数 $f_w$ の設計評価式による値と実測値の比較

## 5. 研究開発計画の立案

FBRの開発推進の為に、高速増殖原型炉もんじゅの更なる活用と言う観点から、炉心の高性能化を目指す必要がある。このため、「線出力の向上」、「燃焼度の向上」、「照射試験能力の向上」を目標とした炉心の開発が必要である。

### (1) 炉心の高性能化

設置許可申請書では高燃焼度炉心まで許可が得られており、低燃焼度炉心から高燃焼度炉心に早期に移行して、燃料サイクルコストの低減、プラントの稼働率向上、再処理量の低減等を達成する必要がある。

高燃焼度炉心に移行するにあたり、最近のR&D結果を取り入れて、次世代炉用の燃料材料（開発済の高線出力、高燃焼度用）をもんじゅで検討し、炉心の高性能化を図る。

現状で炉心の高度化としては開発済の燃料材料に対応して、2ステップで行うこととする。

#### ① ステップ1（改良オーステナイト鋼）

取出平均燃焼度の目標は10万MWd/tとする。

炉心を高度化（高線出力化、高密度化）して、高次化プルトニウム、回収ウランを燃料として採用できるようにする。また、次世代炉用の燃料とほぼ同等な燃料について照射実績を積むことにより次世代炉の展開をスムーズにする。

#### ② ステップ2（フェライト鋼）

取出平均燃焼度の目標は15万MWd/tとする。

軽水炉において高燃焼度化、長サイクル炉心の開発が行われて、FBRにおいてもそれと同程度あるいはそれ以上の高燃焼度、長サイクル炉心を開発する。

### (2) 照射用炉心の開発

将来の高速増殖炉の開発は、経済性を重視する方向にあり、そのために高燃焼度化、高線出力化を計る必要がある。今後、FBR燃料材料開発を強力に推進して行くためには照射試験能力の拡充が必要である。

燃料開発という観点から、「常陽」には実験炉としての特色を活かした幅広い照射試験（もんじゅ、実証炉の燃料材料の照射、RTCB等）を実施する役割が、また、「もんじゅ」には稼働率が高く、大型集合体が照射できるという利点を活かした実証照射試験などの役割が期待されている。

また、米国FFTFの1991年以後の運転停止に伴い世界的な照射試験能力の不足が予想され、更に我が国の軽水炉燃料/材料の長寿命化への高速炉利用要望等を考慮すると、我が国の照射試験能力の拡充とその早期の実現が期待されている。

そのために必要なもんじゅの照射用炉心への改造と照射試験装置の開発に関連した検討項目を以下に示した。

### ① 照射用炉心の開発

燃料材料の照射用の特殊燃料集合体が装荷できる炉心を検討・開発する。

なお、十数年後には常陽のプラント寿命が到来することを考えれば、その代替炉心を準備しておくことは高速炉の開発に必要である。

### ② 照射試験装置の開発

燃料材料の照射特性を高信頼度で把握するには、照射試験条件を制御でき、または精度良く計測できる照射試験装置が必要である。具体的には、温度制御機能及びオンライン計測機能を有した照射試験装置の検討・開発が必要である。

上記のための開発のタイムスケジュールを表5-1に示した。この開発計画を推進するために平成4、5年に実施すべき概念設計及び設計手法の高度化についての要検討項目の概要を燃料設計、核設計、熱設計及び流量配分についてまとめた。

## 5.1 燃料設計

優先度の高い項目として、最大線出力評価、燃料健全性及び燃料製造性検討の検討項目をまとめて、表5-2に示した。

## 5.2 核設計

フィージビリティスタディで選定した有望な炉心概念について炉心の成立性を確認するのに必要な検討項目を表5-3に示した。

## 5.3 熱設計

優先度の高い項目として、集合体内温度分布平坦化案の検討、炉心流量配分適正化検討、工学的安全係数評価手法合理化及び燃料最高温度評価手法合理化の検討項目を表5-4に示した。

