

可搬型深海炉炉心特性計算

1996年5月

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター

システム開発推進部・技術管理室

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

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1996

可搬型深海炉炉心特性計算

大坪 章*

要 旨

可搬型深海炉の仮想的な炉心浸水事故時に、熱中性子化した状態における未臨界性の確保を確認するため、炉心特性計算を実施した。解析対象の事故条件は、次のように設定した。まず①深海で耐圧殻からの海水漏洩事故が発生し、次に②安全棒及び制御棒が挿入されて炉は停止する。その後③一次系の境界が何らかの原因で破損し、炉心内に海水が侵入する。

炉心としては、プルトニウム富化度50%、ウラン濃縮度20%の酸化物燃料を用いた炉心及び、宇宙炉SP-100と同じウラン濃縮度97%の窒化物燃料を用いた炉心の2種類とした。この他に燃料ピン間のスペーサの有無の影響を検討対象とした。

解析計算は主にMCNPコードを用いて行った。計算の結果、炉心内の海水量が多いスペーサの有の場合でも、燃料ピン内に熱中性子吸収特性に優れているレニウムのライナを挿入することで、炉心浸水事故時の未臨界性が確保されることが分かった。必要なレニウムライナ厚さは、酸化物燃料の場合0.15mm、窒化物燃料の場合0.27mmとなった。

*大洗工学センター 基盤技術開発部 先進技術開発室

Core Characteristic Calculation on Transportable Deep Sea Reactor

Akira Otsubo *

Abstract

Core characteristics calculations were performed on a transportable deep sea reactor to confirm subcriticality at the state of thermalized neutron flux during a core flooded accident by sea water. The accident conditions were as follows. ① A sea water leakage accident through a pressure hull occurred at deep sea. ② The reactor was shut down by insertion of safety and control rods. ③ The primary loop boundary was damaged for some cause and the sea water entered into the core.

Two types of fuel core were studied. One is an oxide fuel core using 50% Pu and 50% U of 20% enrichment. The other is a nitride fuel core using U of 97% enrichment like SP-100. The effect of wire spacer was also analysed.

The computer program of MCNP was used for the analysis. Calculation results show that the subcriticality is kept by inserting a Re liner into a fuel pin even for the case with the wire spacer, where much volume of sea water exists in the core. The Re has good absorption effect for thermal neutrons. Thickness of the liner was estimated to be 0.15mm for the oxide fuel and 0.27mm for the nitride one.

* Frontier Technology Development Section, Advanced Technology Division,
O-arai Engineering Center.

目 次

1. はじめに	1
2. 評価条件	2
3. 計算体系設定	7
3. 1 炉心燃料	7
3. 2 原子炉構造	9
4. 臨界性計算	15
4. 1 燃料ピンセル計算	15
4. 2 臨界計算	17
5. 炉心特性の評価	31
5. 1 炉心仕様の評価	31
5. 2 浸水時未臨界性評価	32
6. 考察	39
7. おわりに	41
謝辞	43
参考文献	44
付録 1. 予備計算	45
2. スペーサ無し炉心のNaK/水置換反応度	52

表 リ ス ト

表 2. 1	固定条件	3
表 2. 2	燃料主要仕様	4
表 3. 1	炉心燃料の主要仕様	10
表 3. 2	炉心及び原子炉構造の主要仕様 (酸化燃料炉心)	11
表 3. 3	炉心及び原子炉構造の主要仕様 (窒化物燃料炉心)	12
表 4. 1	燃料ピンセル体系の実効増倍率の計算結果	20
表 4. 2	Reライナ 無しの体系における非均質効果 (ピンセル計算体系)	21
表 4. 3	NaK/水置換反応度 (ピンセル計算体系)	21
表 4. 4	Reの反応度効果 (ピンセル計算体系)	22
表 4. 5	計算ケース	23
表 4. 6	モンテカルロ計算による実効増倍率の計算結果	24
表 4. 7	NaK/水置換反応度 (全炉心体系、非均質効果考慮)	25
表 4. 8	Reの反応度効果 (全炉心体系、非均質効果考慮)	25
表 5. 1	運転時及び水没時の実効増倍率 (Reライナ 付燃料)	35
表 5. 2	炉心及び原子炉構造の主要仕様見直し (酸化燃料炉心)	36
表 5. 3	炉心及び原子炉構造の主要仕様見直し (窒化物燃料炉心)	37
付表 1. 1	形状係数 (拡散計算ベース)	48

図 リ ス ト

図 2. 1	制御棒駆動機構の概念例	5
図 2. 2	制御棒配置条件	6
図 3. 1	制御棒要素平面配置概念	13
図 3. 2	原子炉構造概念図	14
図 4. 1	燃料ピンのセル計算	26
図 4. 2	酸化物燃料炉心体系の計算体系図 (スパーサ有り)	27
図 4. 3	酸化物燃料炉心体系の計算体系図 (スパーサ無し)	28
図 4. 4	窒化物燃料炉心体系の計算体系図 (スパーサ有り)	29
図 4. 5	窒化物燃料炉心体系の計算体系図 (スパーサ無し)	30
図 5. 1	炉心各部の中性子束 (窒化物燃料炉心)	38
図 6. 1	Reライ 厚さの違いによる水没時反応度挿入の変化	40
付図 1. 1	予備計算 (炉心サイジング) 用計算体系	49
付図 1. 2	酸化物燃料炉心の炉心サイジング 計算結果	50
付図 1. 3	窒化物燃料炉心の炉心サイジング 計算結果	51

1. はじめに

可搬型高速炉の炉心の特性については、既にその臨界特性について検討を行った⁽¹⁾。しかし可搬型高速炉の炉心が浸水したときの未臨界性については、電気出力約300kWeの可搬型高速炉を宇宙炉として使用した場合については既に検討したが⁽²⁾、電気出力20～40 kWeの可搬型高速炉を、深海炉として深海底基地で使用するような場合については未検討である。従って本報告書では、この未検討の深海炉の浸水時の未臨界性について報告をする。

浸水時の未臨界性の問題は、宇宙炉と深海炉の場合次のようになる。宇宙炉の場合は例えば、ロケットで打ち上げ時に事故が発生し打ち上げに失敗して、宇宙炉が海上に落下するとする。このとき炉心の外側に配置してある制御棒および安全棒は、総て外れてしまって、炉心のみが海中に落下するとする。一方深海炉の場合は耐圧殻からの仮想的な海水漏洩事故時に、制御棒および安全棒が挿入され炉が停止した後、何らかの原因で一次系容器の破損が起こり、炉心内に海水が侵入するとする。この場合、制御棒および安全棒が挿入されままの状態である。但し宇宙炉、深海炉いずれの場合も、海水が侵入した状態で炉が未臨界の状態に保たれるのは、燃料ピン被覆管内にライナとして用いられたレニウム(Re)が熱中性子を吸収するからである。

本報告書では第4章で臨界計算を行い深海炉としての成立性を確認した炉心に関して、第5章で海水浸水時の未臨界性について検討を行う。

2. 評価条件

計算対象とする深海炉の固定条件を、表 2. 1 に示す。これは現在まで 20～40 kWe の深海基地用動力源として概念検討してきたものである⁽¹⁾。この深海炉の構造に関しては、米国において月面電源として研究開発が行われた 100kWe 級の宇宙炉 SP100 の設計を参考にするとともに、炉容器、冷却材流路、制御棒等については独自に製作可能性を検討して設定したものである。

燃料としては表 2. 2 に示すとおり、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料及び高濃縮ウラン窒化物燃料（SP-100 燃料）の 2 種類を評価対象とする。前者は現在の国際協定で日本が製作できる最も多く核燃料物質を含む燃料であり、後者は国際協力で深海炉の研究を行うことになり、例えば米国から燃料を調達する場合に製作可能となるものである。

制御棒および制御棒駆動機構概念は図 2. 1 に示す宇宙炉 SP-100 に準じる⁽³⁾。但し、安全棒は炉心内に設置せず、炉心周辺に配置する。制御棒配置条件は図 2. 2 に示すとおりである。

表 2. 1 固定条件

Fixed Conditions

原子炉熱出力： 200kWt	
炉心入口温度： 450 °C	炉心出口温度： 550 °C
炉容器： 二重容器	炉心直径／高さ： 1／1
反射体材質： Be (又はBeO)	吸収体材質： B ₄ C
炉内安全棒ないし制御棒： 無し	
燃料被覆管材質： Hastelloy N	炉容器材質： SUS316
冷却材： NaK (Na;32.7at.%, K;67.3at.%)	

表 2. 2 燃料主要仕様

Main Specifications of Fuel

(1) プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料

燃料組成： プルトニウム・ウラン混合酸化物
ウラン濃縮度： 20wt.%
プルトニウム富化度： 50wt.%
燃料スミア密度： 80T. D.
プルトニウム同位体組成比： (239;58%, 240;24%, 241;14%, 242;4%)
燃料ピン外径： 6.5mm

(2) 高濃縮ウラン 窒化物燃料 (SP-100燃料)

燃料組成： 高濃縮ウラン窒化物
ウラン濃縮度： 97wt.%
燃料スミア密度： 96T. D.
燃料ピン外径： 7.75mm (SP-100同等)

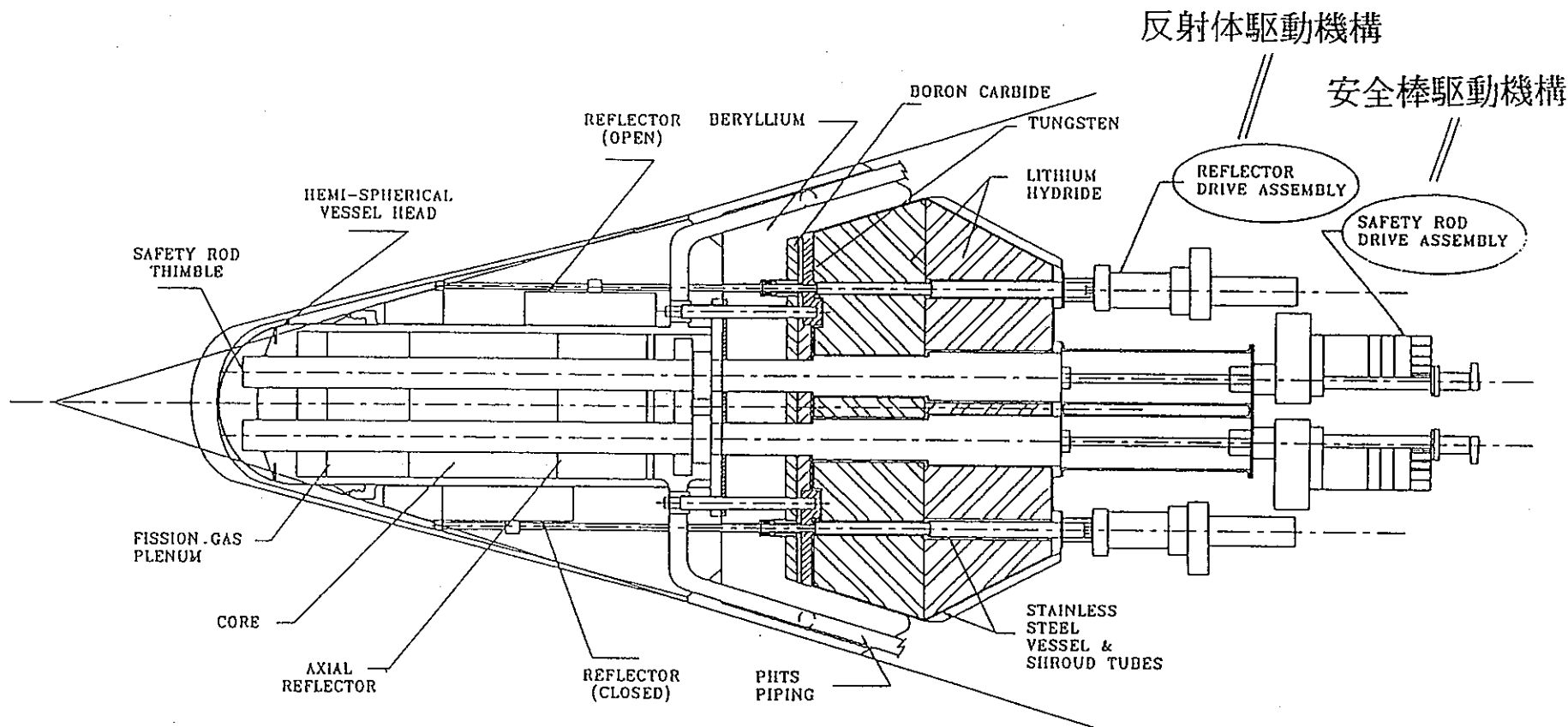
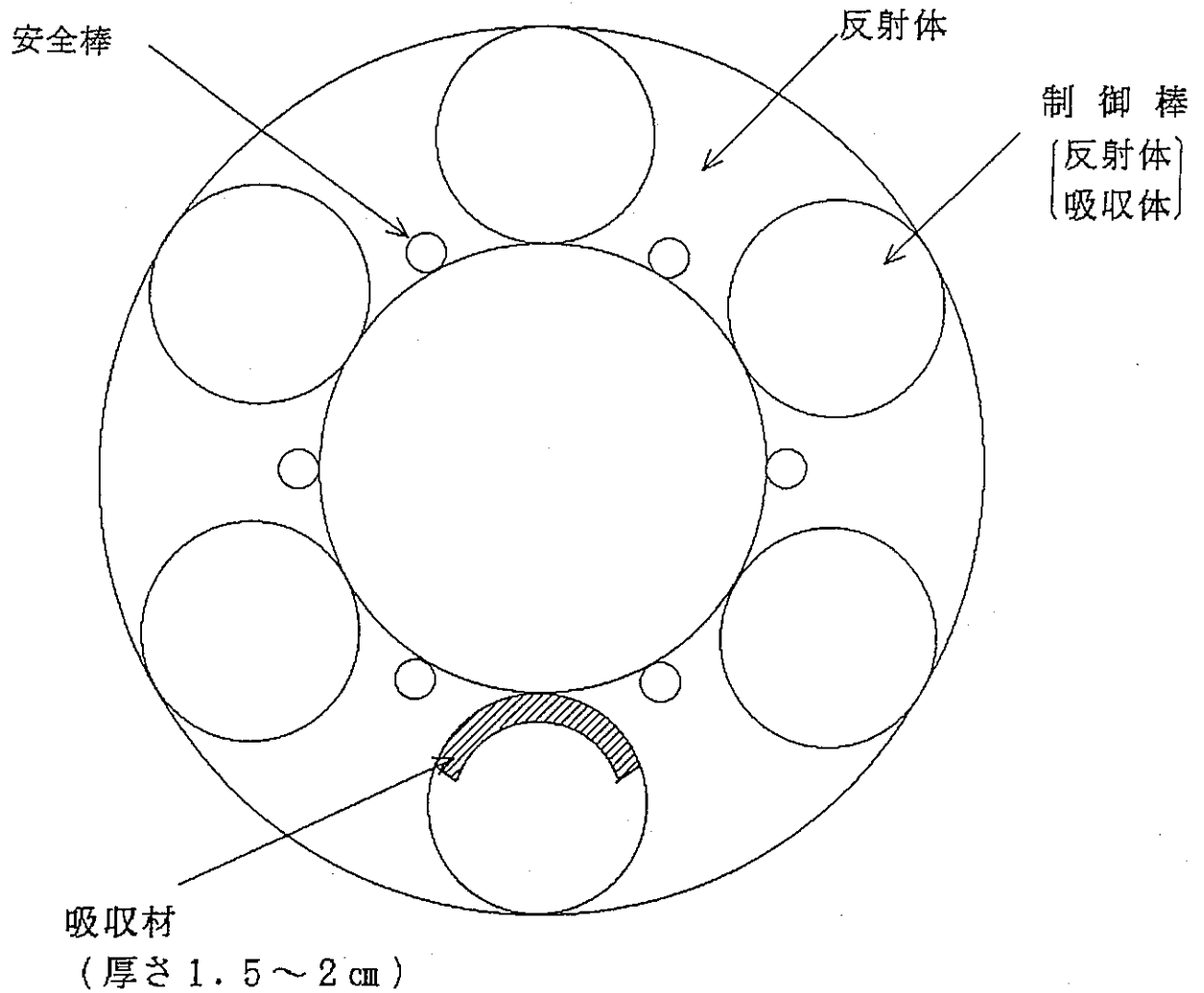


