

DCA改造に関するドライバー領域炉心の 核特性解析

1991年4月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

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

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

DCA改造に関するドライバー領域炉心の核特性解析

相原永史*, 加納亨司*, 大谷暢夫*

要 旨

重水臨界実験装置(DCA)を改造して臨界安全実験計画に資するため、炉心中央部をボイド領域とし、その周辺をドライバー領域としたドライバー領域炉心に関する核特性解析を実施した。解析は、WIMS-ATR/TWOTRAN 結合コードシステムを用いて行った。

今回の解析を通じて、格子ピッチ間隔、冷却材物質、ボイド領域直径及び燃料装荷パターン等のパラメータ変化による核特性効果を把握することができ、DCA改造炉心として成立するドライバー領域炉心の核特性の知見を得ることができた。得られた核特性項目は、実効増倍率、臨界重水水位、臨界 ^{10}B 濃度及び制御棒反応度値等である。

今後、更に炉心中央部ボイド領域に燃料物質を含んだテスト領域とドライバー領域から成る2領域炉心の核特性解析をすすめる。

* 大洗工学センター, 実験炉部, 臨界工学試験室

May, 1991

Analysis of Nuclear Characteristic for Driver Region Core
Related with DCA Modification

Nagafumi Aihara*, Kyoji Kanoh*
and Nobuo Ohtani*

Abstract

An analysis of nuclear characteristic of a driver region core has been performed in order to contribute for the experimental plan of criticality safety using Deuterium Critical Assembly (DCA). The driver region core is composed of two parts by the inner void region and outer driver region loaded with fuel clusters in the DCA core. The analysis was carried out by use of the coupled WIMS-ATR/TWOTRAN code system.

From the present analysis, we could understand the effect of nuclear characteristic due to the parameter change of lattice pitch distance, coolant material, void region diameter, fuel loading pattern and so on for the driver region core. The items of nuclear characteristic obtained by the present analysis are effective multiplication factor, critical heavy water level, critical ^{10}B concentration, control rod reactivity worth and so on.

Furthermore, the analysis of nuclear characteristic of two region core, which is composed of test region including fuel material in the void region and driver region, will be performed as the near future work.

* Criticality Engineering Section, Experimental Reactor Division,
O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

1. 緒 言	1
2. 解析の概要	2
2.1 解析項目	2
2.2 解析方法	2
3. 解析結果及び検討	7
3.1 ドライバー領域炉心の格子核特性	7
3.2 ドライバー領域炉心の炉心核特性	8
3.3 ドライバー領域炉心の制御棒反応度値	11
4. 結 言	12
5. 参考文献	14
6. 謝 辞	15
付録1. TWOTRANとCITAIONコードの比較	87
付録2. 制御棒反応度値の実験解析	88
付録3. WIMS-ATRコードのマルチセルモデル入力データ	92
付録4. 格子寸法計算式	96
付録5. 試験領域（ポイド領域）の形状と寸法	104

1. 緒 言

臨界工学試験室では、臨界安全解析手法の検証、精度評価を目的とした臨界安全性実験のための未臨界度測定試験施設とする計画を進めている。このため、重水臨界実験装置（DCA）を改造し、試験領域と従来のATR型燃料を用いたドライバー領域からなる2領域炉心の構成を計画している。2領域炉心での未臨界度測定の実施に先立ち、予め試験領域、ドライバー領域各々の核特性及び2領域炉心全体の核特性を把握し、実験計画に資する必要がある。この観点から、本報告は、特に試験領域がボイド（空気）で設定され、ドライバー領域がATR型のクラスター燃料で構成される炉心（以後「ドライバー領域炉心」と表現する）、即ち、ドライバー領域に着目した核特性の検討について述べるものである。

本検討の実施に当たり、解析は、群定数作成のための格子計算には従来からATRの解析を行っているWIMS-ATRコードを用い、炉心計算にはボイド領域を含むことを考慮し、輸送理論に基づくTWOTRANコードを用い、WIMS-ATR/TWOTRANコード結合システムに従った。なお、比較・検討のため一部、炉心拡散計算コードCITATIONも用いている。実施した主な検討項目は、ドライバー領域炉心における反応度に着目した格子核特性、炉心核特性、燃料装荷パターンの違いによる核特性及び制御棒反応度値等である。

2. 解析の概要

2.1 解析項目

解析は、ドライバー領域炉心における格子核特性及び炉心核特性に大きく分かれ、具体的な解析項目は以下の通りである。

- (1) ドライバー領域炉心の格子核特性
 - ① 無限増倍率 (k_{∞}) に対する格子ピッチ依存性
 - ② 無限増倍率 (k_{∞}) に対する冷却材物質依存性
 - ③ 格子ピッチ及び冷却材物質の違いによる中性子スペクトルの比較
- (2) ドライバー領域炉心の炉心核特性
 - ① 最適格子ピッチ炉心のサーベイ
 - ② 冷却材物質の違いによる反応度特性
 - ③ ボイド領域直径、燃料装荷パターンの違いによる反応度特性
- (3) ドライバー領域炉心の制御棒反応度値

2.2 解析方法

(1) ドライバー領域炉心の格子核特性

ドライバー領域に装荷されるATR型燃料集合体の格子核特性を把握するため、衝突確率法に基づくWIMS-ATRコード⁽¹⁾を用い、 K_{∞} に対する格子ピッチ及び冷却材物質の違いによる依存性をサーベイし、反応度効果の大きい最適格子を評価した。格子ピッチは20.0cm~37.5cmの範囲について、冷却材物質は軽水(0%ボイド)、ボイド(100%ボイド)及び重水についてサーベイを行った。また、格子ピッチ及び冷却材物質が違う場合の格子平均での中性子スペクトル変化についても分析した。

WIMS-ATRコードの計算条件及び燃料格子の解析条件は以下の通りである。

- ① WIMS-ATRコードの計算条件
 - ・ライブラリー：WIMS内蔵69群ライブラリー (UKライブラリー)
 - ・計算手法：R- θ 2次元衝突確率法 (PIJオプション)
 - ・幾可形状：クラスタータイプ (90° 回転鏡面对称)
 - ・エネルギー群数：14群
 - ・バックリング：臨界バックリングサーチ (臨界状態の群定数算出)
 - ・バックリング入力値：径方向 $2.56 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$ ，軸方向 $2.47 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-2}$
 - ・Annulus数：31

② 燃料格子の解析条件

- 格子形状：四角格子を円筒化近似により置換
- 燃料形状：ATR型28本燃料集合体
- 燃料濃縮度：1.2w/o二酸化ウラン
- 減速材中 ^{10}B 濃度：0 ppm
- 重水モル純度：99.5mol/o

燃料集合体の断面図を図1に示す。その他WIMS-ATR コードの入力値として必要となるDCAの燃料格子を構成する各物質の組成、寸法、密度等を表1にまとめて示す。また、WIMS-ATR コード内蔵69群ライブラリー及びエネルギー14群の群構造をそれぞれ表2、表3に示す。

(2) ドライバー領域炉心の炉心核特性

ここでは、燃料集合体を実際にドライバー領域に装荷した場合の反応度特性について、格子ピッチの違い、冷却材物質の違い、ボイド領域直径の違い及び燃料装荷パターンの違い等による効果を分析し、これらのパラメータの組み合わせから臨界を維持できる適切な反応度を有する最適炉心を評価した。

格子ピッチの違いによる効果の計算は、第1段階として1m×1mの炉心中央部ボイド領域の周囲に配列されている四角格子ピッチの炉心を前提に格子ピッチ18.0cm～35.0cmの範囲を重水水位が2mに設定された状態の実効増倍率(k_{eff})についてサーベイし、最適格子を評価した。

その後、ボイド領域の形状が設備設計の立場から円筒形に変更されたため格子形状を、ボイド領域周辺部の格子配列がボイド領域円筒形状と整合性がよいこと及びスペース的にも無駄が少ないことを考慮し、三角格子(四角格子と等面積)とすることを決めた。以後、第2段階として第1段階で得られた最適格子(20cmピッチ)に関して三角格子に置き換えて冷却材物質、ボイド領域直径及び燃料装荷パターン等の違いによる反応度効果の検討をすすめた。(因みに格子計算の段階では、格子形状を等価半径に置き換えているので四角格子及び三角格子の形状的区別は無い)

冷却材物質は、格子核特性の場合と同様に軽水、ボイド及び重水について評価した。円筒形状のボイド領域直径は、0 cm, 83cm, 88cm及び118cmを設定した。燃料装荷パターンは、ドライバー領域に全て1.2w/o UO_2 燃料1種類を装荷したパターンを基準ケースとして設定し、この他により高い反応度特性を得る観点からドライバー領域の内側から外側までを4層に分け、プルトニウム燃料(MOX燃料)も含めた以下の装荷パターンのケースについて反応度特性をサーベイした。

装荷パターンの ケース	燃料装荷パターン (1層/2層/3層/4層)
1	1.2U/1.2U/1.2U/1.2U
2	1.2U/5 S/8 S/1.2U
3	5 S/8 S/1.2U/1.2U
4	8 S/5 S/1.2U/1.2U

ここで、

1.2U : 1.2w/o UO₂燃料

5 S : 0.54w/o PuO₂-UO₂ スタンダードグレード燃料

$$\left[\frac{\text{PuO}_2}{\text{PuO}_2 + \text{UO}_2} = 0.54 \text{ w/o} \right]$$

8 S : 0.87w/o PuO₂-UO₂ スタンダードグレード燃料

$$\left[\frac{\text{PuO}_2}{\text{PuO}_2 + \text{UO}_2} = 0.87 \text{ w/o} \right]$$

である。また、各燃料装荷パターンにおける中性子束分布についても求めた。

反応度特性は、以下の炉物理量に着目して評価した。

- ドライバー領域の重水水位を2mに設定した状態の k_{eff}
- ドライバー領域の重水水位を2mに設定した状態の臨界¹⁰B濃度
- ドライバー領域の臨界重水水位

解析コードは、輸送理論に基づくTWOTRANコード⁽²⁾を用いた。TWOTRANコードの計算条件は以下の通りである。

- 幾何形状 : R-Zモデル
- 計算オプション : K-Calculation
- エネルギー群数 : 4群
- P₀展開次数 : P₀
- Sn分点数 : S₄

なお、エネルギー4群の入力定数はWIMS-ATRコードによって得られたエネルギー14群の群定数を基に4群に縮約したものをを用いた。4群の群構造を表4に示す。また、減速材中に¹⁰B(臨界¹⁰B濃度)を含む1.2U、5S及び8S Pu燃料格子の群定数もWIMS-ATRコードによって用意した。

重水臨界実験装置構造説明図を図2に示す。四角格子(20cmピッチ)で構成された体系に関し、DCA一様炉心の平面図及びボイド領域(1m×1m)を設けたドライバー領域炉心の平面図をそれぞれ図3及び図4に示す。これらの平面図に対応して、解析に用いた円筒

化近似に基づくR-Zモデルを図5及び図6に示す。

三角格子で構成された体系に関し、ボイド領域直径が88cmで冷却材物質に軽水、ボイド及び重水を用いたドライバー領域炉心の炉心構成を表5、図7及び図8に示す。これらの炉心構成に対応して、臨界固有値計算のためのR-Zモデルを図9及び図10に、臨界重水水位サーチのためのR-Zモデルを図11及び図12に示す。

また、ボイド領域直径が83cm、88cm及び118cmにおける各ケースの燃料装荷パターンの構成を表6及び図13～図15に示す。

(3) ドライバー領域炉心の制御棒反応度価値

炉心中央部のボイド領域直径が0cm(一様炉心)、83cm及び118cmの炉心の中性子インポートランスの高い位置に対称的に制御棒を4本全挿入した場合の制御棒反応度価値を評価した。ボイド領域が0cm(一様炉心)及び83cmの場合は1.2w/o U燃料のみが装荷された炉心で、118cmの場合は、臨界が維持できる8S/5S/1.2U/1.2U燃料装荷パターンの炉心である。

制御棒反応度価値の解析コードはTWOTRANを用い、20cmピッチの四角格子から成る炉心をX-Y形状2次元モデルで解析した。冷却材物質は軽水で、重水中¹⁰B濃度は0ppmである。各体系の1/4炉心形状モデルを図16～図21に示す。TWOTRANコードのその他の計算条件は前項(2)で述べたことに準じる。

制御棒反応度価値は、各ケース共、軸方向臨界バックリングサーチによって求めた制御棒未挿入時の臨界状態の基準炉心($k_{eff}=1$)と、基準炉心と同一の軸方向バックリングを用いて求められた制御棒挿入時の k_{eff} とから求めた。更に、軸方向臨界バックリングから求めた臨界水位を人為的に下げた未臨界状態を基準炉心とした場合の制御棒反応度価値についても同様に解析した。実施した解析ケースを表7に示す。制御棒反応度価値は、得られた k_{eff} から次式に従って算出している。

$$\begin{aligned} \rho_{CR} (\% \Delta k/k) &= \frac{k_{in} - k_{out}}{k_{in} \cdot k_{out}} \times 100 \\ &= \frac{k_{in} - 1}{k_{in}} \times 100 \quad (2-1) \\ &\quad (k_{out} = 1) \end{aligned}$$

ここで、

k_{out} : 軸方向臨界バックリングサーチによる制御棒未挿入炉心の k_{eff}
($k_{out} = 1$)

k_{in} : 制御棒未挿入炉心の軸方向臨界バックリングを用いた制御棒挿入炉心の k_{eff}

である。

炉心計算に入力する群定数は、通常の単位格子及び制御棒とそれを取囲む4つの隣接格

子からなるマルチセルの定数が必要となる。通常単位格子の計算は、WIMS-ATR によって前項(1)で述べた方法に準じて行った。マルチセルの計算は、WIMS-ATR コードのマルチセルオプションを用いて行った。この方法は、制御棒とその隣接格子の間で強い非均質効果が生じるため、マルチセルとして同時に計算し中性子スペクトルの変化をより正確に扱うものである。

制御棒の構造を図22に、マルチセルの構成を図23に示す。

3. 解析結果及び検討

3.1 ドライバー領域炉心の格子核特性

炉心中央部がボイド領域で、その周辺部がドライバー領域から成る炉心（ドライバー領域炉心）のドライバー領域に燃料集合体を装荷した格子の核特性について解析した。

圧力管内の冷却材物質を軽水（0%ボイド）、ボイド（100%ボイド）及び重水とした場合の無限増倍率（ k_{∞} ）に対する格子ピッチ変化依存性の解析結果を表8、表9、表10、図24、図25及び図26にそれぞれ示す。これらの結果より、 k_{∞} は冷却材物質が軽水の場合、格子ピッチ30cmで最適減速状態の最大値（ $k_{\infty}=1.1832$ ）を示す。また、冷却材物質がボイド及び重水の場合は共に格子ピッチ35cmで最大値（ボイド： $k_{\infty}=1.3351$ 、重水： $k_{\infty}=1.3075$ ）を示す。

これらの結果から、同一格子ピッチに対する冷却材物質の違いによる k_{∞} の大小は、軽水<重水<ボイドの順に大きくなっている。

上記の k_{∞} の傾向を1群近似の臨界方程式⁽³⁾(3-1)式を基に簡単な分析を行った。

$$\begin{aligned}
 k_{eff} &= \frac{k_{\infty}}{1+M^2B^2} \\
 &= \frac{k_{\infty}}{1+(M_R^2B_R^2+M_Z^2B_Z^2)} \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

ここで、 $1/1+M^2B^2$ は中性子が体系から漏れない割合を現す指標である。径方向及び軸方向移動面積（ M_R^2, M_Z^2 ）はWIMS-ATRコードによって得られた拡散係数（ D_R, D_Z ）及び吸収断面積（ Σ_a ）を用いて求めた。径方向及び軸方向バックリング（ B_R^2, B_Z^2 ）は共通の形状バックリングを用いた。分析結果を表11に示す。表11に示す比較の範囲では、冷却材物質が軽水の格子ピッチ20cmのケースは $1/1+M^2B^2$ が最大値であることから、 k_{∞} が小さいにもかかわらず k_{eff} も最大値となっている。冷却材物質が同じ軽水の格子ピッチ30cmのケースを格子ピッチ20cmの場合と比べると、 $1/1+M^2B^2$ が小さい（6%）ので k_{∞} が大きい（3%）にもかかわらず k_{eff} も小さく（2%）になっている。一方、冷却材物質が軽水と異なるボイド及び重水冷却材の両ケース（格子ピッチは共に35cm）を比較すると k_{∞} 及び $1/1+M^2B^2$ が共に2%以内の差と小さいため、 k_{eff} も1%以内の差に留まりほぼ同一値となっている。以上のことから、軽水冷却材の場合、 $1/1+M^2B^2$ の効果により最適減速状態の格子ピッチが k_{∞} と k_{eff} で異なってくる。また、ボイド及び重水冷却材の場合（格子ピッチは共に35cm）は、両格子の $1/1+M^2B^2$ の差が小さいことから、最適減速状態の格子ピッチは k_{∞} 及び k_{eff} 共に同一傾向となることが考察できる。

一般に格子ピッチが小さくなると中性子スペクトルが硬化し、 $1/1+M^2B^2$ は小さくなると考えがちであるが、軽水冷却材の場合 $1/1+M^2B^2$ は20cmピッチが30cmピッチに比べて大きくなっている。この理由を明らかにするため、 M_R^2 、 M_Z^2 を構成しているDr、Dz及び Σa について分析した結果を表12に示す。この結果から、軽水冷却材格子の20cmピッチは30cmピッチに比べDr、Dzは大きい、その差は小さい(1.2倍)。これに対し Σa は20cmピッチが30cmピッチに比べ大きく、かつその差も大きい(2.2倍)。このため、20cmピッチは30cmピッチに比べ $M^2(=M_R^2+M_Z^2)$ は小さくなり(約2倍)、結果的に $1/1+M^2B^2$ が大きくなると考えられる。更に、両格子ピッチの Σa の違い(2.2倍)は、格子平均断面積がWIMS-ATRコードにより格子内各領域の体積で重み付け平均されて算出されるので、吸収断面積を殆ど持たない重水領域の占める割合が大きい30cmピッチの方が20cmピッチに比べて小さくなることに起因している。

表11の結果より、ボイド及び重水冷却材の場合(共に35cmピッチ)、 $1/1+M^2B^2$ が殆ど同一値(2%以内で一致)を示しているのは表12の Σa も殆ど同一値(1.4%以内で一致)であるためと考えられる。即ち、両格子の違いは冷却材物質のみで、ボイド及び重水を持つ Σa は共に無視できるくらい小さいことに起因する。

