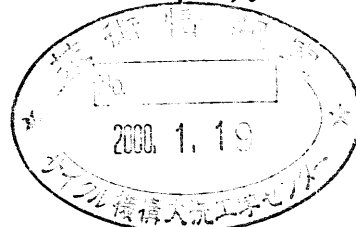


倍增時間短縮を指向した炉心・燃料仕様の検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

1999年3月



新型炉技術開発株式会社

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

〒 319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section

Technology Management Division

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194 Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

1999

倍增時間短縮を指向した炉心・燃料仕様の検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

関 雄次*、田中 洋司*

要 旨

FBR実証炉あるいは今後の高速炉の実用化においては、核燃料サイクルコスト低減に向けた高燃焼度化が指向されている。現在のPu需給状況から判断するに、当面、増殖性向上のニーズは小さいといえるが、2030年頃と想定されている高速炉実用化時代以降にはPu需給の変化により、増殖性への要求が高まる可能性もある。このため、「高燃焼度、長期運転サイクル」を目指した実用化炉心のレファレンス炉心仕様に対して、運転開始以降に倍增時間短縮の要求があった場合に、燃料集合体仕様のみを変更することにより、この要求に対応できる見通しを得るための検討を行ったものである。

レファレンス炉心（原子炉熱出力3800Mwtの富化度2領域均質炉心）において、取出平均燃焼度150GWd/t一定の条件で、倍增時間を短縮するための設計方策（炉心・燃料集合体仕様の変更案）について検討した。倍增時間短縮に有効な方策は、炉心インベントリを低減することと、軸方向ブランケット厚を増して増殖比を上げることであり、このために炉心高さを減じ、ガスプレナムも短縮して軸方向ブランケット厚を増し、炉心平均線出力を維持するように燃料ピン数/集合体を増加（ピン細径化）した。また、取出燃料平均燃焼度を一定に保つよう運転サイクル長を短かくした。

サーベイ結果に基づき、倍增時間短縮に好適な炉心（倍增時間短縮炉心）として上記の397本ピン炉心を選定した。Pu富化度の微調整を行った上で、倍增時間短縮炉心の炉心特性を評価した。また、この倍增時間短縮炉心をベースに、炉心高さを変えずに軸方向非均質炉心にした場合の倍增時間を評価し、均質炉心とほぼ同じ倍增時間を得た。

以上の検討から、運転開始以降に倍增時間短縮の要求があった場合に燃料集合体仕様のみを変更することにより、複合インベントリ倍增時間を30年程度に短縮できる見通しが得られた。

本報告書は、新型炉技術開発株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

契約番号：10C3968

サイクル機構担当部グループ：大洗工学センター

システム技術開発部炉心燃料工学グループ

* 新型炉技術開発株式会社

Study on Core and Fuel Specifications Aiming at Short Doubling Time

Yuji Seki*、Yoji Tanaka*

Abstract

In the JNC design of the reference core of a commercial fast breeder reactor, priority is placed on high-burnup fuel and long-cycle operation leading to a low fuel cycle cost. Less attention is paid to the breeding characteristics, given the present situation of plutonium demand and supply. However, after about 2030, a rapid growth of fast breeder reactors is expected and the need for plutonium breeding is likely to arise. Therefore, we have studied feasibility of meeting a future demand for short doubling time, only by modifying the fuel assembly specifications of the reference core, when required after the commencement of the commercial plant operation.

The survey has been made on a variety of modifications starting from the reference two-region homogeneous core under a fixed condition of average discharge fuel burnup of 150GWd/t. The study shows that an effective way to shorten the doubling time is a combination of modifications such as decreasing the core height and the gas plenum length, increasing the axial blanket thickness, increasing the number of fuel pins per assembly and shortening the period of the cycle operation.

On the basis of the survey, the 39/-pin core has been chosen as a suitable candidate for short doubling time and the core characteristics have been evaluated. In addition, a study has been made on axial heterogeneous core configurations, revealing that the doubling times are about the same as that of the homogeneous core.

This study shows that the complex inventory doubling time of the commercial plant can be shortened to about 30 years, only by modifying the fuel assembly specifications.

Work performed by Advanced Reactor Technology Co.,Ltd. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

Contract Number; 10C3968

JNC Liaison: Core and Fuel Eng.Grp., Systems Eng.Div., Oarai Eng.Ctr.

* Advanced Reactor Technology Co.,Ltd.

倍増時間短縮を指向した炉心・燃料仕様の検討

目次

1. まえがき	1-1
1.1 本検討の背景と目的	1-1
1.2 レファレンス炉心仕様と基本核特性	1-1
1.3 検討にあたっての制約条件	1-2
1.4 炉心特性評価方法	1-2
1.5 レファレンス炉心特性の再現計算	1-4
2. 倍増時間短縮方策の抽出	2.1-1
2.1 サーベイする設計パラメータ	2.1-1
2.2 運転サイクル長と倍増時間との関係	2.2-1
2.3 軸方向ブランケット厚さと倍増時間との関係	2.3-1
2.4 燃料ピン本数331本／集合体の炉心サーベイ	2.4-1
2.5 燃料ピン本数397本／集合体の炉心サーベイ	2.5-1
2.6 非均質炉心構成	2.6-1
3. 倍増時間短縮炉心の燃料集合体仕様の設定と炉心特性の評価	3-1
4. まとめ	4-1
謝辞	
添付資料1 最大線出力	添1-1
添付資料2 各炉心の燃料ピンの軸方向仕様・寸法	添2-1
添付資料3 CDF計算	添3-1

図表リスト

(表)

- 表1.2-1 レファレンス炉心の炉心燃料集合体及び炉心仕様
- 表1.2-2 レファレンス炉心の炉心基本条件及び燃料基本仕様
- 表1.2-3 レファレンス炉心の炉心燃焼特性
- 表1.4-1 倍増時間の定義と計算方法
- 表1.5-1 レファレンス炉心の炉心燃焼特性（再現計算結果）
- 表1.5-1（その2） レファレンス炉心の炉心燃焼特性（再現計算結果）
Pu富化度微調整後
- 表2.2-1 運転サイクル長を短くした時の原子炉倍増時間（450日×6バッチ）
- 表2.2-2 運転サイクル長を短くした時の原子炉倍増時間（386日×7バッチ）
- 表2.4-1 燃料ピン本数331本炉心の炉心特性（炉心高さ100cm）
- 表2.4-2（参考）燃料ピン本数331本炉心の炉心特性（炉心高さ100cm、炉心径縮小）
- 表2.5-1 燃料ピン本数397本炉心の炉心特性（炉心高さ80cm）
- 表2.5-2（参考）燃料ピン本数397本炉心の炉心特性（炉心高さ80cm、炉心径縮小）
- 表2.6-1 軸方向非均質炉心の炉心特性（内部ブランケット厚15cm）
- 表2.6-2 軸方向非均質炉心の炉心特性（内部ブランケット厚20cm）
- 表2.6-3 軸方向非均質炉心の炉心特性（内部ブランケット厚25cm）
- 表3-1 倍増時間短縮炉心の炉心燃料集合体仕様
- 表3-2 倍増時間短縮炉心の炉心特性
- 表4-1 倍増時間短縮の主要なサーベイ結果のまとめ

(図)

- 図1.2-1 レファレンス炉心の炉心配置
- 図1.2-2 燃料集合体軸方向寸法及び炉心燃料上端位置の設定の考え方
- 図1.5-1 レファレンス炉心の2次元RZ燃焼計算体系図
- 図2.3-1 軸方向ブランケット厚と増殖比との関係
- 図2.4-1 炉心径の縮小（外側炉心36体を半径方向ブランケットで置換）
- 図2.6-1 軸方向非均質炉心の炉心構成例（内部ブランケット厚20cmの場合）
- 図3-1 倍増時間短縮炉心の炉心構成

1. まえがき

1.1 本検討の背景と目的

FBR実証炉あるいは今後の高速炉の実用化においては、核燃料サイクルコスト低減に向けた高燃焼度化が指向されている。現在のPu需給状況から判断するに、当面、増殖性向上のニーズは小さいといえるが、2030年頃と想定されている高速炉実用化時代以降にはPu需給の変化により、増殖性への要求が高まる可能性もある。

増殖比の達成目標については、従来から1.2が目安とされてきたが、実用化像FBRにおける「高燃焼度（150～200GWd/t）＋長期運転サイクル（18～24ヶ月）」の要求と高増殖比の要求とは相反する面がある。つまり、増殖性の向上が望まれる状況は、高速炉自身から取出されるPuの一部を他の高速炉プラントの燃料として供給する必要がある場合であり、このような状況に対しては、倍增時間がより直接的な指標となる。

レファレンス炉心である「長期運転サイクル型炉心」は、今後の高燃焼度軽水炉燃料と十分に競合できる経済性を実現するため、「高燃焼度」・「長期運転サイクル」・「軽水炉燃料と同等の燃料加工コスト」を指向して炉心燃料集合体仕様を選定した炉心であり、その特徴は太径の燃料ピン（9.7mm）、高い炉心高さ（120cm）、比較的薄い軸方向ブランケット（厚さ1.2cm（上部）、10cm（下部））である。このレファレンス炉心では増殖性は成り行きであり、経済性を最優先としている。

しかし将来、プラント運転開始以降にPu需給バランスが逼迫して倍增時間短縮の要求があった場合に、燃料集合体仕様のみを変更することにより、この要求に対応できる見通しを確認しておくことが本検討の目的である。

検討項目として下記を実施している。

(1) 倍增時間短縮方策の抽出

(2) 倍增時間短縮炉心の燃料集合体仕様の設定と炉心特性の評価

(1)では、レファレンス炉心（原子炉熱出力3800MWtの富化度2領域均質炉心）からの炉心の互換性（燃料集合体配列ピッチ、制御棒配置）を保ちつつ、取出平均燃焼度150GWd/t一定の条件で、倍增時間を短縮できる設計方策（炉心・燃料集合体仕

様の変更案)を検討し、運転サイクル長、燃料ピン径、炉心高さ、炉心等価径、軸ブランケット厚さ、非均質炉心構成などの設計パラメータについてサーベイを行っている。

(2)では、上記(1)で抽出した倍増時間短縮方策のうち有力な方策をレファレンス高燃焼度炉心に適用することにより、炉心・燃料集合体仕様の変更案を設定し、倍増時間短縮を指向した高燃焼度炉心としての核特性を評価している。得られた核特性についてレファレンス高燃焼度炉心と比較検討することにより、倍増時間短縮炉心のもつメリット・デメリットについて考察を行っている。

1.2 レファレンス炉心仕様と基本核特性

サイクル機構殿より提示戴いたレファレンス炉心仕様及び基本炉特性は次の通りである。

- ・炉心燃料集合体及び炉心仕様 (表1.2-1)
- ・炉心基本条件及び燃料基本仕様 (表1.2-2)
- ・炉心燃焼特性 (表1.2-3)
- ・炉心配置 (図1.2-1)
- ・燃料集合体軸方向寸法及び炉心燃料上端位置の設定の考え方 (図1.2-2)

1.3 検討にあたっての制約条件

炉心の検討にあたっての制約条件は次の通りとしている。

- ・原子炉熱出力：3800MWt
- ・炉心取出平均燃焼度：150GWd/t
- ・レファレンス炉心と同一の燃料集合体ピッチ、制御棒配置
- ・プラント稼働率：85%以上
- ・許容最大線出力：430W/cm
- ・燃料スミア密度：82%TD
- ・燃料ピン全長：297.5cm
- ・炉心圧力損失(燃料集合体バンドル部)：3.5kg/cm²以下
- ・集合体流量最大値：48kg/s (冷却材出入口温度：550℃/395℃は参考値)
- ・径方向ブランケット燃料集合体は炉心燃料装荷位置にも装荷できるものとする。

(全炉心ナトリウムボイド反応度：5\$程度(目標)は参考値)

1.4 炉心特性評価方法

炉心特性の評価にあたっては、サイクル機構殿の手法に準じた手法で評価を実施した。

- ・ 核定数セットには、JENDL3.2ベースの70群統合炉定数(1998年版)を用いた。
- ・ 基本核計算：2次元RZ拡散燃焼計算
(弊社の2DBURNコードを使用した。拡散計算のメッシュ点はメッシュコーナーにある。)
 - ・ メッシュ幅：炉心内で約5cm。k-effは、無限小メッシュに外挿すると約0.2%△k増加する。(なお、CITATIONコードの場合には拡散計算のメッシュ点はメッシュセンターにあり、無限小メッシュに外挿するとkeffは約0.2%△k減少する。)
 - ・ 群数7群、群分割点は4/8/19/28/37/46/70
 - ・ サイクル末期のk-eff：1.002
- ・ 制御棒の扱い：全制御棒がパーク位置にあるものとし、制御棒吸収体下部が炉心上端位置にあるものとした。RZ計算で制御棒をリング化して扱うことに対する補正として、実証炉級炉心設計の補正值を参考に、集合体が更に大型化してFlux depressionが大きいことを勘案して、制御棒の B_4C の原子数密度を一律0.4倍に補正した。(いわゆるリング化補正因子：0.4)
- ・ 炉心圧力損失：提示戴いた手法に準じて実施した。圧力損失評価式にはKfK-PNCの式を用いた。
- ・ CDF評価：提示戴いた評価手法を使用した。この手法は、燃料要素の取出燃焼度と照射履歴(各燃焼サイクルでの軸方向出力分布、被ふく管温度履歴)を入力して、燃料要素内のFPガス内圧増加、被ふく管の内外面の腐食による肉厚減少を考慮しつつ、内圧クリープによるクリープ寿命分数和を評価するものである。
CDF評価はレファレンス炉心の計算手法に準じて実施した。即ち、
 - (a) 設計用クリープ強度式：ODS目標検討式(H10年度)
 - (b) Naによる外面腐食式：PNC-FMSの1992年材料強度基準(暫定案)式
 - (c) 評価対象位置については、JNC殿の制御棒部分挿入時の3次元出力分布評

価の結果から、制御棒第1リングと第2リングの間の内側炉心領域最内側メッシュ位置の燃料要素で、被覆管温度が最も厳しく、また、燃料要素燃焼度が最大となりCDFが最も厳しくなるとの結果が得られているので、ここでも同じ位置をCDF評価対象位置とした。

- (d) 評価対象の燃料要素燃焼度最大値（炉心高さ部平均）には、同じくJNC殿の3次元出力分布評価で得られている、18.7万MWd/tを用いた。
- (e) 燃料要素被覆管肉厚中心最高温度は、寿命初期の第1サイクルで685℃とし、要素発熱の漸減に合わせて温度の漸減を考慮した。Naによる被覆管外面腐食計算用の被覆管外面最高温度は、寿命初期の第1サイクルで681.6℃とし、要素発熱の漸減に合わせて温度の漸減を考慮した。
- (f) 今回のサーベイでは、軸方向ブランケット厚を増すので、この発熱寄与も考慮して、要素発熱には炉心部発熱と下部軸方向ブランケット発熱の合計値を使用した。

(なお、今回のCDFの評価は、被覆管の肉厚の選定が妥当であることを確認するために行ったものであり、基本的に燃料ピン径を変更した場合にはCDFの評価を実施しているが、ピン径が同一でCDF値が大きく変わらないと予想されるケースではCDFの評価は省いており、これらのケースでのCDF値には約を付して表示している。)

- ・燃料仕様（ピン径、肉厚、ワイヤ径、炉心高さ、軸方向ブランケット厚さ、プレナム長さなど）の設定にあたっては、燃料バンドル部圧力損失及び燃料被覆管CDFが制限値（圧力損失：3.5kg/cm²、CDF：0.5）を超えないように設定した。
(なお、第3章に記載しているように、CDFについては、今回検討の倍増時間短縮炉心は結果的にレファレンス炉心に比べCDFに余裕を残した設計となっている。)

- ・核特性の定義は以下の通りとしている。

増殖比：核分裂性Pu (²³⁹Pu、²⁴¹Pu) の生成対消滅比で表す。生成・消滅には捕獲反応、吸収反応、(n,2n)反応、²⁴¹Puの崩壊を考慮する。平衡炉心初期、末期での瞬時値、及び初期・末期の平均で表す。

倍増時間：提示戴いた定義と計算方法を表1.4-1にまとめている。原子炉倍増時間(RDT)と複合インベントリ倍増時間(CIDT)を用いる。

燃料インベントリ：平衡炉心の核分裂性 P u 重量。

最大線出力：拡散計算のメッシュ点位置で定義。新燃料と燃焼燃料との混在による出力ピーキングは、いわゆる mismatch ファクタで考慮する。
Mismatch ファクタは、着目位置での新燃料組成の核分裂反応数と、混在燃料組成（新燃料、燃焼燃料の均質化組成）の核分裂反応数の比で算出する。