図 2. 1 制御棒駆動機構の概念例 (3)

Concept of Control Rod Drive Mechanism



炉心直径	25 cm	} 57 cm } 暫定値
炉容器等	3 cm (1.5 cm × 2)	
反射体	29 cm (14.5 cm × 2)	

図 2. 2 制御棒配置条件

Arrangement of Control Rod

3. 計算体系設定

付録1で説明する予備計算を行って、以下に述べる第4章の臨界計算に用いるための計算体系を設定した。

3.1 炉心燃料

炉心燃料の主要仕様を、表3.1に示す。燃料ピン配列ピッチについては、スペーサ有り、無し
の両方の体系を設定した。

(1) 混合酸化物燃料

a. 燃料ピン配列ピッチ

燃料ピン配列ピッチは次のとおりとした。スペーサ有り及び無し体系の両方とも、炉心圧損は
 1 kg/cm^2 を十分に下回っている。

①スペーサ有り炉心

通常の高速炉燃料の配列ピッチと同程度の値とした。

②スペーサ無し炉心

本検討では、基準体系として燃料ピン間ギャップ無しの状態を設定した。

燃料ピンどうし接触したバンドル構造であっても、予備計算の結果からは通常運転時には
除熱可能と考えられる。しかしながらサブコル閉塞を想定したとすれば、サブコル間の冷
却材流れが期待できず燃料の設計限界を超える恐れもある。これを避けるためには、
若干の燃料ピン間ギャップを確保しておく対策が考えられる。このようなギャップを考慮したと
きの炉心サイズへの影響については、別に評価することとした。

③その他の仕様

被覆管材（ハステロイN）、Pu富化度、ウラン濃縮度を除き、通常の高速炉燃料の仕
様に準じ設定した。

(2) 高濃縮ウラン酸化物燃料

a. 燃料ピン配列ピッチ

①スペーサ有り炉心

通常の高速炉燃料の配列ピッチと同程度の値とした。

②スペーサ無し炉心

フルニウム・ウラン混合酸化物燃料の場合と同じ考え方にしたがって、基準体系として燃料ピッチ間ギャップ無しの状態を設定した。

b. 被覆管

被覆管径については、SP-100燃料仕様に基づいた。

被覆管肉厚については、SP-100の肉厚が明らかでないので、通常の高速度炉燃料ピッチの値を一応の参考にして、0.56mmとした。なお、SP-100の（被覆管肉厚+ギャップ）は0.635mmと報告されている。

(3) 上下反射体

SP-100の設計を参考にして、燃料ペレットの上下にベリリア（BeO）ペレットの反射体（上下各10cm高さ）を設置する。ベリリアは金属ベリウムと比べてBe原子の密度が約63%であり中性子反射体としての性能が劣るが、SP-100では以下の理由を考慮してベリリアが採用されていると推定される。

①融点が高い。（2,550℃。金属ベリウムは1,277℃。）そのため、熔融に対する裕度が大きいのは勿論のこと、燃料ペレットとの間に熱遮蔽ペレットを挿入する必要もない。

②熱膨張率が金属ベリウムと比べて小さい。（ベリリア；25℃～800℃において、 10.3×10^{-6} /℃。金属ベリウム；20℃～700℃において、 17.8×10^{-6} /℃。）

③ベリリアペレットの中性子照射実績より、中性子照射によるサイズ変化、圧縮強度、熱伝導率等の物性変化が少ないと報告されている。

(4) ガスブレード

燃焼度が低いため、内圧増大の観点からはガスブレード長は数cmで十分であるが、スプリング挿入スペース等の製造加工性を考えて10cmとした。また、ガスブレード位置は、炉心の下部とした。

3. 2 原子炉構造

炉心及び原子炉構造の主要仕様を、表 3. 2 に示す。

(1) 制御棒及び安全棒

a. 制御棒

回転ドラム直径は約15cmとする。但し、図 3. 1 に示す制御要素平面配置概念を参考にして、炉心シフト結果に基づく原子炉容器直径の変化に従って、配置可能なようにドラム直径を調整することとする。

B₄C 厚さは2cmとした。また、B₄C の角度は、B₄C が炉容器側位置となったときにほぼ炉容器側に向かい合う110度の角度とした。

B-10濃縮度は、現状の製品の上限である90% とした。また、B₄C の密度は、製作可能と考えられる上限の97%TDとした。

b. 安全棒

安全棒のサイズは、図 3. 2 に示す制御要素平面配置概念に基づき設定した。即ち、安全棒の直径は、図 3. 2 の炉容器とのサイズ比から設定した。

B₄C組成は、制御棒のB₄C部と同様のB-10濃縮度90%、B₄Cの密度97%TDとした。

(2) 原子炉容器

原子炉容器厚さはBe反射体の性能を発揮させ、炉心を小型化し、また制御棒及び安全棒の性能を発揮させる観点からは、薄肉構造が望ましい。予備計算の結果による原子炉容器直径（最大約70cm）での強度を考慮して、炉心側部の原子炉容器肉厚は、0.5cm とした。炉容器の外側には図 3. 2 に示すようにガードベッセルを設けているがこの肉厚も同じとした。

(3) 原子炉構造概念

図 3. 2 に示す。

表 3. 1 炉心燃料の主要仕様

Main Specifications of Core Fuel

項目	仕様	備考
(1)酸化物燃料 (もんじゅ [®] -ス)		
燃料ピン外径	6.5mm	
燃料ピン内径	5.56mm	
被覆管肉厚	0.47mm	
燃料ペレットスミア密度	80%T.D.	
燃料ピン配列ピッチ	7.9mm (ス [®] -サ [®] -あり) 6.5mm (ス [®] -サ [®] -なし)	
ウラン濃縮度	20%	
プルトニウム富化度	50%	
被覆管材質	ハステロイN	
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	(44.9%/16.5%/38.6%) (ス [®] -サ [®] -あり) (66.4%/26.1%/ 7.5%) (ス [®] -サ [®] -なし)	
(2)窒化物燃料 (SP100 [®] -ス)		
燃料ピン外径	7.75mm	
燃料ピン内径	6.63mm	
被覆管肉厚	0.56mm	
燃料ペレットスミア密度	80%T.D.	
燃料ピン配列ピッチ	9.4mm (ス [®] -サ [®] -あり) 7.75mm (ス [®] -サ [®] -なし)	
ウラン濃縮度	97%	
被覆管材質	ハステロイN	
体積比 (燃料/構造材/冷却材)	(45.1%/16.5%/38.4%) (ス [®] -サ [®] -あり) (66.3%/24.3%/ 9.4%) (ス [®] -サ [®] -なし)	
(3)その他 (共通仕様)		
上下反射体材質 高さ	ベリリウム (BeO) 各10cm	
ガスプレナム長さ	10cm (下部プレナム方式)	

表 3. 2 炉心及び原子炉構造の主要仕様
(酸化燃料炉心)

Main Specifications of Core and Reactor Structure (Oxide Fuel Core)

項目	仕様		備考
	スパーサーあり	スパーサーなし	
炉心高さ	34.8cm	25.2cm	
炉心直径	34.8cm	25.2cm	
原子炉容器外径	36.8cm	27.2cm	
制御棒回転ドラム直径	15.0cm	11.0cm	
制御棒 B_4C 厚さ	2cm	2cm	
制御棒 B_4C 角度	110度	110度	
安全棒直径	3.6cm	2.6cm	
B_4C 理論密度比	97%T.D.	97%T.D.	制御棒、安全棒共通
B_4C のB-10濃縮度	90%	90%	
反射体外径/厚さ	66.8/15.0 cm	49.2/11.0 cm	

表 3. 3 炉心及び原子炉構造の主要仕様
(窒化物燃料炉心)

Main Specifications of Core and Reactor Structure (Nitride Fuel Core)

項目	仕様		備考
	スハ°-サ-あり	スハ°-サ-なし	
炉心高さ	25.4cm	19.4cm	
炉心直径	25.4cm	19.4cm	
原子炉容器外径	27.4cm	21.4cm	
制御棒回転ドラム直径	11.8cm	9.2cm	
制御棒B ₄ C厚さ	2cm	2cm	
制御棒B ₄ C角度	110度	110度	
安全棒直径	2.8cm	2.2cm	
B ₄ C理論密度比	97%T.D.	97%T.D.	制御棒、安全棒共通
B ₄ CのB-10濃縮度	90%	90%	
反射体外径/厚さ	51.0/5.9 cm	39.8/4.6 cm	