## 5.4 流量配分

もんじゅMK-II炉心に適合した流量配分を達成するための流量調節機構を開発するために必要な検討項目を表5-5に示した。

表5-1 「もんじゅ」炉心高性能化のタイムスケジュール

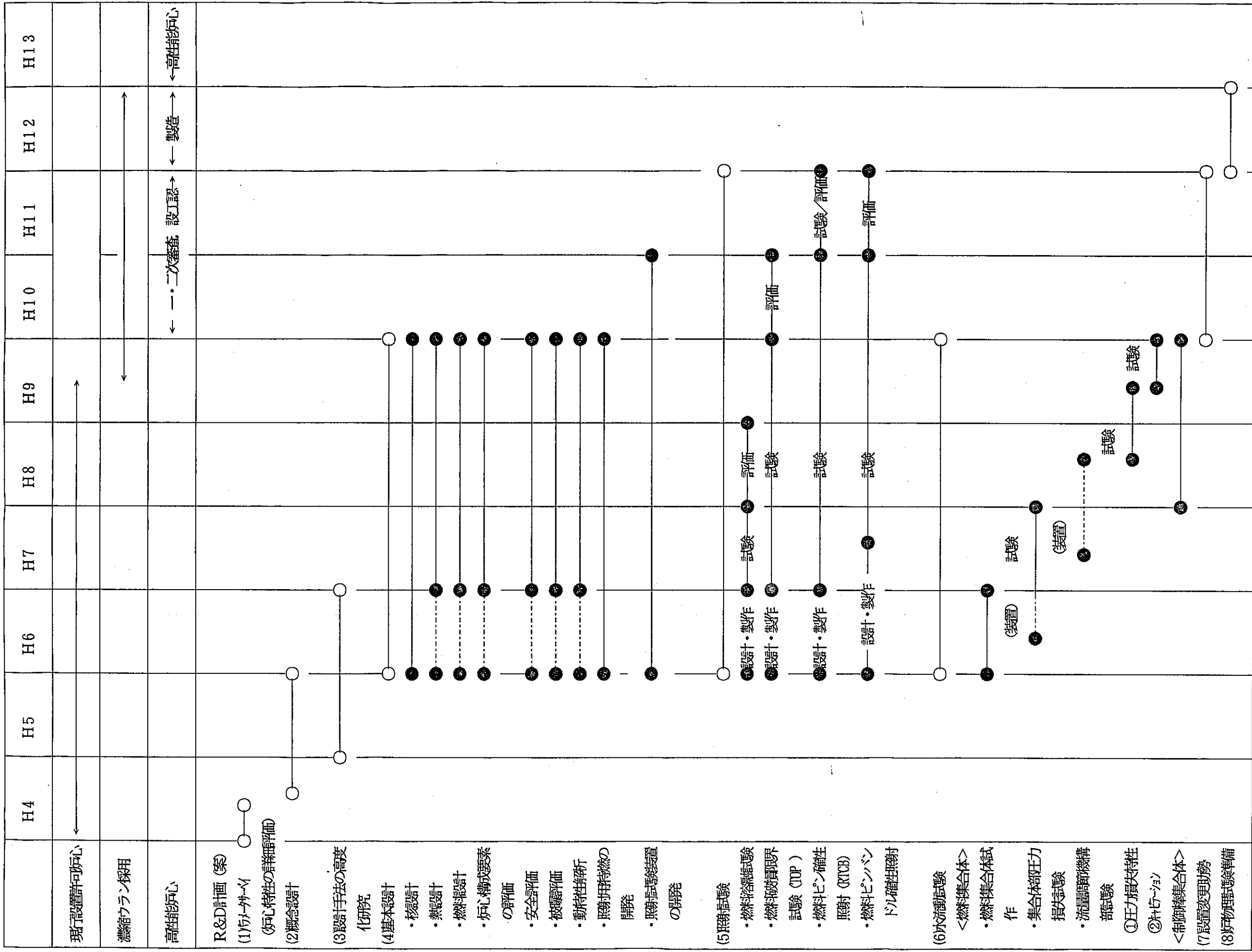


表5-2 燃料設計の要検討項目の概要

分野		燃料設計			備考
項目	目	目標	目的	概要	
最大線出力評価		定格許容最大線出力480w/cmの成索性確認		中心空孔を有す穴あきペレットの、燃料組織変化を考慮した温度評価を行い、各種不確かさを考慮しても、定格時最大線出力として480w/cm とする設計が可能であることを示す。	今回：3領域モデル（簡易評価） 本検討： 中空ペレット燃料挙動詳細モデルによる妥当性確認と成索性評価
燃料健全性評価		PCMIを考慮しての燃料の寿命を通しての健全性確認		中心空孔を有す穴あきペレット型燃料ピンの、寿命を通しての挙動解析を行い、燃焼の末期に至るまで過出力を考慮しても被覆管が健全であることを示す。	
燃料製造性検討		燃料体積比を向上させる為に採用した燃料仕様の製造性の検討を行い、必要R&D課題を摘出し、計画を立案する。		燃料ペレットクラッド間ギャップ 140μm, ペレット密度 95%TD, 中心空孔径1.8 ±0.3mm という仕様は現状の燃料製造技術の観点からは、大量生産は困難と考えられるので、製造性を確立する上で必要なR&D課題を明確にし、課題克服のための計画を立案する。	