高速中性子フルーエンス：0.1MeV以上。

全炉心ナトリウムボイド反応度：炉心燃料集合体のラッパ管内部のナトリウムのみボイド化する。

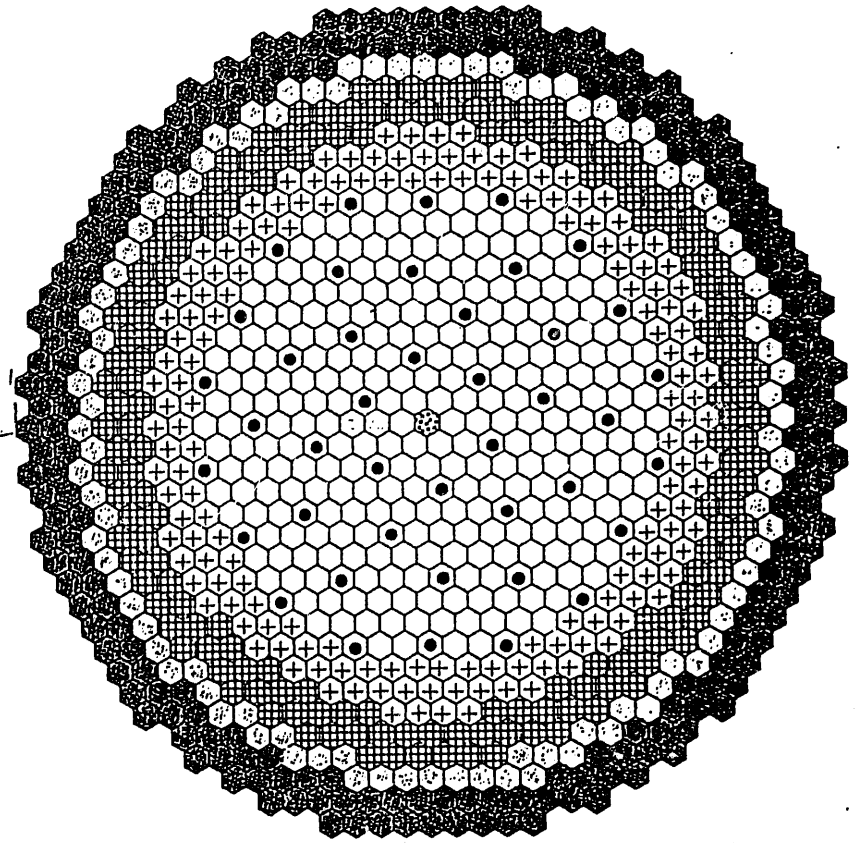
1.5 レファレンス炉心特性の再現計算

今回の倍増時間短縮サーベイを弊社の計算コードで実施するので、サーベイ実施に先立って、レファレンス炉心の特性を弊社の計算コードで評価し、JNC 殿の評価結果と比較して増殖比や原子炉倍増時間に有為な差が無いことを確認した。使用した 2 次元 R Z 計算体系図を図 1.5-1 に示す。弊社の計算結果を表 1.5-1 に示す。この計算は、P u 富化度には J N C 殿の値を用いたものである。この計算で平衡サイクル末期での実効増倍率が 1.002 より若干低い 1.000 となったので、P u 富化度を微調整して平衡サイクル末期での実効増倍率が 1.002 となるようにした。P u 富化度微調整後のレファレンス炉心特性を表 1.5-1（その 2）に示す。

表1.2-1 レファレンス炉心の炉心燃料集合体及び炉心仕様

項目	仕様	備考
<炉心燃料集合体>		
燃料ピン本数	271本	
被覆管材	PNC-FMS	→ フェライト系鋼
被覆管内径	8.50mm	被覆管肉厚は0.6mm
◇ 外径	9.70mm	
燃料要素バンドル部有効長さ	306.5 cm	→ 燃料ピン全長 297.5cm
燃料スミヤ密度	82%TD	ペレット外径/内径は未定
炉心燃料長さ	120.0cm	
下部軸ブランケット長さ	10.0cm	
◇ 上部	1.2cm	インシュレーターペレットに相当
下部ガスプレナム長さ	146.8cm	有効長さは143.8cm → 127.5cm
◇ 上部	28.5cm	→ 33.0 プレナムスプリング体積は約4 cc
ワイヤ径	1.40mm	
ワイヤ材	PNC-FMS	
ワイヤ巻付けピッチ	150mm	→ 200mm
燃料ピン配列ピッチ	11.15mm	
ラッパ管内対面間距離	186.4mm	
ラッパ管肉厚	3.0mm	
ラッパ管材	PNC-FMS	
集合体配列ピッチ	195.4mm	
その他	現行実証炉初期段階炉心に同じ	
<炉心構成要素>		
炉心燃料集合体数	432体	
制御棒	42体	仕様は現行実証炉初期段階炉心に同じ
SUS集合体	1体	同上、炉中心位置に装荷
径ブランケット燃料集合体	174体	仕様は現行実証炉初期段階炉心に同じ
SUS遮蔽体	96体	同上
B4C遮蔽体	210体	同上
<その他>		
炉心等価直径	447.2cm	制御棒含む
制御棒外接円直径	379.6cm	図2の炉心構成例の場合
炉心構成要素外接円直径	650.8cm	同上
バンドル部圧力損失	約3.6kg/cm ²	集合体流量48kg/secの場合 被覆管外径8.8mmの場合の集合体流量 40kg/secに相当

9-1



○	内側炉心燃料集合体	270体
+	外側炉心燃料集合体	162体
⊕	径ブランケット集合体	174体
⊗	SUS遮蔽体	96体
⊛	B4C遮蔽体	210体
●	制御棒	42体
⊙	SUS集合体	1体
合 計		955体

(JNC 殿より)

表1.2-2 レファレンス炉心の炉心基本条件及び燃料基本仕様

項目	炉心基本条件	
熱出力	3800MWth	
炉心材料	PNC-FMS鋼 → フェライト系鋼	
炉心高さ	120cm	
軸ブランケット厚さ	1.2cm (上部)	/ 10cm (下部)
上部ガスプレナム	10cm → 29.8cm (有効長さ 22.75cm)	
上部端栓	2cm	
Naプレナム厚さ	30cm	
燃料交換バッチ	5 (炉心)	/ 5 (ブランケット)

項目	燃料基本仕様	
Pu同位体組成比	Pu238/Pu239/Pu240/Pu241/Pu242/Am241 =3/52/27/9.5/7/1.5	
U同位体組成比	U235/U238=0.3/99.7	
集合体配列ピッチ	195.4mm	
ラッパ管肉厚	3mm	
燃料ピン本数	271本 (炉心)	/ 127本 (ブランケット)
被覆管外径	9.7mm (炉心)	/ 15.0mm (ブランケット)
被覆管肉厚	0.6mm (炉心)	/ 0.4mm (ブランケット)
スミア密度	82.0% (炉心)	/ 91.4% (ブランケット)
ワイヤ径	1.40mm (炉心)	/ 1.22 (ブランケット)
ワイヤ巻き付ピッチ	150mm (炉心) → 200mm	160mm (ブランケット)
体積割合 (燃料 *1, 構造材, 冷却材)	46.5%, 21.3%, 32.2% (炉心)	/ 60.6%, 13.5%, 25.9% (ブランケット)

*1: 被覆管内側

(JNC 殿より)

表1.2-3 レファレンス炉心の炉心燃焼特性

熱出力(MW)	3,800	
運転サイクル長(日)	540	
Pu富化度[内側炉心/外側炉心]	16.2/21.0	
炉心部取出平均燃焼度(万MWd/t)	15.3	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.3	
最大線出力(W/cm) *1 [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	381/405
	平衡サイクル末期	394/362
増殖比	平衡サイクル初期	0.88/0.20/1.08
	平衡サイクル末期	0.85/0.21/1.06
	平衡サイクル平均	0.86/0.21/1.07
倍増時間(年)	78.5	
最大高速フルエンス(n/cm ²)	5.4E+23	
Naポイド反応度 (\$) *2	6.8	

*1 : 燃焼ミスマッチファクタ考慮 (制御棒は全数パーク位置)

*2 : 70群直接計算 (右表参照)。

遅発中性子発生割合

3.44E-03

[EOEC]

ポイド化領域 (ラッパ管内) *4		Naポイド反応度 (% Δk/kk' / \$)	
1.基準		-	
2.(a)をポイド化	*1	2.3	/ 6.6
3.(a)~(b)をポイド化	*1	2.6	/ 7.6
4.(a)~(e)をポイド化	*1	2.5	/ 7.3
5.(a)~(f)をポイド化	*2	2.3	/ 6.6
6.上記4.に輸送効果を考慮。	*3	2.5	/ 7.4
7.上記5.に輸送効果を考慮。	*3	2.4	/ 6.8

*1 : 基準のNa原子数密度に対して90.9% (ラッパ管内相当) をポイド化。

*2 : 基準のNa原子数密度に対して96.8% (ラッパ管内相当) をポイド化。

*3 : 輸送効果として0.8を考慮。

*4 : (a)内側炉心,(b)外側炉心,(c)上部軸ブランク1.2cm, (d)上部がスプレッド10cm,(e)上部端栓部2cm,(f)Naブランク30cm

(JNC殿より)

以下に示す二種類の定義による倍増時間（原子炉倍増時間、複合インベントリ倍増時間）を使用する。

(1) 原子炉倍増時間

1基の原子炉のみで考えた場合の倍増時間を原子炉倍増時間RDTと称し、下記で定義する。

$$\bullet \quad RDT = \text{初装荷fissile} / \text{年間fissile利得}$$

ここで、

初装荷fissile： 新燃料装荷時のfissileインベントリ（平衡炉心）

年間fissile利得： 1年当りのfissile増加量

(2) 複合インベントリ倍増時間（IDT 及び CIDT）

核分裂物質は再処理されて始めて燃料として使用できるので、サイクル全体を考えて倍増時間を定義したインベントリ倍増時間（IDT）がより合理的である。

このIDTはfissileの増加量が、炉内及び炉外（貯蔵、再処理、輸送、加工中）に存在するfissileの合計量に等しくなるのに必要な時間である。

$$\bullet \quad IDT = \left[\text{初装荷fissile} \times \text{炉外ファクター} \right] / \left[\text{年間fissile利得} \times (1 - \text{炉外fissile損失率}) \right]$$

ここで、

初装荷fissile： 新燃料装荷時のfissileインベントリ（平衡炉心）

炉外ファクター： $1 + (\text{燃料炉外滞在期間}) / (\text{燃料炉内滞在期間})$

燃料炉外滞在期間： 5年を想定

燃料炉内滞在期間 = $(\text{サイクル長} + \text{燃交} \cdot \text{定検期間}) \times \text{バッチ数}$
燃交・定検期間として3ヶ月を想定

年間fissile利得： 1年当りのfissile増加量

炉外fissile損失率： 再処理・加工中のfissile損失率として2%を想定
(炉外 ^{241}Pu 崩壊は無視)

さらに複数のFBRが存在する場合には、複利効果によりIDTの時間が経過しなくても新たなFBRを建設するのに必要なfissileを得ることができる（複合インベントリ倍増時間CIDT）。

十分な数のFBRがあると仮定すると、倍増時間の短縮ファクターは0.693 (=ln 2) となり、

$$\bullet \quad CIDT = 0.693 \times IDT$$

表 1.5-1 レファレンス炉心の炉心燃焼特性（再現計算結果）

レファレンス炉心（Pu 富化度は、JNC 殿の値を用いた。）

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	540 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	16.17/20.97	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.4	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.1	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	390/394
	平衡サイクル末期	395/358
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.64/0.25/0.15/0.07/1.10
	平衡サイクル末期	0.62/0.24/0.15/0.07/1.07
	平衡サイクル平均	0.63/0.24/0.15/0.07/1.08
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	7.01	
原子炉倍增時間 (年)	65.3	
複合インベントリ倍增時間 (CIDT) (年)	72.8	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	5.3E+23	
CDF	0.105 (炉心部発熱のみ:0.078)	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	2.82	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	120
上部軸ブランケット長さ (cm)	1.2
下部軸ブランケット長さ (cm)	10
下部プレナム有効長 (cm)	127.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	271
被覆管外径 (mm)	9.7
被覆管肉厚 (mm)	0.6
ワイヤ径 (mm)	1.4
ペレット外径 (mm)	8.32
ペレット内径 (mm)	2.62

表 1.5-1 (その2) レファレンス炉心の炉心燃焼特性 (再現計算結果)

Pu 富化度微調整後

平衡末期 keff が 1.002 となるように富化度を調整

炉心燃焼特性

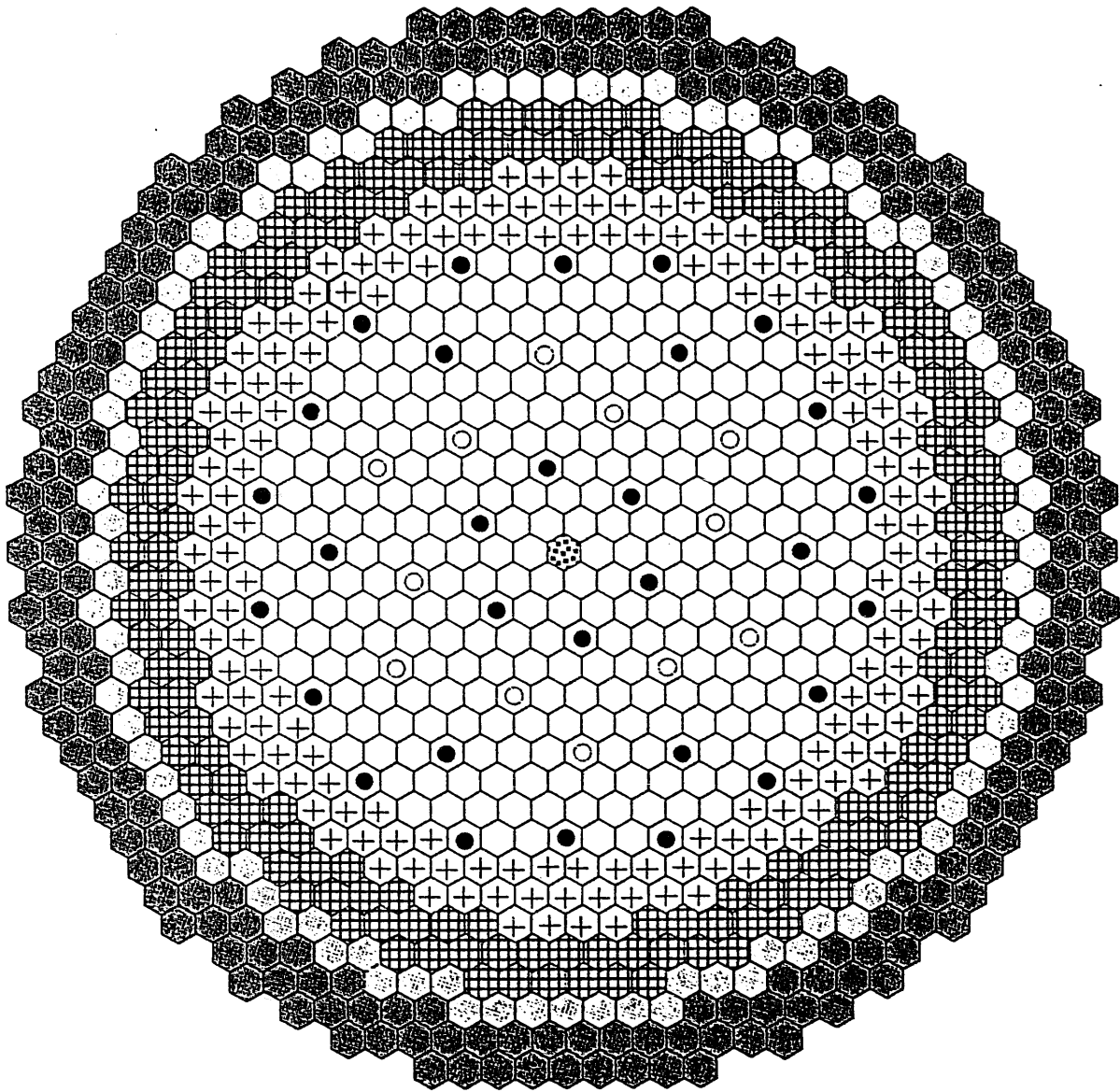
熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	540 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	16.32/21.16	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.4	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.2	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	390/396
	平衡サイクル末期	394/359
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.63/0.24/0.15/0.06/1.09
	平衡サイクル末期	0.62/0.24/0.15/0.07/1.07
	平衡サイクル平均	0.62/0.24/0.15/0.07/1.08
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	7.08	
原子炉倍増時間 (年)	70.0	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	78.1	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	5.3E+23	
CDF	約 0.1	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	2.82 ρ	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	120
上部軸ブランケット長さ (cm)	1.2
下部軸ブランケット長さ (cm)	10
下部プレナム有効長 (cm)	127.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	271
被覆管外径 (mm)	9.7
被覆管肉厚 (mm)	0.6
ワイヤ径 (mm)	1.4
ペレット外径 (mm)	8.32
ペレット内径 (mm)	2.62