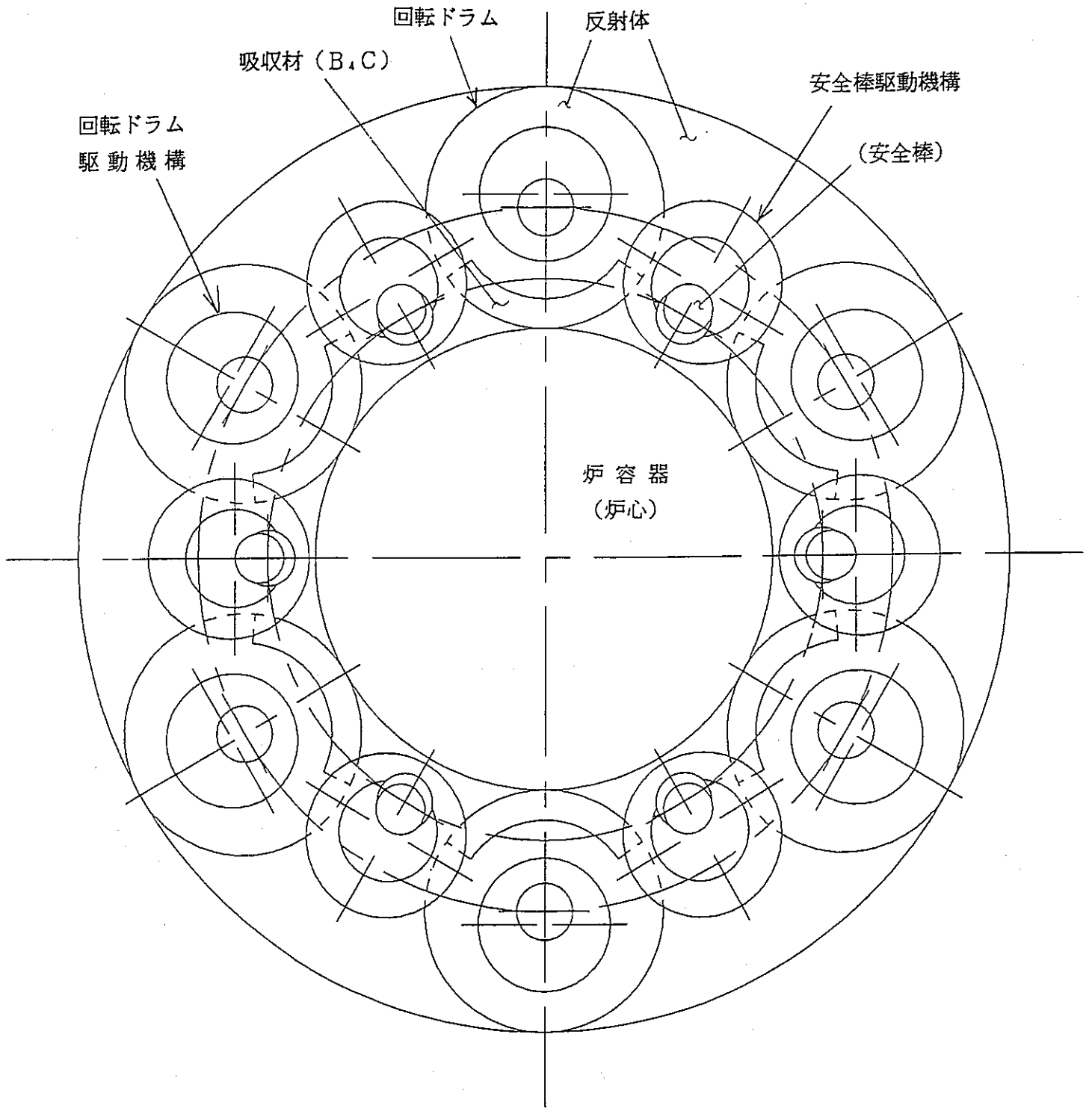


図 3. 1 制御棒要素平面配置概念

Concept of Horizontal Arrangement of Control Rod

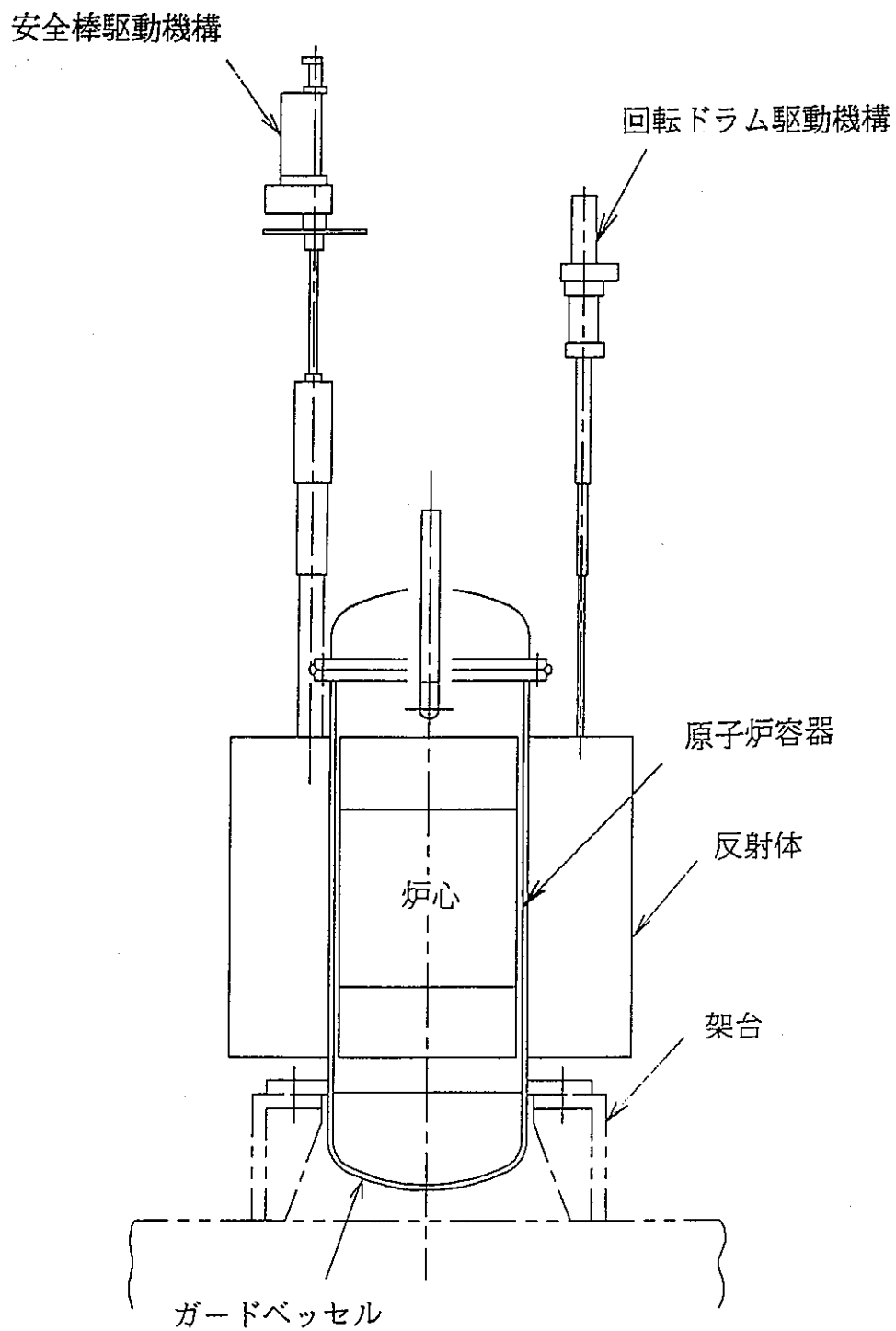


図 3. 2 原子炉構造概念図

Concept of Reactor Structure

4. 臨界性計算

前章で設定した炉心体系について、モンテカルロコードによる臨界計算を実施した。

燃料ピンで構成される高速炉の炉心体系の計算は、非均質効果が小さく、燃料ピンと冷却材を均質に混ぜ合わせたいわゆる均質体系で計算される。本検討では水没状態での計算も行うため、非均質効果を取り入れる必要がある。全炉心体系の燃料ピンを全て計算モデル化することはモンテカルロコードを用いれば可能であるが、入力作業が膨大なものとなるため、炉心体系は均質体系で計算し、非均質効果は別途燃料ピン1本をモデル化したセル計算で確認した。

4. 1 燃料ピンセル計算

ピン体系の非均質性、NaK と水の置換反応度、 $Re_{\text{ライ}}$ の反応度効果等をチェックするため、ピンセル体系でのサーベイ計算を実施した。

(1) 計算条件

a. 計算体系

計算は無限配列のピンセル体系とした。非均質モデルの計算体系図を図 4. 1 に示す。

b. 計算コード

連続エネルギーモンテカルロコード MCNP-4 を用いた。

c. パラメータ

計算パラメータは、次のとおりとした。

- 燃料の種類：酸化物燃料／窒化物燃料
- 冷却材：NaK / 水
- 非均質性：均質／非均質
- $Re_{\text{ライ}}$ ：有り及び無し

(2) 計算結果

燃料ピンセル体系の実効増倍率の計算結果を表 4. 1 に示す。同表に、モンテカルロ計算の計算結果の相対的な標準偏差 (FSD; Fractional Standard Deviation) も合わせて示した。

燃料ピンセル体系で計算したピン非均質効果は下の a. に示すとおりである。また、参考データと

して、燃料ピンセル体系ベースの水没時のNaK/水置換による反応度変化及び、Reの添加による反応度効果を示す。

a. ピン非均質効果

Re₁付 無しの体系において、冷却材がそれぞれNaKと水の場合について非均質効果を計算した。非均質効果（非均質体系の実効増倍率から均質体系の実効増倍率を引いた値。均質体系計算値に下記の非均質効果を加えると非均質体系相当値になる。）の計算結果は表 4. 2 に示すとおりである。

中性子平均エネルギーが高いNaKのピン非均質体系では、燃料の自己遮蔽によって燃料部分の中性子束が低下し、これに伴い燃料の核分裂の割合が減少（被覆管、冷却材での吸収が増大）して均質体系と比べて反応度が低下する。一方、冷却材が水に置換されたピン非均質体系では、燃料の自己遮蔽によって燃料部分の中性子束が低下し、これによって燃料の中性子共鳴吸収の減少及び水による中性子減速の増大が起こり、均質体系と比べて反応度が増大する。

b. NaK/水置換反応度

ピンセル計算体系において、冷却材のNaKを水（20℃）に置換した場合の反応度変化を、表 4. 3 に示す。

高速炉炉心燃料体系において、冷却材（ここではNaK）を水に置換した場合の現象は、水の中性子減速効果による中性子平均エネルギーの低下と、水による中性子反射効果の増大（中性子漏洩の減少）である。ピンセル計算体系は無限体系であるため後者の中性子反射効果は影響せず、前者の中性子エネルギー減速効果が反応度変化に寄与する。中性子エネルギーが低下すれば、 η （中性子が1個吸収されたときに核分裂により発生する平均の中性子個数）が低下するため、ここでの水への置換反応度は負の値を示している。

c. Reの反応度効果

ピンセル計算体系において被覆管厚さの1/2のRe₁付、即ち酸化物燃料ピンでは0.235mm、窒化物燃料ピンでは0.28mmの厚さのRe₁付 を付けた場合の反応度効果を表 4. 4 に示す。

4. 2 臨界計算

(1) 計算条件

a. 計算体系

計算体系を図4. 2～図4. 5に示す。各部寸法については、表3. 2及び表3. 3に示すとおりである。

計算体系は、次のようにモデル化した。まず、炉心部、上下反射体部及びガスプラム部については、均質モデルとした。また二重の原子炉容器は密着させて1cm厚さにモデル化した。径方向の反射体の上部は、空隙部に制御棒駆動機構等が存在するが、計算モデル上、20%の体積率のSUS316が存在するものとした。

b. 計算コード

連続エネルギーモンテカルロコードMCNP-4を用いた。

c. 計算ケース

計算ケースは、まずRe_{eff} 無し状態で表4. 5の10ケースを設定した。

(2) 計算結果

モンテカルロ計算による実効増倍率の計算結果を表4. 6に示す。表4. 5の10ケースは表4. 6の1～10のケースに対応する。表4. 6の11～14のケースは、Re_{eff} の反応度効果を調べるために、表4. 5の10ケースの計算結果を検討して新たに設定したものである。

a. 運転中の実効増倍率

燃料ピンの非均質効果を考慮した運転中の実効増倍率は次のとおりである。

酸化物燃料炉心：1.037

窒化物燃料炉心：1.025

b. 制御棒価値

表4. 6の計算結果より、酸化物燃料炉心及び窒化物燃料炉心の制御棒価値は、次のとおりである。

酸化物燃料炉心（制御棒＋安全棒）：26.0%dk/k

酸化物燃料炉心（制御棒）：19.2%dk/k

窒化物燃料炉心（制御棒＋安全棒）：22.1%dk/k

窒化物燃料炉心（制御棒）：18.4%dk/k

大型高速炉の制御棒価値は10%dk/k前後であり、それと比較すれば十分な制御棒価値を有している。

c. 未臨界度

表4. 6の計算結果より、NaK冷却材体系での酸化物燃料炉心及び窒化物燃料炉心の制御棒のみ及び（制御棒+安全棒）挿入時の実効増倍率はいずれも0.9以下であり、十分な未臨界度となっている。

一方、水没時の未臨界度については、（制御棒+安全棒）挿入時においても実効増倍率は1.0を上回っている。

（制御棒+安全棒）挿入時において、NaKから海水（水）への置換反応度は、表4. 6のケース1と5及びケース6と10を比較することにより、表4. 7に示すように次のとおりとなる。

酸化物燃料炉心：34%dk/k

窒化物燃料炉心：31%dk/k

ピンセル計算体系の計算結果では、NaKから海水（水）への置換反応度は負の値となっていたが、全炉心体系では上に示すように正の値となった。これは、この炉心体系の無限増倍率が2以上と漏洩の大きな体系であり、水の反射効果により体系からの中性子漏洩が減少し大きな正の反応度が入り、これが水の減速効果による負の反応度効果を上回ったためと考えられる。

d. Re_{eff}の反応度効果

表4. 6のケース1と11及びケース6と13を比較することにより、Re_{eff}の反応度効果は表4. 8に示すとおりである。すなわち、NaK体系において、

酸化物燃料炉心：-8.5%dk/k

窒化物燃料炉心：-5.1%dk/k

水体系において、

酸化物燃料炉心：-38%dk/k

窒化物燃料炉心：-18%dk/k

である。

(3) 検討

a. 燃料ピンギャップ変更による炉心サイズへの影響

窒化物燃料炉心では、スペサ有り炉心の直径が24.6cmであるのに対し、スペサ無し炉心の直径は19.44cmと大幅に小さく、炉心体積は約49%、燃料インベントリは約72%である。スペサ無し炉心においては、冷却材サフィニル間の流路を確保する観点から微少な燃料ビン間ギャップを設けたときの炉心サイズへの影響を見積もった。炉心は窒化物燃料炉心とし、燃料ビン間ギャップは0.2mmを想定した。