表5-3 核設計の要検討項目の概要

分野		核設計	
項目	日	目標・目的	概要
炉心概念設計評価		<p>フィージビリティスタディで選定した有望な炉心概念について、炉心の成立性を確認する。</p>	<p>MK2炉心への変更に伴う炉心の概念設計として、下記の核設計の評価を実施する。</p> <p>(1) 照射用特殊燃料集合体配置の検討 3次元出力分布解析により、照射用特殊燃料集合体の配置及び仕様が炉心のピーク出力へ与える影響を評価する。</p> <p>(2) 反応度制御系成立性の確認評価 ① 中心制御棒(CCR)をINTAで置き換えた事に伴う、制御棒機能分担の見直しを行う。</p> <p>② ワンロッドスタック時も含む各制御棒反応度係数値を3次元解析に基づき評価し、反応度バランスの検討を行う。</p> <p>③ 主炉停止系制御棒(CCR, FCR)のB10濃縮度増加に伴う制御棒係数値解析及び反応度バランスを評価する。</p> <p>(3) 反応度係数の解析評価 ナトリウムボイド反応度、動特性パラメータ等一連の反応度係数の評価検討を行う。</p>
			備考

表5-4 熱特性の要検討項目の概要 (1/2)

分野	熱特性 (1/2)				備考
項目	目的	目標	目的	概要	備考
a) 集合体内温度分布平坦化案検討	集合体内流量・温度分布を平坦化する為の集合体構造概念を検討する。	集合体内流量・温度分布を平坦化する為の集合体構造概念を検討する。	燃料集合体の周辺部流量抑制構造概念を開発し、集合体内流量・温度分布特性改善による周辺流れ係数、最高温度低減を図る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 周辺部流量抑制構造検討</li> <li>(2) 集合体設計・製作</li> <li>(3) 流動伝熱試験 (炉外試験)</li> <li>(4) 設計成立性 (構造、熱流動) 評価・確認</li> </ul>	
b) 炉心流量配分適性化検討	被覆管温度制限を満足する領域流量の過不足分調整を図る。	被覆管温度制限を満足する領域流量の過不足分調整を図る。	炉心燃料領域内及び径ブランチ領域間で流量配分調整に必要な評価、流動試験による確認を行う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>(1) 流量配分評価条件設定 (被覆管CDF, 温度制限)</li> <li>(2) 集合体必要流量評価</li> <li>(3) 流量調整構造検討</li> <li>(4) 流動試験による確認評価。</li> </ul>	表5-5参照

表5-4 熱特性の要検討項目の概要 (2/2)

分野	熱特性 (2/2)			備考
項目	目	標	目的	概要
c) 工学的安全係数 評価手法合理化		炉心設計最高温度評価上で 考慮すべき各種の不確かさ 幅の合理的低減方法を検討 する。	実機性能試験の反映、評価手法高度 化により、個々の安全係数値 (HSF) 及び高温点温度低減を図る。 (1) HSF 合理化検討 ・性能試験反映 (出力分布誤差、流量配分誤差) ・ (乗算→統計) 項の分離 ・評価対象毎の係数分離 (部位、時期、) (2) HSF 適用法の合理化 ・因子間相関性採り入れ ・燃料製造データ (変動分布、 幅) を考慮した評価手法	
d) 燃料最高温度 評価手法合理化		高線出力 (360 → 480w/cm) 燃料の温度評価手法を合理 化し、最高温度低減を図る	燃料温度評価モデル、評価基準、中 空ペレット効果等を、国内外の照射 試験データ、評価実績に基づき検討 し、合理化手法を開発する。 (1) 燃料組織変化モデル (高密度、中空ペレット) (2) ギャップコングタックス 評価手法、誤差幅の合理化 低減検討。 (3) 温度変動主要因子の感度 解析 (モンテカルロ評価) (4) 照射データ取得、評価	