次に、上記と同様のケースについて、WIMS-ATRコードの結果を基にエネルギー69群による格子平均の中性子スペクトルを考察した。中性子スペクトルの振舞いを図27～図31に示す。図27に示す軽水冷却材からなる格子ピッチ20cmの中性子スペクトルは、図28に示す格子ピッチ30cmの場合に比べ中性子の減速が十分でなく、高速群の中性子の割合が熱群に対して相対的に多い。一方、格子ピッチ30cmの場合は、熱群の方が高速群に対して相対的に多く、最適減速状態を現している。

図29及び図30は、それぞれボイド及び重水冷却材格子の場合(共に35cmピッチ)で、両者の中性子スペクトルの振舞いは殆ど同一傾向を示し、冷却材物質の違いの効果はみられない。そこで図31に、ボイド及び重水冷却材の両格子について中性子スペクトルを重ね合わせて正確に比較してみると、高速群領域で重水冷却材の場合が若干中性子が少なくなっている傾向がみられるが、全体的に両者は良く一致しているといえる。

3.2 ドライバー領域炉心の炉心核特性

燃料集合体を実際にドライバー領域炉心に装荷し、格子ピッチの違い、冷却材物質の違い、ボイド領域直径の違い及び燃料装荷パターンの違い等による炉心の反応度特性について解析した。

(1) 最適格子ピッチ炉心のサーベイ

冷却材物質が軽水で四角格子配列による重水水位200cmでのドライバー領域炉心の k_{eff} に対する格子ピッチ依存性の解析結果を、1.2 % Δ 燃料集合体が炉内全領域一様に装荷さ

れた炉心（一様炉心）及び格子核特性（ k_{∞} ）の場合と比較して表13及び図32に示す。

これらの結果より、 k_{∞} は格子ピッチ32.5cmで最適減速状態の最大値（ $k_{\infty}=1.1973$ ）を示すのに対し、 k_{eff} は一様炉心の場合では格子ピッチ22.5cmで最大値（ $k_{eff}=1.0829$ ）を、ドライバー領域炉心の場合では格子ピッチ20.0cmで最大値（ $k_{eff}=1.0075$ ）を示す。即ち反応度を得る上で、 k_{∞} の最適格子ピッチに比べ k_{eff} の最適格子ピッチは中性子の体系からの漏洩効果により小さくなり、かつ k_{eff} の値も小さくなっている。この効果は炉心中央部にボイド領域があるドライバー領域炉心の場合、径方向の実効の大きさが一様炉心より小さくなっている（径方向形状バックリングが大きくなる）ため更に大きくなり、最適格子ピッチ及び k_{eff} は一様炉心の場合より小さい。上記の結果から、ドライバー領域炉心の最適格子での余剰反応度は重水水位200cm(上限)で1%以下であり、重水水位200cm～80cm範囲での反応度制御を前提にすると不足気味である。

図33～図36に、一様炉心及びドライバー領域炉心におけるエネルギー4群の中性子束分布を18cm格子ピッチ及び25cm格子ピッチの場合について示す。各炉心共通に、25cm格子ピッチ炉心は20cm格子ピッチのものに比べ4群（熱群）の中性子束が大きく、スペクトルは軟化している傾向である。ドライバー領域炉心では、ドライバー領域中央部で中性子束が最大となり、ボイド領域で極端に小さくなっている。

なお、表14に参考までに一様炉心及びドライバー領域炉心におけるエネルギー4群の中性子収支バランス（漏洩、吸収及び発生）を18cm格子ピッチ及び25cm格子ピッチ炉心について示す。

(2) 冷却材物質の違いによる反応度特性

前項(1)で述べたドライバー領域炉心は炉心中央部ボイド領域が等価直径で113cmであったが、ドライバー領域炉心の余剰反応度を高める観点から、ボイド領域の直径を88cmに縮少し、かつボイド領域が円筒形状であることに即してドライバー領域の格子配列を四角格子から三角格子に変更した。なお、四角格子と三角格子の等価半径(11.28cm)は同一である。

この炉心体系について、冷却材物質が軽水、ボイド及び重水である場合の反応度特性を重水水位200cmの時の k_{eff} 、臨界¹⁰B濃度及び臨界重水水位について解析した。解析結果を表15に示す。なお、図8に示した冷却材物質が軽水及び重水の場合でドライバー領域の内側1層、2層にそれぞれ8S、5S Pu燃料を装荷した場合の解析結果も併せて示す。

表15の結果より、ドライバー領域がU燃料のみのケース（CORE-A～CORE-C）では、冷却材物質が軽水の場合に超臨界（ $k_{eff}=1.0220$ ）となり、重水、ボイドの場合は未臨界である。また、Pu燃料が装荷されたケース（CORE-D、CORE-E）は、U燃料のみの場合より更に k_{eff} は高く、やはり軽水冷却材の方が重水に比べて高い。CORE-Aのケースで余剰反応度が2%以上得られ、臨界重水水位も152.3cmで、前項(1)で述べた最適炉心に比

べ反応度制御上の余裕が得られている。

CORE-A～CORE-Cのケースを比べて冷却材物質が軽水の場合がボイド及び重水に比べて k_{eff} が高いのは、3.1節で述べた格子核特性の考察とも関連し、ボイド及び重水の場合は中性子の吸収効果が軽水に比べ極めて小さいことに起因して M^2 が大きくなり、有限体系による中性子の漏洩効果が顕著に現れるためと考えられる。

(3) ボイド領域直径，燃料装荷パターンの違いによる反応度特性

前項(2)で行ったボイド領域直径88cmの他に、88cmを挟む83cm、118cmのボイド領域直径に対し、表6及び図13～図15に示した5種類の燃料装荷パターンの反応度特性について、前項(2)と同様に解析を行った。解析結果を表16～表18に示す。これらの計算ケースの中で、表16及び表17のケース2、表18のケース2～ケース4はPu燃料本数の不足から実験のための炉心体系を組めないが、核特性の相違を検討するため解析を実施した。

これらの結果より、ボイド領域直径83cm、及び88cmの場合は、各ケース共 k_{eff} は超臨界となり、臨界重水水位も80cm～200cmの範囲を満足している。DCA所有の燃料本数を満足する体系の中で k_{eff} が最大のものは、ボイド領域直径83cm及び88cmの場合では共にケース3の1.2U/8S/5S/1.2Uの装荷パターンである(83cm： $k_{eff}=1.0732$ 、88cm： $k_{eff}=1.0720$)。ボイド領域直径118cmの場合は、ケース2～ケース5が超臨界となるが、DCA所有の燃料本数を満足する体系で超臨界($k_{eff}=1.0341$)になるのはケース5の8S/5S/1.2U/1.2Uの装荷パターンである。また、各燃料装荷パターン共ボイド領域直径が大きくなるにつれ k_{eff} は小さくなっているが、これは主として、炉内核分裂中性子数の減少及び中性子漏洩量の増大によるものと考えられる。

また、表16の結果を例に挙げると、ケース4はケース3に比べ、 k_{eff} が小さくなっているにもかかわらず臨界重水水位が小さく、臨界 ^{10}B 濃度が大きくなっており、一見矛盾するような傾向がみられる。これは、Pu燃料を装荷する場合の装荷パターンの組み合わせによって、水位反応度、 ^{10}B 反応度が微妙に変化していることが推察できるが、今後、定量的に確認する必要がある。

表19に1.2w/oU燃料のみを装荷し、ボイド領域直径が0cm(一様炉心)から83、88、118cmに変化したドライバー領域炉心の k_{eff} 、臨界重水水位及び臨界 ^{10}B 濃度の解析結果をまとめて示す。ボイド領域直径0、83、88cmのケースは、2%以上の余剰反応度を有し、臨界重水水位も80cm～200cmの範囲を満足している。118cmのケースは未臨界である。

表20～表22及び図37～図42にボイド領域直径が83cm、88cm及び118cmの場合の重水水位に依存する水位反応度(及び水位反応度係数)の解析結果を示す。但し、83cm及び88cmの場合は1.2U燃料のみの装荷パターンで、118cmの場合は8S/5S/1.2U/1.2U燃料の装荷パターンである。これらの結果から、いずれの炉心も水位反応度係数は水位の上昇と共に小さくなる傾向を示している。また、ボイド領域直径が大きくなると、全体的に水位反応度係数

が大きくなる傾向がみられる。

各ボイド領域直径及び燃料装荷パターンの炉心におけるエネルギー 4 群の中性子束分布の振舞いを図43～図45に参考までに示す。

3.3 ドライバー領域炉心の制御棒反応度値

ボイド領域直径が 0 cm (一様炉心)、83cm及び118cmのドライバー領域炉心における制御棒反応度値の解析結果を表23に示す。但し、ボイド領域直径が 0 cm (一様炉心) 及び83cmの場合は1.2w/o U燃料のみの装荷炉心で、118cmの場合は8S/5S/1.2U/1.2U燃料装荷パターンの炉心である。

これらの結果から、一様炉心、ボイド領域直径83cm及び118cm の各炉心共、臨界状態での制御棒反応度値が最も大きく、臨界水位を下げた未臨界状態になる程、制御棒反応度値が小さくなる傾向を示している。ボイド領域直径が大きくなると、全体的に制御棒反応度値が小さくなる傾向がみられ、特に、Pu燃料が装荷されている118cmの場合は、他のボイド領域直径に比べて小さくなっている。

また、表24に示す一様炉心におけるTWOTRANとCITATIONコード⁽⁴⁾による制御棒反応度値の解析結果の比較は、CITATIONコードの方が大きめに評価し、両者は10%以内で一致している。

4. 結 言

DCAを改造して実施する臨界安全性に関する未臨界度測定の試験計画に資するため、炉心中央部をボイド領域に設定し、その周辺領域にATR型燃料集合体を装荷したドライバー領域炉心に着目した核特性解析を行った。解析の結果、以下の知見が得られた。

(1) ドライバー領域炉心の格子核特性

圧力管内の冷却材物質を軽水、重水及びボイドとした場合の k_{∞} に対する格子ピッチ依存性は以下の通りである。

- ① 冷却材物質が軽水の場合、格子ピッチ30cmで最適減速状態となり、 k_{∞} は1.1832である。
- ② 冷却材物質がボイド及び重水の場合、共に格子ピッチ35cmで最適減速状態となり、 k_{∞} は重水の場合が1.3075、ボイドの場合が1.3351である。
- ③ 冷却材物質の違いによる k_{∞} は、同一格子ピッチに対して軽水<重水<ボイドの順に大きくなる。

(2) ドライバー領域炉心の炉心核特性

① 最適格子ピッチ炉心のサーベイ

- 冷却材物質が軽水の一様炉心（ボイド領域無し）の場合、格子ピッチ22.5cmで最適減速状態となり、 k_{eff} は1.0829である。
- 冷却材物質が軽水のドライバー領域炉心（ボイド領域直径113cm）の場合、格子ピッチ20cmで最適減速状態となり、 k_{eff} は1.0075であり余剰反応度が1%以下と小さい。

② 冷却材物質の違いによる反応度特性

冷却材物質を軽水、重水及びボイドとした場合のドライバー領域炉心（ボイド領域直径88cm）における k_{eff} の相違は以下の通りである。

- 冷却材物質が軽水の場合、 k_{eff} は1.0220（臨界重水水位で152.3cm）となり、2%以上の余剰反応度が得られた。
- 冷却材物質が重水、ボイドの場合、 k_{eff} はそれぞれ0.9558、0.9213となり未臨界である。
- 冷却材物質の違いによる k_{eff} は、格子核特性の場合と逆に、軽水>重水>ボイドの順に小さくなる。

③ ボイド領域直径、燃料装荷パターンの違いによる反応度特性

ボイド領域直径を83cm、88cm及び118cmとした場合のドライバー領域炉心における5種類の燃料装荷パターン（表16～表18参照）の反応度特性の相違は以下の通りである。

- ボイド領域直径83cm及び88cmの場合、各燃料装荷パターン共 k_{eff} は超臨界となり、臨界重水水位はほぼ83cm～152cmの範囲である。このうち、 k_{eff} が最大のケースは1.2U/5S/8S/1.2Uの燃料装荷パターンで、83cmの場合1.0750、88cmの場合1.0743である。
- ボイド領域直径118cm の場合、U燃料のみの装荷パターン(1.2U/1.2U/1.2U/1.2U) は未臨界となり、Pu燃料混合装荷のパターンが全て超臨界となる。その時の臨界重水水位は137cm～146cmの範囲である。このうち、 k_{eff} が最大のケースは5S/8S/1.2U/1.2U の燃料装荷パターンで、1.0396である。
- 各燃料装荷パターン共、ボイド領域直径が大きくなるにつれ、 k_{eff} は小さくなる傾向である。
- 水位反応度係数は、各ボイド領域直径共、重水水位の上昇と共に小さくなる傾向を示す。また、ボイド領域直径が大きい方が、水位反応度係数の絶対値を大きくする傾向がみられる。

(3) ドライバー領域炉心の制御棒反応度値

ボイド領域直径0 cmの一樣炉心及びボイド領域直径83cm、118cm のドライバー領域炉心に、制御棒を対称位置に4本全挿入した場合の臨界状態及び未臨界状態での制御棒反応度値の相違は以下の通りである。

- ① 一樣炉心及びドライバー領域炉心共に、臨界状態での制御棒反応度値が最も大きく、未臨界状態になる程、制御棒反応度値は小さくなる傾向である。
- ② ボイド領域直径が大きくなると、制御棒反応度値は小さくなる傾向がみられる。
- ③ 今回の解析による制御棒反応度値は、各炉心を通じて、臨界状態では-2.56～-3.45 % $\Delta k/k$ であり、未臨界状態では-1.36～-3.05% $\Delta k/k$ の範囲である。

以上のことから、今回の解析を通じてドライバー領域炉心における格子核特性、炉心核特性及び制御棒反応度値等の炉物理的傾向を概ね把握することができた。今後、更にドライバー領域炉心の核特性を詳細に詰めると共に、炉心中央部のボイド領域に燃料物質を含めたテスト領域とドライバー領域から成る2領域炉心の核特性に関する解析検討を進める必要がある。

5. 参考文献

- (1) J.R. ASKEW, F.J. FAYERS, and P.B. KEMSHELL, "A General Description of the Lattice Code WIMS," J. Brit. Nucl. Energy Soc., 5, 564 (1966).
- (2) K.D. LATHROP and F.W. BRINKLEY, "Theory and Use of the General-Geometry TWOTRAN Program," LA-4432, UC-32, Mathematics and Computers, TID-4500, (1970).
- (3) 安 成弘, "原子炉の理論と設計", 東京大学出版会, (1980).
- (4) T.B. FOWLER, D.R. VONDY, and G.W. CUNINGHAM, "Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION," ORNL-TM-2496, Rev. 2, Oak Ridge National Laboratory (1971).

6. 謝 辞

本研究の遂行に当たり、計算実施段階において、(株)CSKの田中健一氏より、多大なる協力をして頂きました。ここに、感謝の意を表します。

Table 1 DCA's Physical Constant

1. Fuel Assembly

(i) 28 elements/assembly in 3 circular rings

Ring	No of elements	Pitch circle dia of elements centers(cm)
1	4	2.625
2	8	6.000
3	16	9.515

(ii) Fuel Element

(1) 1.2 w/o Enriched UO_2 Fuel

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	—	1.480	1.203w/o enriched UO_2	10.36
Gap	1.480	1.503	Helium	—
Fuel sheath	1.503	1.673	Aluminum alloy	2.674

Composition		w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic % density ($10^{24}/cm^3$)
pellet	^{235}U	1.057		0.0002806
	^{238}U	86.793		0.02275
	O	12.150		0.04738
Sheath	Al		96.98	0.05788
	Mg		2.60	0.00172

(2) 1.5 w/o Enriched UO₂ Fuel

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	—	1.477	1.499w/o enriched UO ₂	10.38
Gap	1.477	1.503	Helium	—
Fuel sheath	1.503	1.673	Aluminum alloy	2.674

Composition		w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic % density (10 ²⁴ /cm ³)
pellet	²³⁵ U	1.317		0.0003503
	²³⁸ U	86.565		0.02273
	O	12.120		0.04735
Sheath	Al		9.698	0.05788
	Mg		2.60	0.00172

(3) Natural UO₂ Fuel

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	—	1.480	0.711w/o natural UO ₂	10.36
Gap	1.480	1.503	Helium	—
Fuel Sheath	1.503	1.673	Aluminum alloy	2.674

Composition		w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic % density (10 ²⁴ /cm ³)
pellet	²³⁵ U	0.625		0.0001659
	²³⁸ U	87.255		0.02287
	O	12.120		0.04679
Sheath	Al		9.698	0.05788
	Mg		2.60	0.00172

(4) 0.54 w/o Enriched $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ Fuel (Standard Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
Fuel pellet	—	1.469	0.542w/o enriched $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$	10.17
Gap	1.469	1.506	Helium	—
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic \bar{A} density (10^{24} /cm ³)
Pellet	²³⁵ U		0.6214		0.0001620
	²³⁸ U		86.782		0.02233
	²³⁸ Pu	0.021	0.000102		0.000000026
	²³⁹ Pu	90.360	0.4304		0.0001103
	²⁴⁰ Pu	8.640	0.04115		0.00001050
	²⁴¹ Pu	0.915	0.004359		0.000001108
	²⁴² Pu	0.064	0.000303		0.0000000767
	O		12.12		0.04640
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 23 August 1971

(5) 0.87 w/o Enriched $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$ Fuel (Standard Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm)
Fuel pellet	—	1.472	0.862 w/o enriched $\text{PuO}_2 - \text{UO}_2$	10.17
Gap	1.472	1.506	Helium	—
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic \bar{A} density (10^{24} /cm)
Pellet	^{235}U		0.6194		0.0001615
	^{238}U		86.503		0.02226
	^{238}Pu	0.019	0.000145		0.000000037
	^{239}Pu	90.314	0.6849		0.0001755
	^{240}Pu	8.682	0.06584		0.00001680
	^{241}Pu	0.918	0.006960		0.000001769
	^{242}Pu	0.067	0.000510		0.0000001291
	O		12.12		0.04641
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 23 August 1971

(6) 0.87 w/o Enriched PuO₂-UO₂ Fuel (Reactor Grade)

	Inner dia (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm)
Fuel pellet	—	1.468	0.874 w/o enriched PuO ₂ -UO ₂	10.25
Gap	1.468	1.506	Helium	—
Fuel sheath	1.506	1.668	Zry-2	6.523

Composition		w/o in Pu	w/o in fuel pellet	w/o in sheath	Atomic No density (10 ²⁴ /cm)
pellet	²³⁵ U		0.6194		0.0001627
	²³⁸ U		86.493		0.02243
	²³⁸ Pu	0.84	0.00641		0.00000166
	²³⁹ Pu	64.92	0.4953		0.0001279
	²⁴⁰ Pu	21.77	0.1661		0.00004272
	²⁴¹ Pu	9.46	0.07217		0.0000184
	²⁴² Pu	3.01	0.02296		0.000005856
	O		12.13		0.04680
Sheath	Zr			98.22	0.04218
	Sn			1.48	0.0004897
	Fe			0.14	0.0000985
	Cr			0.10	0.0000756
	Ni			0.06	0.0000401

Date of Analysis ; 16 June 1973

(iii) Hanger Wire

N_a in assembly	Pitch circle dia of hanger wire center (cm)	Outer dia (cm)	Material	Density (g/cm ³)
4	10.60	0.20	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in wire	Atomic N_a density (10 ²⁴ /cm ³)
Al	96.98	0.05788
Mg	2.60	0.00172

(iv) Spacer

N_a in assembly	Outer dia (cm)	Thickness (cm)	Material	Density (g/cm ³)
2 *1	11.44	0.30	Aluminum alloy	2.674

Composition	w/o in Spacer	Atomic N_a density (10 ²⁴ /cm ³)
Al	96.98	0.05788
Mg	2.60	0.00172

*1 The positions are 70 cm and 140 cm from the lowest end of fuel.