0.2mmの燃料ビン間ギャップを設けることにより、燃料体積比は66.3%から63.0%に低下している。燃料インベントリを保存するには、炉心直径を19.8cmとする必要がある。燃料体積比の変化に伴う反応度変化は、拡散計算による予備計算結果から0.7%dk/k/vol.%と評価されており、これより反応度低下は、2.3%dk/kとなる。形状係数は7%dk/k/cm(半径)であり、燃料体積比低下の補償分として0.7cmの直径増大が必要であり、結局炉心直径は、約20.5cmとなる。

表 4. 1 燃料ピンセル体系の実効増倍率の計算結果

Calculation Results of Effective Multiplication Factor
in a Fuel Pin Cell Geometry

燃料	冷却材	Re	スプルーサー	均質性	無限増倍率	FSD
酸化物	NaK	なし	あり	非均質	2.1224	0.0057
酸化物	NaK	なし	あり	均質	2.1320	0.0036
酸化物	水	なし	あり	非均質	1.6166	0.0032
酸化物	水	なし	あり	均質	1.5925	0.0033
酸化物	NaK	あり	あり	非均質	1.7413	0.0069
酸化物	水	あり	あり	非均質	1.1121	0.0047
窒化物	NaK	なし	あり	非均質	2.0941	0.0045
窒化物	NaK	なし	あり	均質	2.0950	0.0051
窒化物	水	なし	あり	非均質	1.8010	0.0030
窒化物	水	なし	あり	均質	1.7965	0.0047
窒化物	NaK	あり	あり	非均質	1.9239	0.0050
窒化物	水	あり	あり	非均質	1.4562	0.0047

* Reの付-厚さ：酸化物燃料0.235mm、窒化物燃料；0.28mm

表 4. 2 Reライナー無しの場合における非均質効果
(ピンセル計算体系)

Unhomogeneous Effect in Re Liner Lacked Geometry (Pin Cell Calculation Geometry)

燃料	Na-K			水		
	非均質体系	均質体系	非均質効果	非均質体系	均質体系	非均質効果
酸化物燃料	2.1224	2.1320	-0.2%dk/k	1.6166	1.5925	0.9%dk/k
窒化物燃料	2.0941	2.0950	-0.02%dk/k	1.8010	1.7965	0.1%dk/k

表 4. 3 NaK/水置換反応度 (ピンセル計算体系)

NaK/Water Replacement Reactivity (Pin Cell Calculation Geometry)

燃料	Reライナーなし			Reライナー付		
	NaK	水	反応度変化	NaK	水	反応度変化
酸化物燃料	2.1224	1.6166	15%dk/k	1.7413	1.1121	32%dk/k
窒化物燃料	2.0941	1.8010	7.8%dk/k	1.9239	1.4562	17%dk/k

* Reライナー厚さ：酸化物燃料0.235mm、窒化物燃料；0.28mm

表 4. 4 Reの反応度効果 (ピンセル計算体系)

Reactivity Effect of Re (Pin Cell Calculation Geometry)

燃料	NaK			水		
	Reなし	Re付*	反応度変化	Reなし	Re付	反応度変化
酸化物燃料	2.1224	1.7413	-10%dk/k	1.6166	1.1121	-28%dk/k
窒化物燃料	2.0941	1.9239	-4.2%dk/k	1.8010	1.4562	-13%dk/k

* Re層厚さ：酸化物燃料0.235mm、窒化物燃料；0.28mm

表 4. 5 計算ケース

Calculation Case

ケース	燃料ペレット	スパーサ	スクラム状態	ガスブナム
1	窒化物	有	(制御棒+安全棒) 挿入	正常
2	窒化物	無	(制御棒+安全棒) 挿入	正常
3	窒化物	有	制御棒挿入	正常
4	窒化物	有	運転状態	正常
5	窒化物	有	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入
6	酸化物	有	(制御棒+安全棒) 挿入	正常
7	酸化物	無	(制御棒+安全棒) 挿入	正常
8	酸化物	有	制御棒挿入	正常
9	酸化物	有	運転状態	正常
10	酸化物	有	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入

ガスブナムに水が浸入のケースは、NaKも水に置換

表 4. 6 モンテカルロ計算による実効増倍率の計算結果

Calculation Results of Effective Multiplication Factor by Montecarlo Method

ケース	燃料ペレット	スペーサー	スクラム状態	ガスフレナム	モンテカルロ計算結果	非均質補正後のKeff	備考
1	SP-100	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	0.8358±0.0045	0.836	
2	SP-100	なし	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	—	1.004	拡散計算ペース*1
3	SP-100	あり	制御棒のみ挿入	正常	0.8621±0.0046	0.862	
4	SP-100	あり	運転状態	正常	1.0254±0.0084	1.025	
5	SP-100	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入 ^{注)}	1.1251±0.0082	1.125	
6	もんじゅ	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	0.8187±0.0045	0.817	
7	もんじゅ	なし	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	—	0.998	拡散計算ペース*2
8	もんじゅ	あり	制御棒のみ挿入	正常	0.8658±0.0045	0.865	
9	もんじゅ	あり	運転状態	正常	1.03881±0.0049	1.037	
10	もんじゅ	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入 ^{注)}	1.1067±0.0040	1.137	
11	SP-100	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	0.8020±0.0036	0.802	Reライナー付
12	SP-100	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入 ^{注)}	0.9368±0.0050	0.938	Reライナー付
13	もんじゅ	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	正常	0.7655±0.0041	0.764	Reライナー付
14	もんじゅ	あり	(制御棒+安全棒) 挿入	水が浸入 ^{注)}	0.7867±0.0032	0.796	Reライナー付

注) ガスフレナムに水が浸入のケースは、NaKも水に置換

* 1 炉心半径9.72cm

* 2 炉心半径12.6cm

表 4. 7 NaK/水置換反応度

(全炉心体系、非均質効果考慮)

NaK/Water Replacement Reactivity (Whole Core Geometry, Unhomogeneous Effect)

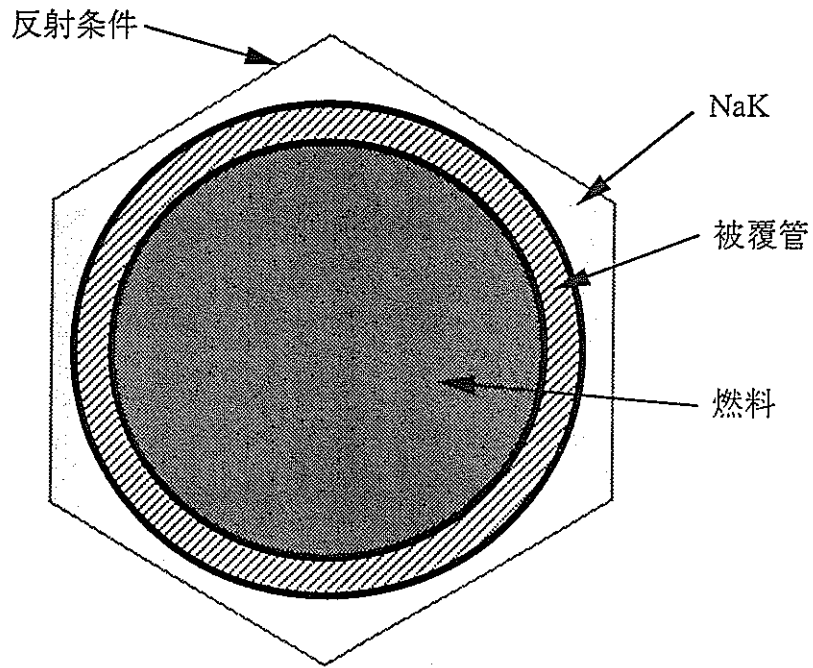
燃料	Re ₀ 付-なし			Re ₀ 付-付		
	NaK	水	反応度変化	NaK	水	反応度変化
酸化物燃料	0.817	1.137	34%dk/k	0.764	0.796	5.3%dk/k
窒化物燃料	0.836	1.125	31%dk/k	0.802	0.938	18%dk/k

表 4. 8 Reの反応度効果

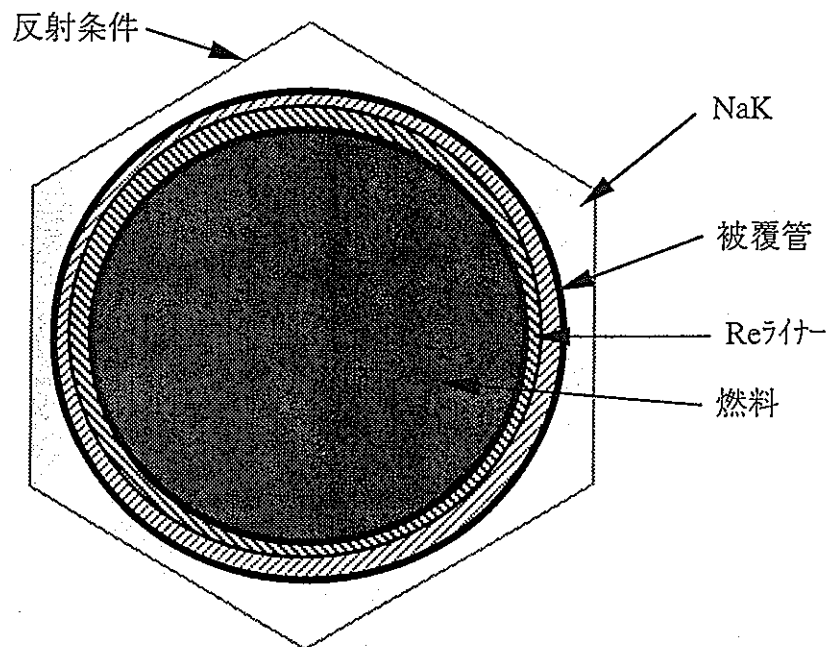
(全炉心体系、非均質効果考慮)

Re Reactivity Effect (Whole Core Geometry, Unhomogeneous Effect)

燃料	NaK			水		
	Reなし	Re付	反応度変化	Reなし	Re付	反応度変化
酸化物燃料	0.817	0.764	-8.5%dk/k	1.137	0.796	-38%dk/k
窒化物燃料	0.836	0.802	-5.1%dk/k	1.125	0.938	-18%dk/k