表5-5 流量配分の要検討項目の概要

分野	流量配分			備考
項目	目	標	目的	概要
流量調節機構の開発		<p>もんじゅMK-II炉心に適合した流量配分を達成するための流量調節機構を開発する。</p>	<p>MK-II炉心用の流量配分は、プランケット流量を減少させると共に炉心燃料も配分比を変更する必要があるため、このための流量調節機構を開発しなければならない。</p> <p>(1)流量調節機構の検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>炉心燃料集合体エントランスノズルのオリフィス検討を行い、流量配分比達成見通しを得る。</li> <li>高圧-低圧プレナム間の流量配分を変更するための中性子しゃへい体（スリット付）本数の適正化を検討する</li> </ul> <p>(2)流量調節機構単体試験（水流動試験）</p> <p>(1)の結果に基づき、炉心燃料集合体の流量ゾーン1～8迄の流量調節機構の単体試験を実施し、最適オリフィスを定める。</p> <p>(3)流量調節機構キャビテーション試験</p> <p>最適オリフィスに対し、流量ゾーン1～8迄のキャビテーション試験を実施し、問題が生じないことを確認する。</p> <p>(4)流量配分評価</p> <p>試験結果に基づき、MK-II炉心の流量配分評価を実施し、必要流量が確保されることを確認する。</p>	

## 6. まとめ

今回選定した高性能炉心の線出力、燃焼度及び照射用特殊燃料集合体の装荷本数は、それぞれ以下のとおりとなった。

- (1) 最大線出力 : 480 W/cm
- (2) 取出平均燃焼度 : 10万MWd/t
- (3) 照射用特殊燃料集合体の装荷本数 : 最大20体

選定した炉心の燃料仕様は以下のとおりであり、燃料製造側開発要素を伴う仕様である。

- (1) ピン径 : 7.8 mm
- (2) 被覆管肉厚 : 0.4 mm
- (3) ペレット被覆管ギャップ : 140  $\mu$ m
- (4) 中心空孔径 : 1.8 mm

この仕様のもとでCDF及び圧力損失が許容値内に納まることを確認した。

選定炉心の燃焼欠損反応度及び制御棒値は、従来の炉心に比較して以下のように変動したが、成立する見通しが得られた。

- (1) 燃焼欠損反応度は0.9% $\Delta k/k'$ 程大きくなった。
- (2) 制御棒値は10から20%小さくなった。

燃料被覆材を改良オーステナイトに変更したことにより、熱的制限値（被覆管温度）を675℃から700℃に変更すれば、炉心全流量は変えずに制限値以内に納まることが確認された。ただし、領域毎の流量配分は出力分布に対応して最適化する必要がある。

以上の検討結果を踏まえて、今回選定した高性能炉心を達成するために必要な研究開発計画を立案した。

## 付録 A 中空ペレットの燃料温度特性

### 1. 解析条件

#### ・被覆管

外径 : 7.8 mm  $\phi$   
内径 : 7.0 mm  $\phi$   
内面温度 : 584°C (最大線出力位置)

#### ・燃料ペレット

外径 : 6.86 mm  $\phi$   
中心空孔径 : 1.80 $\pm$ 0.30 mm  $\phi$

#### ・燃料領域密度

柱状晶領域 : 99 %TD  
等軸晶領域 : 97 %TD  
未変化領域 : 95 %TD

#### ・燃料境界温度

1400°C 等軸晶外側境界  
1800°C 柱状晶外側境界

#### ・最大線出力密度 480 W/cm

#### ・ギャップコンダクタンス パラメータとする。

case1 : 1000 BTU/ft<sup>2</sup>hrF = 0.5678 W/cm<sup>2</sup>°C

case2 : 1100 BTU/ft<sup>2</sup>hrF = 0.6246 W/cm<sup>2</sup>°C (ギャップ幅 160->140 $\mu$ m)

case1 : 1082 BTU/ft<sup>2</sup>hrF = 0.6144 W/cm<sup>2</sup>°C (照射データ評価結果を反映)

## 2. 解析方法

以下の計算式により各領域の温度を求める。

(1) 領域Ⅰ (柱状晶領域)

$$T = T_1 + \frac{Q}{2\pi} \int_r^{r_1} \frac{1}{r K_1(r)} \cdot \frac{r^2 - r_0^2}{r_p^2 - r_0^2} dr$$