	内側炉心燃料集合体	270体
	外側炉心燃料集合体	162体
	径ブランケット集合体	174体
	SUS遮蔽体	96体
	B ₄ C遮蔽体	210体
	主炉停止系制御棒	30体
	後備炉停止系制御棒	12体
	SUS集合体	1体
合 計		955体

図1.2-1 レファレンス炉心の炉心配置

(JNC殿より)

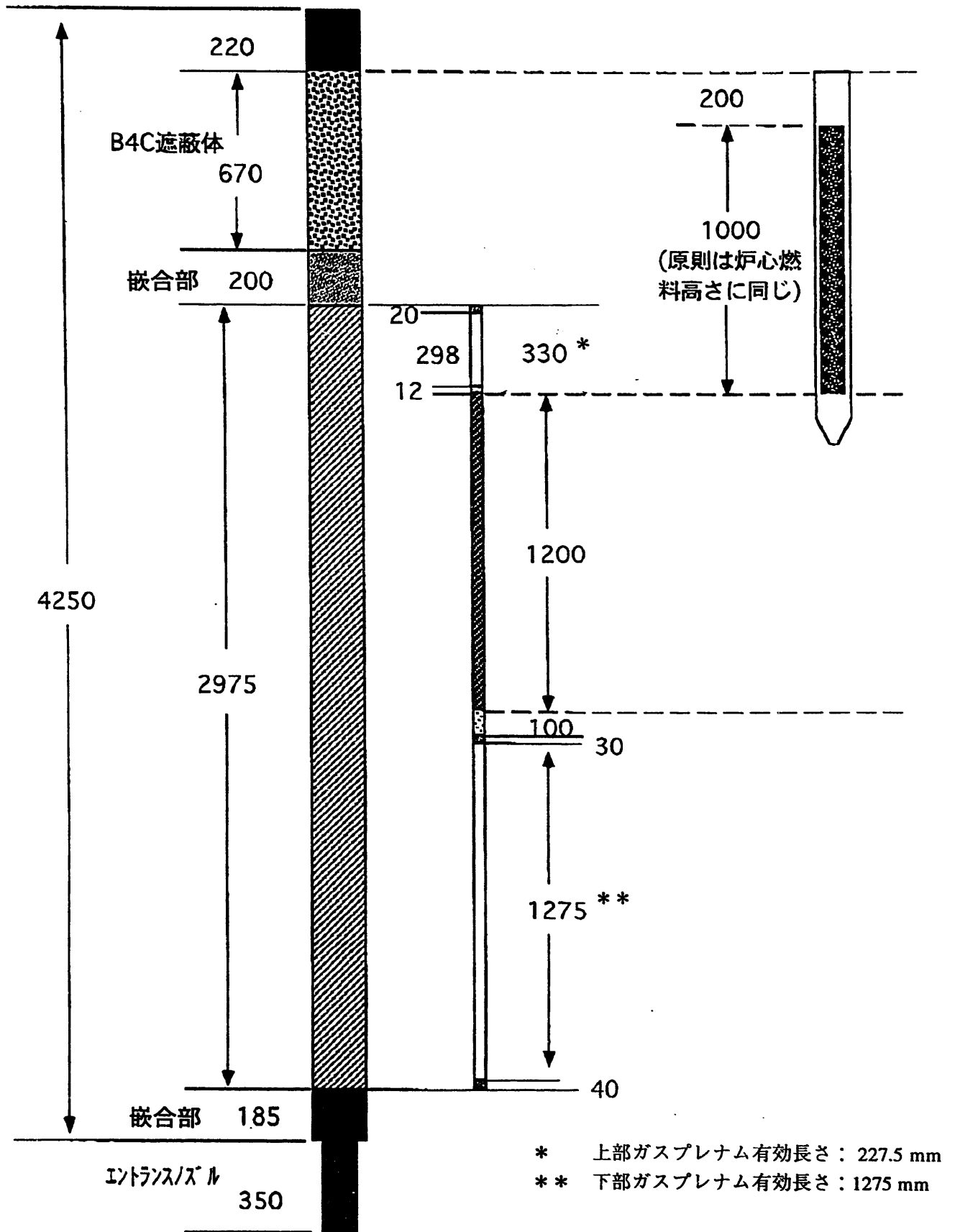


図1.2-2 燃料集合体軸方向寸法及び炉心燃料上端位置の設定の考え方

(JNC殿より)

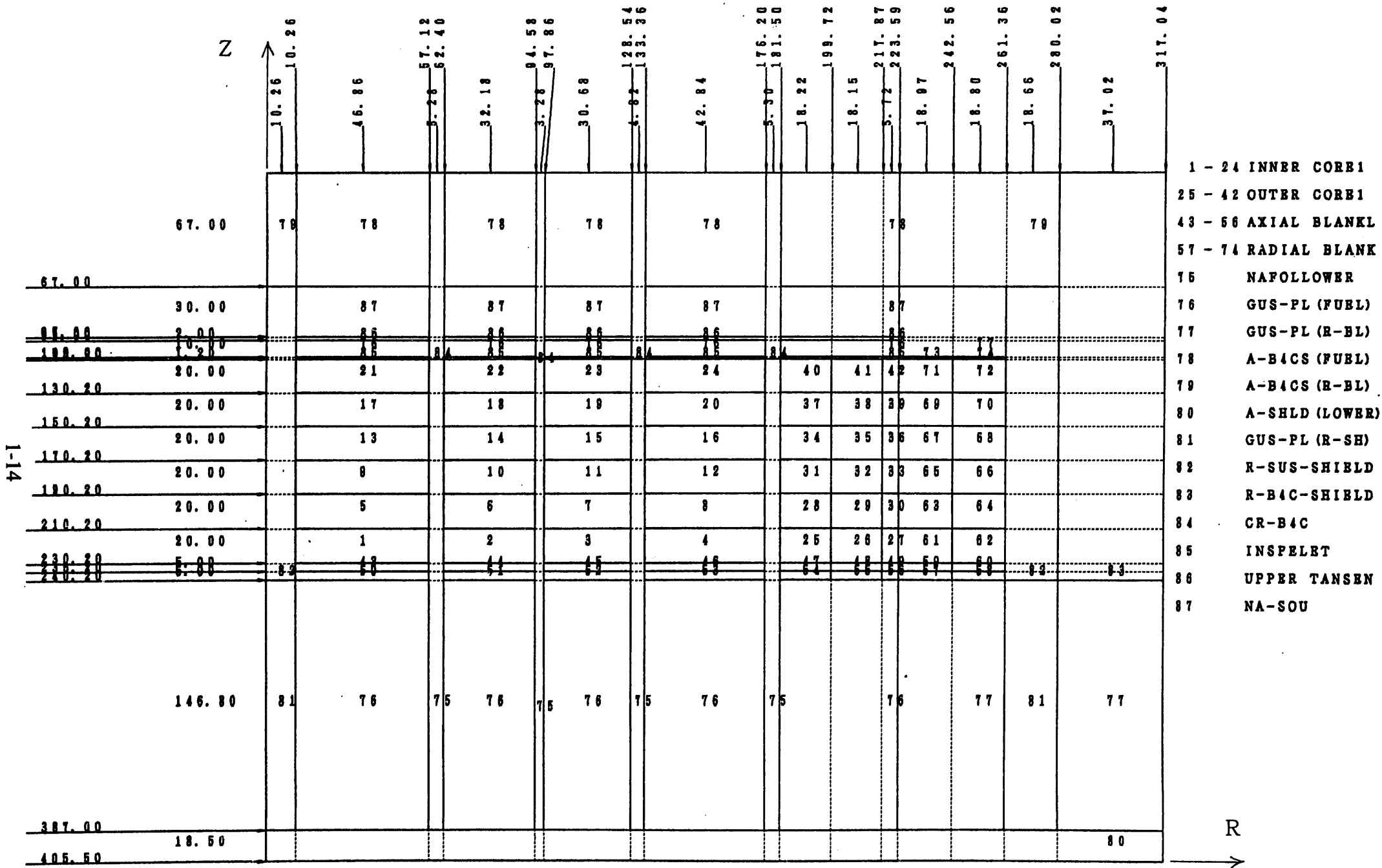


図1.5-1 レファレンス炉心の2次元R Z 燃焼計算体系図

(JNC 殿より)

2. 倍増時間短縮方策の抽出

レファレンス炉心をベースとして、取出平均燃焼度15万MWd/t一定の条件で、倍増時間を短縮できる設計方策（炉心・燃料集合体仕様の変更案）を抽出するための炉心サーベイを実施する。

2.1 サーベイする設計パラメータ

倍増時間（ここでは原子炉倍増時間RDT）は、炉出力が一定の下では

$$RDT \propto FLOAD / BG$$

ここで、FLOAD：Fissileインベントリ（平衡炉心）

BG：増殖ゲイン（Breeding Gain）（=BR-1.0）

BR：増殖比

従って、倍増時間を短縮するには、Fissileインベントリを小さくすること及び増殖比を大きくすることが有効である。

倍増時間の観点から見たレファレンス炉心の特徴は、

- ・ 太径の燃料ピン（9.7mm）採用： 既に燃料体積比は46.5%に達しており、炉心部の増殖性が高い炉心となっている。
- ・ 高い炉心高さ（120cm）： 中性子経済が良い点からは、Pu富化度が低くなって炉心部の増殖比は良好であるが、炉心のインベントリが大きくなって倍増時間は長くなっている。
- ・ 薄い軸方向ブランケット（厚さ1.2cm（上部）、10cm（下部））：これを厚くすることで、totalの増殖比を増加でき、倍増時間を短縮できる。
- ・ 長い運転サイクル長（540日、約18か月）： これを短くすることで、燃焼反応度を小さくでき、Pu富化度を下げて増殖比を上げることができる（後述参照）。

倍増時間短縮のためにサーベイする設計パラメータとしては、

- ・ 運転サイクル長
- ・ 燃料ピン径
- ・ 平均線出力
- ・ 炉心高さ

- ・炉心等価径
- ・軸方向ブランケット厚さ
- ・非均質炉心構成（後述参照）

などを考慮することとしたが、今回のサーベイの前提条件である各種の制約条件（炉心取出平均燃焼度、燃料集合体寸法、燃料ピン長、炉心圧力損失、CDF制限など）があり、これらの設計パラメータを単独では動かすことはできない。特に、炉心取出平均燃焼度（15万MWd/t 一定）は、設計パラメータと以下のような関係にある。

$$BU = \frac{[\text{炉心部出力}] \times [\text{運転サイクル長}] \times [\text{バッチ数}]}{\left\{ (\pi/4) \cdot d_{in}^2 \cdot \rho_{TH} \cdot f_{smear} \cdot n_p \cdot FASS \cdot H_c \right\}}$$

ここで、

d_{in} ：燃料ピン内径、 ρ_{TH} ：燃料理論密度、

f_{smear} ：燃料スミア割合、

n_p ：集合体内の燃料ピン本数、FASS：炉心燃料集合体数、

H_c ：炉心高さ

また、

$$\begin{aligned} [\text{平均線出力}] &= [\text{炉心部出力}] / \{ n_p \cdot FASS \cdot H_c \} \\ &= [\text{最大線出力}] / [\text{出力ピーキングファクタ}] \end{aligned}$$

ここでは次のようなサーベイを行っている。

(1) 運転サイクル長の短縮

運転サイクル長を単独では変更できないので、 $[\text{運転サイクル長}] \times [\text{バッチ数}]$ が一定の条件で、運転サイクル長を短縮し、バッチ数を増加させる。

(2) 軸方向ブランケット厚さの増加

軸方向ブランケット厚さを増加すると、プレナム長が変化してCDFに影響することになるが、ここでは、軸方向ブランケット厚さを単独で変化させることができるものとして、増殖比・倍增時間の変化をサーベイする。

(3) 集合体内ピン数の増加（271本→331本、397本）

レファレンス炉心仕様に対して倍增時間短縮に有効な方策は、炉心インベントリを低減することと、軸方向ブランケット厚を増して増殖比を上げることである。こ

のために「炉心高さ」を減じ、「ガスプレナム」も短縮して「軸方向ブランケット厚」を増し、「炉心平均線出力」を維持するように「集合体内ピン数」を増加（ピン細径化）することとした。燃料体積比はほぼ維持している。また、炉心取出燃料燃焼度を一定（15万MWd/t）に保つよう「運転サイクル長」を短かくした。従って、このサーベイでは、集合体内ピン数を増加したことによる単独の効果を見るのではなく、上記の複数の設計パラメータの複合効果を見ることになる。

（注： 設計パラメータは相互に関連しているので個々の設計パラメータを単独で動かした場合の増殖比・倍増時間への効果を見ようとしても、意味のある結果は得られない。例えば、集合体内ピン数増加（ピン径を細径化して燃料体積比をほぼ一定とする）のみを単独で行っても、増殖比・倍増時間の変化は現れないからである。）

(4) 非均質炉心構成

非均質炉心構成については、均質炉心について好適な炉心仕様を選定した後、炉心高さを均質炉心と同一に保って、炉心内に軸方向ブランケットを設けた軸方向非均質炉心での検討を行っている。

2.2 運転サイクル長と倍増時間との関係

炉心取出平均燃焼度と運転サイクル長とは次の関係がある。

$$BU = \frac{[\text{炉心部出力}] \times [\text{運転サイクル長}] \times [\text{バッチ数}]}{[\text{炉心燃料装荷量}]}$$

ここで、BU：炉心取出平均燃焼度：15万MWd/t 一定。

炉心燃料装荷量がレファレンス炉心と同一の場合、炉心取出平均燃焼度一定の条件下では、 $[\text{運転サイクル長}] \times [\text{バッチ数}]$ も一定となる。ここでは、以下のよう¹に運転サイクル長を短くし、これに応じてバッチ数を増加させる。炉心のPu富化度は、平衡サイクル末期の k_{eff} が1.002となるよう調整した。

	<u>レファレンス炉心</u>	<u>サーベイ (1)</u>	<u>サーベイ (2)</u>
・ 運転サイクル長	540日 (約18か月)	450日	386日
・ 燃料交換バッチ数	5バッチ	6バッチ	7バッチ

結果を表2.2-1、表2.2-2に示す。取出平均燃焼度一定の条件下で、炉心装荷量も同一としている場合には、運転サイクル長を短縮すると、僅かに増殖比は向上し、倍増時間も僅かに短縮できるが、効果は小さい。これは、次のように説明できよう。例として、簡単のために次の3バッチ炉心と4バッチ炉心での平衡炉心末期での炉心内の平均燃焼度を比較してみる。両炉心の取出平均燃焼度を1とすると、

	<u>3バッチ×12か月</u>	<u>4バッチ×9か月</u>
	1/3	1/4
	2/3	2/4
	<u>3/3</u>	3/4
炉心平均燃焼度	2/3 = 0.667	<u>4/4</u>
		炉心平均燃焼度 10/16 = 0.625

即ち、4バッチ×9ヶ月の方が炉心平均燃焼度が僅かではあるが低くなる。従って装荷燃料のPu富化度は低くて済む。従って炉心の増殖比は僅かであるが向上する。

表 2.2-1 運転サイクル長を短くした時の原子炉倍増時間 (450 日×6 バッチ)

運転サイクル長及びバッチ数を 540 日×5 バッチから 450 日×6 バッチに変更
炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	450 x 6	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	16.21/21.02	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.4	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.0	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	392/394
	平衡サイクル末期	395/363
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.63/0.25/0.15/0.07/1.09
	平衡サイクル末期	0.62/0.24/0.15/0.07/1.07
	平衡サイクル平均	0.63/0.24/0.15/0.07/1.08
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	7.03	
原子炉倍増時間 (年)	68.2	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	75.3	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	5.4E+23	
CDF	約 0.1	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	2.82	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	120
上部軸ブランケット長さ (cm)	1.2
下部軸ブランケット長さ (cm)	10
下部プレナム有効長 (cm)	127.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	271
被覆管外径 (mm)	9.7
被覆管肉厚 (mm)	0.6
ワイヤ径 (mm)	1.4
ペレット外径 (mm)	8.32
ペレット内径 (mm)	2.62

表 2.2-2 運転サイクル長を短くした時の原子炉倍増時間 (386 日×7 バッチ)