Re層なし体系



Re層付体系

図 4. 1 燃料ピンのセル計算

Cell Calculation of Fuel Pin

77

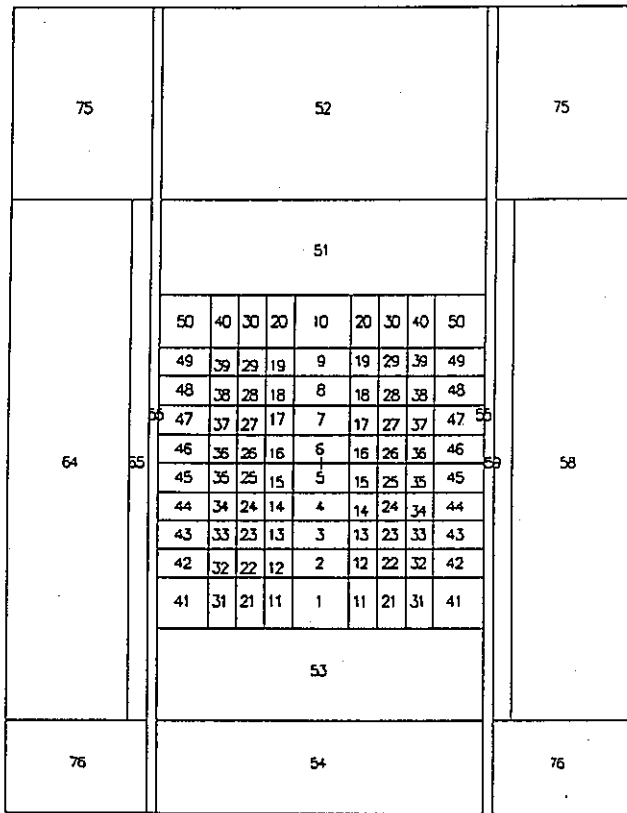
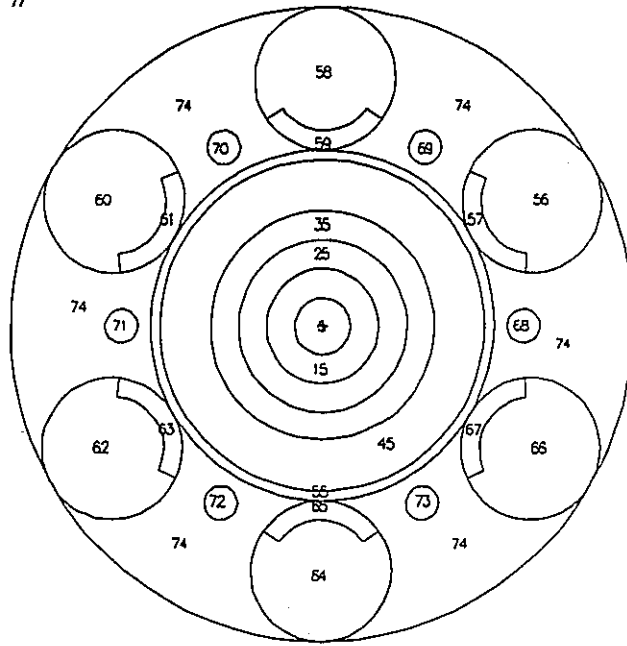
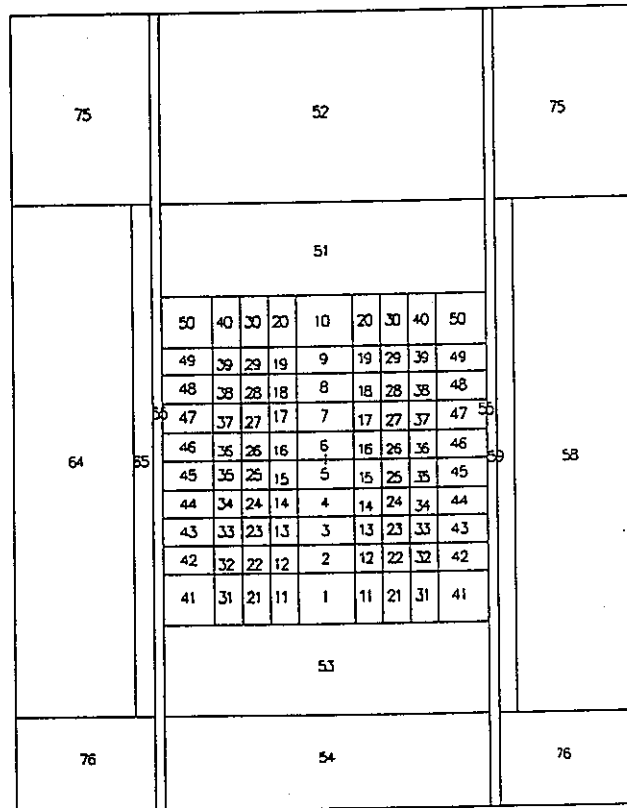
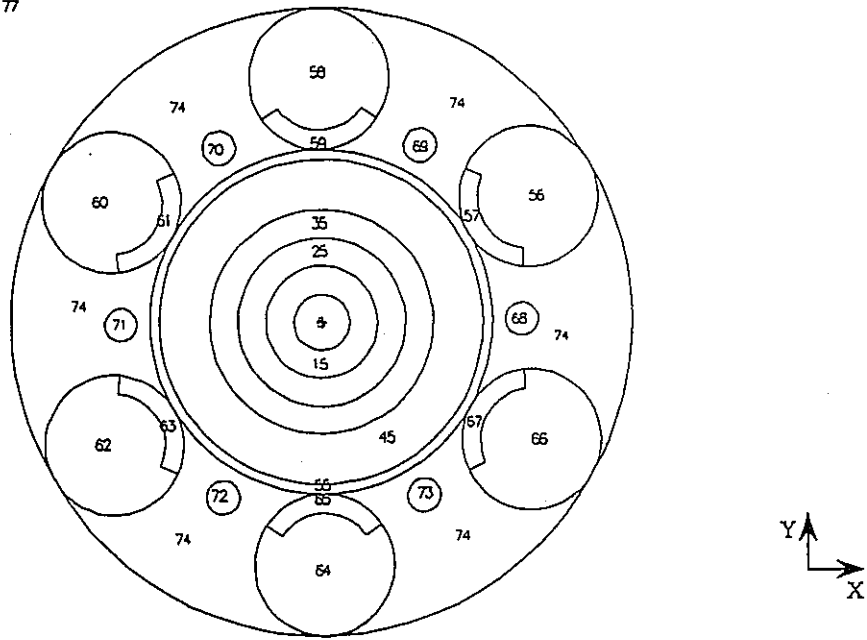


図 4. 2 酸化物燃料炉心体系の計算体系図

(スペーサ有り)

Calculation Geometry of Oxide Fuel Core (With Spacer)

77

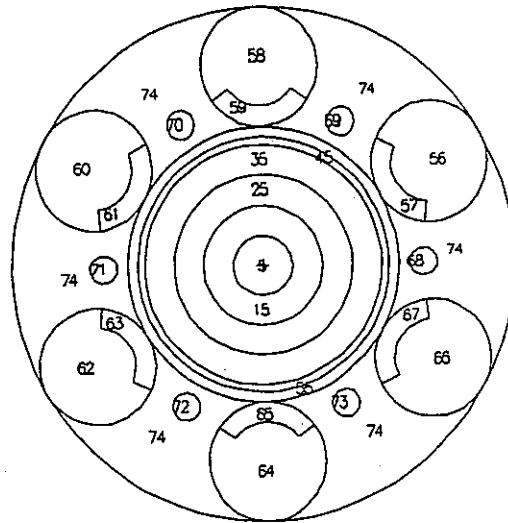


77

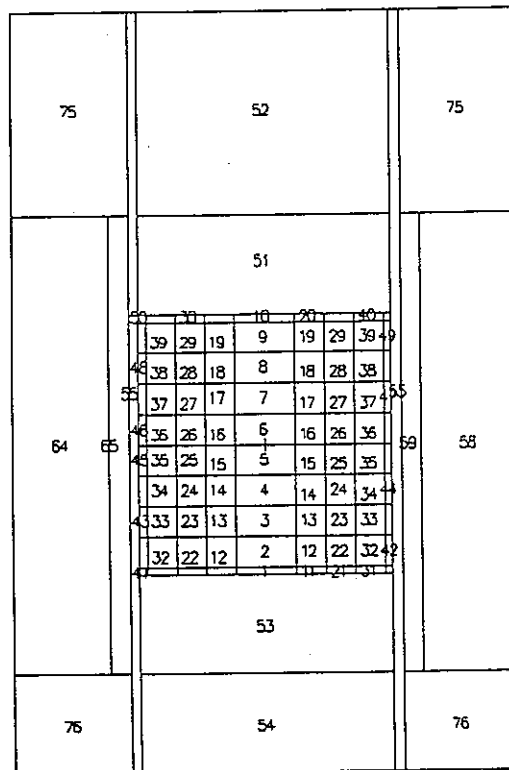
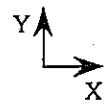
図 4. 3 酸化物燃料炉心体系の計算体系図

(スペーサ無し)

Calculation Geometry of Oxide Fuel Core (Without Spacer)



77



77

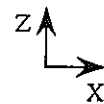
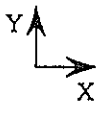
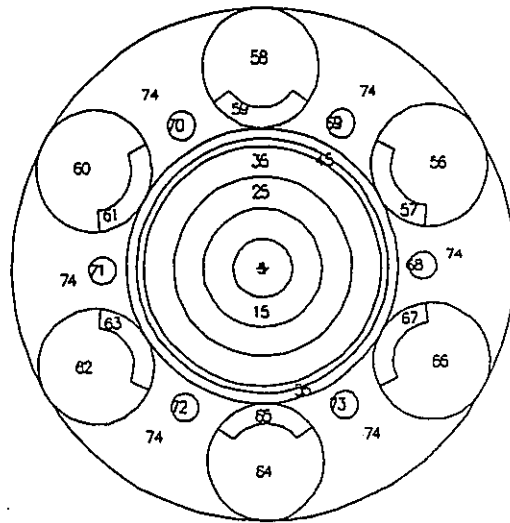


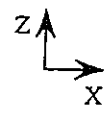
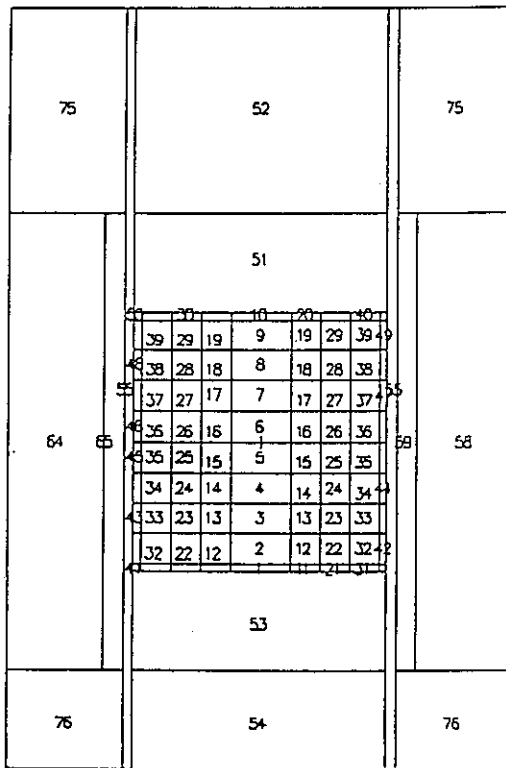
図 4. 4 窒化物燃料炉心体系の計算体系図

(スペーサ有り)

Calculation Geometry of Nitride Fuel Core (With Spacer)



77



77

図 4. 5 窒化物燃料炉心体系の計算体系図

(スペーサ無し)

Calculation Geometry of Nitride Fuel Core (Without Spacer)

5. 炉心特性の評価

前章のサーベイ計算結果に基づき、運転中及び水没時（制御棒及び安全棒挿入状態）の臨界性に対する要求を満たす炉心仕様を設定するとともに、設定した炉心に対する炉心特性値を評価した。

5. 1 炉心仕様の設定

(1) Re厚さの設定

前章の計算結果から、Re_{リフ} を付けない場合には、制御棒及び（制御棒＋安全棒）挿入体系で、水没時の未臨界が維持できないことが示された。よってここでは、制御棒及び安全棒挿入体系で、水没時の未臨界を維持する条件（Re厚さ）を検討する。Re_{リフ} の導入により、水没時に大きな負の反応度が挿入される。

Re_{リフ} が無い場合の水没時の余剰反応度は次のとおりである。

	酸化物燃料炉心	窒化物燃料炉心
運転時過剰反応度	3%dk/k	3%dk/k
水没による反応度付加	34%dk/k	31%dk/k
制御棒、安全棒反応度	-26%dk/k	-22%dk/k
合計	11%dk/k	12%dk/k

水没時に未臨界となるためには、水没による反応度付加と運転時過剰反応度の合計を制御棒及び安全棒の反応度価値以下にする必要があり、上の表より、水没による反応度付加を酸化物燃料炉心で23%dk/k以下、窒化物燃料炉心で19%dk/k以下にする必要がある。

図5. 1は、表4. 7のNaK/水置換反応度に基づき、被覆管のRe_{リフ}の厚さをパラメータにして、NaKから水への置換反応度の低減効果を示したものである。表4. 7の値は図中に●及び○で示す。但し、Re_{リフ}の厚さとNaK/水置換反応度は直線的に変化するものと仮定した。この図より、水没による反応度付加が上に示す値以下になるRe厚さとして、若干の余裕を見込んで

酸化物燃料：0.15mm

窒化物燃料：0.27mm

と設定した。

(2) 炉心サイズの調整

Re_{ライ} を設けることにより運転中の余剰反応度が低下するため、所定の余剰反応度を確保するため、炉心サイズの微調整を行う必要がある。

上記(1)の厚さのRe_{ライ}による余剰反応度の低下は、表4.8の関係(Re_{ライ}厚さは被覆管肉厚の1/2: 酸化物燃料0.235mm、窒化物燃料; 0.28mm)より次のとおりとなる。

酸化物炉心: $-5.4\%dk/k$ ($-8.5 \times 0.15\text{mm} / 0.235\text{mm}$)

窒化物炉心: $-4.9\%dk/k$ ($-5.1 \times 0.27\text{mm} / 0.28\text{mm}$)

この反応度低下を補償する炉心サイズの増大量は、付表1.1の形状係数より求めることができ、調整後の炉心直径(高さ)は次のとおりとなる。

酸化物炉心: 37.2cm (+2.4cm)

窒化物炉心: 27.2cm (+1.8cm)

5.2 浸水時未臨界性評価

前節に示すRe_{ライ}厚さと炉心直径・高さにおける炉心特性を評価した。評価結果を、表5.1に示す。

(1) 運転時

a. 基準計算値

表4.6のケース9(酸化物炉心)及びケース4(窒化物炉心)に示す運転状態(制御棒引き抜き状態、Re_{ライ}無し)の実効増倍率を基準計算値とした。

b. 補正值

7. 非均質補正

表4.2に示す非均質効果を補正值とした。

4. Re_{ライ}

前節の(2)に述べたとおり、表4.8に示すReの反応度効果に基づき、Re_{ライ}による反応度低下量を求めた。

9. 炉心サイズ

付表1.1に示す形状係数(半径1cm変化当たりの反応度変化)に基準体系からの半径

変化量を乗じたものを炉心サイズ補正值とした。

$$\text{酸化物炉心} : 4.45\%dk/k/cm \times 2.4\text{cm (直径)} \times 0.5 = 5.34\%dk/k$$

$$\text{窒化物炉心} : 5.68\%dk/k/cm \times 1.8\text{cm (直径)} \times 0.5 = 5.11\%dk/k$$