(2) 領域Ⅱ (等軸晶領域)

$$T = T_2 + \frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{\rho_2}{\rho_3} \int_r^{r_2} \frac{1}{r K_2(r)} \cdot \frac{(r^2 - r_1^2) + \rho_1 / \rho_2 (r_1^2 - r_0^2)}{r_p^2 - r_0^2} dr$$

(3) 領域Ⅲ (未変化領域)

$$T = T_s + \frac{Q}{2\pi} \int_r^{r_s} \frac{1}{r K_3(r)} \cdot \frac{(r^2 - r_2^2) + \rho_2 / \rho_3 (r_2^2 - r_1^2) + \rho_1 / \rho_3 (r_1^2 - r_0^2)}{r_p^2 - r_0^2} dr$$

但し、

- $T_1$  : 半径  $r_1$  での温度
- $T_2$  : 半径  $r_2$  での温度
- $T_s$  : 燃料表面での温度
- $K_1, \dots$  : 各領域の熱伝導度
- $Q$  : 線出力密度

### 3. 結果

(1) case1 (ギャップコンダクタンス :  $1000 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.5678 \text{ W/cm}^2\text{ }^\circ\text{C}$  の場合)

	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2326	2260	2190
燃料表面温度	964	964	964
$\Delta T$	1362	1296	1226
中心空孔効果	1.0509	1.0000	0.9460

(2) case2 (ギャップコンダクタンス :  $1100 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.6246 \text{ W/cm}^2\text{ }^\circ\text{C}$  の場合)

	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2293	2226	2155
燃料表面温度	930	930	930
$\Delta T$	1363	1296	1225
中心空孔効果	1.0517	1.0000	0.9452

(3) case3 (ギャップコンダクタンス :  $1082 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.6144 \text{ W/cm}^2\text{ }^\circ\text{C}$  の場合)

	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2299	2232	2161
燃料表面温度	936	936	936
$\Delta T$	1363	1296	1225
中心空孔効果	1.0517	1.0000	0.9452

ギャップコンダクタンスをパラメータにして評価したが、中心空孔効果はあまり変化せず+5.1~5.2%の値となる。

燃料の組織変化を考慮した場合

(1) case1 (ギャップコンダクタンス :  $1000 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.5678 \text{ W/cm}^2\text{C}$  の場合)

	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2230	2174	2114
燃料表面温度	964	964	964
$\Delta T$	1266	1210	1150
中心空孔効果	1.0463	1.0000	0.9504

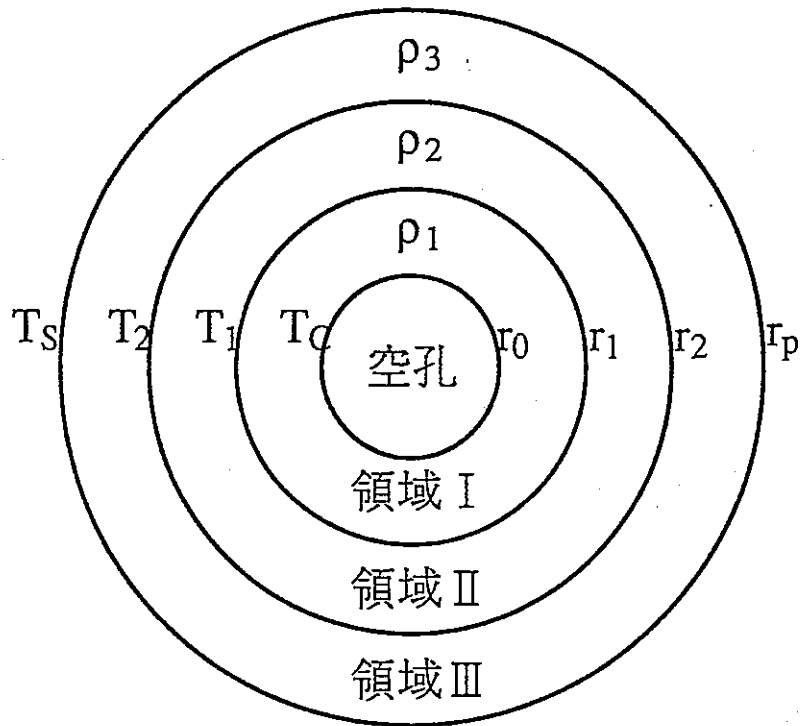
(2) case2 (ギャップコンダクタンス :  $1100 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.6246 \text{ W/cm}^2\text{C}$  の場合)