運転サイクル長及びバッチ数を 386 日×7 バッチに変更

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	386 x 7	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	16.15/20.93	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.4	
燃焼反応度(%dk/kk')	1.5	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	394/391
	平衡サイクル末期	397/365
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.63/0.25/0.15/0.07/1.09
	平衡サイクル末期	0.62/0.24/0.15/0.07/1.08
	平衡サイクル平均	0.63/0.24/0.15/0.07/1.09
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	7.00	
原子炉倍増時間 (年)	68.2	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	74.6	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	5.5E+23	
CDF	約 0.1	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	2.82	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	120
上部軸ブランケット長さ (cm)	1.2
下部軸ブランケット長さ (cm)	10
下部プレナム有効長 (cm)	127.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	271
被覆管外径 (mm)	9.7
被覆管肉厚 (mm)	0.6
ワイヤ径 (mm)	1.4
ペレット外径 (mm)	8.32
ペレット内径 (mm)	2.62

2.3 軸方向ブランケット厚さと倍増時間との関係

ここでは、軸方向ブランケット厚さを単独で動かせるものとして（他の制約条件をはずして）、軸方向ブランケット厚さを増加した時の増殖比・倍増時間の変化を調べた。当初、炉心高さを100cmでサーベイを実施したが、軸方向ブランケットの増殖比が炉心高さにかなり依存して変動することが判ったので、炉心高さ80cm、120cmについても軸方向ブランケット厚さの代表点で計算を追加した。

結果を図2.3-1に示す。炉心高さが低いほど軸方向ブランケットの増殖比分担が大きい。厚さについては、上下各約50cm厚までは増殖比が増加し続ける。

なお、増殖比が増加した時の倍増時間の短縮効果は、倍増時間が1/（増殖ゲイン）に比例するので容易に推定することができる。

軸ブランケット増殖比 vs 軸ブランケット長

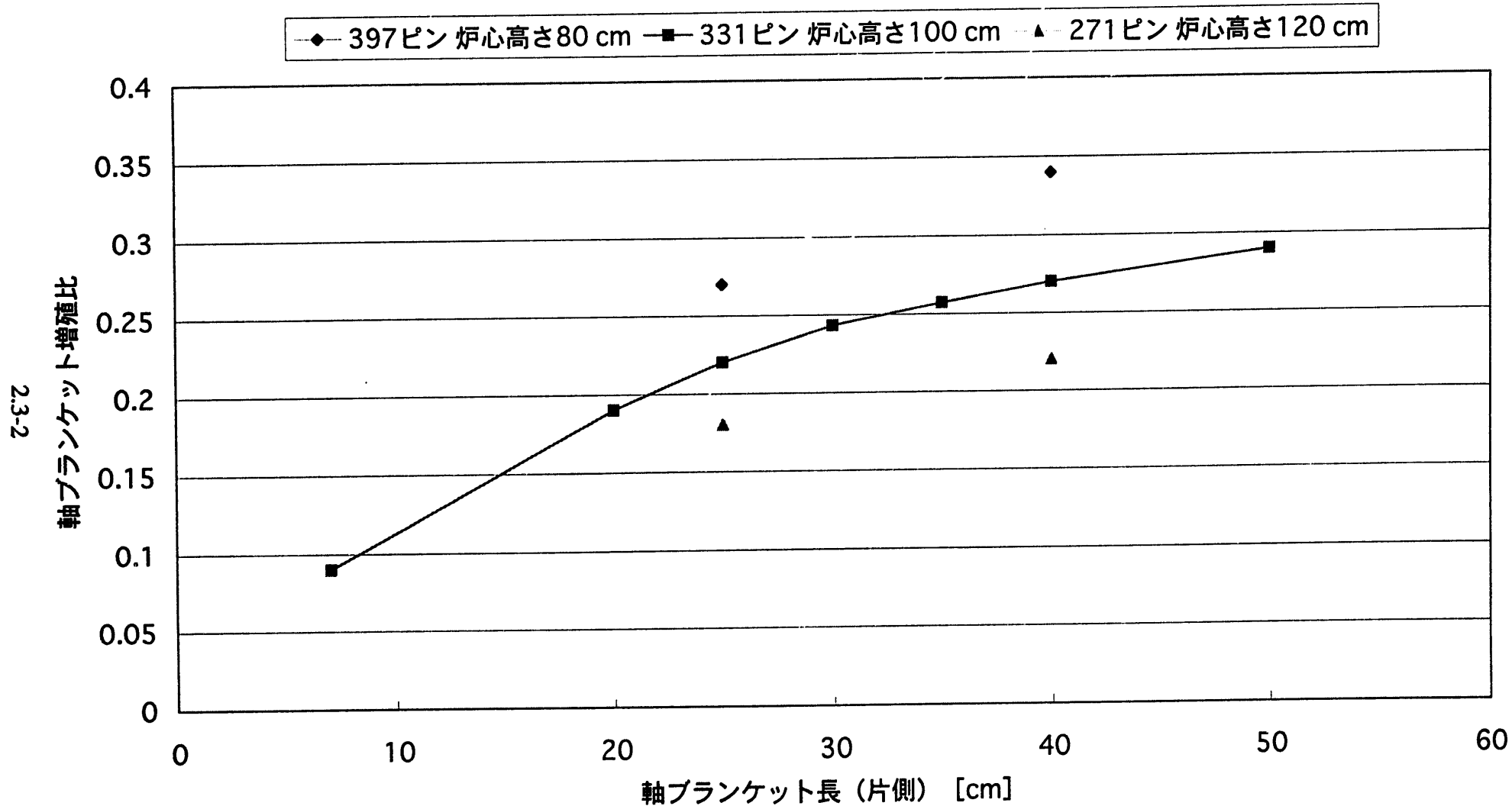


図2.3-1 軸方向ブランケット厚と増殖比との関係

2.4 燃料ピン本数331本／集合体の炉心サーベイ

レファレンス炉心仕様に対して倍増時間短縮に有効な方策は、炉心インベントリを低減することと、軸方向ブランケット厚を増して増殖比を上げることである。このために炉心高さを減じ、ガスプレナムも短縮して軸方向ブランケット厚を増し、炉心平均線出力を維持するように燃料ピン数／集合体を増加（ピン細径化）することとした。燃料体積比はほぼ維持している。また、炉心取出燃料燃焼度を一定（15万MWd/t）に保つよう運転サイクル長を短かくした。

燃料ピン本数と炉心取出平均燃焼度BUとの関係は次の通りである。

$$\text{関係式： } BU = \frac{[\text{炉心部出力}] \times [\text{運転サイクル長}] \times [\text{バッチ数}]}{\left\{ (\pi/4) \cdot d_{in}^2 \cdot \rho_{TH} \cdot f_{smear} \cdot n_p \cdot FASS \cdot H_c \right\}}$$

ここで、

d_{in} ：燃料ピン内径、 ρ_{TH} ：燃料理論密度、

f_{smear} ：燃料スミア割合、

n_p ：集合体内の燃料ピン本数、FASS：炉心燃料集合体数、

H_c ：炉心高さ

また、

$$\begin{aligned} [\text{平均線出力}] &= [\text{炉心部出力}] / \{n_p \cdot FASS \cdot H_c\} \\ &= [\text{最大線出力}] / [\text{出力ピーキングファクタ}] \end{aligned}$$

2.4.1 サーベイの手順

このサーベイの手順としては、燃料ピンを細くしてピン本数を271本から331本に増加し、平均線出力を維持するように炉心高さを低減した。炉心高さを低減して（ガスプレナム長も低減して）、軸方向ブランケットを厚くした。燃焼度を維持するために運転サイクル長を短くした。以下に手順を説明する。

(1) ピン数：271本→331本（22%増）

(2) ピン径とワイヤ径

ラッパー管内対面間距離（186.4mm）、Porosity/ring(0.086)、ワイヤ径の製作上の最小値（1.1mm以上）と最小変化刻み（0.1mm刻み）の条件から、レファレンス炉心と同程度の燃料体積比を維持するための、ピン径とワイヤ径の組み合わせ

(候補) がきまる。

ピン全長と集合体流量最大値とを用いて炉心バンドル部圧力損失を計算して、レファレンス炉心の圧力損失 (2.8kgf/cm²)と同程度で、制限値 (3.5kgf/cm²)を超えないような「ピン径とワイヤ径」を選定した。(レファレンス炉心のピン全長には306.5cmを用いた。ワイヤ巻き付けピッチは15cmから20cmに変更済み。)

	<u>ピン径</u>	<u>ワイヤ径</u>	<u>圧力損失 (流量)</u>
レファレンス炉心	9.70mm	1.40mm	2.8kgf/cm ² (48.0kg/s)
331本ピン炉心	8.75	1.3	3.1 (同上)

(3) ピンピッチ

ピンピッチは、ピンとワイヤとのノミナル時ギャップが0.05mmであるとして
Pin pitch= Pin dia. + Wire dia. + 0.05mm から設定した。

(4) 被覆管肉厚の設定

炉心高さ及びプレナム長さ、燃料要素の炉心燃料燃焼度を固定したままで、被覆管の肉厚を、

(a) 肉厚/ピン径の比を一定

(b) 肉厚一定

の二通りにより設定してCDFを評価したところ、(a)のCDF値 (0.13) はレファレンス炉心の値 (0.105) よりやや増加、(b)のCDF値 (0.02) はレファレンス炉心より減少する結果となったので、(a)と(b)の肉厚の中間値 (平均値) により被覆管肉厚を設定することとした。この意味は、CDFは燃料寿命期間中の被覆管温度 (特に、内圧が増加する寿命末期での温度) やガスプレナム長さによって敏感に変動するので、肉厚を上記のように設定してサーベイを進めて、もし、CDFが厳しくなったら肉厚の増加を再考するものとした。

(注：以降のサーベイ炉心でのCDF値は、レファレンス炉心の値を超えることはなかったので、肉厚の増加は必要とはならず、従って被覆管肉厚は上記のように設定したものである。)

(5) ペレット径と中心空孔径

ペレット径は、被覆管内径 (7.61mm) とペレット径のdiametricalなギャップ

(0.18mm)から7.43mmに設定した。中心空孔径は、ペレット燃料密度 (95%TD) と燃料スミア密度 (82%TD) から2.28mmに設定した。

(6) 炉心高さ

炉心平均線出力をレファレンス炉心と同程度に保つように、炉心高さを約20%減少させて、100cmと設定した。

(7) 運転サイクル長

炉心取出平均燃焼度をほぼ一定に保つように、運転サイクル長をレファレンス炉心の540日から450日に短縮した。(約17%減)

(8) 軸方向ブランケット長と下部プレナム長

炉心高さ減少分 (20cm) とこれに応じて下部ガスプレナムが不要になる分 (約20cm) の合計40cmを軸方向ブランケットの増加分に廻すこととした。即ち、

上部軸方向ブランケット：1.2cm → 25cm

下部軸方向ブランケット：10cm → 25cm

下部ガスプレナム (有効長)：127.5cm → 107.5cm

なお、上部ガスプレナムについては、上部ガスプレナムを短くすると炉心上端位置よりも制御棒吸収体下端位置が下がり過ぎる懸念があるので、今回のサーベイでは、上部ガスプレナム長は変更せず、レファレンス炉心と同じとした。

(9) 2次元R Z 拡散燃焼計算による炉心特性評価

以上の331本炉心仕様を基に、2次元R Z 拡散燃焼計算により炉心特性評価を行った。計算方法については第1章に述べている。

2.4.2 ピン本数331本炉心の炉心特性

炉心特性評価結果を表2.4-1にまとめている。増殖比は平衡サイクル平均で1.16、原子炉倍增時間は約33年、複合インベントリ倍增時間は約39年である。

2.4.3 炉心径を縮小する場合 (参考)

上記のように炉心高さを100cmに減少した炉心で、更に炉心径も縮小すると増殖比・倍增時間がどの程度変化するかを調べてみた。炉心燃料集合体を少なくすると集合体出力が増加するので、被覆管最高温度を維持するには流量を増加する必要がある。また、線出力も増加する。JNC 殿のレファレンス炉心での温度・

圧力損失評価（引用資料4）では、集合体流量44.1kg/sで被覆管肉厚最高温度685℃、燃料ピンバンドル部圧力損失2.56kgf/cm²が得られており、10%程度の集合体出力増加は収拾できると考えられる。

ここでは、図2.4-1に示すように外側炉心燃料集合体36体（全炉心燃料集合体432体→396体、約8%減）を半径方向ブランケットで置換するものとした。集合体流量は48kg/sのままとした。内側炉心、外側炉心のPu富化度比の調整が必要であるが、ここではレファレンス炉心の比のままとしている。炉心特性評価結果を表2.4-2に示す。原子炉倍增時間は約31年、複合インベントリ倍增時間は約38年であり、炉心径縮小前の値に比べ僅かではあるが短縮される。

表 2.4-1 燃料ピン本数 331 本炉心の炉心特性 (炉心高さ 100 cm)

ピン数：331 本、炉心高さ：100 cm、軸ブランケット長：各 25 cm

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	450 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	17.95/23.29	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.5	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	355/380
	平衡サイクル末期	355/336
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.57/0.23/0.15/0.22/1.17
	平衡サイクル末期	0.56/0.22/0.15/0.22/1.15
	平衡サイクル平均	0.56/0.22/0.15/0.22/1.16
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	6.37	
原子炉倍増時間 (年)	33.1	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	39.2	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	4.8E+23	
CDF	2.32E-2	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.11	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	100
上部軸ブランケット長さ (cm)	25
下部軸ブランケット長さ (cm)	25
下部プレナム有効長 (cm)	107.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	331
被覆管外径 (mm)	8.75
被覆管肉厚 (mm)	0.57
ワイヤ径 (mm)	1.3
ペレット外径 (mm)	7.43
ペレット内径 (mm)	2.28

表 2.4-2 (参考) 燃料ピン本数 331 本炉心の炉心特性 (炉心高さ 100 cm、炉心径縮小)

ピン数：331 本、炉心高さ：100 cm、軸ブランケット長：各 25 cm

炉心径縮小：集合体数 432→396 本、サイクル長：450 日→413 日

炉心燃焼特性

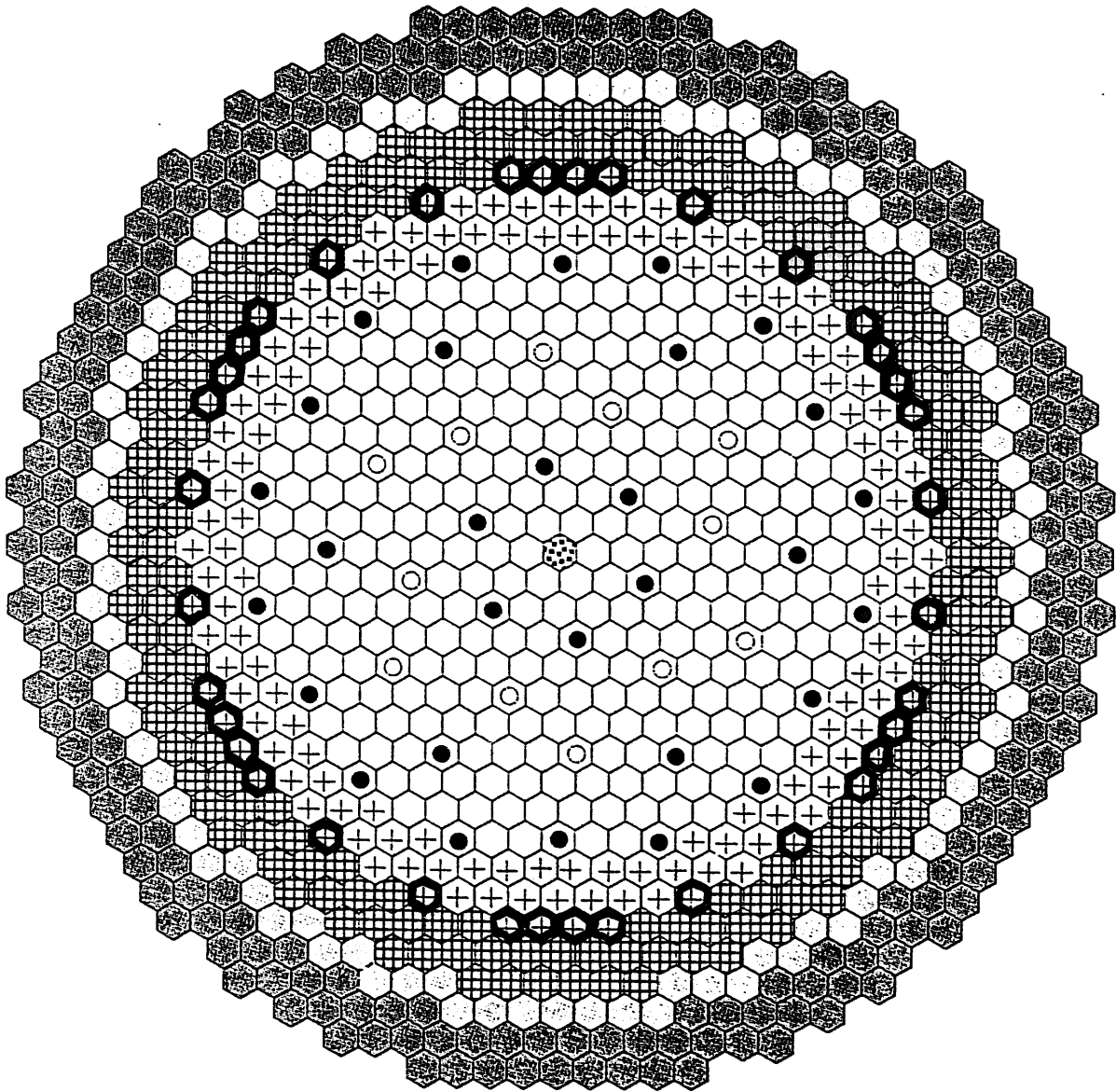
熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	413 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	18.4/21.4	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.6	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	436/378
	平衡サイクル末期	407/345
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.62/0.17/0.15/0.22/1.16
	平衡サイクル末期	0.60/0.17/0.16/0.22/1.16
	平衡サイクル平均	0.61/0.17/0.16/0.22/1.16
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	5.91	
原子炉倍増時間 (年)	31.3	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	38.2	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	5.1E+23	
CDF	1.49E-2	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.11	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	100
上部軸ブランケット長さ (cm)	25
下部軸ブランケット長さ (cm)	25
下部プレナム有効長 (cm)	107.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/126