2. Fuel Channel

	Inner Dia(cm)	Outer Dia(cm)	Material	Density(g/cm ³)
Pressure tube	11.68	12.08	Alumimun alloy	2.674
Air gap	12.08	13.25	Air	0.001205
Calandria tube	13.25	13.65	Alumimun alloy	2.674

Composition	w/o in Al	w/o in Air	Atomic % density
Al	96.98		0.05788
Mg	2.60		0.00172
Air	O	23.5204	0.00001067
		76.4796	0.00003962

3. Moderator

(i) Density of D₂O (9950 mol/o) 1.1045

Material	w/o in Moderator	Density(g/cm ³)
D ₂ O	99.55	1.10504
H ₂ O	0.45	0.99777

Composition	w/o in D ₂ O	Atomic % density(/cm ³ × 10 ²⁴)
H	0.05036	0.0003323
D	2.00223	0.06613
O	79.9283	0.03323

4. Coolant

Simulated void fraction(%)	w/o in Coolant				Density(g/cm ³)
	H ₂ O	D ₂ O	H ₃ BO ₃	Air	
0	100	—	—	—	0.99777
30	63.17	36.82	0.00921	—	1.0348
70	18.07	81.91	0.0215	—	1.0840
86.7	0.45	99.55	—	—	1.1045
100	—	—	—	100	0.000001
Density(g/cm ³)	0.99777	1.10504	1.435	0.001205	—

Composition	w/o in Coolant				
	0% void	30% void	70% void	86.7% void	100% void
H	11.1901	7.0693	2.0231	0.05036	
D		7.4055	16.4744	2.00223	
O	88.8099	85.5231	81.5001	79.9283	23.5204
¹⁰ B		0.0003158	0.000737		
B(Natural)		0.001611	0.003760		
N					76.4796

Composition	Atomic No. density (10 ²⁴ /cm ³)				
	0% void	30% void	70% void	86.7% void	100% void
H	0.06671	0.04371	0.01310	0.0003323	
D		0.02291	0.05340	0.06613	
O	0.03335	0.03331	0.03325	0.03323	0.00001067
B(Natural)		0.0000009	0.0000023		
N					0.00003962

5. Others

- (i) Temperature : 22°C ≈ 295°k
- (ii) Square lattice pitch : 22.5cm or 25.0cm
- (iii) Diameter of core tank : 300.5cm
- (iv) No. of fuel channel (Standard core) : 121 for 22.5cm lattice pitch
: 97 for 25.0cm lattice pitch

表2 WIMS-ATRコード内蔵69群ライブラリーの群構造

GROUP	ENERGY	ENERGY WIDTH	LETHARGY WIDTH	GROUP	ENERGY eV	ENERGY WIDTH	LETHARGY WIDTH
	MeV						
1	10.0 - 6.0655	3.9345	0.49997	28	4.00 - 3.30	0.700	0.19237
2	6.0655 - 3.679	2.3865	0.49998	29	3.30 - 2.60	0.700	0.23841
3	3.679 - 2.231	1.448	0.50019	30	2.60 - 2.10	0.500	0.21357
4	2.231 - 1.353	0.878	0.50013	31	2.10 - 1.50	0.600	0.33647
5	1.353 - 0.821	0.532	0.49956	32	1.50 - 1.30	0.200	0.14310
6	0.821 - 0.500	0.321	0.49592	33	1.30 - 1.15	0.150	0.12260
7	0.500 - 0.3025	0.1975	0.50253	34	1.15 - 1.123	0.027	0.02376
8	0.3025 - 0.183	0.1195	0.50260	35	1.123 - 1.097	0.026	0.02342
9	0.183 - 0.1110	0.072	0.49996	36	1.097 - 1.071	0.026	0.02399
10	0.1110 - 0.06734	0.04366	0.49978	37	1.071 - 1.045	0.026	0.02458
11	0.06734 - 0.04085	0.02649	0.49985	38	1.045 - 1.020	0.025	0.02421
12	0.04085 - 0.02478	0.01607	0.49987	39	1.020 - 0.996	0.024	0.02381
13	0.02478 - 0.01503	0.00975	0.49999	40	0.996 - 0.972	0.024	0.02439
14	0.01503 - 0.009118	0.005912	0.49980	41	0.972 - 0.950	0.022	0.02289
				42	0.950 - 0.910	0.040	0.04302
				43	0.910 - 0.850	0.060	0.06821
				44	0.850 - 0.780	0.070	0.08594
				45	0.780 - 0.625	0.155	0.22154
				46	0.625 - 0.500	0.125	0.22314
15	9118.0 - 5530.0	3588.0	0.50006	47	0.500 - 0.400	0.100	0.22314
16	5530.0 - 3519.1	2010.9	0.45198	48	0.400 - 0.350	0.050	0.13353
17	3519.1 - 2239.45	1279.65	0.45198	49	0.350 - 0.320	0.030	0.08961
18	2239.45 - 1425.1	814.35	0.45199	50	0.320 - 0.300	0.020	0.06454
19	1425.1 - 906.898	518.202	0.45197	51	0.300 - 0.280	0.020	0.06899
20	906.898 - 367.262	539.636	0.90395	52	0.280 - 0.250	0.030	0.11333
21	367.262 - 148.728	218.534	0.90396	53	0.250 - 0.220	0.030	0.12783
22	148.728 - 75.5014	73.2266	0.67797	54	0.220 - 0.180	0.040	0.20067
23	75.5014 - 48.052	27.4494	0.45187	55	0.180 - 0.140	0.040	0.25131
24	48.052 - 27.700	20.352	0.55085	56	0.140 - 0.100	0.040	0.33647
25	27.700 - 15.968	11.732	0.55085	57	0.100 - 0.080	0.020	0.22314
26	15.968 - 9.877	6.091	0.48038	58	0.080 - 0.067	0.013	0.17731
27	9.877 - 4.00	5.877	0.90391	59	0.067 - 0.058	0.009	0.14425
				60	0.058 - 0.050	0.008	0.14842
				61	0.050 - 0.042	0.008	0.17435
				62	0.042 - 0.035	0.007	0.18232
				63	0.035 - 0.030	0.005	0.15415
				64	0.030 - 0.025	0.005	0.18232
				65	0.025 - 0.020	0.005	0.22314
				66	0.020 - 0.015	0.005	0.28768
				67	0.015 - 0.010	0.005	0.40547
				68	0.010 - 0.005	0.005	0.69315
				69	0.005 - 0.	0.005	-

表3 WIMS-ATRコード計算のエネルギー14群構造

エネルギー群	エネルギー範囲
1	10.0 - 3.6790 (Mev)
2	3.6790 - 0.821
3	0.821 - 0.06734
4	0.06734 - 0.005530
5	5530.0 - 3.30 (ev)
6	3.3 - 0.996
7	0.996 - 0.625
8	0.625 - 0.350
9	0.350 - 0.250
10	0.250 - 0.100
11	0.100 - 0.058
12	0.058 - 0.030
13	0.030 - 0.015
14	0.015 - 0.0

表4 WIMS-ATRコード計算のエネルギー4群構造

群数	エネルギー範囲
1	10.0(Mev) - 0.821(Mev)
2	0.821(Mev) - 5.53 (Kev)
3	5.53(Kev) - 0.625(ev)
4	0.625(ev) - 0.0 (ev)

表5 ボイド領域直径88cmにおけるドライバー領域炉心の炉心構成

タイプ名	燃料タイプ	冷却材	備考
CORE-A	1.2%U	軽水	ボイド領域88cmφ 重水領域幅5.21cm 炉心構成図1参照
CORE-B	1.2%U	重水	ボイド領域88cmφ 重水領域幅5.21cm 炉心構成図1参照
CORE-C	1.2%U	ボイド	ボイド領域88cmφ 重水領域幅5.21cm 炉心構成図1参照
CORE-D	8S 5S 1.2%U	軽水	ボイド領域88cmφ 重水領域幅5.21cm 最内側1層 8S 内側2層 5S 他の領域 1.2%U 炉心構成図2参照
CORE-E	8S 5S 1.2%U	重水	ボイド領域88cmφ 重水領域幅5.21cm 最内側1層 8S 内側2層 5S 他の領域 1.2%U 炉心構成図2参照

* 燃料は6角配置を採用、20cm正方格子と等価面積の6角格子

表6 ボイド領域直径変化におけるドライバー領域炉心の炉心構成

ボイド領域 直径	ケース 番号	燃料配置	備考
83cm	1	1.2U ALL	図13(1)の配置
	2	1.2U/5S/8S/1.2U	図13(2)の配置
	3	1.2U/8S/5S/1.2U	図13(3)の配置
	4	5S/8S/1.2U/1.2U	図13(4)の配置
	5	8S/5S/1.2U/1.2U	図13(5)の配置
88cm	1	1.2U ALL	図14(1)の配置
	2	1.2U/5S/8S/1.2U	図14(2)の配置
	3	1.2U/8S/5S/1.2U	図14(3)の配置
	4	5S/8S/1.2U/1.2U	図14(4)の配置
	5	8S/5S/1.2U/1.2U	図14(5)の配置
118cm	1	1.2U ALL	図15(1)の配置
	2	1.2U/5S/8S/1.2U	図15(2)の配置
	3	1.2U/8S/5S/1.2U	図15(3)の配置
	4	5S/8S/1.2U/1.2U	図15(4)の配置
	5	8S/5S/1.2U/1.2U	図15(5)の配置

* 装荷されている燃料集合体数は以下の通りである。

ボイド領域直径 83cm : 132体
 ボイド領域直径 88cm : 132体
 ボイド領域直径 118cm : 114体

表7 制御棒反応度値の解析ケース

テスト領域 (ボイド)	燃 料	コード	目 的	ケ ー ス	方 法
0 cm	1.2%U (全炉心)	CITATION TWOTRAN	臨 界 (両コードの比較)	臨 界 2	基準炉心(C/R未挿入) C/R挿入 の B_z^2 サーチ → 炉心に入力 ($k_{eff}=1.0$)
		TWOTRAN	未臨 界 (反応度値の比較)	未臨 界 2	臨界水位より低い水位2点を基に B_z^2 と して入力(基準炉心)
83cm	1.2%U (ドライバ領域)	TWOTRAN	臨 界と未臨 界 (反応度値の比較)	臨 界 1	同 上
				未臨 界 2	同 上
118cm	8S/5S/1.2U/1.2U (ドライバ領域)	TWOTRAN	臨 界と未臨 界 (反応度値の比較)	臨 界 1	同 上
				未臨 界 2	同 上

X-Y 2次元モデル

 ^{10}B : 0 ppm

0% ボイド率

表8 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化

格子ピッチ (cm)	無限増倍率
20.0	1.146375
22.5	1.163314
25.0	1.174286
27.5	1.181557
28.0	1.182002
29.0	1.183037
30.0	1.183205
31.0	1.183063
32.0	1.181897
32.5	1.181449
35.0	1.177968

(圧力管内軽水, 1.2w/o U燃料)

表9 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化
(圧力管内ボイド, 1.2w/oU燃料)

格子ピッチ(cm)	無限増倍率
20.0	1.159048
22.5	1.234064
25.0	1.279707
27.5	1.307401
30.0	1.324017
32.5	1.332401
33.0	1.333389
34.0	1.334514
35.0	1.335138
36.0	1.335109
37.0	1.334916
37.5	1.334399

表10 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化
(圧力管内 D₂O, 1.2w/oU燃料)

格子ピッチ(cm)	無限増倍率
20.0	1.153481
22.5	1.217991
25.0	1.258515
27.5	1.283483
30.0	1.297791
32.5	1.305142
33.0	1.305949
34.0	1.307130
35.0	1.307532
36.0	1.307261
37.0	1.306507
37.5	1.305983

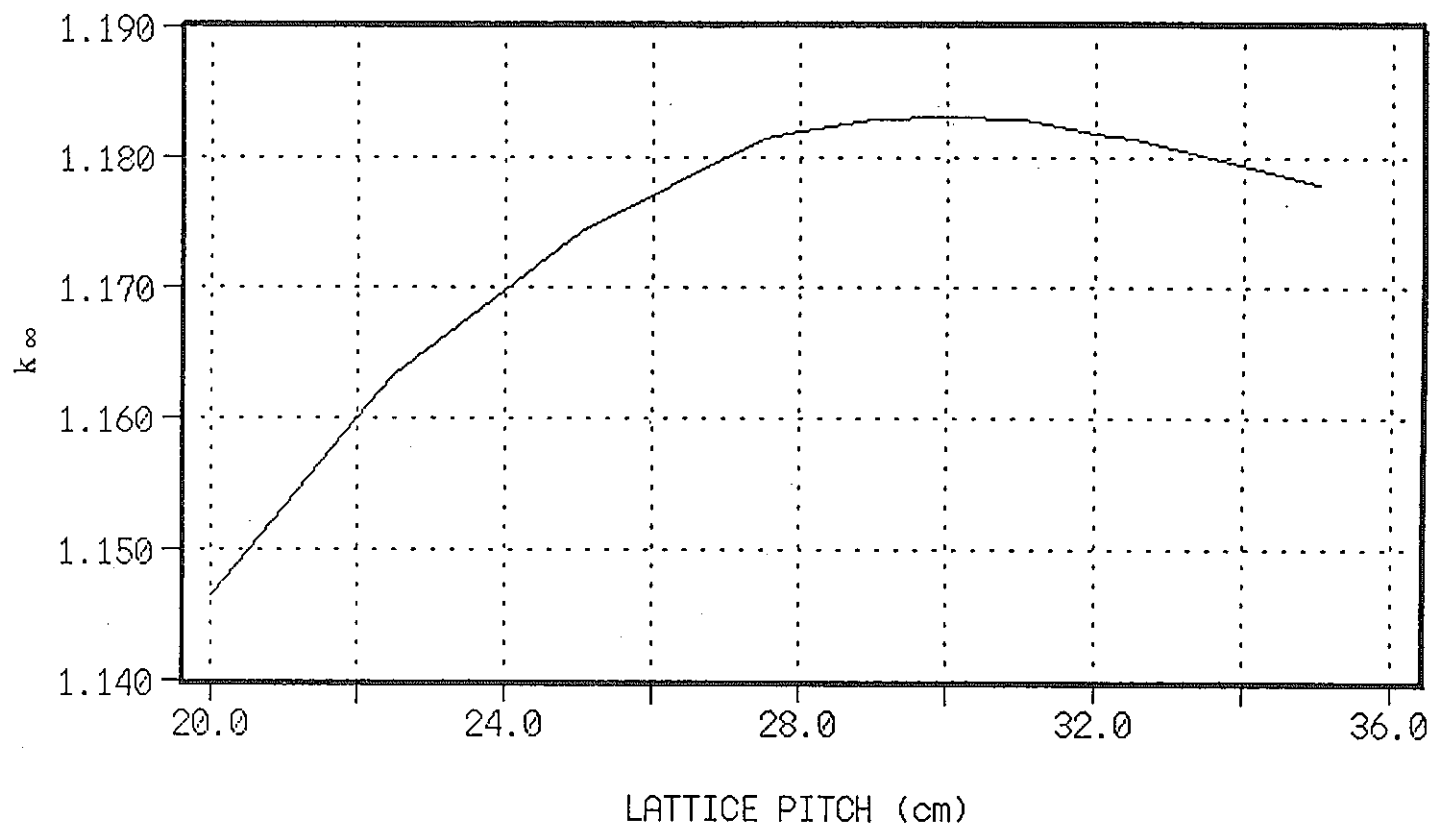


図24 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化
(圧力管内軽水, 1.2w/oU燃料)

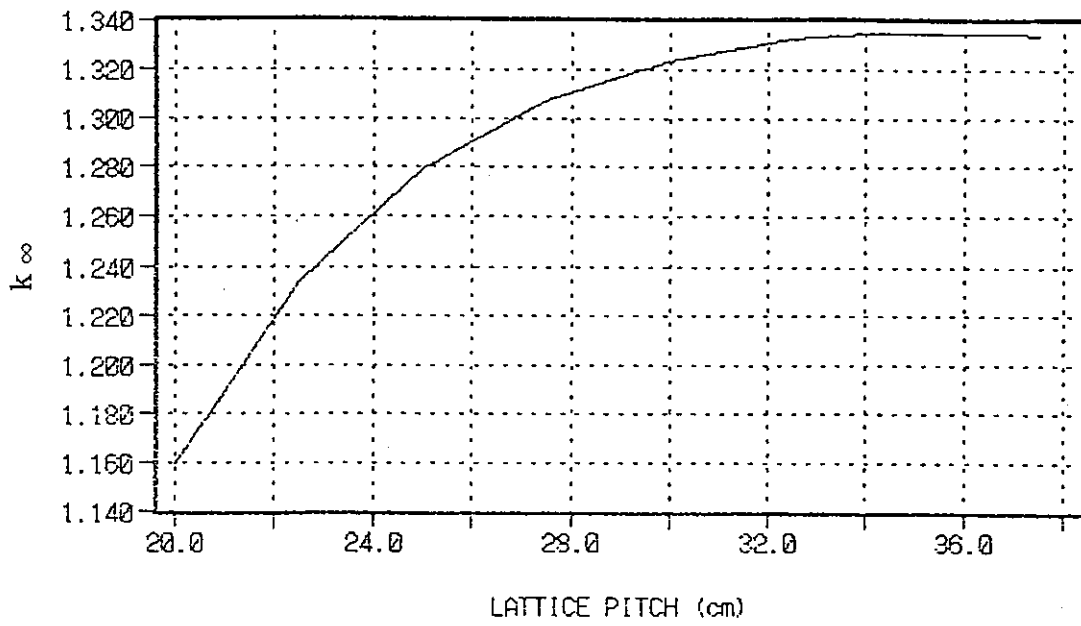


図25 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化
(圧力管内ボイド, 1.2w/oU燃料)