(2) 水没時

a. 基準計算値

表4.6のケース14(酸化物炉心)及びケース12(窒化物炉心)に示す水没状態(制御棒+安全棒挿入状態、被覆管肉厚の1/2のReライ付)の実効増倍率を基準計算値とした。

b. 補正值

7. 非均質補正

表4.2に示す非均質効果を補正值とした。

4. Reライ付

表4.8に示すReの反応度効果に基づき、基準計算値とのReライ付の違い(酸化物炉心: $0.15\text{mm} - 0.235\text{mm} = -0.085\text{mm}$ 、窒化物炉心: $0.27\text{mm} - 0.28\text{mm} = -0.01\text{mm}$)による反応度差を補正值とした。

$$\text{酸化物炉心} : -38\%dk/k/cm / 0.235\text{mm} \times (-0.085)\text{mm} = 13.7\%dk/k$$

$$\text{窒化物炉心} : -18\%dk/k/cm / 0.28\text{mm} \times (-0.01\text{mm}) = 0.007\%dk/k$$

ウ. 炉心サイズ

付表1.1に示す形状係数(半径1cm変化当たりの反応度変化)に基準体系からの半径変化量を乗じたものを炉心サイズ補正值とした。

$$\text{酸化物炉心} : 4.45\%dk/k/cm \times 2.4\text{cm (直径)} \times 0.5 = 5.34\%dk/k$$

$$\text{窒化物炉心} : 5.68\%dk/k/cm \times 1.8\text{cm (直径)} \times 0.5 = 5.11\%dk/k$$

以上の見直し結果を反映した原子炉構造の主要仕様を表5.2及び表5.3に示す。実効増倍率の評価結果は、次のとおりである。

	酸化物燃料炉心	窒化物燃料炉心
運転時実効増倍率	1.036	1.027
水没時実効増倍率	0.986	0.996

なお参考のため、窒化物燃料炉心の中性子束分布を、図 5. 1 に示す。

本章の計算はパーサ有り炉心についてのものである。パーサ無しの場合は、水没時の水の量が少なくなるため、浸水による反応度増加は小さくなり、従って、海水（水）が浸水した場合の実効増倍率はこの値より小さくなる。パーサ無しの場合の計算結果については、付録 2 で説明する。

表 5. 1 運転時及び水没時の実効増倍率
(Reライネ付燃料)

Effective Multiplication Factors during Normal Operation and Flooded Condition
(Fuel with Re Liner)

運転時 (制御棒、安全棒引き抜き状態)

	酸化物炉心	窒化物炉心
基準計算値*1	1.0388	1.0254
補正值		
非均質補正	-0.002	-0.0002
Reライネ	-0.054	-0.049
炉心サイズ	0.0534	0.0511
補正合計	-0.0026	0.0019
補正後の実効増倍率	1.0362	1.0273

水没時 (制御棒、安全棒挿入状態)

	酸化物炉心	窒化物炉心
基準計算値*2	0.7867	0.9368
補正值		
非均質補正	0.009	0.001
Reライネ*3	0.137	0.007
炉心サイズ	0.0534	0.0511
補正合計	0.1994	0.0591
補正後の実効増倍率	0.986	0.996

*1 Reライネ無し

*2 被覆管厚さの1/2のRe層

*3 基準計算とRe厚さ設定調整後との水没時の反応度差

表5. 2炉心及び原子炉構造の主要仕様見直し
(酸化燃料炉心)

Improved Main Specifications of Core and Reactor Structure (Oxide Fuel Core)

項目	仕様	備考
	スパーサーあり	
炉心高さ	37.2cm	
炉心直径	37.2cm	
原子炉容器外径	39.2cm	
制御棒回転ドラム直径	16.0cm	
制御棒B ₄ C厚さ	2cm	
制御棒B ₄ C角度	110度	
安全棒直径	3.8cm	
B ₄ C理論密度比	97%T.D.	制御棒、安全棒共通
B ₄ CのB-10濃縮度	90%	
反射体外径/厚さ	71.2/16.0 cm	

表5. 3 炉心及び原子炉構造の主要仕様見直し
(窒化物燃料炉心)

Improved Main Specifications of Core and Reactor Structure (Nitride Fuel Core)

項目	仕様	備考
	スパーサーあり	
炉心高さ	27.2cm	
炉心直径	27.2cm	
原子炉容器外径	29.2cm	
制御棒回転ドラム直径	12.6cm	
制御棒B ₄ C厚さ	2cm	
制御棒B ₄ C角度	110度	
安全棒直径	2.8cm	
B ₄ C理論密度比	97%T.D.	制御棒、安全棒共通
B ₄ CのB-10濃縮度	90%	
反射体外径/厚さ	54.4/12.6 cm	

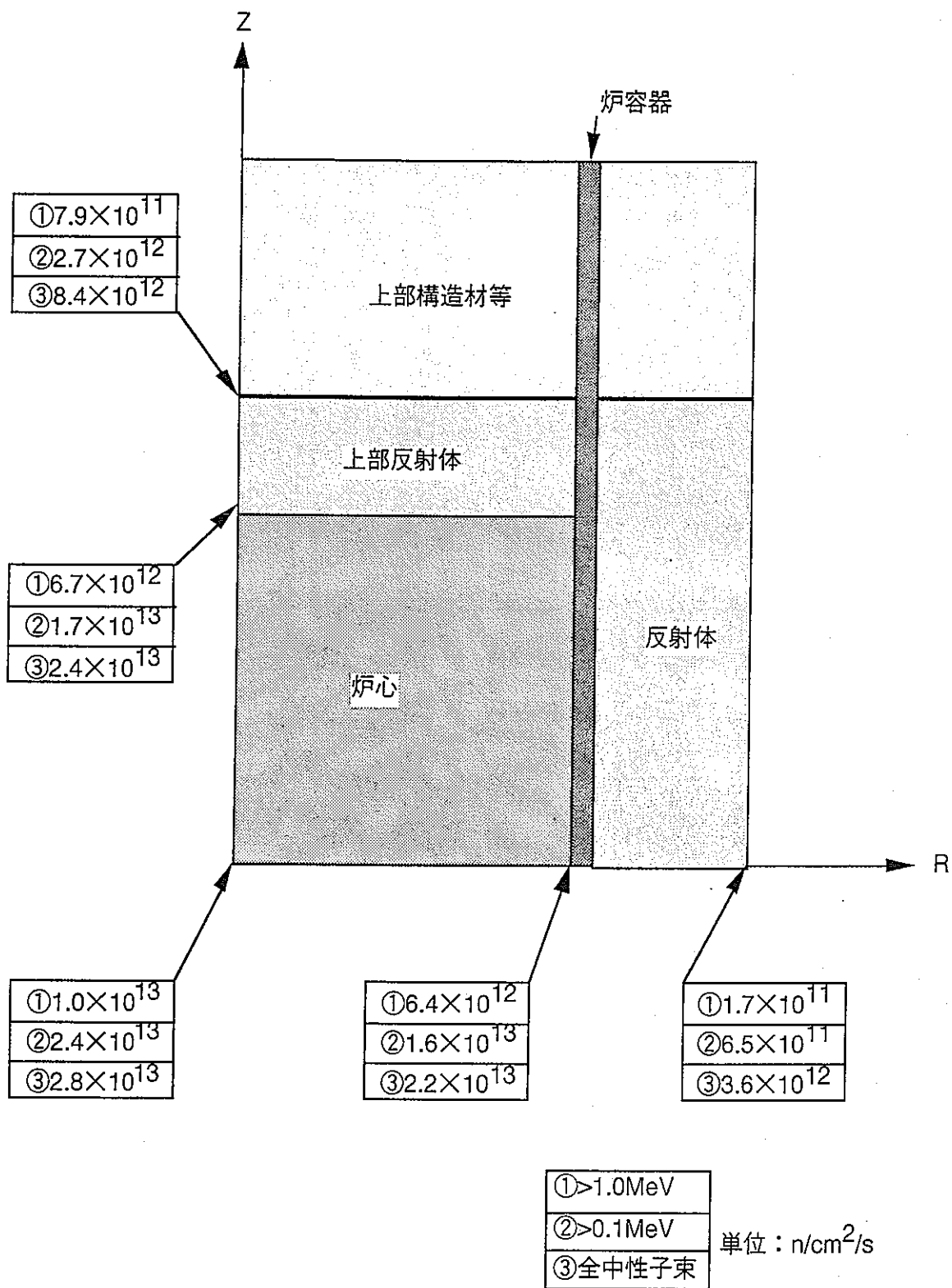


図 5. 1 炉心各部の中性子束 (窒化物燃料炉心)

Neutron Flux Distribution (Nitride Fuel Core)

6. 考察

可搬型深海炉の中で、小規模な海底基地用の電源として最初に実用化が期待できる、20～40 kWe 規模の可搬型深海炉炉心の浸水事故時特性について検討した結果、酸化物燃料炉心及び窒化物燃料炉心のどちらについても、燃料ピンの中にReライフを挿入することによって、未臨界性が確保出来ることが分かった。

熱中性子吸収性能に優れたReの炉心内への組み込み方法としては、上記の方法の他に炉容器の内面にRe板を張りつけるとか、Reペレットを燃料ピンの中に入れる方法が考えられる。従って、今回の計算で燃料ピンの中のReライフのみで未臨界性が確保出来たことは、まだかなり技術的に余裕のある状態だと言える。

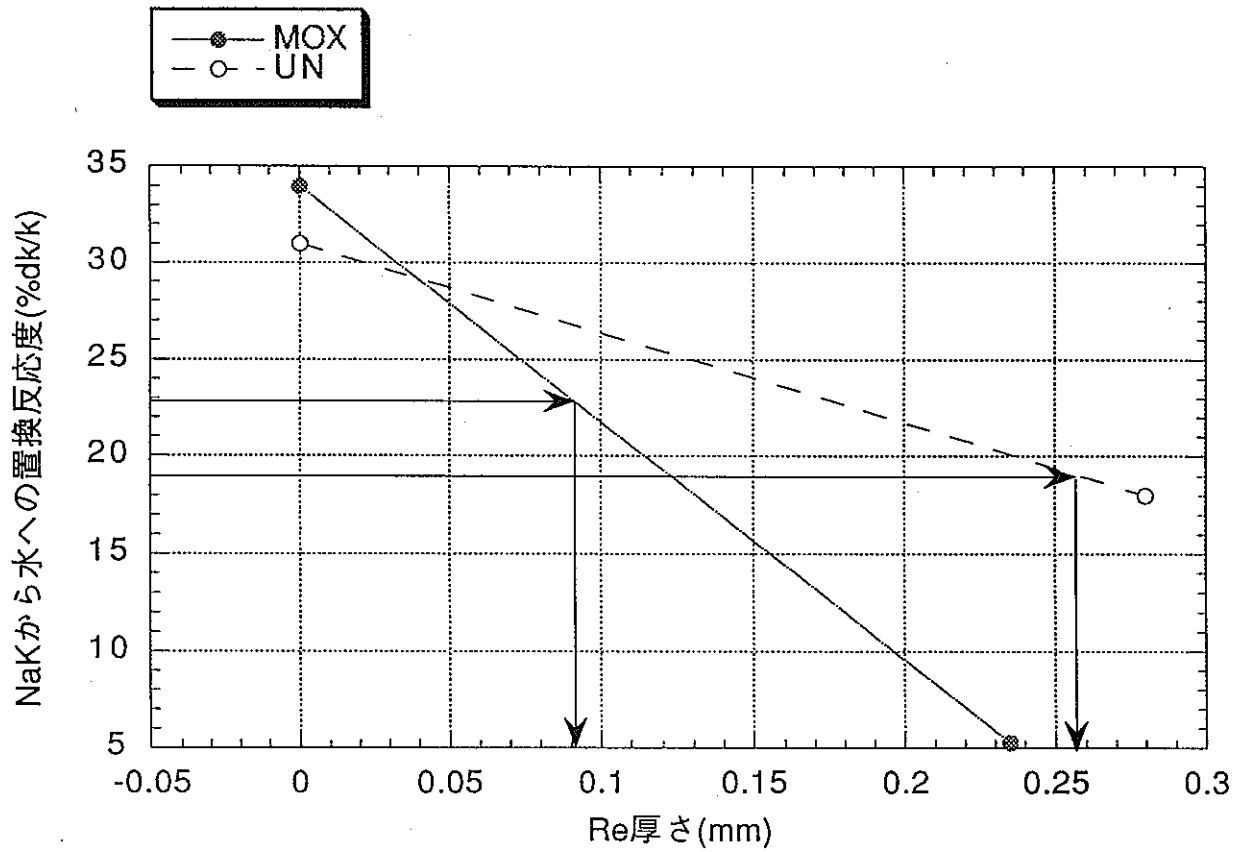


図 6. 1 Reライ衬厚さの違いによる水没時反応度挿入の変化

Reactivity Change Dependency on Re Liner Thickness in Case of Core Flooded with Water

7. おわりに

被覆管内側にReライフを設置して、炉心水没時に未臨界性を有するような可搬型炉の炉心設計値を求める検討を実施した。

本検討の結果の概要は以下のとおりである。

- (1) 高濃縮ウラン窒化物燃料及びプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料を用いた可搬型炉について、炉心特性計算を実施するため、炉心サイズ並びに炉心燃料及び炉体廻りの基本構造を設定した。設定した炉心サイズは次のとおりである。