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	331
被覆管外径 (mm)	8.75
被覆管肉厚 (mm)	0.57
ワイヤ径 (mm)	1.3
ペレット外径 (mm)	7.43
ペレット内径 (mm)	2.28



	内側炉心燃料集合体	270体	
	外側炉心燃料集合体	162体	→126体
	径ブランケット集合体	174体	→210体
	SUS遮蔽体	96体	
	B ₄ C遮蔽体	210体	
	主炉停止系制御棒	30体	
	後備炉停止系制御棒	12体	
	SUS集合体	1体	
合 計		955体	

図2.4-1 炉心径の縮小（外側炉心36体を半径方向ブランケットで置換）

2.5 燃料ピン本数397本／集合体の炉心サーベイ

2.5.1 サーベイの手順

サーベイの手順は前節の331本ピンの場合と同様である。

(1) ピン数：271本→397本 (46%増)

(2) ピン径とワイヤ径

	<u>ピン径</u>	<u>ワイヤ径</u>	<u>圧力損失 (流量)</u>
レファレンス炉心	9.70mm	1.40mm	2.8kgf/cm ² (48.0kg/s)
331本ピン炉心	8.75	1.3	3.1
397本ピン炉心	7.98	1.2	3.3

(3) ピンピッチ

ピンピッチは、ピンとワイヤとのノミナル時ギャップが0.05mmであるとして

Pin pitch= Pin dia. + Wire dia. + 0.05mm から設定した。

(4) 被覆管肉厚の設定

被覆管の肉厚は331本ピンの場合と同じく、

(a) 肉厚/ピン径の比を一定

(b) 肉厚一定

の中間値 (各肉厚の平均値) に設定した。

(5) ペレット径と中心空孔径

331本ピンの場合と同様である。

(6) 炉心高さ

炉心平均線出力をレファレンス炉心と同程度に保つように、炉心高さを約40%減少させて、80cmと設定した。

(7) 運転サイクル長

炉心取出平均燃焼度をほぼ一定に保つように、運転サイクル長をレファレンス炉心の540日から365日に短縮した。(約32%減)

(8) 軸方向ブランケット長と下部プレナム長

炉心高さ減少分 (40cm) とこれに応じて下部ガスプレナムが不要になる分 (約40cm) の合計約80cmを軸方向ブランケットの増加分に廻すことができるの

で、軸方向ブランケット厚さを上下40cmずつとした。

上部軸方向ブランケット：1.2cm → 40cm

下部軸方向ブランケット：10cm → 40cm

下部ガスプレナム（有効長）：127.5cm → 97.5cm（30cm減少）

なお、上部ガスプレナムについては変更せず、レファレンス炉心と同じとした。

(9) 2次元R Z 拡散燃焼計算による炉心特性評価

以上の397本炉心仕様を基に、2次元R Z 拡散燃焼計算により炉心特性評価を行った。計算方法については前節と同じである。内側炉心／外側炉心のP u 富化度比については、炉心への制御棒挿入の影響を考慮に入れて、内側炉心／外側炉心の最大線出力比が1.0／0.9となるよう、P u 富化度を調整した。

2.5.2 ピン本数397本炉心の炉心特性

炉心特性評価結果を表2.5-1にまとめている。増殖比は平衡サイクル平均で1.19、原子炉倍増時間は約26年、複合インベントリ倍増時間は約34年である。

2.5.3 炉心径を縮小する場合（参考）

前節と同様に、炉心高さを80cmに減少した炉心で、更に炉心径も縮小すると増殖比・倍増時間がどの程度変化するかを調べてみた。炉心燃料集合体を少なくすると集合体出力が増加するので、被覆管最高温度を維持するには流量を増加する必要がある。また、線出力も増加する。

ここでは、前節の図2.4-1と同じく外側炉心燃料集合体36体（全炉心燃料集合体432体→396体、約8%減）を半径方向ブランケットで置換するものとした。集合体流量は48kg/sのままとした。内側炉心、外側炉心のP u 富化度比の調整が必要であるが、ここでもレファレンス炉心の比のままとしている。炉心特性評価結果を表2.5-2に示す。原子炉倍増時間は約24年、複合インベントリ倍増時間は約32年であり、炉心径縮小前の値に比べ僅かではあるが短縮される。

2.5.4 ピン本数を更に増加する場合の倍増時間についての考察

これまでの検討から、燃料ピン数／集合体を増加し、炉心高さを低減して軸方向ブランケット厚さを増加することにより倍増時間を短縮できる結果を得たが、ピン

数を更に469本に増加し、炉心高さを低減すると倍增時間は更に短縮されるかどうかについて考察を加えた。これまでの検討結果を基に、ピン本数469本、炉心高さ70cmでの原子炉倍增時間を外挿して推定すると、

燃料ピン数／集合体	<u>271</u>	<u>331</u>	<u>397</u>	<u>469</u>
炉心高さ(cm)	120	100	80	70
軸方向ブランケット厚(cm)	～10	25	40	50
fissileインベントリ(t)	7.1	6.4	5.7	～5.4
炉心増殖比	.86	.78	.70	～.66
全増殖比	1.08	1.16	1.19	～1.17
原子炉倍增時間（年）	70	33	26	～27

即ち、ピン数を469本に増加して炉心高さを70cmとしても、Pu富化度が増加して炉心部の増殖比が低下するので、原子炉倍增時間はピン数397本、炉心高さ80cmの炉心と同程度であり、下げ止まりの傾向にあると言える。

表 2.5-1 燃料ピン本数 397 本炉心の炉心特性 (炉心高さ 80 cm)

ピン数：397 本、炉心高さ：80 cm、軸ブランケット長：各 40 cm
 内側炉心・外側炉心間の最大線出力バランスのために Pu 富化度を調整
 炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	365 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	21.23/25.71	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	3.2	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	393/365
	平衡サイクル末期	361/330
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.50/0.20/0.15/0.33/1.18
	平衡サイクル末期	0.49/0.20/0.16/0.35/1.20
	平衡サイクル平均	0.50/0.20/0.15/0.34/1.19
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	5.73	
原子炉倍増時間 (年)	26.3	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	33.5	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	4.5E+23	
CDF	1.3E-4	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	80
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

表 2.5-2 (参考) 燃料ピン本数 397 本炉心の炉心特性 (炉心高さ 80 cm、炉心径縮小)

ピン数：397 本、炉心高さ：80 cm、軸ブランケット長：各 40 cm
 炉心径縮小：集合体数 432→396 本、サイクル長：365 日→335 日
 炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	335 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	21.29/27.87	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	3.2	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	432/396
	平衡サイクル末期	395/359
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.54/0.16/0.17/0.33/1.19
	平衡サイクル末期	0.53/0.15/0.18/0.35/1.21
	平衡サイクル平均	0.53/0.15/0.17/0.34/1.20
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	5.36	
原子炉倍増時間 (年)	24.1	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	31.7	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	4.5E+23	
CDF	1.0E-4	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	80
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/126

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

2.6 非均質炉心構成

前節までのサーベイ結果に基づき、倍増時間短縮のための好適な均質炉心として、燃料ピン数397本／集合体の炉心を選定した。燃料ピン径7.98mm、炉心高さ80cm、軸方向ブランケット上下それぞれ40cmである。炉心径はレファレンス炉心と同じである。

この節では、この好適な均質炉心をベースとして、炉心の全体高さを同一(80cm)に保って、炉心内に内部ブランケットを設けた軸方向非均質炉心を構成し、倍増時間短縮の効果を検討した。

内部ブランケットの厚さについては、厚さが薄いと増殖比が向上せず、逆に厚くし過ぎると炉心Pu富化度が上昇してFissileインベントリが増加し、倍増時間は長くなるので、炉心高さの1/4程度が適当であり、ここでは厚さを15cm、20cm、25cmの3通りに変えて増殖特性を検討した。内部ブランケットの直径は、均質炉心の内側炉心径と同一とした。軸方向非均質炉心の炉心構成例として内部ブランケットが20cm厚の場合の炉心を図2.6-1に示す。炉心内のPu富化度は1種類としている。また、炉心部取出平均燃焼度は、炉心と内部ブランケットの取出平均燃焼度を15万MWd/tとしている。

第1章に述べている均質炉心の炉心特性評価法と同じ手法により、軸方向非均質炉心の炉心特性を評価した。評価結果を表2.6-1～3にまとめている。表2.5-1の均質炉心の炉心特性と比較すると、軸方向非均質炉心では、

- ・ 内部ブランケットを設けたことによりPu富化度が増加して、炉心内のFissileインベントリが約3%～8%増加する。
- ・ 増殖比は僅かに増加する。
- ・ この結果、倍増時間は均質炉心とほぼ同じとなっている。原子炉倍増時間は約26年、複合インベントリ倍増時間は約32年である。
- ・ 燃焼反応度、最大高速フルエンスが低減する。
- ・ 内部ブランケット厚25cmの軸方向非均質炉心では、最大線出力が許容線出力430W/cmを大幅に超えており、設計条件を満たせない。内部ブランケット厚は20cm以下が適切である。

表 2.6-1 軸方向非均質炉心の炉心特性 (内部ブランケット厚 15 cm)

ピン数：397 本、炉心高さ：65 cm、軸ブランケット長：各 40 cm

厚さ 15 cm の軸ブランケットを炉心中央部に設置

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	365 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	26.8/26.8	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.6	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	382/378
	平衡サイクル末期	383/327
増殖比 [内側炉心/外側炉心/内部軸ブランケット/径ブランケット/軸ブランケット/全体]	平衡サイクル初期	0.36/0.21/0.13/0.17/0.34/1.20
	平衡サイクル末期	0.36/0.19/0.13/0.16/0.35/1.19
	平衡サイクル平均	0.36/0.20/0.13/0.16/0.34/1.20
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	5.92	
原子炉倍增時間 (年)	26.1	
複合インベントリ倍增時間 (CIDT) (年)	33.3	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	3.7E+23	
CDF	約 0.0001	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	65 (32.5 × 2)
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
内部軸ブランケット長さ (cm)	15
内部軸ブランケット半径 (cm)	176.20
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心/径ブランケット] (本)	270/162/174

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

表 2.6-2 軸方向非均質炉心の炉心特性 (内部ブランケット厚 20 cm)

ピン数：397 本、炉心高さ：60 cm、軸ブランケット長：各 40 cm

厚さ 20 cm の軸ブランケットを炉心中央部に設置

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	365 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	28.5/28.5	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	2.7	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	418/432
	平衡サイクル末期	370/342
増殖比 [内側炉心/外側炉心/内部軸ブランケット/径ブランケット/軸ブランケット/全体]	平衡サイクル初期	0.30/0.23/0.16/0.19/0.33/1.21
	平衡サイクル末期	0.31/0.20/0.17/0.18/0.35/1.20
	平衡サイクル平均	0.30/0.21/0.16/0.19/0.34/1.20
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	6.03	
原子炉倍増時間 (年)	25.5	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	32.4	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	3.7E+23	
CDF	約 0.0001	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	60 (30 x 2)
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
内部軸ブランケット長さ (cm)	20
内部軸ブランケット半径 (cm)	176.20
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心/径ブランケット] (本)	270/162/174

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

表 2.6-3 軸方向非均質炉心の炉心特性 (内部ブランケット厚 25 cm)

ピン数：397 本、炉心高さ：55 cm、軸ブランケット長：各 40 cm

厚さ 25 cm の軸ブランケットを炉心中央部に設置

炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	365 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	30.5/30.5	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	3.0	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	458/488 *
	平衡サイクル末期	370/371
増殖比 [内側炉心/外側炉心/内部軸ブランケット/径ブランケット/軸ブランケット/全体]	平衡サイクル初期	0.24/0.25/0.18/0.22/0.33/1.21
	平衡サイクル末期	0.26/0.21/0.20/0.20/0.34/1.21
	平衡サイクル平均	0.25/0.23/0.19/0.21/0.34/1.21
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	6.16	
原子炉倍増時間 (年)	25.4	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	32.3	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	4.1E+23	
CDF	約 0.0001	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	55 (27.5 × 2)
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
内部軸ブランケット長さ (cm)	25
内部軸ブランケット半径 (cm)	176.20
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心/径ブランケット] (本)	270/162/174

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

* (注) このケース (内部ブランケット厚 25 cm の軸方向非均質炉心) では炉心の最大線出力が許容線出力 430 W/cm を超えている。

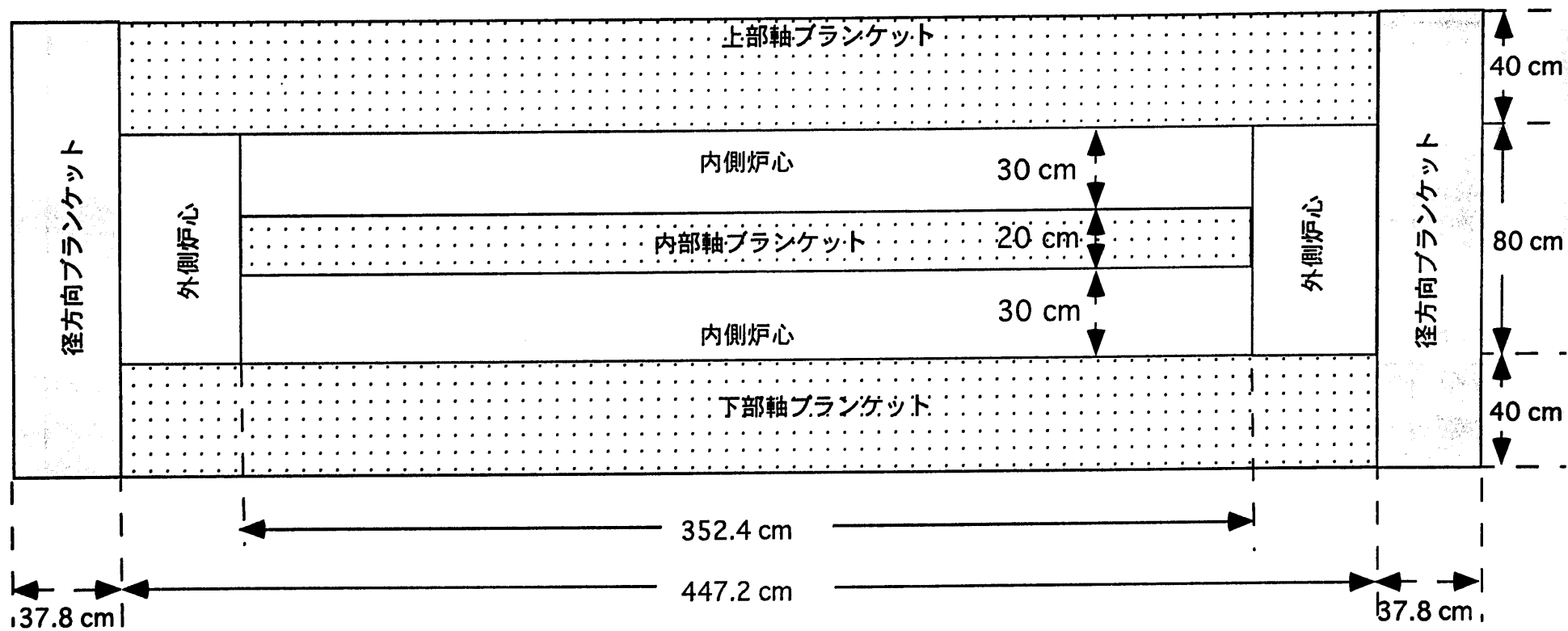


図2.6-1 軸方向非均質炉心の炉心構成例 (内部ブランケット厚20cmの場合)