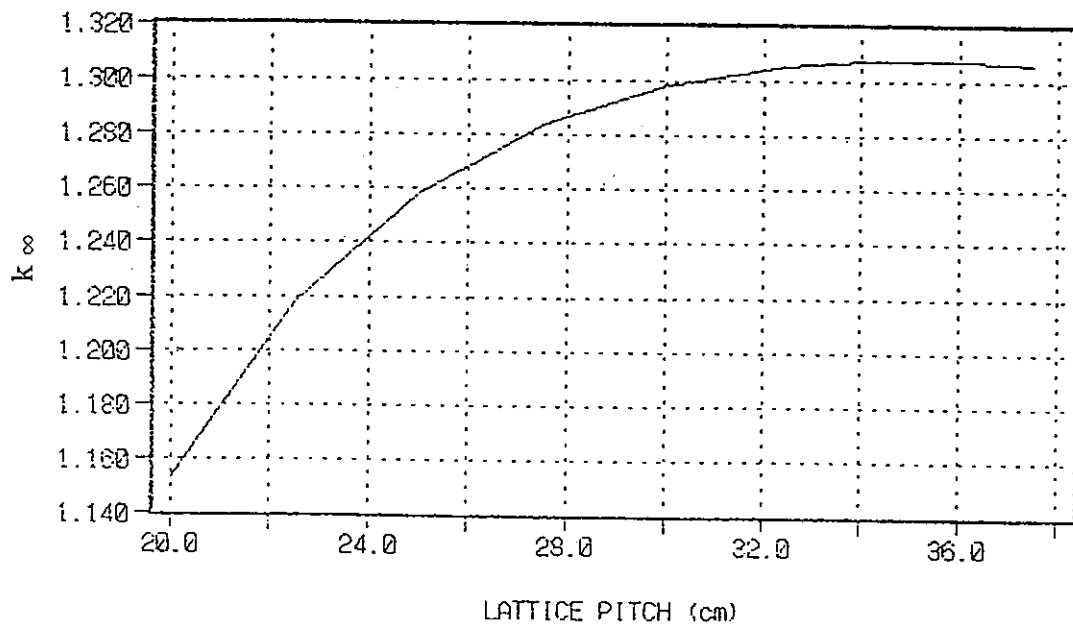


図26 格子ピッチの増大による無限増倍率の変化
(圧力管内D₂O, 1.2w/oU燃料)

表11 無限増倍率, 漏れの割合及び実効増倍率の関係

	格子ピッチ (cm)	K_{inf}	M_R^2	M_Z^2	$1/(1+M^2B^2)$	K_{eff}
H ₂ O	20.0	1.146375	1.351405×10^2	1.415289×10^2	0.9349815	1.071839
	30.0	1.183205	2.551596×10^2	2.615892×10^2	0.8850271	1.047169
VOID	35.0	1.335138	5.412641×10^2	5.574702×10^2	0.7835725	1.046177
D ₂ O	35.0	1.307532	5.001485×10^2	5.092369×10^2	0.7975929	1.042878

* ハックリング* について

軸方向、径方向ハックリング* は次式で計算した。

$$B_R^2 (\text{径方向ハックリング*}) = \left(\frac{2.4048}{R} \right)^2 = 2.561704 \times 10^{-4} \quad (R = 150.25(\text{cm}))$$

$$B_Z^2 (\text{軸方向ハックリング*}) = \left(\frac{\pi}{H} \right)^2 = 2.467401 \times 10^{-4} \quad (H = 200.0(\text{cm}))$$

表12 各体系における拡散係数及び吸収断面積

	格子ピッチ (cm)	D_R	D_Z	Σ_a
H ₂ O	20.0	1.115807	1.168554	8.256644×10^{-3}
	30.0	0.977893	1.002534	3.832475×10^{-3}
VOID	35.0	1.384808	1.426270	2.558470×10^{-3}
D ₂ O	35.0	1.29744	1.321024	2.594124×10^{-3}

表13 各炉心における k_{eff} (k_{∞}) の格子ピッチ依存性の比較

格子ピッチ(cm)	Kinfinity(WIMS)	一様炉心	ドライバー領域炉心
18.0	1.127383	1.06566525	1.00660992
20.0	1.149343	1.07680321	1.00754642
22.5	1.170249	1.08285522	1.00003147
25.0	1.184669	1.08129406	0.98431397
27.5	1.192773	1.07264996	0.96192652
30.0	1.196151	1.05822182	0.93394369
32.5	1.197349	1.04261684	0.90625805
35.0	1.194938	1.02166367	0.87375134

*1 k_{∞} は重水密度入力値の違いのため、表8の結果と僅かな差があるが、傾向分析の上で特に問題ないと考えられる。

*2 重水水位 : 200cm
 冷却材物質 : 軽水
 燃料 : 1.2w/oU

表14 中性子収支バランス

(1) 漏洩

中性子群	現 状 炉 心		改 造 炉 心	
	18 cmピッチ	25 cmピッチ	18 cmピッチ	25 cmピッチ
1	0.0083849	0.0079136	0.0158263	0.0150948
2	0.0133246	0.0136903	0.0262594	0.0272505
3	0.0143295	0.0186280	0.0281061	0.0364318
4	0.0159665	0.0427115	0.0316238	0.0818140
合 計	0.0520055	0.0829433	0.1018156	0.1605910

(2) 吸収

中性子群	現 状 炉 心		改 造 炉 心	
	18 cmピッチ	25 cmピッチ	18 cmピッチ	25 cmピッチ
1	0.0262703	0.0219319	0.0260103	0.0217234
2	0.0243801	0.0174244	0.0238659	0.0170514
3	0.1918187	0.1250841	0.1848106	0.1199300
4	0.7055569	0.7525901	0.6635205	0.6806661
合 計	0.9480259	0.9170305	0.8982074	0.8393709

(3) 発生

中性子群	現 状 炉 心		改 造 炉 心	
	18 cmピッチ	25 cmピッチ	18 cmピッチ	25 cmピッチ
1	0.0635722	0.0538155	0.0629432	0.0533039
2	0.0044175	0.0032647	0.0043244	0.0031948
3	0.0589564	0.0385736	0.0568025	0.0369842
4	0.9387262	0.9856479	0.8827978	0.8914441
合 計	1.0656723	1.0813017	1.0068679	0.9849270

- 注) (1) 漏洩 及び (2) 吸収 はTWOTRANのOUTPUTより抜粋した。
 (3) 発生 は [(2) 吸収] $\times \nu \sigma_f / \sigma_a$ より算出した。

表15 冷却材物質の違いによる反応度特性

タイプ名	Keff* ¹	臨界水位* ²	臨界 ¹⁰ B濃度* ³	冷却材物質／燃料
CORE-A	1.02203846	152.3	26.8	軽水／1.2U
CORE-B	0.95582192	-----	-----	重水／1.2U
CORE-C	0.92133659	-----	-----	ボイド／1.2U
CORE-D	1.05956650	109.2	81.4	軽水／MOX
CORE-E	1.02209377	169.3	34.9	重水／MOX

*¹ 重水水位 2 m での Keff*² 水位単位 : cm*³ ¹⁰B濃度単位 : ppm*⁴ 格子ピッチ : 20cm相当

表16 ドライバー領域炉心反応度特性計算結果（ボイド領域直径83cm）

ケース番号	K_{eff}	臨界水位 (cm)	^{10}B 濃度 (ppm)	備考
1	1.02466679	147.4	43.7	
2	1.07495975	84.2	107.7	8S不足 ^{*1}
3	1.07316494	87.6	87.0	
4	1.07054520	83.9	94.8	
5	1.06464005	83.4	85.8	

表17 ドライバー領域炉心反応度特性計算結果（ボイド領域直径88cm）

ケース番号	K_{eff}	臨界水位 (cm)	^{10}B 濃度 (ppm)	備考
1	1.02203846	152.3	26.8	
2	1.07429981	87.5	104.5	8S不足 ^{*1}
3	1.07200909	91.6	100.9	
4	1.06630516	70.4	93.4	
5	1.05956650	109.2	81.4	

表18 ドライバー領域炉心反応度特性計算結果（ボイド領域直径118cm）

ケース番号	K_{eff}	臨界水位 (cm)	^{10}B 濃度 (ppm)	備考
1	0.98494738	-----	-----	
2	1.03263855	144.5	44.0	8S,5S不足 ^{*1}
3	1.03512764	144.5	59.7	同上 ^{*1}
4	1.03960800	136.6	53.4	8S不足 ^{*1}
5	1.03407669	145.5	44.7	

*1 DCA所有のMOX燃料が不足している体系

表19 1.2U一様炉心のボイド領域直径変化による反応度特性

ボイド直径 (cm)	Keff	臨界水位 (cm)	^{10}B 濃度 (ppm)
0.0	1.08220671	107.3	145.6
83.0	1.02466679	147.4	43.7
88.0	1.02203846	152.3	26.8
118.0	0.98494783	-----	-----

表20 ボイド領域直径83cmの重水水位反応度係数
(1.2U一様炉心)

重水水位 (cm)	Keff	反応度係数*
50	0.732901394	
		9.816x10 ⁻³
70	0.856081724	
		4.168x10 ⁻³
90	0.921865523	
		2.168x10 ⁻³
110	0.960239649	
		1.303x10 ⁻³
130	0.984946430	
		8.573x10 ⁻⁴
147.4	0.999633908	
		6.910x10 ⁻⁴
150	1.00143242	
		5.716x10 ⁻⁴
170	1.01303101	
		4.010x10 ⁻⁴
190	1.02132988	
		3.189x10 ⁻⁴
200	1.02466679	

* 反応度係数は次式で計算した

$$[\text{反応度係数}] = \frac{(k_1 - k_2) / k_1 k_2}{(h_1 - h_2)}$$

h₁, h₂ : 任意の重水水位 (cm)

k₁ : h₁でのKeff

k₂ : h₂でのKeff

表21 ボイド領域直径88cmの重水水位反応度係数
(1.2U一様炉心)

重水水位 (cm)	Keff	反応度係数*
50	0.73105574	
		9.845x10 ⁻³
70	0.85392589	
		4.202x10 ⁻³
90	0.91995440	
		2.094x10 ⁻³
110	0.95781504	
		1.310x10 ⁻³
130	0.98246606	
		7.144x10 ⁻⁴
150	0.99645366	
		6.553x10 ⁻⁴
152.3	0.99975510	
		5.448x10 ⁻⁴
170	1.00949010	
		4.781x10 ⁻⁴
190	1.01932948	
		3.200x10 ⁻⁴
200	1.02203846	

* 反応度係数は次式で計算した

$$[\text{反応度係数}] = \{(k1-k2)/k1k2\}/(h1-h2)$$

h1, h2 : 任意の重水水位 (cm)

k1 : h1でのKeff

k2 : h2でのKeff

表22 ボイド領域直径118cmの重水水位反応度係数
(8S/5S/1.2U/1.2U装荷炉心)

重水水位 (cm)	Keff	反応度係数*
50	0.70072961	
70	0.83514804	1.148×10^{-2}
90	0.91132891	5.005×10^{-3}
110	0.95799995	2.673×10^{-3}
130	0.98556858	1.459×10^{-3}
145.5	0.99941498	9.069×10^{-4}
150	1.00327587	8.557×10^{-4}
170	1.01861095	7.503×10^{-4}
190	1.02968884	5.281×10^{-4}
200	1.03408146	4.126×10^{-4}

* 反応度係数は次式で計算した

$$[\text{反応度係数}] = \{(k_1 - k_2) / k_1 k_2\} / (h_1 - h_2)$$

h₁, h₂ : 任意の重水水位 (cm)

k₁ : h₁でのKeff

k₂ : h₂でのKeff

表23 制御棒反応度値の解析結果

炉心状態	重水水位 (cm)	未挿入時 Keff	挿入時 Keff	反応度 %ΔK/K
1.2%U 一様炉心	118.95 * ¹	1.00023460	0.96691397	-3.45
	110.0 * ²	0.98293089	0.95431723	-3.05
	100.0 * ²	0.95931547	0.93297731	-2.94
ボイド領域 直径83 cmの炉心	159.2 * ¹	0.99981500	0.96651142	-3.45
	140.0 * ²	0.97587883	0.94920468	-2.87
	120.0 * ²	0.94827330	0.92339336	-2.84
ボイド領域 直径118 cmの炉心	148.5 * ¹	0.99911481	0.97414630	-2.56
	140.0 * ²	0.98107045	0.96767896	-1.41
	120.0 * ²	0.95037645	0.93826842	-1.36

*1 臨界水位

*2 未臨界水位

表24 TWOTRANとCITATIONによる制御棒反応度値の比較（一様炉心）

使用コード	重水水位 (cm)	未挿入時 Keff	挿入時 Keff	反応度 %ΔK/K
TWOTRAN	118.95 * ¹	1.00023460	0.96691397	-3.42
CITATION		1.00000010	0.9633884	-3.80

*1 臨界水位

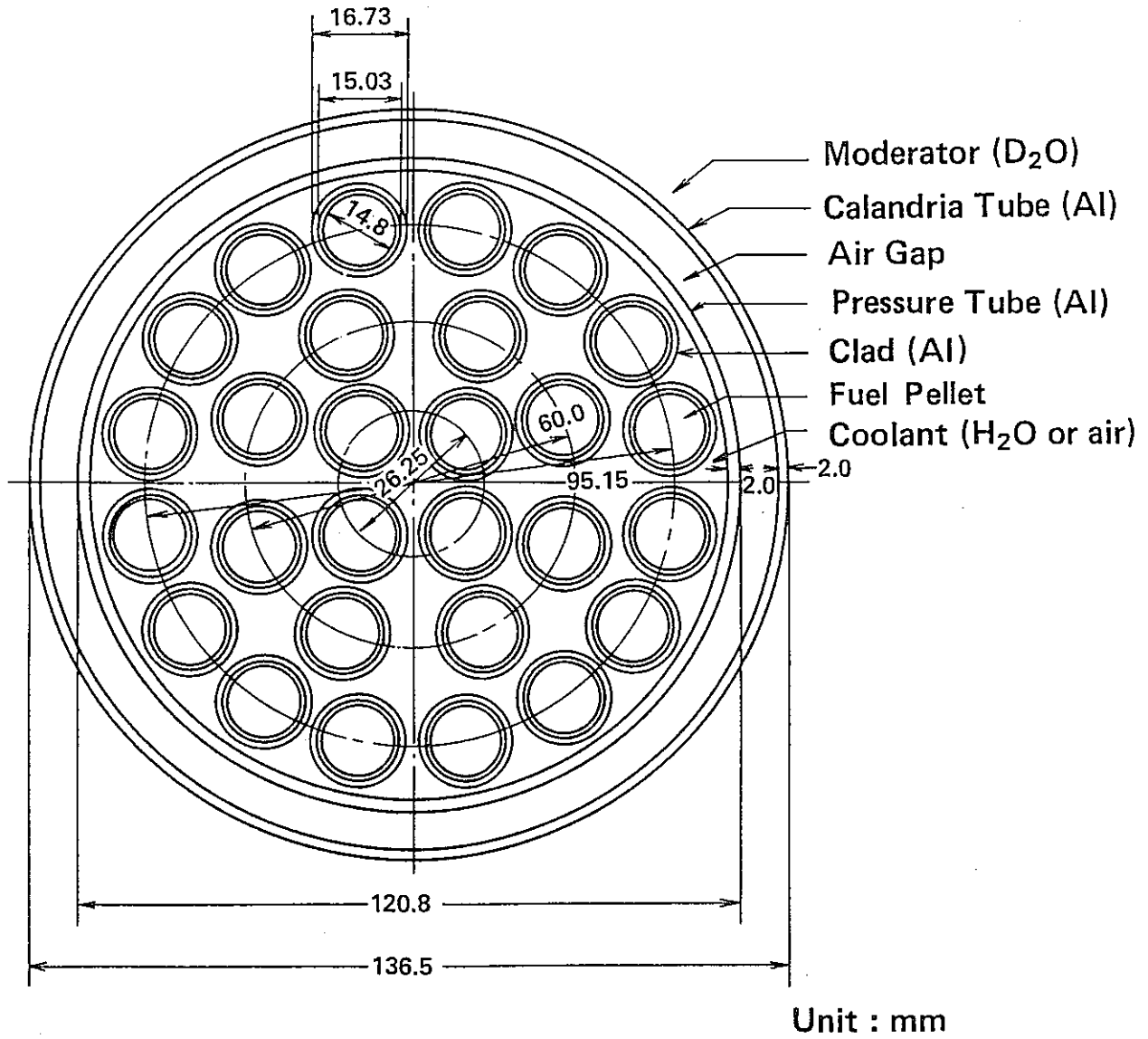


Fig. 1 Cluster Fuel Channel of DCA
(1.2% E.U UO₂)