	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2199	2143	2082
燃料表面温度	930	930	930
$\Delta T$	1269	1213	1152
中心空孔効果	1.0462	1.0000	0.9497

(3) case3 (ギャップコンダクタンス :  $1082 \text{ BTU/ft}^2\text{hrF} = 0.6144 \text{ W/cm}^2\text{C}$  の場合)

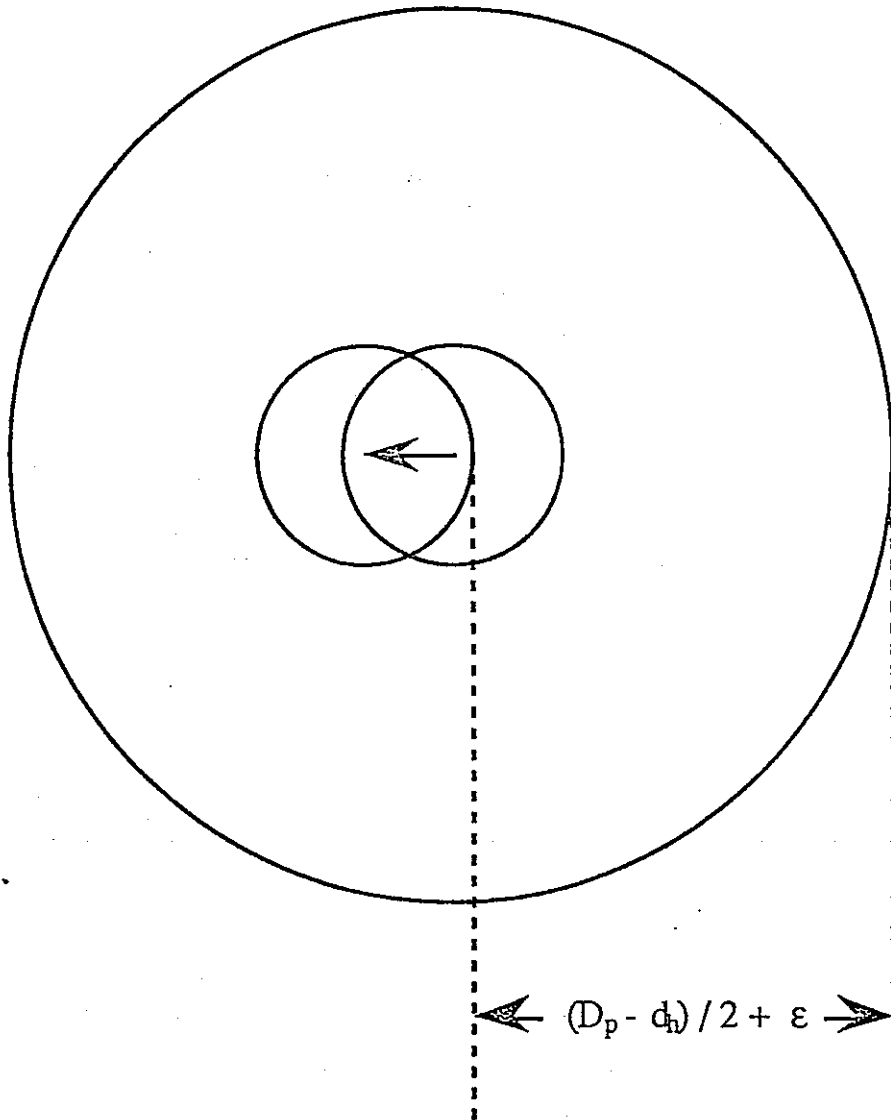
	- 0.3 mm $\phi$	ノミナル値	+ 0.3 mm $\phi$
燃料最高温度	2204	2148	2087
燃料表面温度	936	936	936
$\Delta T$	1268	1212	1151
中心空孔効果	1.0462	1.0000	0.9497

ギャップコンダクタンスをパラメータにして評価したが、中心空孔効果はあまり変化せず+4.6%の値となる。



図A-1 組織変化モデル

- $D_p$  : ペレット径  
 $d_h$  : 中空ペレット孔径  
 $\delta d_h$  : 中空ペレット孔径の公差  
 $\varepsilon$  : 中空ペレット孔径の偏心率



図A-2 中空ペレット径の偏心率モデル