(注) 炉心は炉中心SUS集合体 (1体) 及び制御棒集合体 (42体) を含む。

3. 倍増時間短縮炉心の燃料集合体仕様の設定と炉心特性の評価

倍増時間短縮のための好適な炉心（以下、倍増時間短縮炉心という）として、2.5節で示した燃料ピン数397本／集合体の均質炉心を選定した。燃料ピン径7.98mm、炉心高さ80cm、軸方向ブランケット上下それぞれ40cm、炉心径はレファレンス炉心と同じである。Pu富化度比については、2.5節で述べているように、制御棒挿入の影響を考慮に入れて、内側炉心／外側炉心の最大線出力比が1.0／0.9となるようPu富化度比を調整済みである。

また、倍増時間短縮炉心は、炉心高さが80cmで、レファレンス炉心120cmに比べ扁平化しているため、炉心Naボイド反応度がどの程度低減しているかの検討を行った。炉心Naボイド反応度の計算方法は、次の通りである。

- ・ 炉心状態：各炉心の平衡炉心末期の組成を使用。
- ・ 炉心（内側炉心、外側炉心燃料集合体）のラッパ管内のNaをボイド化。
（基準のNa原子数密度に対して90.9%をボイド化）
- ・ 中性子エネルギー群数：18群（基準状態、Naボイド状態で1次元計算により、それぞれ18群に縮約）
- ・ 炉心計算：2次元18群RZ拡散、direct-k計算。

得られた炉心Naボイド反応度は、

倍増時間短縮炉心：	2.1 % $\Delta k/kk'$	(6.1 \$*)	(18群計算)
レファレンス炉心：	2.6 % $\Delta k/kk'$	(7.6 \$*)	(18群計算)
	2.6 % $\Delta k/kk'$	(7.6 \$*)	(JNC殿70群計算)

* β_{eff} : 0.344%使用

従って、倍増時間短縮炉心の炉心Naボイド反応度は、レファレンス炉心に比べ約20%低減する。（なお、レファレンス炉心での18群計算の炉心Naボイド反応度はJNC殿70群計算と一致している。）

倍増時間短縮炉心の燃料集合体仕様を表3-1に、炉心特性を表3-2に示す。炉心構成を図3-1に示す。倍増時間短縮炉心の原子炉倍増時間は約26年、複合インベントリ倍増時間は約34年である。

レファレンス炉心と倍増時間短縮炉心との主要な特性を比較すると、

	<u>レファレンス炉心</u>	<u>倍增時間短縮炉心</u>
ピン数 (本/集合体)	271	397
ピン径(mm)	9.7	7.98
炉心高さ(cm)	120	80
軸ブラ厚 (上,下) (cm)	1.2, 10	40, 40
運転サイクル長 (日)	540	365
燃料交換バッチ数	5	5
増殖比	1.08	1.19
原子炉倍增時間 (年)	~70	26
複合インベントリ倍增時間 (年)	~78	34
Pu 富化度 (内・外) (w/o)	16.3/21.2	21.2/25.7
最大線出力 (内・外) (W/cm)	394/396	393/365
燃焼反応度(%dk/kk')	2.2	3.2
新燃料fissileインベントリ(t)	7.1	5.7
最大高速フルエンス(n/cm ²)	5.3E+23	4.5E+23
CDF	0.1	0.0001
燃料バンドル部圧力損失 (kgf/cm ²)	2.8	3.3
炉心ナトリウムボイド反応度 (%Δk/kk')	2.6	2.1

これらの炉心特性の比較から倍增時間短縮炉心のメリットとしては、レファレンス炉心に比べ、

- ・増殖比が高く、炉心fissileインベントリが少なく、倍增時間が短い。
- ・最大高速フルエンスが15%低い。
- ・CDFに余裕がある。
- ・炉心ナトリウムボイド反応度は約20%低減する。

一方、格段のデメリットは無いが、

- ・運転サイクル長をレファレンス炉心の約18か月から12か月に短縮している。従って

プラント稼働率は低下する。

但し、倍増時間が若干増加しても稼働率を維持することを優先するのであれば、バッチ数を低減する方策もあり得る。この場合、燃焼反応度は大きくなる。

- ・倍増時間短縮炉心の燃焼反応度は3.2%dk/kk'となるが、設計上収拾できる範囲であると考えられる。

[被覆管肉厚を薄くした時のCDF値の検討]

倍増時間短縮炉心のCDF値は0.0001であり、制限値(0.5)に比べて余裕のある値となっているので、被覆管肉厚を0.55mmから0.50mmに変更した場合のCDF値の変化を調べた。

倍増時間短縮炉心：(a)被覆管外径7.98mm、肉厚0.55mm、内径6.88mm

CDF値：0.0001

(b)内径を固定して肉厚を0.5mmに変更。

被覆管外径7.88mm、肉厚0.50mm、内径6.88mm

CDF値：0.0007

なお、倍増時間短縮炉心でのCDF値がレファレンス炉心のCDF値よりも余裕のある値となっている理由としては、

- ・レファレンス炉心よりもPu富化度が高いので、燃焼に伴う出力漸減が大きく、CDFに最も影響する寿命末期での被覆管肉厚中心温度が低い。(レファレンス炉心：660℃、倍増時間短縮炉心：641℃)
- ・燃料の炉内滞在期間が短く、被覆管の腐食量が少ない。(滞在期間はレファレンス炉心：540日×5サイクル、倍増時間短縮炉心：365日×5サイクル)

が挙げられる。

表3-1 倍增時間短縮炉心の炉心燃料集合体仕様

項目	仕様	備考
燃料ピン本数／集合体	397 本	
Pu富化度 (内側／外側炉心)	21.23／25.71 w/o	Pu/(Pu+U)
被覆管外径	7.98 mm	
被覆管内径	6.88 mm	
燃料ペレット外径	6.70 mm	
燃料ペレット内径	2.01 mm	燃料スミア密度より算出
燃料スミア密度	82 %TD	ペレット燃料密度：95%TD
燃料要素バンドル部長さ	294.7 cm	圧損評価では306.5cm使用
炉心燃料長さ	80 cm	
下部軸ブランケット長さ	40 cm	中実ペレット
上部軸ブランケット長さ	40 cm	中実ペレット
下部ガスプレナム長さ	97.5 cm	有効長
上部ガスプレナム長さ	22.75 cm	*有効長
燃料ピン配列ピッチ	9.23 mm	
ワイヤ径	1.2 mm	
ワイヤ巻き付けピッチ	200 mm	*
ラッパ管内対面間距離	186.4 mm	*
ラッパ管肉厚	3.0 mm	*
集合体配列ピッチ	195.4 mm	*
集合体全長	425 cm	*

*印：レファレンス炉心と同じ。

(注) 炉心構成要素 (炉心燃料集合体、制御棒、径ブランケット燃料集合体など) の体数はレファレンス炉心と同じである。

表 3-2 倍増時間短縮炉心の炉心特性

(表 2.5-1 を再掲)

ピン数：397 本、炉心高さ：80 cm、軸ブランケット長：各 40 cm
 内側炉心・外側炉心間の最大線出力バランスのために Pu 富化度を調整
 炉心燃焼特性

熱出力 (MW)	3,800	
運転サイクル長 (日) x バッチ数	365 x 5	
富化度[内側炉心/外側炉心] (w/o)	21.23/25.71	
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)	15.0	
燃焼反応度(%dk/kk')	3.2	
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	393/365
	平衡サイクル末期	361/330
増殖比 [内側炉心/外側炉心 /径ブランケット/軸ブランケット /全体]	平衡サイクル初期	0.50/0.20/0.15/0.33/1.18
	平衡サイクル末期	0.49/0.20/0.16/0.35/1.20
	平衡サイクル平均	0.50/0.20/0.15/0.34/1.19
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)	5.73	
原子炉倍増時間 (年)	26.3	
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)	33.5	
最大高速フルエンス (0.1MeV 以上) (n/cm ²)	4.5E+23	
CDF	1.3E-4	
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)	3.3	

炉心仕様

炉心高さ (cm)	80
上部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部軸ブランケット長さ (cm)	40
下部プレナム有効長 (cm)	97.5
燃料集合体数[内側炉心/外側炉心] (本)	270/162

燃料集合体仕様

燃料ピン本数 (本)	397
被覆管外径 (mm)	7.98
被覆管肉厚 (mm)	0.55
ワイヤ径 (mm)	1.2
ペレット外径 (mm)	6.70
ペレット内径 (mm)	2.01

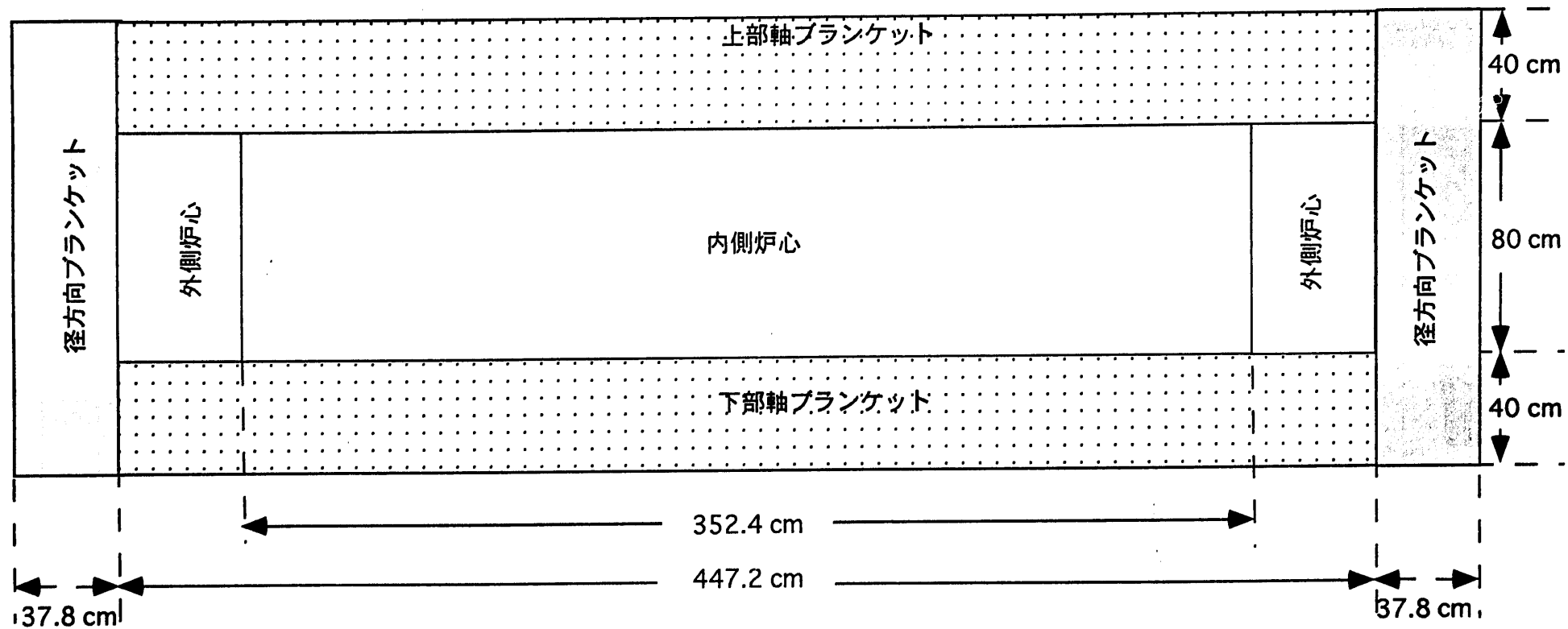


図3-1

倍増時間短縮炉心の炉心構成

(注) 炉心は炉中心 SUS集合体 (1体) 及び制御棒集合体 (42体) を含む。

4. まとめ

「高燃焼度、長期運転サイクル」を目指した実用化炉心（160万kWe級）のレファレンス炉心仕様に対して、運転開始以降に倍増時間短縮の要求があった場合に、燃料集合体仕様のみを変更することにより、この要求に対応できる見通しを得るための検討を行ったものである。

レファレンス炉心仕様に対して倍増時間短縮に有効な方策は、炉心インベントリを低減することと、軸方向ブランケット厚を増して増殖比を上げることである。このために炉心高さを減じ、ガスプレナムも短縮して軸方向ブランケット厚を増し、炉心平均線出力を維持するように燃料ピン数／集合体を増加（ピン細径化）した。燃料体積比はほぼ維持している。また、炉心取出燃料燃焼度を一定（15万MWd/t）に保つよう運転サイクル長を短かくした。

	<u>レファレンス炉心</u>	<u>331本ピン炉心</u>	<u>397本ピン炉心</u>
ピン数（本／集合体）	271	331	397
ピン径(mm)	9.7	8.75	7.98
炉心高さ(cm)	120	100	80
軸ブラ厚（上,下）（cm）	1.2, 10	25, 25	40, 40
運転サイクル長（日）	540	450	365
増殖比	1.08	1.16	1.19
原子炉倍増時間（年）	～70	33	26
複合インベントリ倍増時間（年）	～78	39	34

サーベイ結果に基づき、倍増時間短縮に好適な炉心（倍増時間短縮炉心）として上記の397本ピン炉心を選定した。また、この倍増時間短縮炉心をベースに、炉心高さを変えずに軸方向非均質炉心にした場合の倍増時間を評価し、均質炉心とほぼ同じ倍増時間を得た。主要なサーベイ炉心の炉心特性と仕様をまとめて表4-1に示す。

以上の検討結果から、運転開始以降に倍増時間短縮の要求があった場合に燃料集合体仕様のみを変更することにより、複合インベントリ倍増時間を30年程度に短縮できる見通しが得られた。

表4-1 倍増時間短縮の主要なサーベイ結果のまとめ

炉心名称と特徴 炉心特性と仕様		[レファレンス炉心] 燃料ピン数/集合体 271本 炉心高さ 120 cm 軸ブラ厚 (上下) 1.2, 10 cm	[331本ピン炉心] 燃料ピン数/集合体 331本 炉心高さ 100 cm 軸ブラ厚 (上下) 各 25 cm	[倍増時間短縮炉心] 燃料ピン数/集合体 397本 炉心高さ 80 cm 軸ブラ厚 (上下) 各 40 cm	[軸方向非均質炉心] 燃料ピン数/集合体 397本 炉心高さ 80 cm 内部ブランケット厚 20 cm 軸ブラ厚 (上下) 各 40 cm
[炉心燃焼特性]					
熱出力 (MW)		3,800	3,800	3,800	3,800
運転サイクル長 (日) × バッチ数		540 × 5	450 × 5	365 × 5	365 × 5
富化度 [内側炉心/外側炉心] (w/o)		16.32/21.16	17.95/23.29	21.23/25.71	28.5/28.5
炉心部取り出し平均燃焼度 (万 MWd/t)		15.4	15.0	15.0	15.0
燃焼反応度 (%dk/kk)		2.2	2.5	3.2	2.7
最大線出力 (W/cm) [内側炉心/外側炉心]	平衡サイクル初期	390/396	355/380	393/365	418/432
	平衡サイクル末期	394/359	355/336	361/330	370/342
増殖比 [内側炉心/外側炉心/径ブランケット /軸ブランケット/全体]	平衡サイクル初期	0.63/0.24/0.15/0.06/1.09	0.57/0.23/0.15/0.22/1.17	0.50/0.20/0.15/0.33/1.18	0.30/0.23/0.16/0.19/0.33/1.21*
	平衡サイクル末期	0.62/0.24/0.15/0.07/1.07	0.56/0.22/0.15/0.22/1.15	0.49/0.20/0.16/0.35/1.20	0.31/0.20/0.17/0.18/0.35/1.20*
	平衡サイクル平均	0.62/0.24/0.15/0.07/1.08	0.56/0.22/0.15/0.22/1.16	0.50/0.20/0.15/0.34/1.19	0.30/0.21/0.16/0.19/0.34/1.20*
新燃料 fissile インベントリ (平衡炉心) (ton)		7.08	6.37	5.73	6.03
原子炉倍増時間 (年)		70.0	33.1	26.3	25.5
複合インベントリ倍増時間 (CIDT) (年)		78.1	39.2	33.5	32.4
最大高速フルエンス (>0.1MeV) (n/cm ²)		5.3E+23	4.8E+23	4.5E+23	3.7E+23
CDF		0.1	2.3E-2	1.3E-4	約0.0001
炉心バンドル部圧損 (kgf/cm ²)		2.82	3.11	3.3	3.3
[炉心仕様]					
炉心高さ (cm)		120	100	80	60 (30×2)
上部軸ブランケット長さ (cm)		1.2	25	40	40
内部軸ブランケット長さ (cm)					20
内部軸ブランケット半径 (cm)					176.2
下部軸ブランケット長さ (cm)		10	25	40	40
下部プレナム有効長 (cm)		127.5	107.5	97.5	97.5
燃料集合体数 [内側/外側炉心/径ブランケット] (体)		270/162/174	270/162/174	270/162/174	270/162/174
[燃料集合体仕様]					
燃料ピン本数 (本) [炉心/径ブランケット]		271/127	331/127	397/127	397/127
被覆管外径 (mm) [炉心/径ブランケット]		9.7/15.0	8.75/15.0	7.98/15.0	7.98/15.0
被覆管肉厚 (mm) [炉心/径ブランケット]		0.6/0.4	0.57/0.4	0.55/0.4	0.55/0.4
ワイヤ径 (mm) [炉心/径ブランケット]		1.4/1.22	1.3/1.22	1.2/1.22	1.2/1.22
ペレット外径 (mm) [炉心/径ブランケット]		8.32/13.9	7.43/13.9	6.70/13.9	6.70/13.9
ペレット内径 (mm) [炉心]		2.62	2.28	2.01	2.01