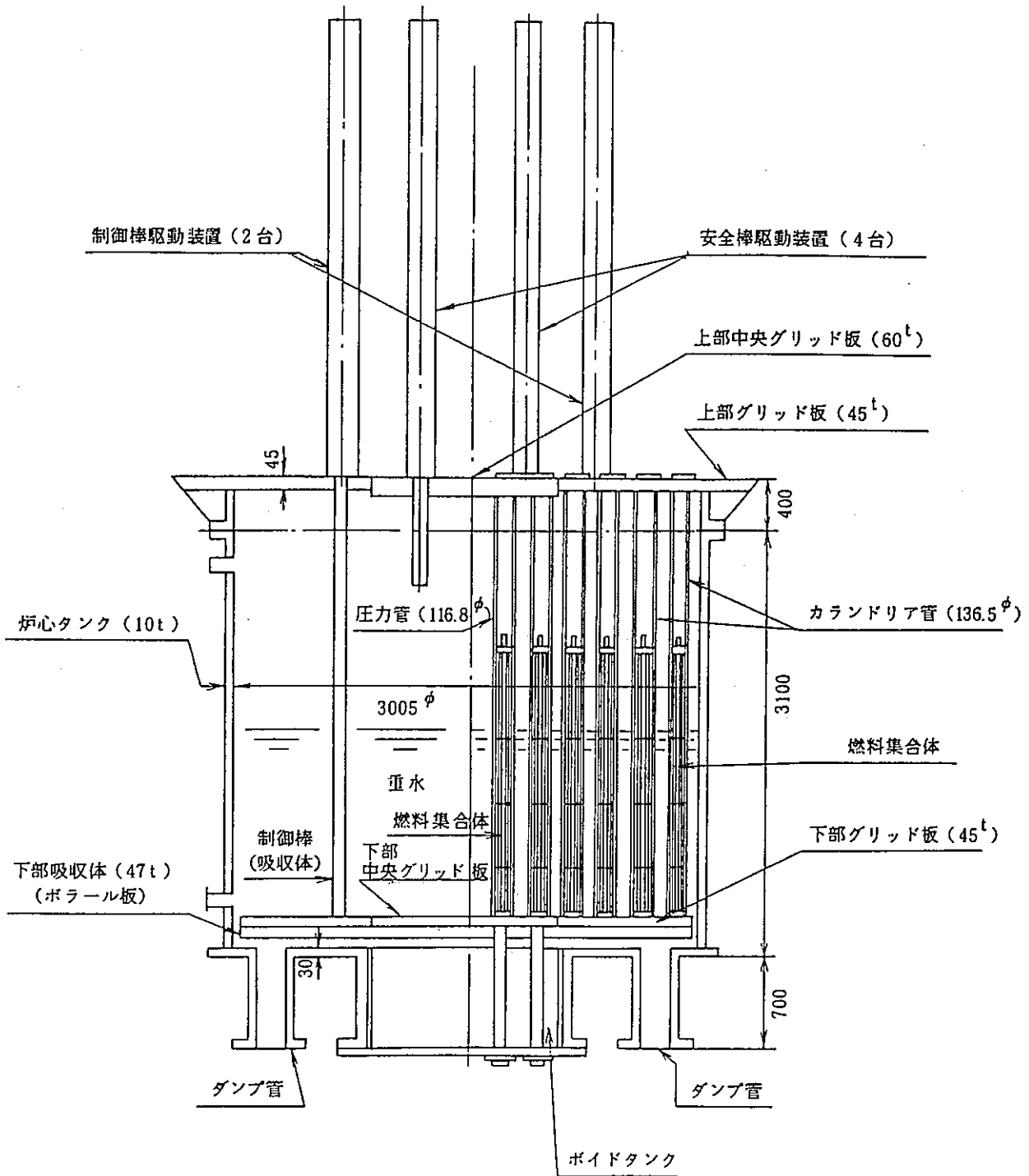


図2 重水臨界実験装置構造説明図

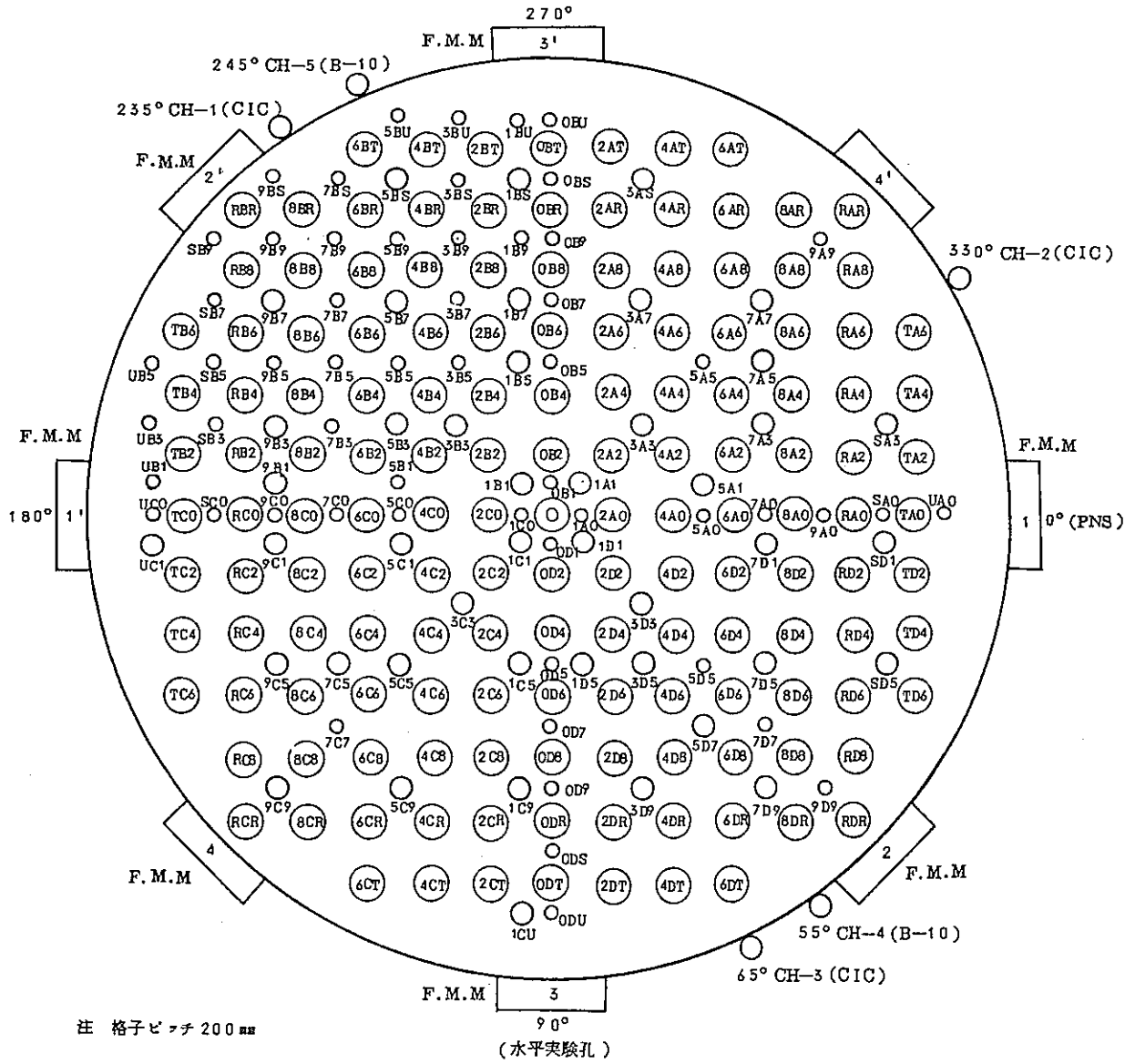


図3 一様炉心平面図 (四角格子)

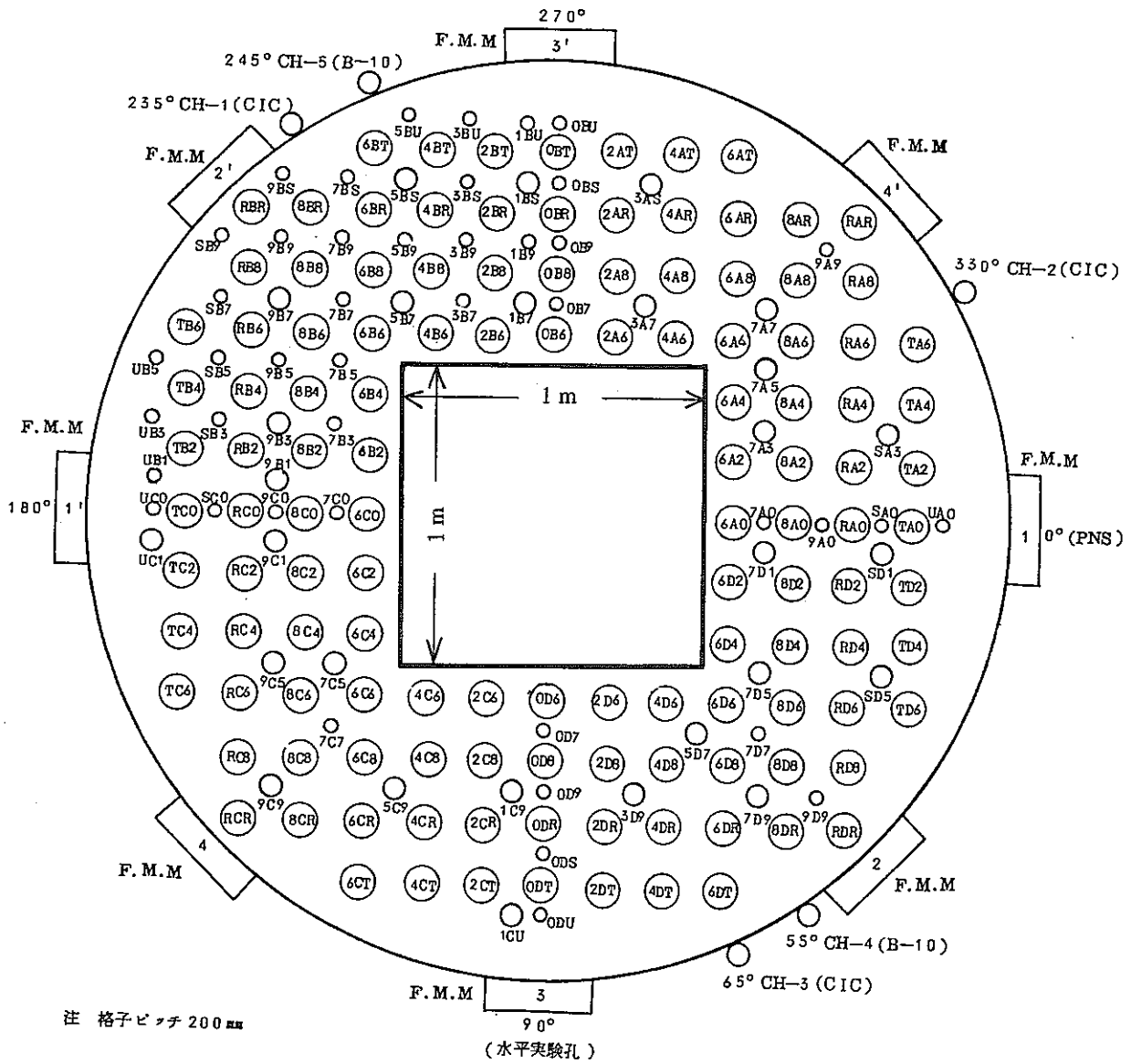


図4 ドライバー領域炉心平面図 (四角格子)