酸化物炉心：37.2cm (Reライフ 厚さ；0.1mm)

窒化物炉心：27.2cm (Reライフ 厚さ；0.27mm)

- (2) 連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP-4Aを用いて、制御棒挿入等の種々の炉心状態での実効増倍率を計算し、以下の結果が得られた。

○設定した炉心サイズにおいて、燃料ピンの非均質効果を考慮した運転中の実効増倍率は次のとおりである。

酸化物燃料炉心：1.036

窒化物燃料炉心：1.027

○酸化物燃料炉心及び窒化物燃料炉心の制御棒値は、次のとおりであり、十分な制御棒値を有している。

酸化物燃料炉心（制御棒＋安全棒）：26.0%dk/k

酸化物燃料炉心（制御棒）：19.2%dk/k

窒化物燃料炉心（制御棒＋安全棒）：22.1%dk/k

窒化物燃料炉心（制御棒）：18.4%dk/k

○酸化物燃料炉心及び窒化物燃料炉心の制御棒のみ、及び（制御棒＋安全棒）挿入時の実効増倍率はいずれも0.9以下であり、十分な未臨界度となっている。

○（制御棒＋安全棒）挿入時において、NaKから海水（水）へ置き換わり、かつガスバブルがたまってその部分に海水（水）が浸入した場合の実効増倍率は次のとおりであり、未臨界が保たれている。

酸化物燃料炉心 : 0.986

窒化物燃料炉心 : 0.996

謝辞

本計算の実施に当たっては、(株)三菱重工新型炉技術部河北孝司氏および(株)新型炉開発技術部吉岡直樹氏の協力を得た。

参考文献

- (1) 「高速炉ガスタービン発電概念検討」、動燃技報 No. 89、pp. 30-41、1994年3月、大坪章、羽賀一男、関口信忠。
- (2) 「FBR技術を適用した月面炉の検討(2)一炉心設計」、日本原子力学会「1993春の年会」予稿集、p. 58、1993年3月、野村紀男、羽賀一男、大坪章。
- (3) “SP-100 Reactor and Shield Design Update,” N. A. Deane and S. L. Stewart, Pro. 9th Sym. of Space Nuclear Power Systems, pp. 97-106, Jan. 1992, Albuquerque, USA.

付録1 予備計算

炉心仕様決定、炉心サイズ（臨界調整）のため、予備計算を行った。

1. 1 計算条件

- (1) 2次元RZ体系において、拡散計算（7群）を実施した。
- (2) 付図1. 1に計算体系を示す。
- (3) 体系温度は20℃とした。但し、冷却材NaKは500℃の密度を用いた。
- (4) 反射体（Be）厚さは7cmとした。また、軸方向にBeOの上部／下部反射体（10cm長さ）を設置した。
- (5) 原子炉容器肉厚は1cm（0.5cm×2）とした。
- (6) 燃料仕様に関しては、本計算では燃料集合体のスペーサについては、「有り」及び「無し」の両方の条件で行った。燃料自体の仕様は、次のとおりである。

①酸化物燃料（プルトニウム-ウラン混合酸化物）

燃料ピン径、ペレット径、燃料ピン配列ピッチ（スペーサ有り）等は下記のように設定した。スペーサ無しのケースの燃料ピン配列ピッチは、燃料被覆管の相互のギャップが零の状態（P/D=1.0）を想定した。

- ・燃料ピン外径：6.5mm
- ・燃料ピン内径：5.56mm
- ・被覆管肉厚：0.47mm
- ・燃料ペレットスミア密度：80%T. D.
- ・燃料ピン配列ピッチ：7.9mm（スペーサ有り）、6.5mm（スペーサ無し）
- ・ウラン濃縮度：20%
- ・プルトニウム富化度：50%
- ・被覆管材質： Hastelloy N
- ・体積比（燃料／構造材／冷却材）：(44.9%/16.5%/38.6%)（スペーサ有り）
：(66.4%/26.1%/7.5%)（スペーサ無し）

②窒化物燃料（ウラン窒化物、SP100ベース）

燃料ピン径は、SP-100燃料ピンと同一とした。被覆管肉厚は、被覆管肉厚と燃料ピン外径

の比が①の酸化物燃料と同じになるように設定した。また、燃料ピン配列ピッチについても、P/Dが①の酸化物燃料と同じになるように設定した。

- ・燃料ピン外径：7.75mm
- ・燃料ピン内径：6.63mm
- ・被覆管肉厚：0.56mm
- ・燃料ペレットスミア密度：80%T. D.
- ・燃料ピン配列ピッチ：9.4mm（スペーサ有り）、7.75mm（スペーサ無し）
- ・ウラン濃縮度：97%
- ・被覆管材質： Hastelloy N
- ・体積比（燃料／構造材／冷却材）：（45.1%/16.5%/38.4%）（スペーサ有り）、
（66.3%/24.3%/ 9.4%）（スペーサ無し）

1. 2 計算結果

炉心高さと炉心等価直径が等しくなる条件の下で、実効増倍率が約1.03となる炉心高さ（炉心径）を求めた。「常陽」クラスの小型炉心体系では、拡散計算による実効増倍率は、輸送計算に対して2%dk/k前後の過小評価をする（輸送効果）ことが知られている。小型炉心ほど、拡散計算と輸送計算の差は拡大する傾向にある。この炉心体系の燃焼初期の目標の実効増倍率は1.03から1.05であり、輸送効果を見込んで拡散計算における目標実効増倍率は1.00とした。

以下に、次の章で示す炉心仕様決定用のデータとして、炉心サイズ及び主な特性値をまとめた。

(1) 酸化物燃料炉心

酸化物燃料炉心の炉心サイズ計算結果を付図1. 2に示す。

①炉心高さ（直径）／体積

付図1. 2に示すとおり、炉心高さ（直径）／体積は次のとおりである。

32.5cm／27,000cm³（スペーサ有り）、 25.2cm／12,600cm³（スペーサ無し）

②平均出力密度／線出力／炉心圧損

平均出力密度及び平均線出力は下に示すとおり小さい。これらの数値では今までの炉心設計の経験から冷却材の炉心圧損はスペーサ有り、及び無しの両方の炉心とも、十分に目標の

1kg/cm²を下回る。

7.4W/cm³/4.0W/cm (スペサ有り)、 16W/cm³/5.8W/cm (スペサ無し)

③重金属インベントリ/平均燃焼度

重金属インベントリは下に示すとおりである。この重金属インベントリを用いて、200kW、15年連続運転を仮定した場合の炉心平均燃焼度の計算結果は、下に示すとおりである。

95kgHM/11GWd/t (スペサ有り)、 65kgHM/17GWd/t (スペサ無し)

(2) 窒化物燃料炉心

窒化物燃料炉心の炉心サイジング計算結果を付図1. 3に示す。

①炉心高さ(直径)/体積

付図1. 3に示すとおり、炉心高さ(直径)/体積は次のとおりである。

25.4cm/13,000cm³ (スペサ有り)、 19.6cm/5,900cm³ (スペサ無し)

②平均出力密度/線出力

平均出力密度及び平均線出力は下に示すとおり小さく、窒化物燃料炉心同様に、冷却材の炉心圧損はスペサ有り、及び無し両方の炉心とも、十分に目標の1kg/cm²以下を下回っている。

15W/cm³/12W/cm (スペサ有り)、 35W/cm³/18W/cm (スペサ無し)

③重金属インベントリ/平均燃焼度

重金属インベントリは下に示すとおりである。この重金属インベントリを用いて、200kWt、15年連続運転を仮定した場合の炉心平均燃焼度の計算結果は、下に示すとおりである。

63kgHM/17GWd/t (スペサ有り)、 42kgHM/26GWd/t (スペサ無し)

(3) 炉心流量

熱出力; 200kWt、炉心出口温度; 550°C、炉心入り口温度; 450°Cの条件より、炉心の冷却材流量は、約10.9m³/hである。

(4) 形状係数

炉心のサイジング計算結果より、炉心の組成・密度を変化させず炉心径及び炉心高さを変化させたときの炉心の反応度変化(形状係数)をまとめた。結果を付表1. 1に示す。

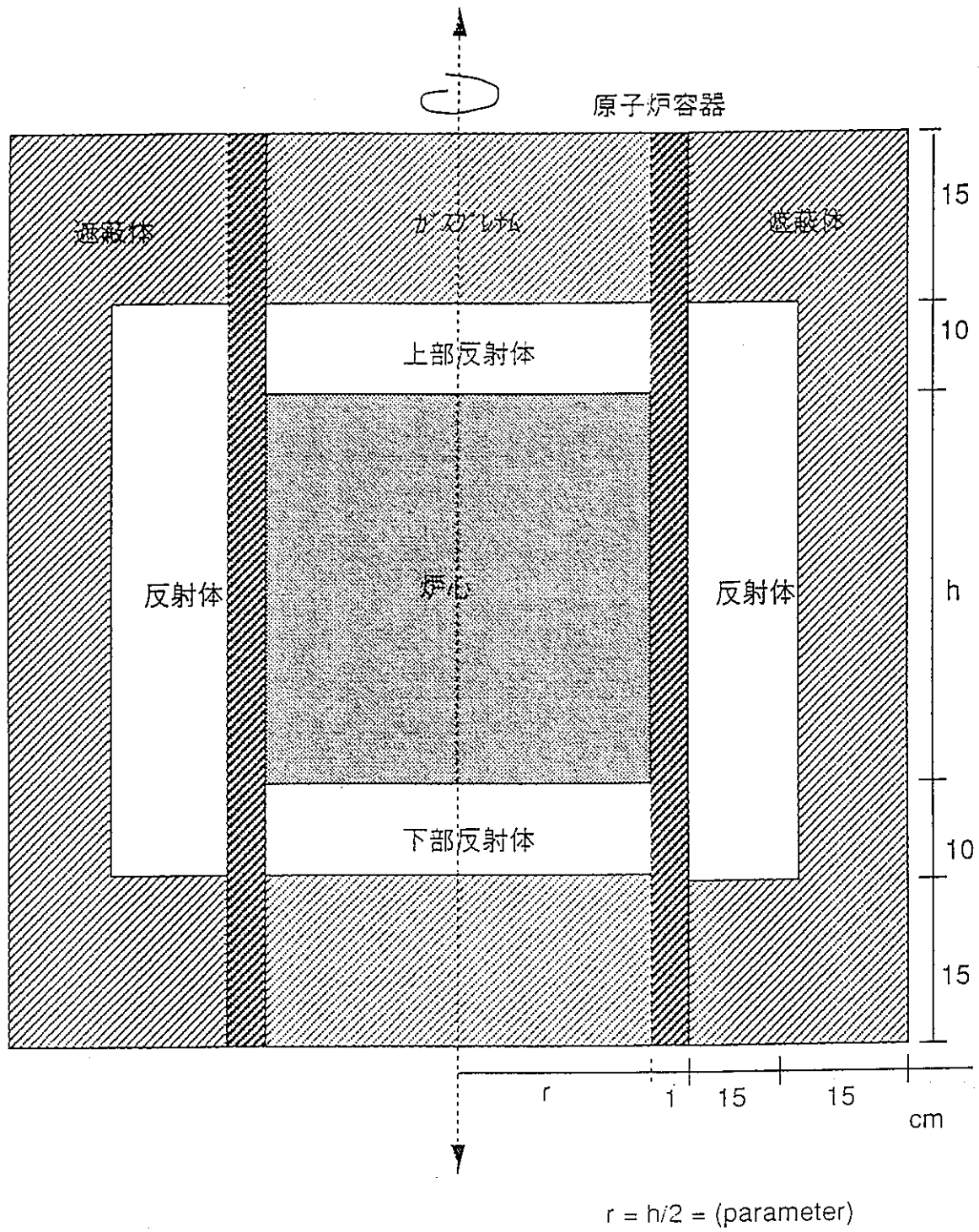
付表 1. 1 形状係数 (拡散計算ベース)

Shape Factors (Diffusion Calculation Base)

(単位 : dk/k/cm)