* [内側炉心/外側炉心
/内部ブランケット/径ブランケット
/軸ブランケット/全体]

謝辞

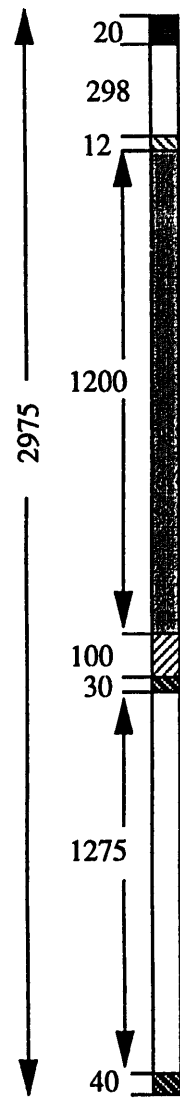
本検討を行うにあたって、テーマの設定をはじめとして、多くの助言とご討論をいただいた核燃料サイクル開発機構大洗工学センター システム技術開発部炉心燃料工学グループ 林 秀行殿、川島 克之殿はじめ、同グループの方々に感謝いたします。

添付資料 1 最大線出力

均質炉心及び軸非均質炉心の最大線出力特性を下表にまとめた。

表 均質炉心及び軸非均質炉心の最大線出力特性

炉 心	時 期	領 域	均 質 組 成		新 燃 料		
			ピーク 出力密度 (W/cc)	ピーク 線出力 (W/cc)	燃焼因子 ()	最大線出力 (W/cc)	
均 質 炉 心	レファレンス炉心 (271本ピン)	BOEC	内側炉心	307	374	1.043	390
			外側炉心	287	350	1.125	394
		EOEC	内側炉心	307	374	1.056	395
			外側炉心	265	323	1.107	358
	331本ピン炉心	BOEC	内側炉心	330	330	1.077	355
			外側炉心	330	329	1.153	380
		EOEC	内側炉心	331	331	1.073	355
			外側炉心	297	297	1.131	336
	397本ピン炉心	BOEC	内側炉心	416	346	1.136	393
			外側炉心	376	313	1.165	365
		EOEC	内側炉心	388	323	1.117	361
			外側炉心	347	289	1.144	330
軸 非 均 質 炉 心	IB=15 cm 炉心 (397本ピン)	BOEC	内側炉心	389	324	1.170	379
			外側炉心	362	301	1.162	350
		EOEC	内側炉心	397	331	1.157	383
			外側炉心	340	284	1.152	327
	IB=20 cm 炉心 (397本ピン)	BOEC	内側炉心	420	350	1.194	418
			外側炉心	428	356	1.213	432
		EOEC	内側炉心	387	323	1.146	370
			外側炉心	350	291	1.176	342
	IB=25 cm 炉心 (397本ピン)	BOEC	内側炉心	455	379	1.207	458
			外側炉心	479	399	1.224	488
		EOEC	内側炉心	376	314	1.179	370
			外側炉心	367	306	1.214	371



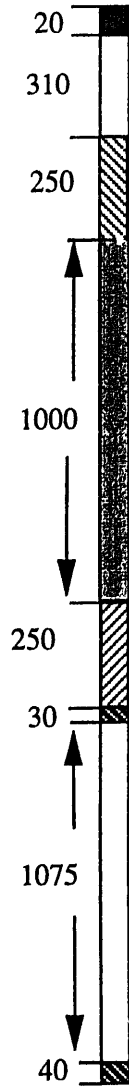
レファレンス炉心

上部ガスプレナム
(有効長さ 227.5)
上部軸方向ブランケット

炉心

下部軸方向ブランケット

下部プレナム

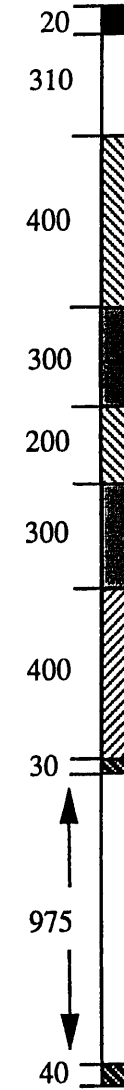


331本ピン炉心

上部ガスプレナム
(有効長さ 227.5)



倍増時間短縮炉心
(397本ピン炉心)



軸方向非均質炉心
(内部ブランケット厚 20cm)

内部ブランケット

(単位 mm)

各炉心の燃料ピンの軸方向仕様・寸法

添付資料 3 C D F 計算

レファレンス炉心及び倍増時間短縮炉心での C D F 計算の主要な入出力データをまとめている。

- (1) レファレンス炉心の C D F 計算 ・ ・ ・ ・ 本文の表 1.5-1 に対応。
- (2) 倍増時間短縮炉心の C D F 計算 ・ ・ ・ ・ 本文の表 3-2 に対応。

ok0
 NCYL : NUMBER OF CYCLES = 10
 NZC : NUMBER OF AXIAL NODES FOR CORE = 24
 NZBL : NUMBER OF AXIAL NODES FOR LOWER-BLANKET = 2 (NO LOWER-BLANKET IF NZBL=0)
 NZBU : NUMBER OF AXIAL NODES FOR UPPER-BLANKET = 2 (NO UPPER-BLANKET IF NZBU=0)
 NSGM : TOTAL NUMBER OF AXIAL NODES = 28 (NSGM = NZC + NZBL + NZBU)
 KFZ : OPTION FOR AXIAL POWER DISTRIBUTION FACTOR = 0
 (=0:ONLY ONE DISTRIBUTION FACTOR FOR ALL CYCLES, =1: GIVE A DISTRIBUTION FACTOR FOR EACH CYCLE)
 IOPFP : OPTION FOR FP-CORROSION = 3 (=0:NOT CONSIDERED, =1:MONJU, =2:PNC1520, =3:PNC-FMS)
 IOPNA : OPTION FOR NA-CORROSION = 3 (=0:NOT CONSIDERED, =1:MONJU, =2:PNC1520, =3:PNC-FMS)
 IOPCRP : OPTION FOR CREEP STRENGTH = 3 (=0:NOT CONSIDERED, =1:PNC1520, =2:PNC-FMS, =3:PNC-ODS)
 IOPFB : OPTION FOR FP-GAS RELEASE RATE = 0 (=0:USING LOCAL NODE BURNUP, =1:USING PIN AVERAGE BURNUP)

CDI : CLAD INNER DIAMETER (NOMINAL) = 0.8500 CM (0.8525 CM FOR CDF-CALCULATION 0.8475 CM FOR GAS-PLENUM VOLUME)
 CDO : CLAD OUTER DIAMETER (NOMINAL) = 0.9700 CM (0.9671 CM FOR CDF-CALCULATION)
 FDIC : CORE-PELLET INNER DIAMETER (NOMINAL) = 0.2620 CM (0.2420 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 FDOC : CORE-PELLET OUTER DIAMETER (NOMINAL) = 0.8320 CM (0.8370 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 FDI8 : BLANKET-PELLET INNER DIAMETER = 0.0000 CM (0.0000 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 FDOB : BLANKET-PELLET OUTER DIAMETER = 0.8320 CM (0.8370 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 OBMC : O/M RATION FOR MOX = 1.98 (2.00 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 OBMB : O/M RATION FOR UO2 = 2.00 (2.02 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 TDC : THEORETICAL DENSITY FOR MOX = 0.95 (0.97 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 TDB : THEORETICAL DENSITY FOR UO2 = 0.95 (0.97 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 DENSC : CORE FUEL DENSITY (NOMINAL) = 10.986 G/CC(11.036 G/CC FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 DENSB : BLANKET FUEL DENSITY (NOMINAL) = 10.960 G/CC(11.010 G/CC FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 VOLTC : IMPURITY OF MOX = 180.00 MICRO-L/G-MOX (1.0ATM, 0.0DEG-C)
 VOLTB : IMPURITY OF UO2 = 50.00 MICRO-L/G-UO2 (1.0ATM, 0.0DEG-C)
 BETAC : GENERATED FP-GAS FROM MOX = 0.27 N/FISSION
 BETAB : GENERATED FP-GAS FROM UO2 = 0.30 N/FISSION
 HCORE : CORE HEIGHT (NOMINAL) = 120.00 CM (120.50 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 HBLKU : UPPER-BLANKET HEIGHT (NOMINAL) = 10.00 CM (10.20 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 HBLKL : LOWER-BLANKET HEIGHT (NOMINAL) = 1.20 CM (1.40 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 HJPLN : UPPER GAS-PLENUM HEIGHT = 22.75 CM (12.834 CC FOR CALCULATION OF INTERNAL PRESSURE)
 HLPLN : LOWER GAS-PLENUM HEIGHT = 127.50 CM (71.925 CC FOR CALCULATION OF INTERNAL PRESSURE)
 U235 : FRACTION OF U235 IN U = 0.0030
 PU02 : PU ENRICHMENT (PU02/(PU02+UO2)) = 0.1583 (0.1583 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME)
 PU239 : FRACTION OF PU239 IN PU = 0.5500 (PU239 = 1.0 - PU240 - PU241 - PU242)
 PU240 : FRACTION OF PU240 IN PU = 0.2700
 PU241 : FRACTION OF PU241 IN PU = 0.1100
 PU242 : FRACTION OF PU241 IN PU = 0.0700

NSTEP(NCYL) : NUMBER OF TIME-STEP FOR EACH CYCLE
 CYLTM(NCYL) : IRRADIATION TIME FOR EACH CYCLE [DAYS]
 POWER(NCYL*2) : RELATIVE LINEAR HEAT RATE [-]
 THOTI(NCYL*2) : MAX. CLADDING INNER TEMP. [DEG-C]
 THOTM(NCYL*2) : MAX. CLADDING MIDWALL TEMP. [DEG-C]
 THOTO(NCYL*2) : MAX. CLADDING OUTER TEMP. [DEG-C]
 TPLUP(NCYL*2) : UPPER GAS PLENUM TEMP. [DEG-C]
 TPLLN(NCYL*2) : LOWER GAS PLENUM TEMP. [DEG-C]
 TIN (NCYL*2) : REACTOR INLET TEMP. [DEG-C]
 NOTICE) DATA(2*N-1):DATA AT BEGINNING OF CYCLE-N
 DATA(2*N) :DATA AT END OF CYCLE-N

NCYL	NSTEP	CYLTM	POWER		THOTI		THOTM		THOTO		TPLUP		TPLLN		TIN	
			BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
1	100	270.00	1.0000	1.0183	688.30	688.30	685.00	685.00	681.60	681.60	674.80	674.80	395.00	395.00	395.00	395.00
2	100	270.00	1.0183	1.0274	688.30	688.30	685.00	685.00	681.60	681.60	674.80	674.80	395.00	395.00	395.00	395.00
3	100	270.00	0.9949	1.0102	685.00	685.00	681.80	681.80	678.40	678.40	671.70	671.70	395.00	395.00	395.00	395.00
4	100	270.00	1.0102	1.0159	685.00	685.00	681.80	681.80	678.40	678.40	671.70	671.70	395.00	395.00	395.00	395.00

(1) レゾナンス炉心のCDF計算 . . . 本文の表 1.5-1 に対応。

添 3-2

6-BOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
6-EOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
7-BOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
7-EOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
8-BOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
8-EOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
9-BOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
9-EOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
10-BOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700
10-EOC	0.81730	0.76060	0.71530	0.64990	0.58690	0.53550	0.03720	0.03700

BURN : PIN BURNUP (CORE) = 186700 MWD/T (IF NOT BURN=0.0, CORRECTION FACTOR FOR POWER = 1.0)
PHE : INITIAL PRESSURE BY HE (ROOM TEMP.) = 1.000 ATM
POUT : COOLANT PRESSURE = 1.452 ATM
OXI : COOLANT OXYGEN CONCENTRATION = 3.000 PPM
FACFP : CORRECTION FACTOR FOR FP CORROSION = 1.0000
FACNA : CORRECTION FACTOR FOR NA CORROSION = 1.0000
FACHP : CORRECTION FACTOR FOR HOOP STRESS = 1.0000
FACTR : CORRECTION FACTOR FOR TR = 1.0000
CSRST : CORRECTION FACTOR FOR SR TO ST = 0.8000
FACPVU : FACTOR OF UPPER PLENUM VOLUME = 1.0000
FACPVL : FACTOR OF LOWER PLENUM VOLUME = 1.0000

NODE NO.	NODE HEIGHT (CM)	HEAVY METAL WEIGHT (G)	
		FOR BURNUP	FOR GAS-GENERATION
1	5.000	24.949	30.180
2	5.000	24.949	30.180
3	5.000	22.558	23.892
4	5.000	22.558	23.892
5	5.000	22.558	23.892
6	5.000	22.558	23.892
7	5.000	22.558	23.892
8	5.000	22.558	23.892
9	5.000	22.558	23.892
10	5.000	22.558	23.892
11	5.000	22.558	23.892
12	5.000	22.558	23.892
13	5.000	22.558	23.892
14	5.000	22.558	23.892
15	5.000	22.558	23.892
16	5.000	22.558	23.892
17	5.000	22.558	23.892
18	5.000	22.558	23.892
19	5.000	22.558	23.892
20	5.000	22.558	23.892
21	5.000	22.558	23.892
22	5.000	22.558	23.892
23	5.000	22.558	23.892
24	5.000	22.558	23.892
25	5.000	22.558	23.892
26	5.000	22.558	23.892
27	0.600	2.994	3.166
28	0.600	2.994	3.166

添 3-4

RESULTS AT END OF CYCLE- 10

PIN POWER AT BOC = 37.237 [KW]
PIN POWER AT EOC = 37.178 [KW]
RELEASED TOTAL FP-GAS = 0.12994 [MOL]
INITIAL HE-GAS PRESSURE = 2.4591 [KGF/CM2]
IMPURITY-GAS PRESSURE = 3.7633 [KGF/CM2]
FP-GAS PRESSURE = 90.6879 [KGF/CM2]
COOLANT OUTER PRESSURE = 1.5000 [KGF/CM2]

TOTAL INTERNAL PRESSURE = 95.4103 [KGF/CM2]
 PIN BURNUP (CORE) = 186700.0 [MWD/T]
 AXIAL-BLANKET BURNUP = 57573.4 [MWD/T]
 CORRECTION FACTOR FOR SY = -1.52388 [-]
 CORRECTION FACTOR FOR SU = -1.22104 [-]
 CORRECTION FACTOR FDC = 0.33870 [-]