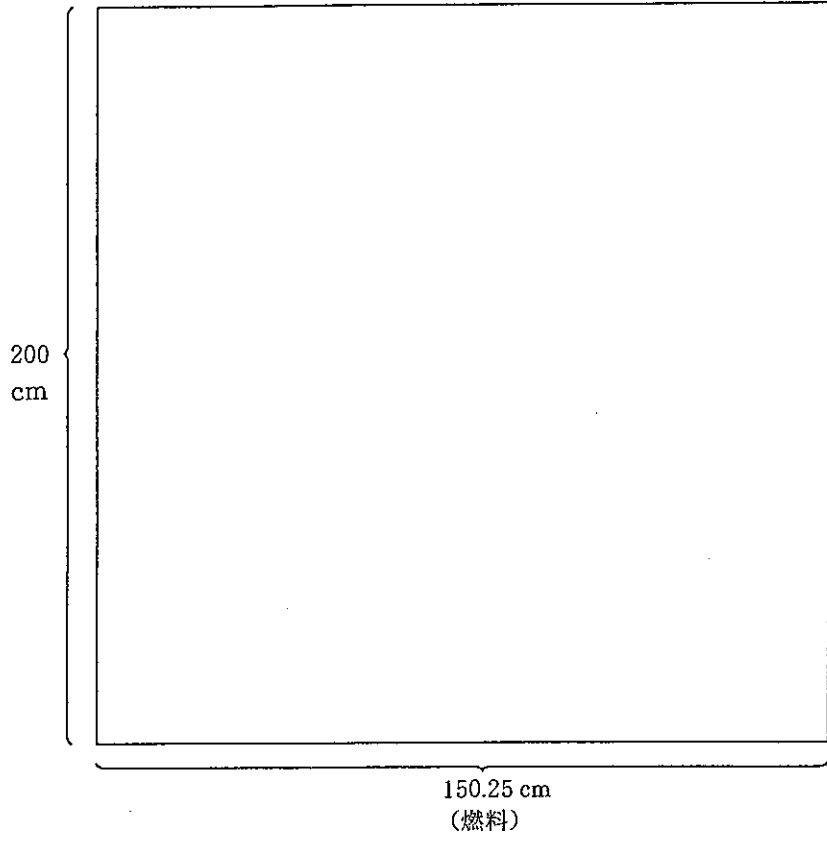


図5 一様炉心R-Z形状モデル

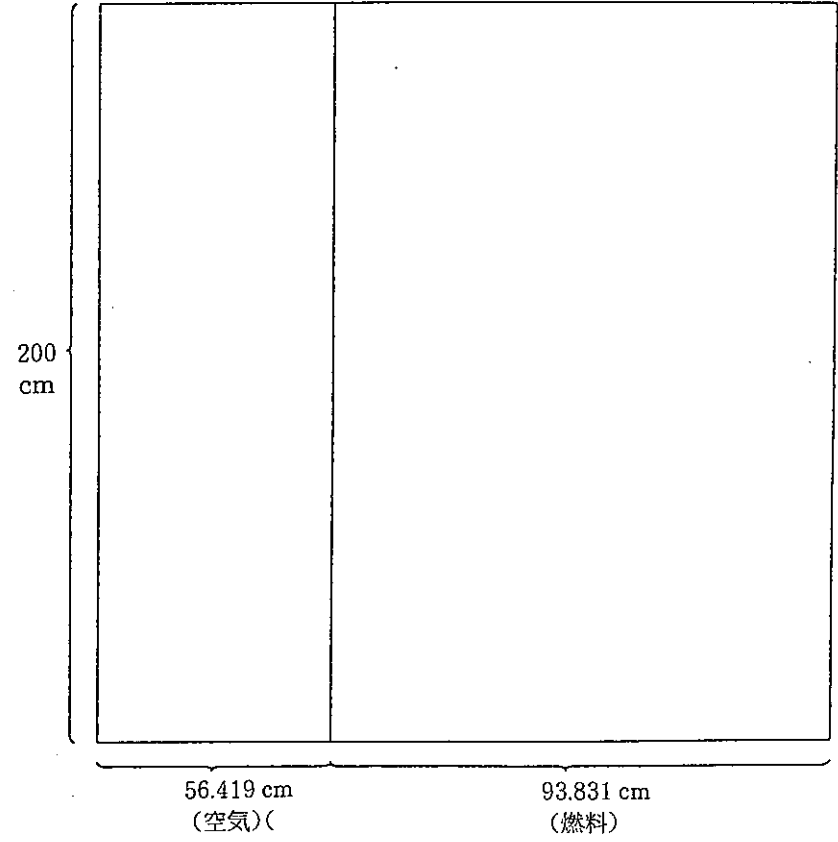


図6 ドライバー領域炉心R-Z形状モデル

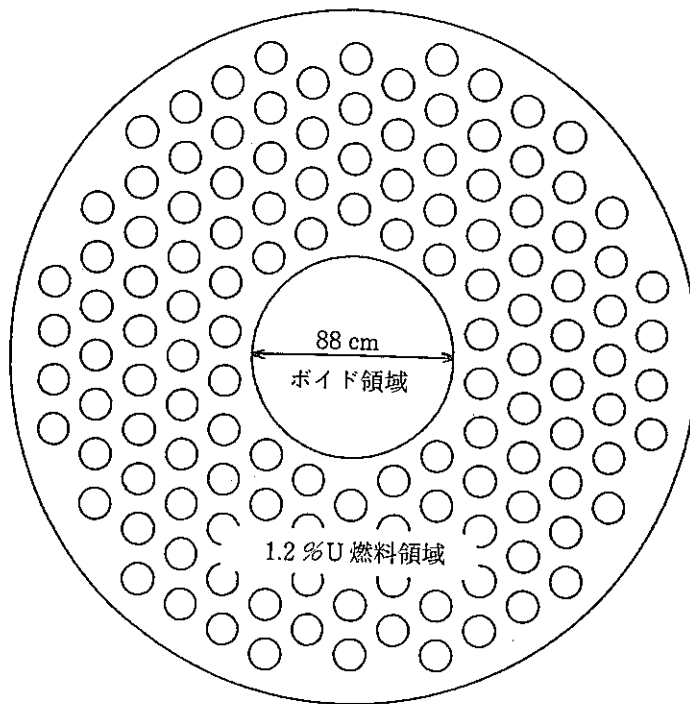


図7 CORE-A~CORE-Cの炉心構成

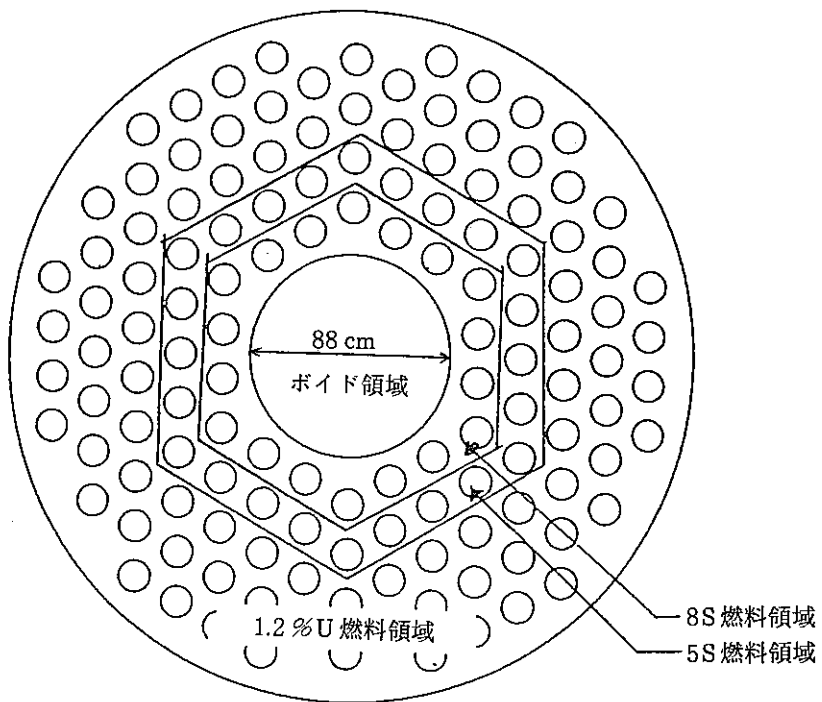


図8 CORE-D, CORE-Eの炉心構成

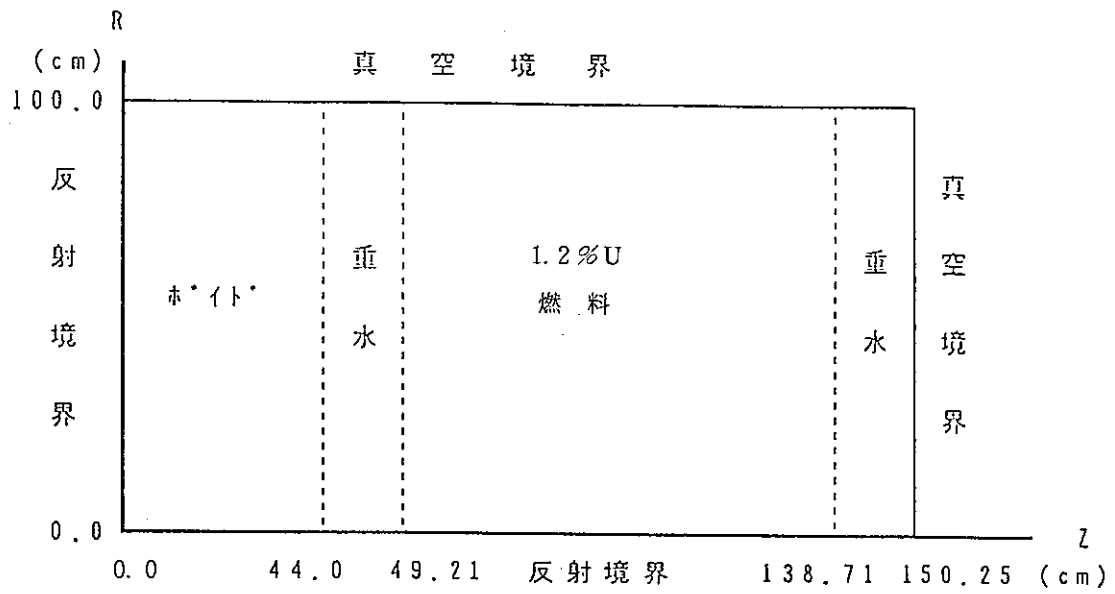


図9 TWOTRAN計算体系 (CORE-A~CORE-C)

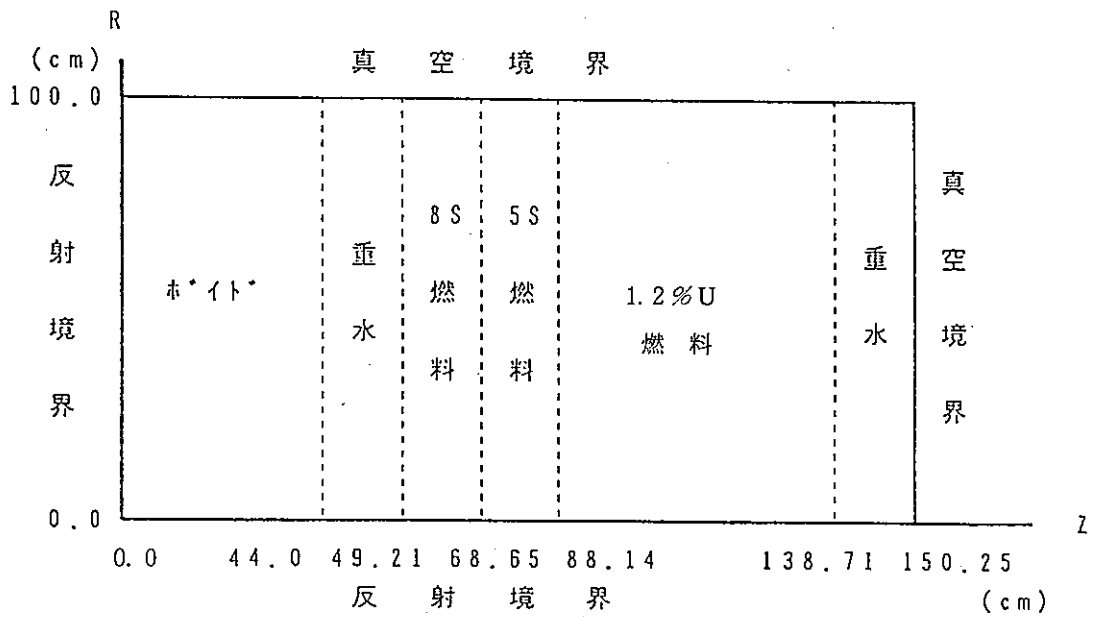


図10 TWOTRAN計算体系 (CORE-D, CORE-E)

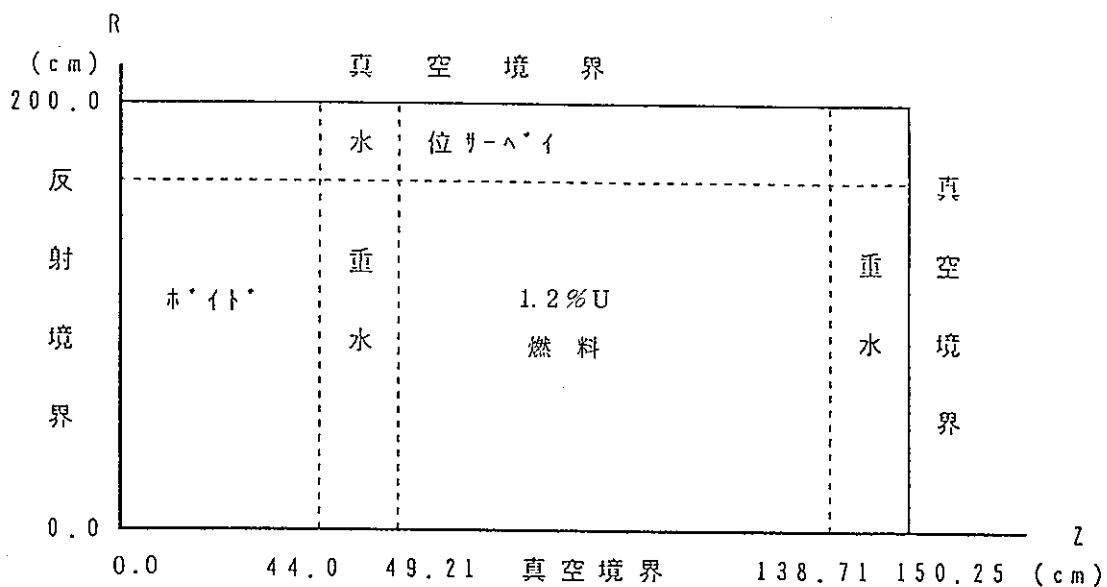


図11 TWOTRAN計算体系 (CORE-A~CORE-C : 水位サーベイ)

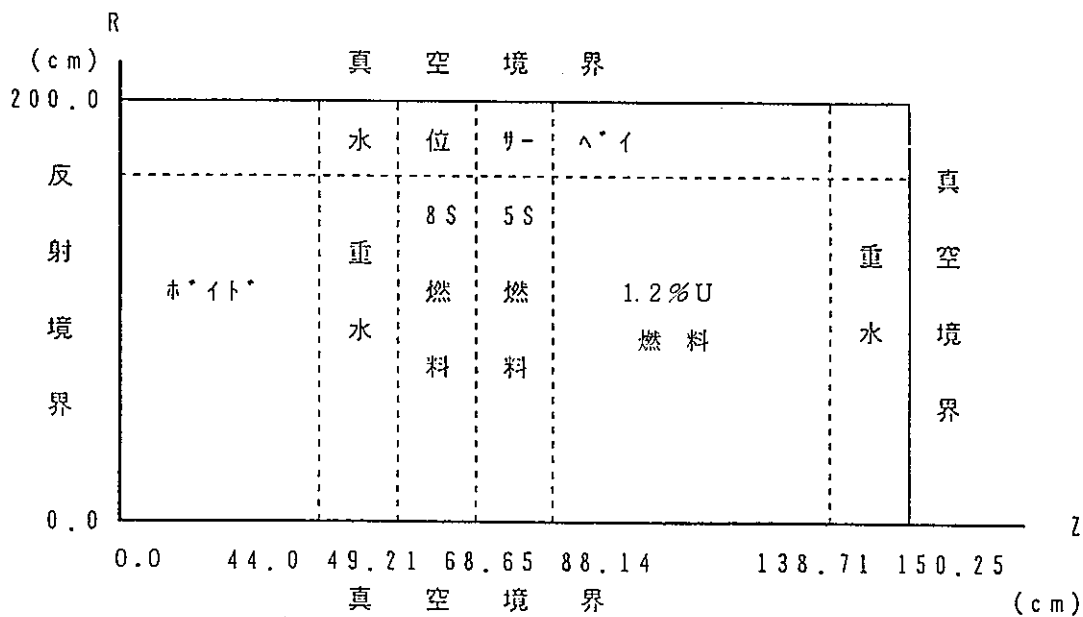


図12 TWOTRAN計算体系 (CORE-D, CORE-E : 水位サーベイ)

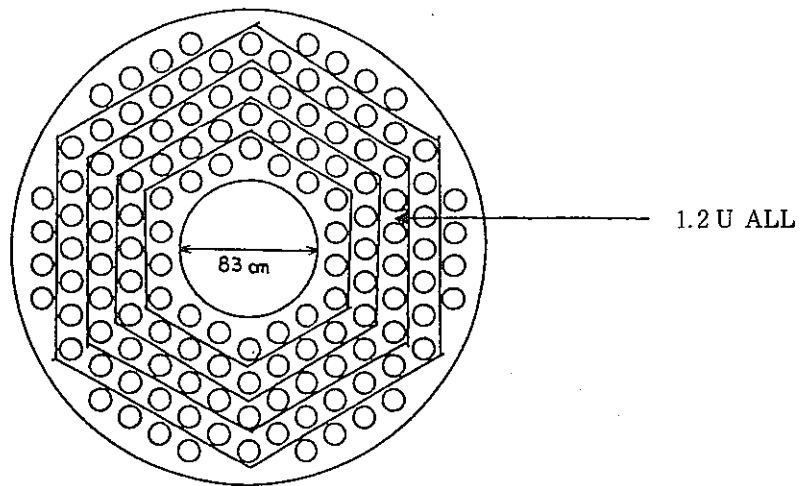


図13(1) ボイド領域直径83cm燃料配置 (1.2U ALL)

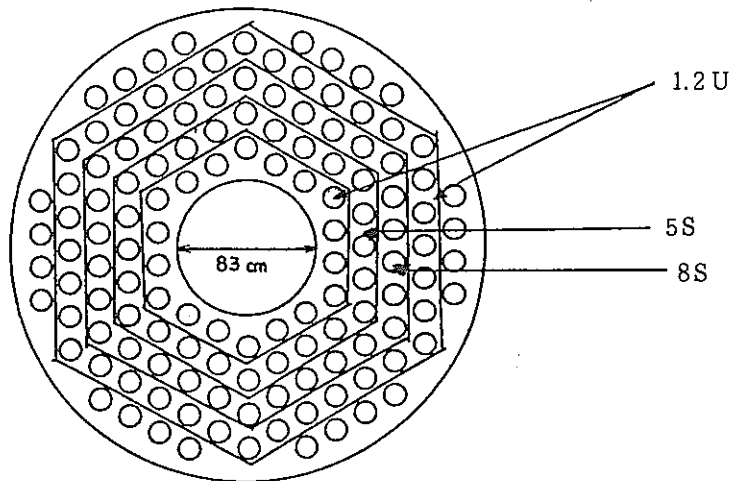


図13(2) ボイド領域直径83cm燃料配置 (1.2U/5S/8S/1.2U)

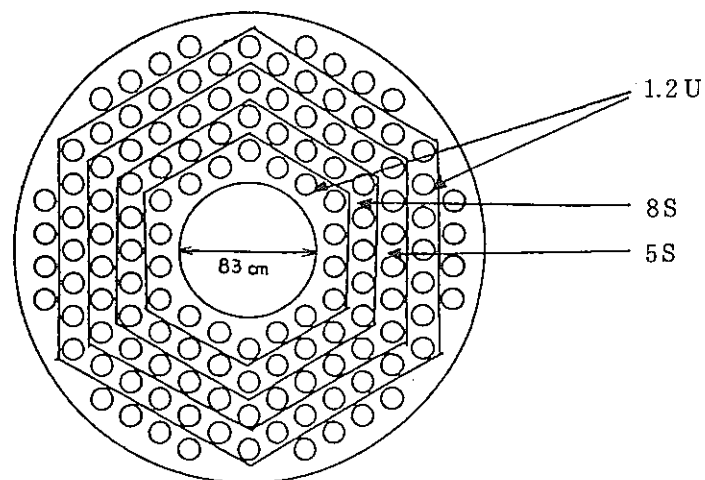


図13(3) ボイド領域直径83cm燃料配置 (1.2U/8S/5S/1.2U)

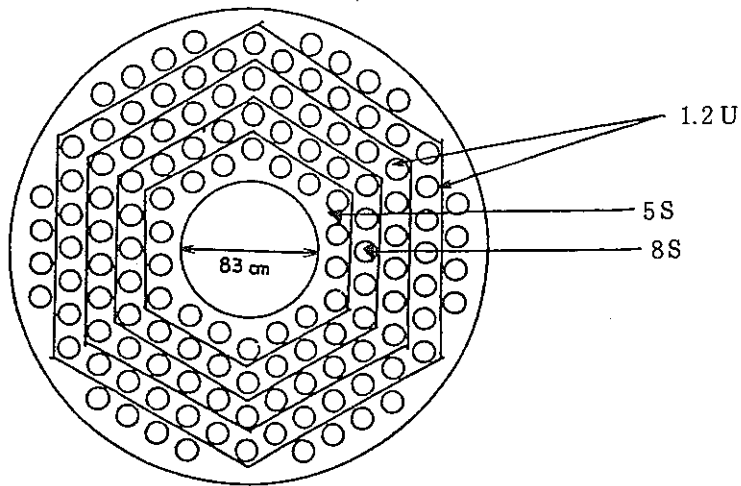


図13(4) ボイド領域直径83cm燃料配置 (5S/8S/1.2U/1.2U)

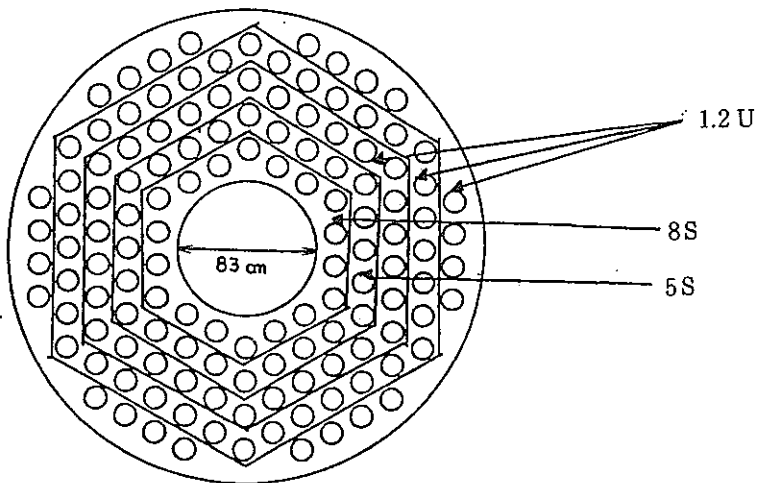


図13(5) ボイド領域直径83cm燃料配置 (8S/5S/1.2U/1.2U)

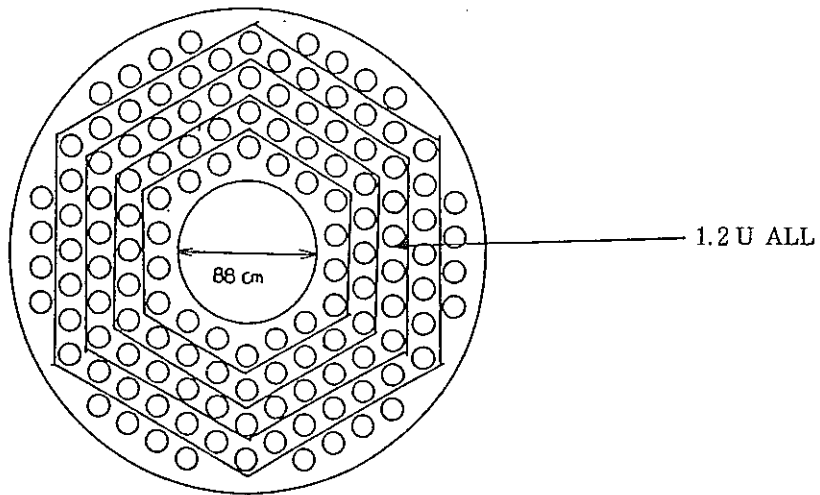


図14(1) ボイド領域直径88cm燃料配置 (1.2U ALL)