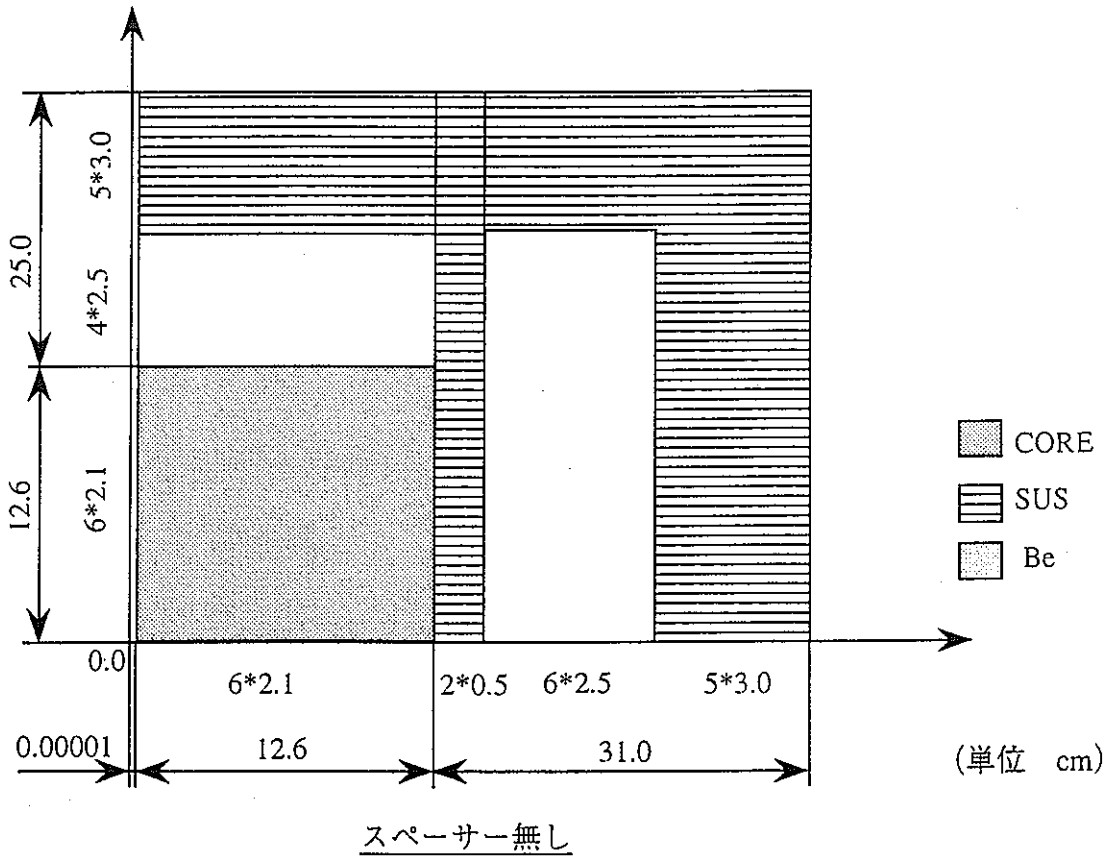
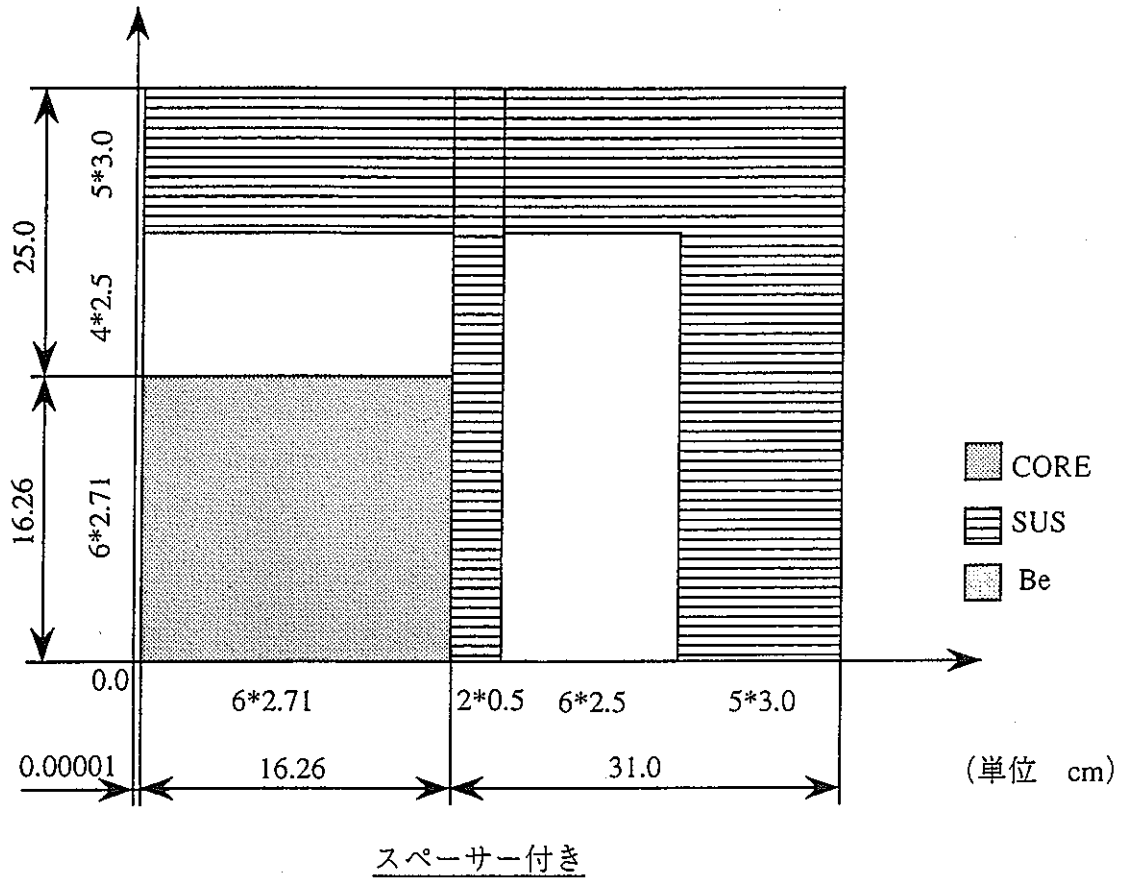
スペーサ	酸化物燃料炉心	窒化物燃料炉心
有り	0.0445	0.0568
無し	0.0542	0.0715

注) 炉心半径1cm変化時の反応度変化 (炉心高さは2cm変化)



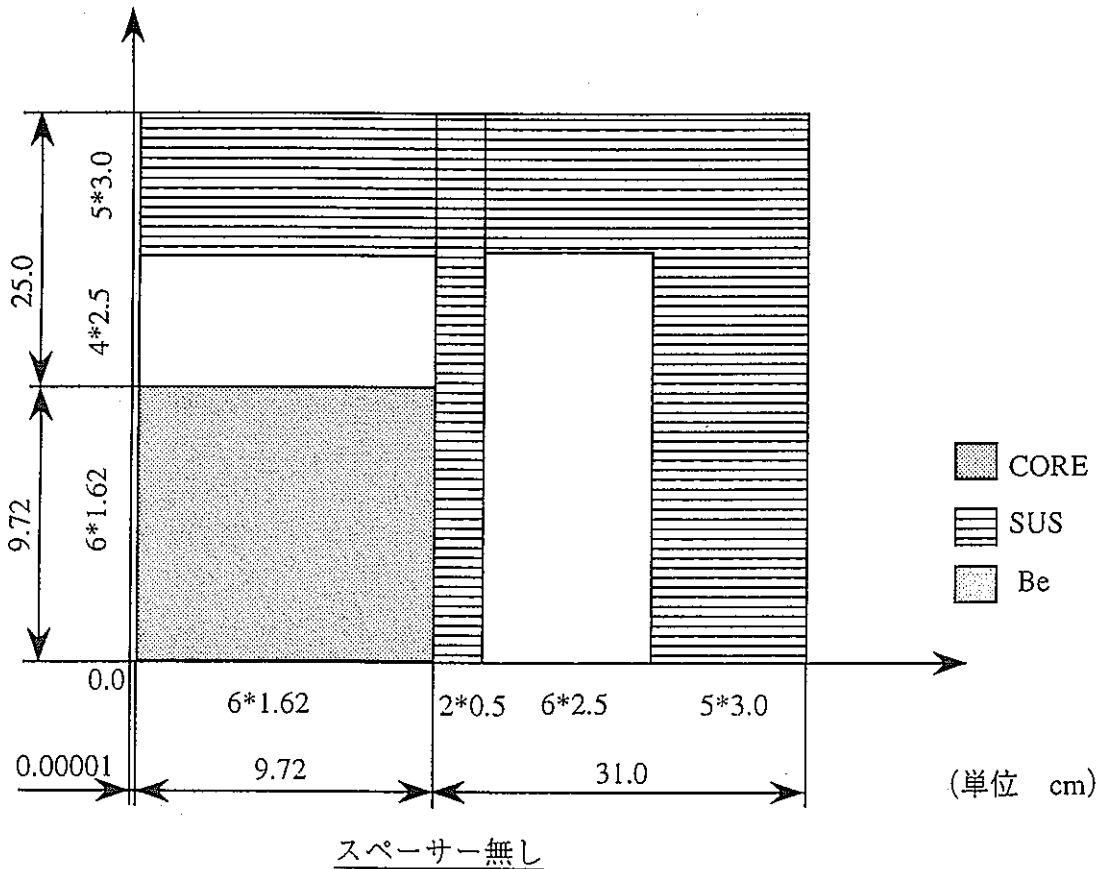
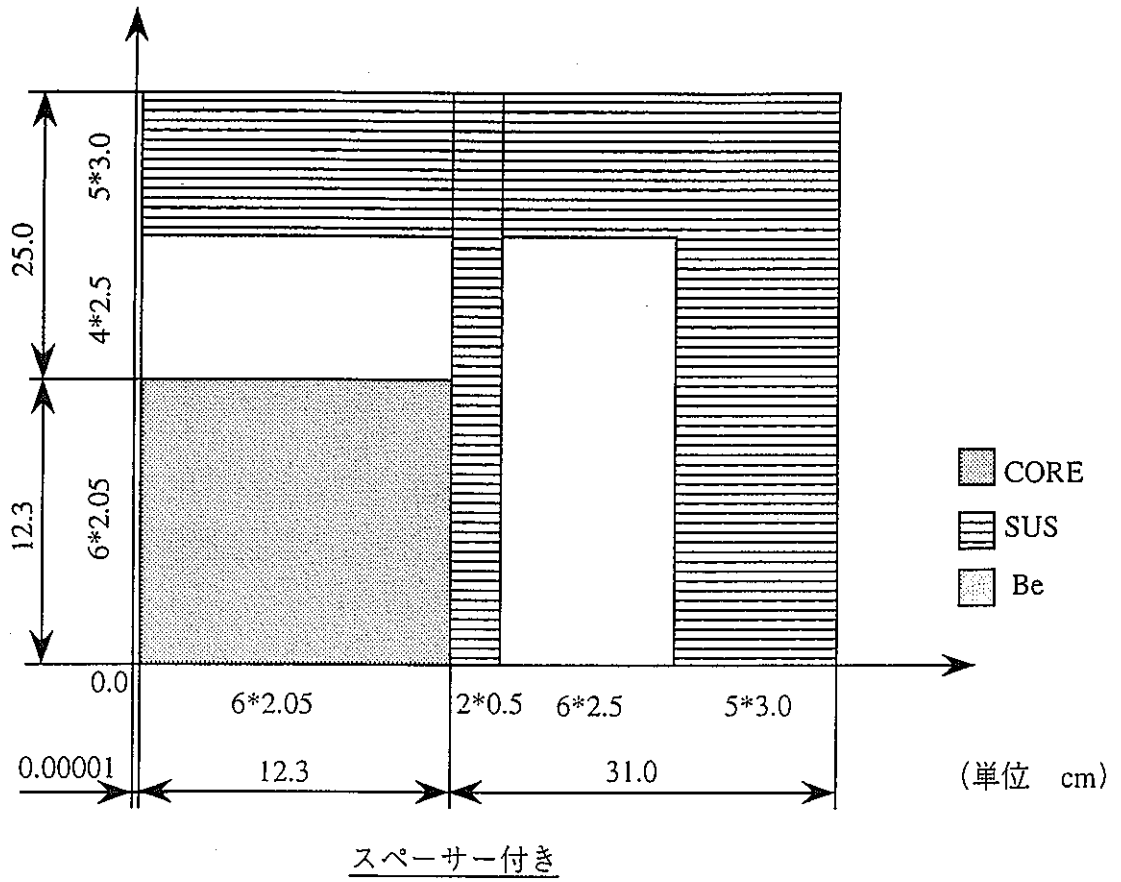
付図 1. 1 予備計算（炉心サイジング）用計算体系

Preliminary Calculation Geometry for Core Sizing



付図 1. 2 酸化物燃料炉心の炉心サイジング計算結果

Sizing Calculation Result of Oxide Fuel Core



付図 1. 3 窒化物燃料炉心の炉心サイズ計算結果

Sizing Calculation Result of Nitride Fuel Core

付録2 スパーサ無し炉心のNaK-水置換反応度

スパーサ無し燃料の炉心は冷却材の体積比が小さいため、水没時の反応度挿入量がスパーサ有り燃料と比べて小さくなると予想される。これを確認するため、MCNPコードを用いて水没時の挿入反応度を計算した。炉心サイズ等は拡散計算ベースで設定した表3.2及び表3.3に示す条件である。その他の計算条件は、Re_{eff}無し、制御棒引抜き体系とした。

MCNPコードによる実効増倍率計算結果は次のとおりである。

燃料	冷却材	K _{eff}	FSD
酸化物	NaK	1.0996	0.0092
酸化物	水	1.1530	0.0046
窒化物	NaK	1.0648	0.0043
窒化物	水	1.1419	0.0065

NaKから水への置換反応度の計算結果を、表4.7に示すスパーサ有りの場合（Re_{eff}無し）と比較して以下に示す。

燃料	スパーサ	置換反応度 (%dk/k)
酸化物	無し	4.2
窒化物	無し	6.3
酸化物	有り	34
窒化物	有り	31