NODE NO.	LOCAL BURNUP [MWD/T]	GENERATED FP-GAS [MOL]	FP-GAS RELEASE RATE [%]	NA CORROSION [CM]	FP CORROSION [CM]	CLAD THICKNESS [CM]	HOOP-STRESS [KGF/MM2]	CDF [-]
1	61785.3	0.00250	10.00	0.0000038	0.0035637	0.0537325	8.11	2.160E-23
2	65367.0	0.00265	10.00	0.0000044	0.0035794	0.0537162	8.11	6.009E-23
3	131064.0	0.00379	100.00	0.0000060	0.0036173	0.0536767	8.12	3.730E-22
4	144928.9	0.00419	100.00	0.0000083	0.0036784	0.0536133	8.13	2.698E-21
5	159604.1	0.00461	100.00	0.0000117	0.0037738	0.0535095	8.14	2.282E-20
6	173761.7	0.00502	100.00	0.0000170	0.0039442	0.0533388	8.17	2.231E-19
7	183080.0	0.00529	100.00	0.0000248	0.0042076	0.0530676	8.22	2.369E-18
8	194469.0	0.00562	100.00	0.0000365	0.0046220	0.0526415	8.29	2.823E-17
9	204327.5	0.00590	100.00	0.0000542	0.0052400	0.0520058	8.39	3.738E-16
10	212452.9	0.00614	100.00	0.0000806	0.0060812	0.0511383	8.54	5.377E-15
11	216796.9	0.00626	100.00	0.0001192	0.0070676	0.0501132	8.73	7.849E-14
12	221366.1	0.00639	100.00	0.0001756	0.0080329	0.0490915	8.92	1.106E-12
13	224134.5	0.00647	100.00	0.0002564	0.0087928	0.0482508	9.08	1.395E-11
14	225079.9	0.00650	100.00	0.0003704	0.0092930	0.0476366	9.20	1.531E-10
15	224382.1	0.00648	100.00	0.0005282	0.0095978	0.0471740	9.29	1.477E-09
16	221703.7	0.00640	100.00	0.0007418	0.0097826	0.0467756	9.37	1.269E-08
17	217202.1	0.00627	100.00	0.0010240	0.0098960	0.0463800	9.45	9.800E-08
18	210944.9	0.00609	100.00	0.0013877	0.0099668	0.0459455	9.54	6.816E-07
19	205115.3	0.00592	100.00	0.0018493	0.0100121	0.0454387	9.64	4.360E-06
20	195324.3	0.00564	100.00	0.0024131	0.0100412	0.0448457	9.76	2.509E-05
21	183957.8	0.00531	100.00	0.0030809	0.0100603	0.0441588	9.90	1.296E-04
22	171195.7	0.00494	100.00	0.0038471	0.0100731	0.0433799	10.07	5.992E-04
23	160999.6	0.00465	100.00	0.0047193	0.0100819	0.0424987	10.27	2.561E-03
24	146279.4	0.00423	100.00	0.0056615	0.0100880	0.0415505	10.50	9.741E-03
25	132099.4	0.00382	100.00	0.0066534	0.0100923	0.0405542	10.74	3.327E-02
26	120530.3	0.00348	100.00	0.0076913	0.0100955	0.0395132	11.01	1.046E-01
27	7570.5	0.00003	10.00	0.0067439	0.0035000	0.0470561	9.19	3.648E-03
28	7529.8	0.00003	10.00	0.0067439	0.0035000	0.0470561	9.19	3.648E-03

添3-5

```

ok0
NCYL : NUMBER OF CYCLES = 10
NZC : NUMBER OF AXIAL NODES FOR CORE = 24
NZBL : NUMBER OF AXIAL NODES FOR LOWER-BLANKET = 6 ( NO LOWER-BLANKET IF NZBL=0 )
NZBU : NUMBER OF AXIAL NODES FOR UPPER-BLANKET = 6 ( NO UPPER-BLANKET IF NZBU=0 )
NSGM : TOTAL NUMBER OF AXIAL NODES = 36 ( NSGM = NZC + NZBL + NZBU )
KFZ : OPTION FOR AXIAL POWER DISTRIBUTION FACTOR = 0
      ( =0:ONLY ONE DISTRIBUTION FACTOR FOR ALL CYCLES, =1: GIVE A DISTRIBUTION FACTOR FOR EACH CYCLE )
IOPFP : OPTION FOR FP-CORROSION = 3 ( =0:NOT CONSIDERED, =1:MONJU, =2:PNC1520, =3:PNC-FMS )
IOPNA : OPTION FOR NA-CORROSION = 3 ( =0:NOT CONSIDERED, =1:MONJU, =2:PNC1520, =3:PNC-FMS )
IOPCRP : OPTION FOR CREEP STRENGTH = 3 ( =0:NOT CONSIDERED, =1:PNC1520, =2:PNC-FMS, =3:PNC-ODS )
IOPFB : OPTION FOR FP-GAS RELEASE RATE = 0 ( =0:USING LOCAL NODE BURNUP, =1:USING PIN AVERAGE BURNUP )
  
```

```

CDI : CLAD INNER DIAMETER (NOMINAL) = 0.6880 CM ( 0.6905 CM FOR CDF-CALCULATION 0.6855 CM FOR GAS-PLENUM VOLUME )
CDO : CLAD OUTER DIAMETER (NOMINAL) = 0.7980 CM ( 0.7951 CM FOR CDF-CALCULATION )
FDIC : CORE-PELLET INNER DIAMETER (NOMINAL) = 0.2010 CM ( 0.1810 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
FDOC : CORE-PELLET OUTER DIAMETER (NOMINAL) = 0.6700 CM ( 0.6750 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
FDIB : BLANKET-PELLET INNER DIAMETER = 0.0000 CM ( 0.0000 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
FDOB : BLANKET-PELLET OUTER DIAMETER = 0.6700 CM ( 0.6750 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
OBMC : O/M RATION FOR MOX = 1.98 ( 2.00 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
OBMB : O/M RATION FOR UO2 = 2.00 ( 2.02 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
TDC : THEORETICAL DENSITY FOR MOX = 0.95 ( 0.97 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
TDB : THEORETICAL DENSITY FOR UO2 = 0.95 ( 0.97 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
DENS : CORE FUEL DENSITY (NOMINAL) = 11.008 G/CC ( 11.058 G/CC FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
DENS : BLANKET FUEL DENSITY (NOMINAL) = 10.960 G/CC ( 11.010 G/CC FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
VOLTC : IMPURITY OF MOX = 180.00 MICRO-L/G-MOX (1.0ATM, 0.0DEG-C)
VOLTB : IMPURITY OF UO2 = 50.00 MICRO-L/G-UO2 (1.0ATM, 0.0DEG-C)
BETAC : GENERATED FP-GAS FROM MOX = 0.27 N/FISSIION
BETAB : GENERATED FP-GAS FROM UO2 = 0.30 N/FISSIION
HCORE : CORE HEIGHT (NOMINAL) = 79.92 CM ( 80.42 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
HBLKU : UPPER-BLANKET HEIGHT (NOMINAL) = 40.02 CM ( 40.22 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
HBLKL : LOWER-BLANKET HEIGHT (NOMINAL) = 40.02 CM ( 40.22 CM FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
HUPLN : UPPER GAS-PLENUM HEIGHT = 22.75 CM ( 8.396 CC FOR CALCULATION OF INTERNAL PRESSURE )
HLPLN : LOWER GAS-PLENUM HEIGHT = 97.50 CM ( 35.984 CC FOR CALCULATION OF INTERNAL PRESSURE )
U235 : FRACTION OF U235 IN U = 0.0030
PUO2 : PU ENRICHMENT (PUO2/(PUO2+UO2)) = 0.2037 ( 0.2037 FOR CALCULATION OF FP & IMPURITY GAS VOLUME )
PU239 : FRACTION OF PU239 IN PU = 0.5500 ( PU239 = 1.0 - PU240 - PU241 - PU242 )
PU240 : FRACTION OF PU240 IN PU = 0.2700
PU241 : FRACTION OF PU241 IN PU = 0.1100
PU242 : FRACTION OF PU241 IN PU = 0.0700
  
```

```

NSTEP(NCYL) : NUMBER OF TIME-STEP FOR EACH CYCLE
CYLTM(NCYL) : IRRADIATION TIME FOR EACH CYCLE [DAYS]
POWER(NCYL*2) : RELATIVE LINEAR HEAT RATE [ - ]
THOTI(NCYL*2) : MAX. CLADDING INNER TEMP. [DEG-C]
THOTM(NCYL*2) : MAX. CLADDING MIDWALL TEMP. [DEG-C]
THOTO(NCYL*2) : MAX. CLADDING OUTER TEMP. [DEG-C]
TPLUP(NCYL*2) : UPPER GAS PLENUM TEMP. [DEG-C]
TPLLW(NCYL*2) : LOWER GAS PLENUM TEMP. [DEG-C]
TIN (NCYL*2) : REACTOR INLET TEMP. [DEG-C]
  
```

NOTICE) DATA(2*N-1):DATA AT BEGINNING OF CYCLE-N
DATA(2*N) :DATA AT END OF CYCLE-N

NCYL	NSTEP	CYLTM	POWER		THOTI		THOTM		THOTO		TPLUP		TPLLW		TIN	
			BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC	BOC	EOC
1	100	182.50	1.0000	0.9765	688.30	688.30	685.00	685.00	681.60	681.60	674.80	674.80	395.00	395.00	395.00	395.00
2	100	182.50	0.9765	0.9548	688.30	688.30	685.00	685.00	681.60	681.60	674.80	674.80	395.00	395.00	395.00	395.00
3	100	182.50	0.9510	0.9331	673.90	673.90	670.80	670.80	667.60	667.60	661.10	661.10	395.00	395.00	395.00	395.00
4	100	182.50	0.9331	0.9157	673.90	673.90	670.80	670.80	667.60	667.60	661.10	661.10	395.00	395.00	395.00	395.00

添 3-6

(2) 倍増時間短縮炉心のCDF計算 本文の表 3-2 に対応。

6-BOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
6-EOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
7-BOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
7-EOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
8-BOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
8-EOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
9-BOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
9-EOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
10-BOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530
10-EOC	0.98150	0.96320	0.95180	0.92170	0.88620	0.84580	0.82670	0.77750	0.72640	0.67530

NSGM =	31	32	33	34	35	36
1-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
1-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
2-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
2-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
3-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
3-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
4-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
4-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
5-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
5-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
6-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
6-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
7-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
7-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
8-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
8-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
9-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
9-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
10-BOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600
10-EOC	0.31280	0.23400	0.16700	0.11700	0.08300	0.06600

添 3-8

BURN : PIN BURNUP (CORE) = 186700 MWD/T (IF NOT BURN>0.0, CORRECTION FACTOR FOR POWER = 1.0)
 PHE : INITIAL PRESSURE BY HE (ROOM TEMP.) = 1.000 ATM
 POUT : COOLANT PRESSURE = 1.452 ATM
 OXI : COOLANT OXYGEN CONCENTRATION = 3.000 PPM
 FACFP : CORRECTION FACTOR FOR FP CORROSION = 1.0000
 FACNA : CORRECTION FACTOR FOR NA CORROSION = 1.0000
 FACHP : CORRECTION FACTOR FOR HOOP STRESS = 1.0000
 FACTR : CORRECTION FACTOR FOR TR = 1.0000
 CSRST : CORRECTION FACTOR FOR SR TO ST = 0.8000
 FACPVU : FACTOR OF UPPER PLENUM VOLUME = 1.0000
 FACPVL : FACTOR OF LOWER PLENUM VOLUME = 1.0000

NODE NO.	NODE HEIGHT (CM)	HEAVY METAL WEIGHT (G)	
		FOR BURNUP	FOR GAS-GENERATION
1	6.670	21.583	22.555
2	6.670	21.583	22.555
3	6.670	21.583	22.555
4	6.670	21.583	22.555
5	6.670	21.583	22.555
6	6.670	21.583	22.555
7	3.330	9.862	10.524
8	3.330	9.862	10.524
9	3.330	9.862	10.524
10	3.330	9.862	10.524
11	3.330	9.862	10.524
12	3.330	9.862	10.524
13	3.330	9.862	10.524
14	3.330	9.862	10.524
15	3.330	9.862	10.524
16	3.330	9.862	10.524

17	3.330	9.862	10.524
18	3.330	9.862	10.524
19	3.330	9.862	10.524
20	3.330	9.862	10.524
21	3.330	9.862	10.524
22	3.330	9.862	10.524
23	3.330	9.862	10.524
24	3.330	9.862	10.524
25	3.330	9.862	10.524
26	3.330	9.862	10.524
27	3.330	9.862	10.524
28	3.330	9.862	10.524
29	3.330	9.862	10.524
30	3.330	9.862	10.524
31	6.670	21.583	22.555
32	6.670	21.583	22.555
33	6.670	21.583	22.555
34	6.670	21.583	22.555
35	6.670	21.583	22.555
36	6.670	21.583	22.555

RESULTS AT END OF CYCLE- 10

PIN POWER AT BOC	=	26.626	[KW]
PIN POWER AT EOC	=	26.241	[KW]
RELEASED TOTAL FP-GAS	=	0.05816	[MOL]
INITIAL HE-GAS PRESSURE	=	2.4777	[KGF/CM2]
IMPURITY-GAS PRESSURE	=	4.0107	[KGF/CM2]
FP-GAS PRESSURE	=	78.1050	[KGF/CM2]
COOLANT OUTER PRESSURE	=	1.5000	[KGF/CM2]
TOTAL INTERNAL PRESSURE	=	83.0934	[KGF/CM2]
PIN BURNUP (CORE)	=	186700.0	[MWD/T]
AXIAL-BLANKET BURNUP	=	31690.0	[MWD/T]
CORRECTION FACTOR FOR SY	=	-0.75646	[-]
CORRECTION FACTOR FOR SU	=	-0.54570	[-]
CORRECTION FACTOR FDC	=	0.33793	[-]

添
3-9

NODE NO.	LOCAL BURNUP [MWD/T]	GENERATED FP-GAS [MOL]	FP-GAS RELEASE RATE [K]	NA CORROSION [CM]	FP CORROSION [CM]	CLAD THICKNESS [CM]	HOOP-STRESS [KGF/MM2]	CDF [-]
1	12814.7	0.00039	10.00	0.0000023	0.0035003	0.0487973	6.35	1.295E-25
2	16198.3	0.00049	10.00	0.0000025	0.0035014	0.0487961	6.35	2.025E-25
3	22732.0	0.00069	10.00	0.0000028	0.0035056	0.0487916	6.35	3.780E-25
4	32513.2	0.00099	10.00	0.0000033	0.0035198	0.0487769	6.36	9.183E-25
5	45405.7	0.00138	10.00	0.0000040	0.0035612	0.0487347	6.36	3.144E-24
6	60087.2	0.00182	10.00	0.0000052	0.0036510	0.0486438	6.38	1.583E-23
7	142441.9	0.00181	100.00	0.0000070	0.0037142	0.0485788	6.38	8.740E-23
8	153724.2	0.00196	100.00	0.0000094	0.0038090	0.0484816	6.40	5.347E-22
9	164857.8	0.00210	100.00	0.0000128	0.0039516	0.0483356	6.42	3.627E-21
10	175438.9	0.00223	100.00	0.0000178	0.0041645	0.0481177	6.45	2.711E-20
11	179624.7	0.00229	100.00	0.0000246	0.0044663	0.0478091	6.49	2.086E-19
12	188272.3	0.00240	100.00	0.0000344	0.0048927	0.0473729	6.56	1.747E-18
13	195836.3	0.00249	100.00	0.0000481	0.0054674	0.0467845	6.64	1.581E-17
14	202253.0	0.00257	100.00	0.0000675	0.0061883	0.0460442	6.76	1.522E-16
15	204654.0	0.00260	100.00	0.0000941	0.0069948	0.0452111	6.89	1.463E-15
16	208542.2	0.00265	100.00	0.0001309	0.0077988	0.0443703	7.03	1.383E-14
17	211155.6	0.00269	100.00	0.0001810	0.0084905	0.0436285	7.15	1.222E-13
18	212473.0	0.00270	100.00	0.0002487	0.0090086	0.0430427	7.25	9.785E-13
19	212451.7	0.00270	100.00	0.0003387	0.0093631	0.0425982	7.33	7.080E-12
20	211134.4	0.00269	100.00	0.0004567	0.0095983	0.0422451	7.40	4.667E-11
21	208542.2	0.00265	100.00	0.0006086	0.0097545	0.0419369	7.45	2.829E-10
22	204654.0	0.00260	100.00	0.0008010	0.0098592	0.0416398	7.50	1.583E-09
23	202231.8	0.00257	100.00	0.0010436	0.0099309	0.0413255	7.56	8.384E-09
24	195836.3	0.00249	100.00	0.0013401	0.0099798	0.0409802	7.62	4.105E-08
25	188293.5	0.00240	100.00	0.0016947	0.0100135	0.0405917	7.69	1.858E-07

26	179709.6	0.00229	100.00	0.0021101	0.0100371	0.0401528	7.77	7.780E-07
27	175651.4	0.00223	100.00	0.0026025	0.0100543	0.0396432	7.86	3.142E-06
28	165197.7	0.00210	100.00	0.0031575	0.0100666	0.0390759	7.97	1.170E-05
29	154340.4	0.00196	100.00	0.0037698	0.0100755	0.0384547	8.09	4.025E-05
30	143483.0	0.00183	100.00	0.0044326	0.0100820	0.0377854	8.23	1.283E-04
31	60826.1	0.00184	10.00	0.0038876	0.0100710	0.0383414	8.12	2.990E-05
32	45502.9	0.00138	10.00	0.0038876	0.0084358	0.0399767	7.77	1.646E-05
33	32474.3	0.00098	10.00	0.0038876	0.0066600	0.0417525	7.42	9.764E-06
34	22751.5	0.00069	10.00	0.0038876	0.0053348	0.0430777	7.18	6.709E-06
35	16139.9	0.00049	10.00	0.0038876	0.0044336	0.0439788	7.02	5.229E-06
36	12834.2	0.00039	10.00	0.0038876	0.0039830	0.0444294	6.95	4.638E-06

添3-10