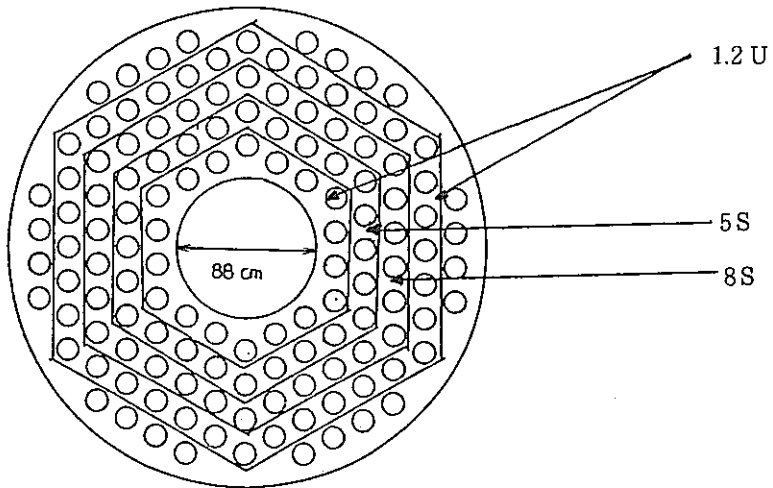


図14(2) ボイド領域直径88cm燃料配置 (1.2U/5S/8S/1.2U)

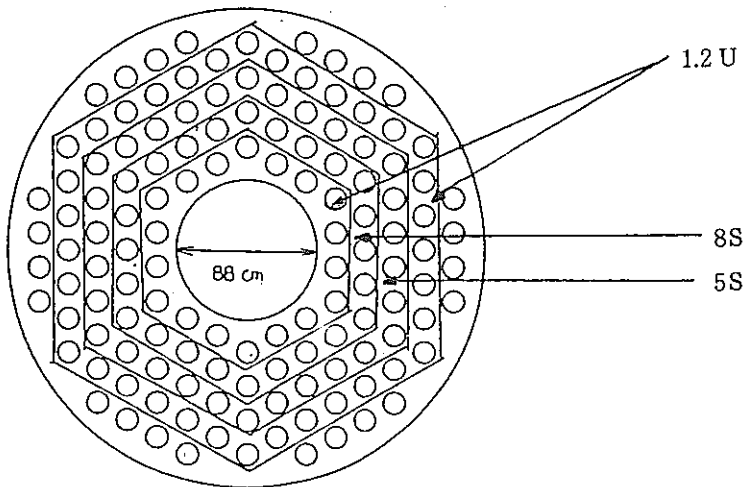


図14(3) ボイド領域直径88cm燃料配置 (1.2U/8S/5S/1.2U)

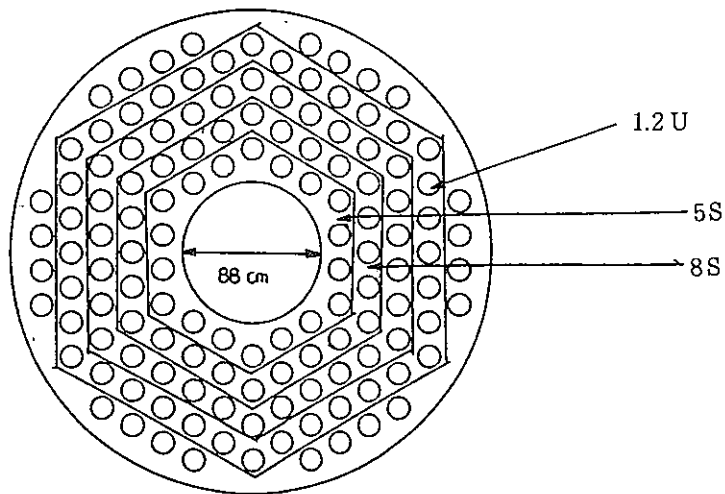


図14(4) ボイド領域直径88cm燃料配置 (5S/8S/1.2U/1.2U)

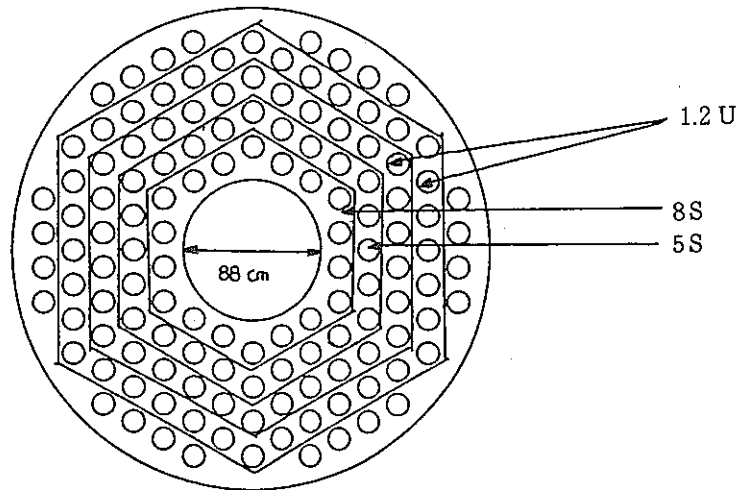


図14(5) ボイド領域直径88cm燃料配置 (8S/5S/1.2U/1.2U)

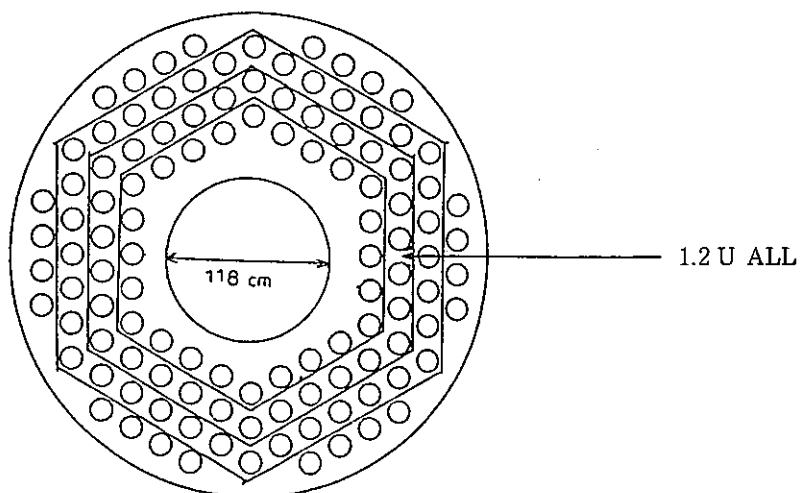


図15(1) ボイド領域直径118cm燃料配置 (1.2U ALL)

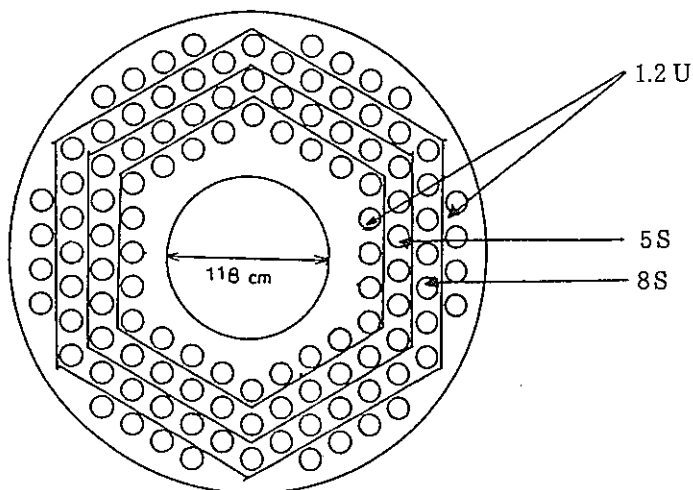


図15(2) ボイド領域直径118cm燃料配置 (1.2U/5S/8S/1.2U)

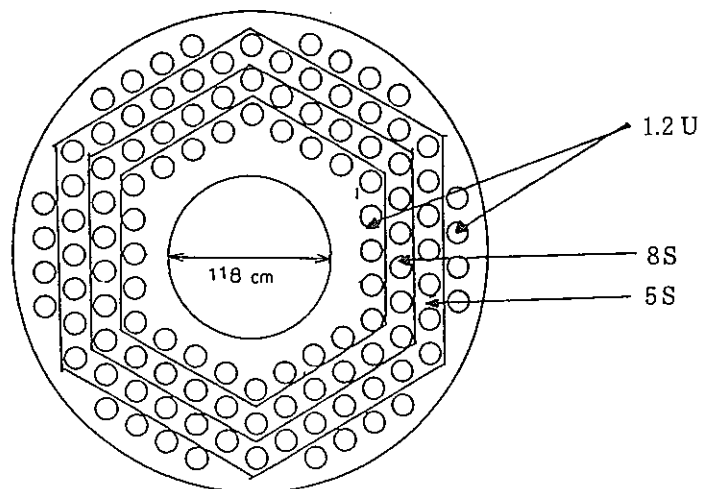


図15(3) ボイド領域直径118cm燃料配置 (1.2U/8S/5S/1.2U)

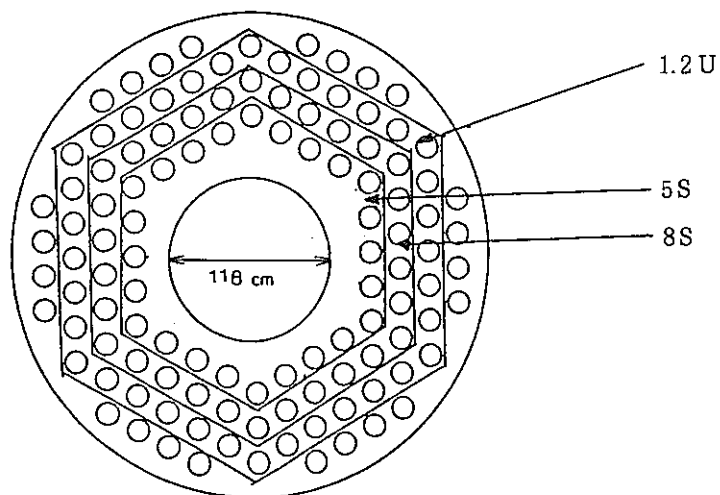


図15(4) ボイド領域直径118cm燃料配置 (5S/8S/1.2U/1.2U)

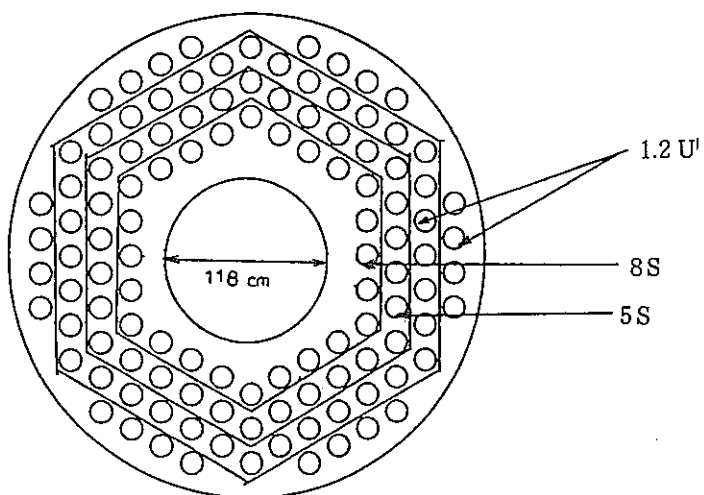
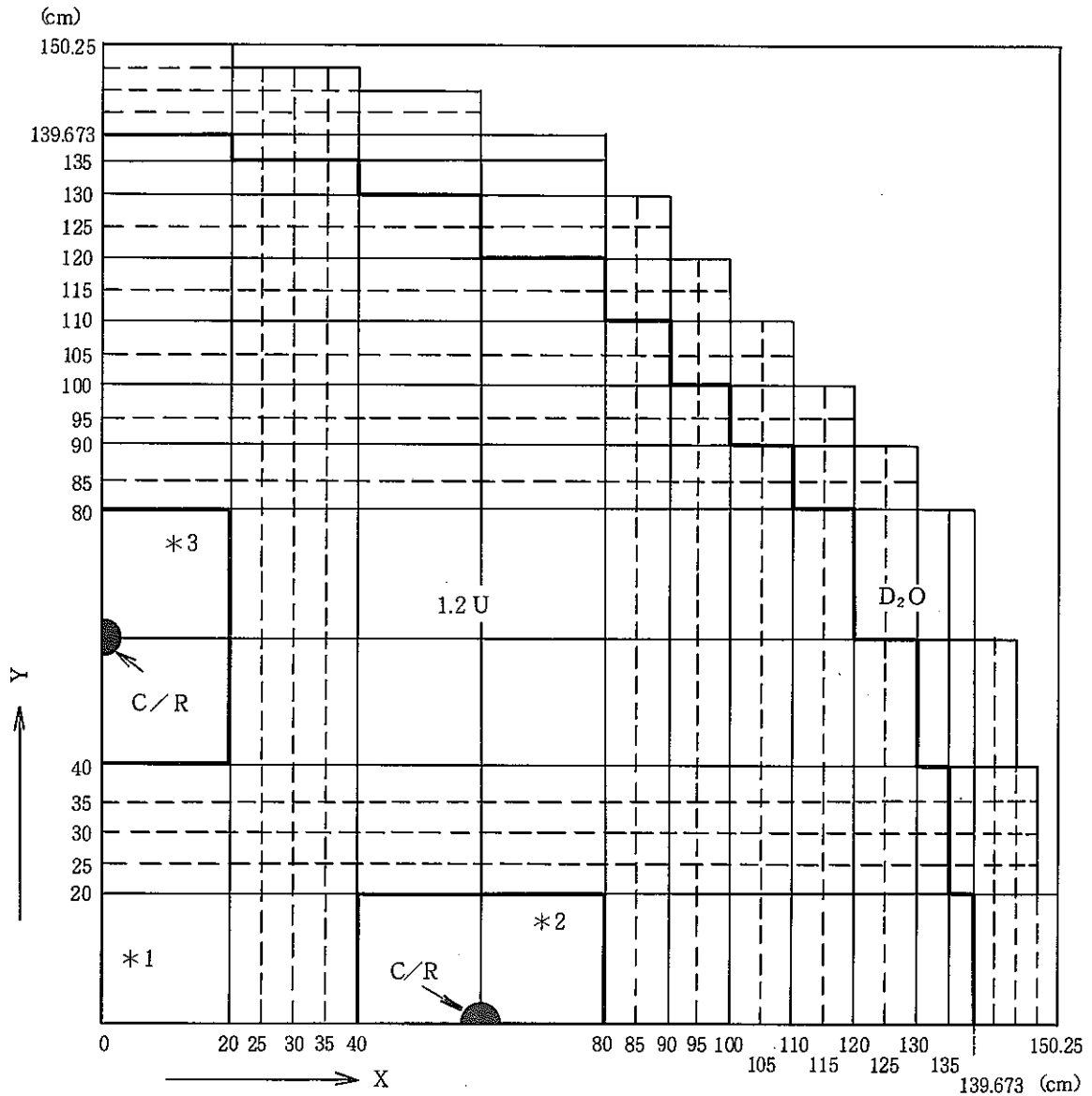


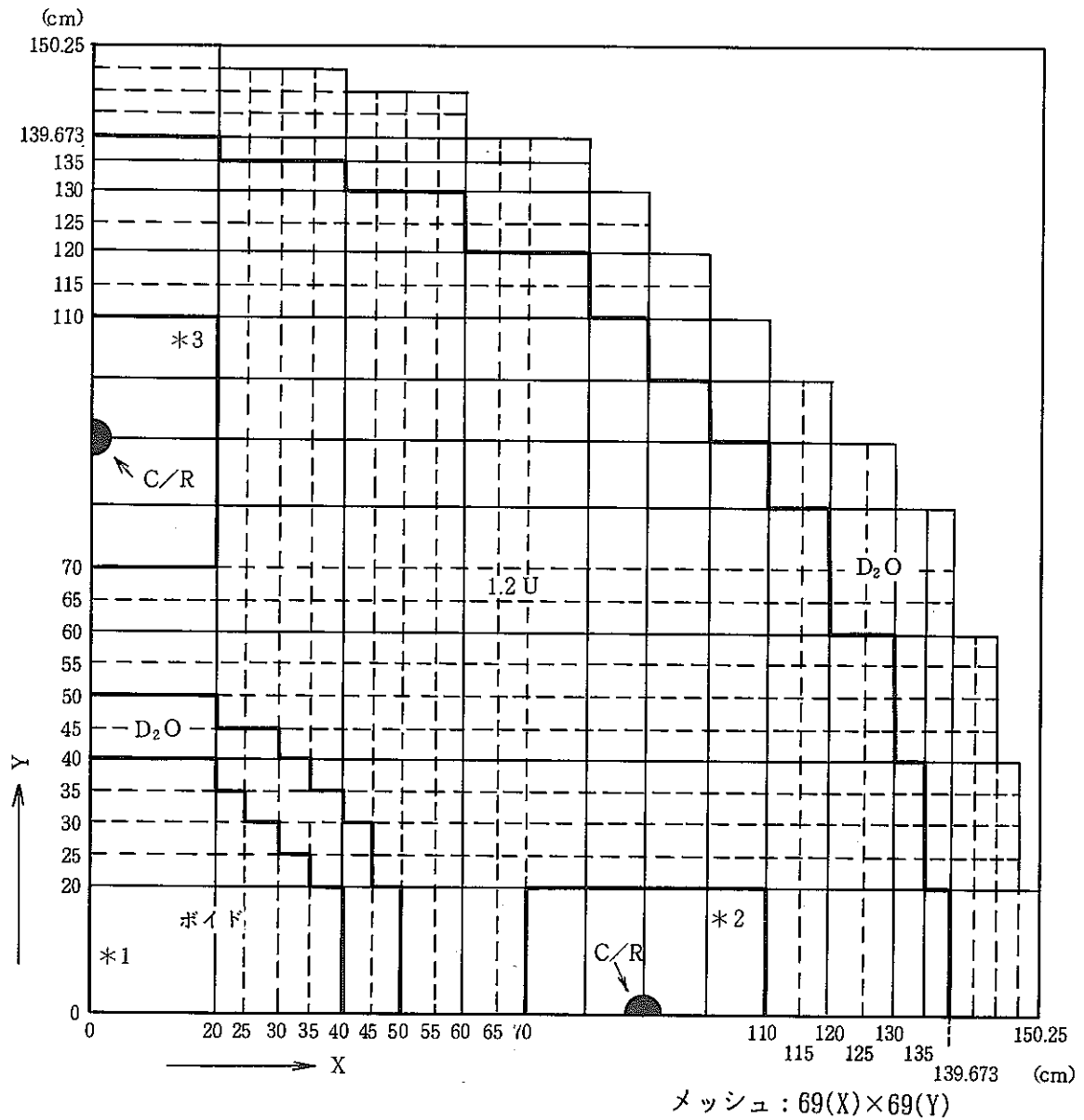
図15(5) ボイド領域直径118cm燃料配置 (8S/5S/1.2U/1.2U)



メッシュ : 83(X) × 83(Y)

- *1 この領域の詳細メッシュ分割は図19に示す。
- *2 " " 図20 "
- *3 " " 図21 "

図16 制御棒挿入炉心X-Y形状モデル図 (一様炉心)

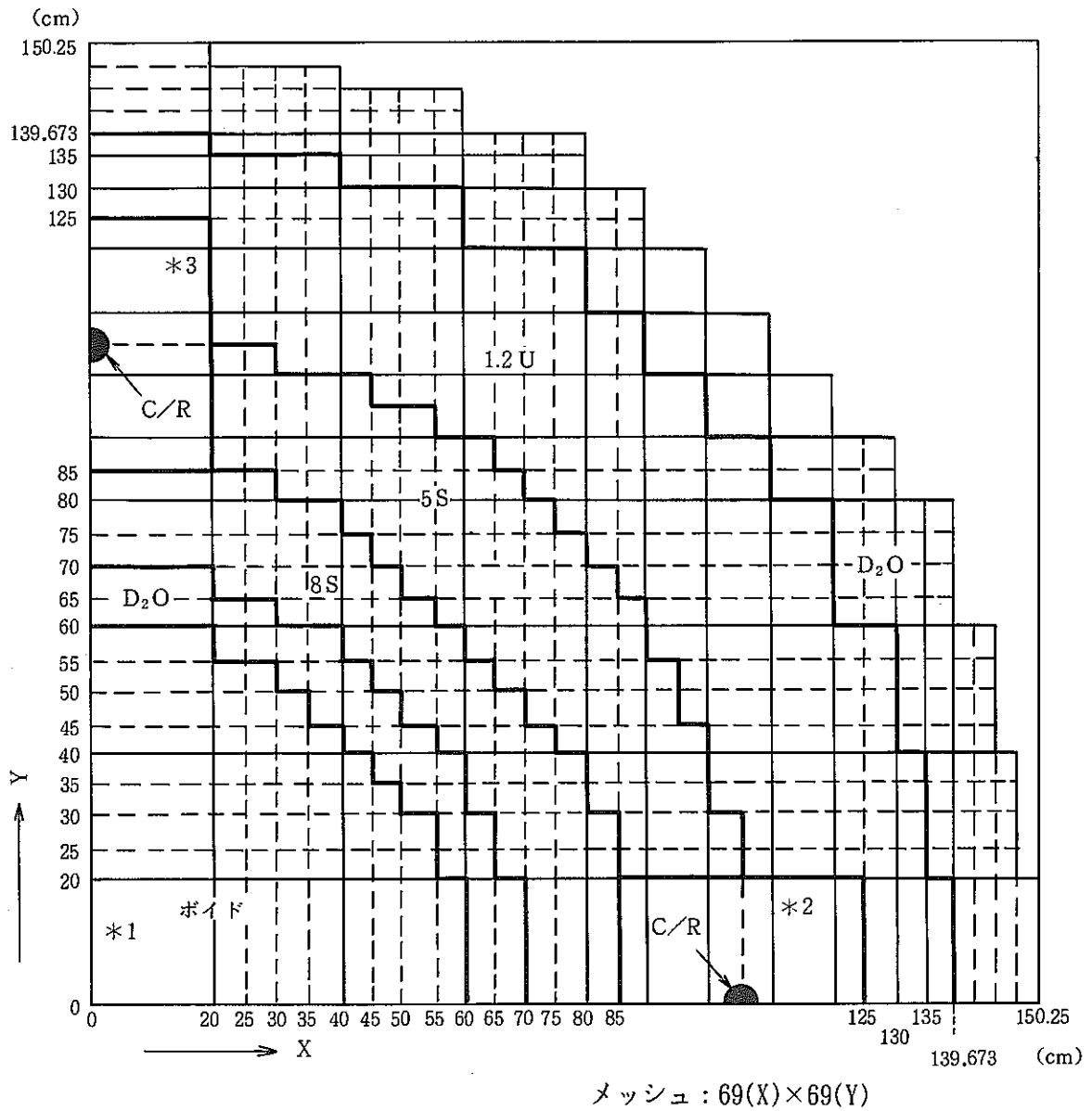


*1 この領域の詳細メッシュ分割は図19に示す。

*2 " " 図20 "

*3 " " 図21 "

図17 制御棒挿入炉心X-Y形状モデル図 (ボイド領域直径83cm)

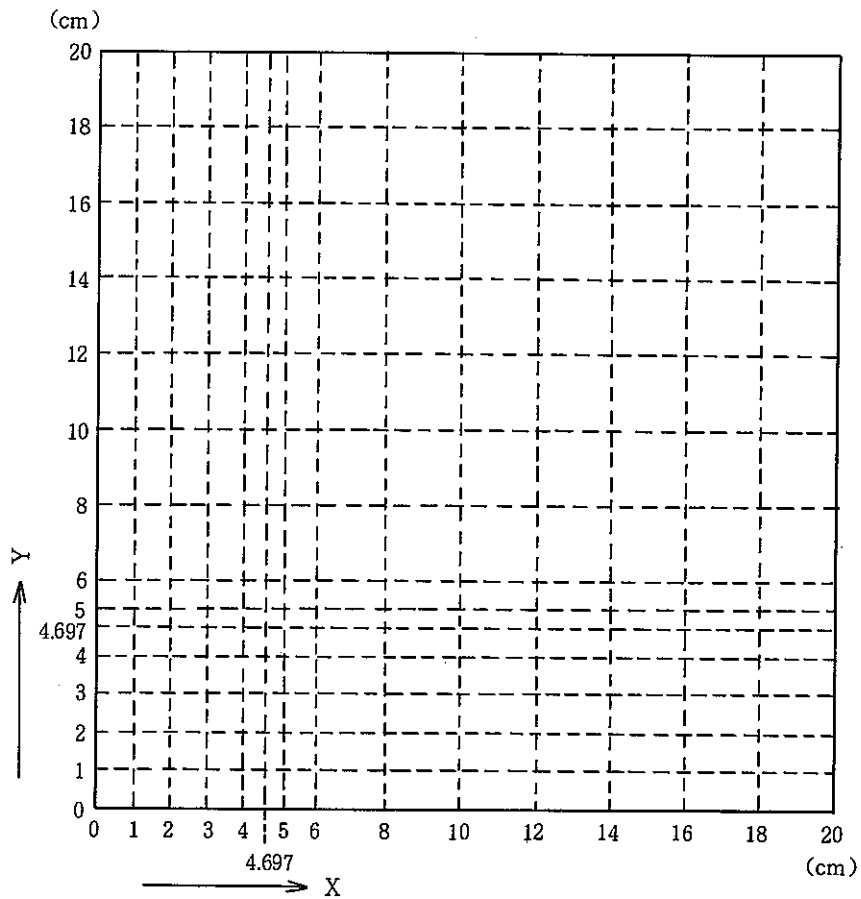


*1 この領域の詳細メッシュ分割は図19に示す。

*2 " " 図20 "

*3 " " 図21 "

図18 制御棒挿入炉心X-Y形状モデル図 (ボイド領域直径118cm)



メッシュ : 14(X) × 14(Y)

図19 炉心計算 0 ~ 20cm領域メッシュ分割図 (*1の領域)

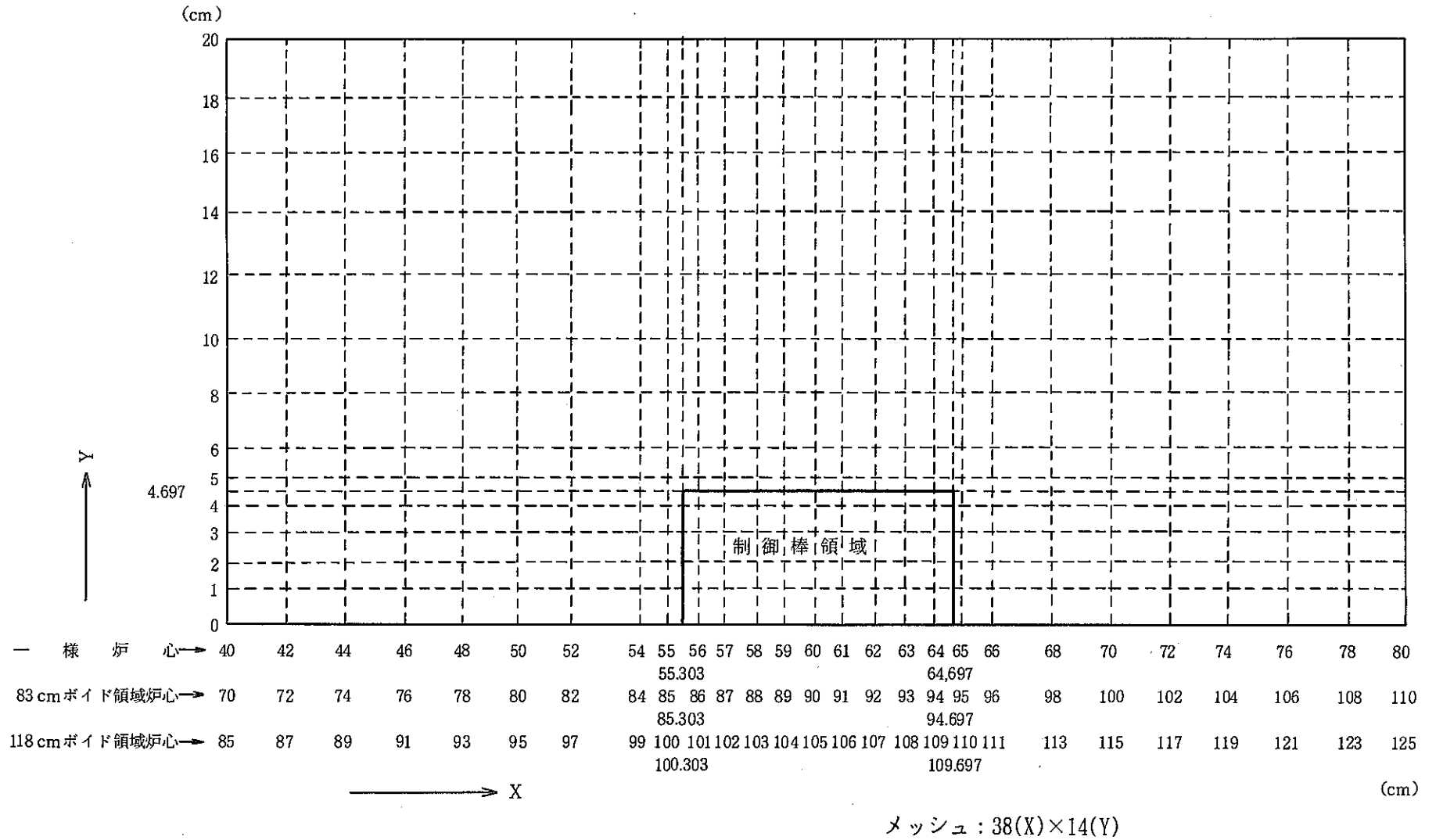


図20 制御棒挿入領域詳細メッシュ図 (*2の領域)

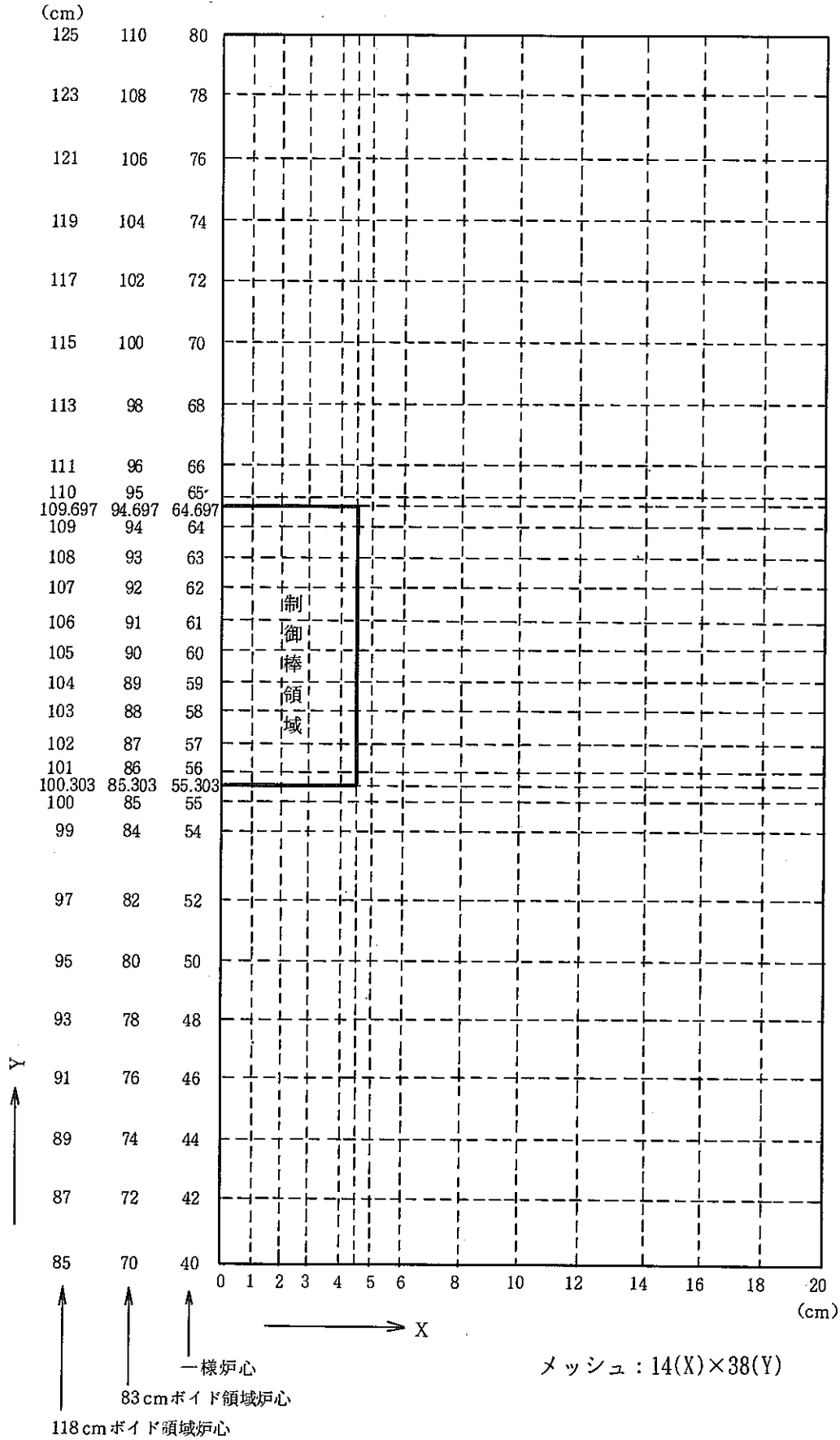
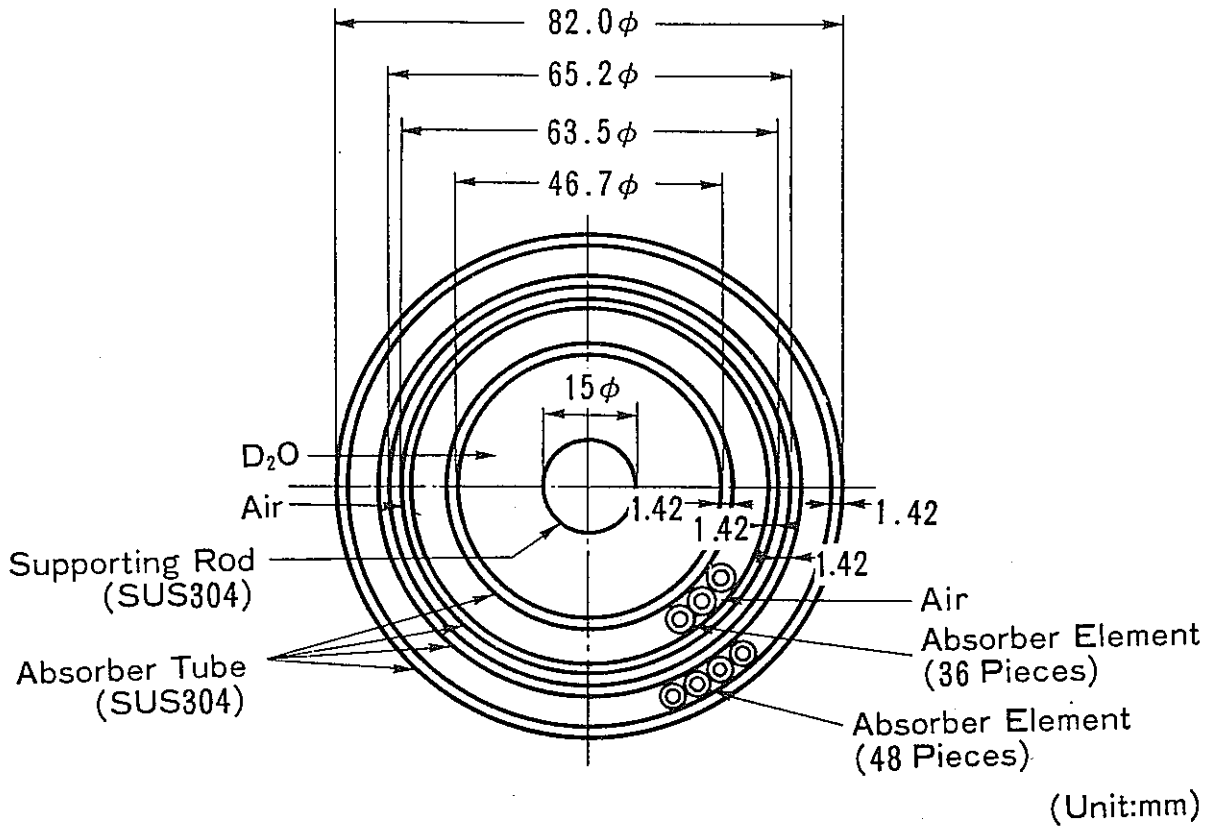


図21 制御棒挿入領域詳細メッシュ図 (*3の領域)



Absorber Element

Absorber	B ₄ C	34.8 ± 0.5g
Effective Length		1975mm
Density		70% TD

Clad (SUS 304)

Diameter		3.58 mm ID
Thickness		0.59 mm
Length		1983mm

Fig. 22 Cross Section of Control-rod

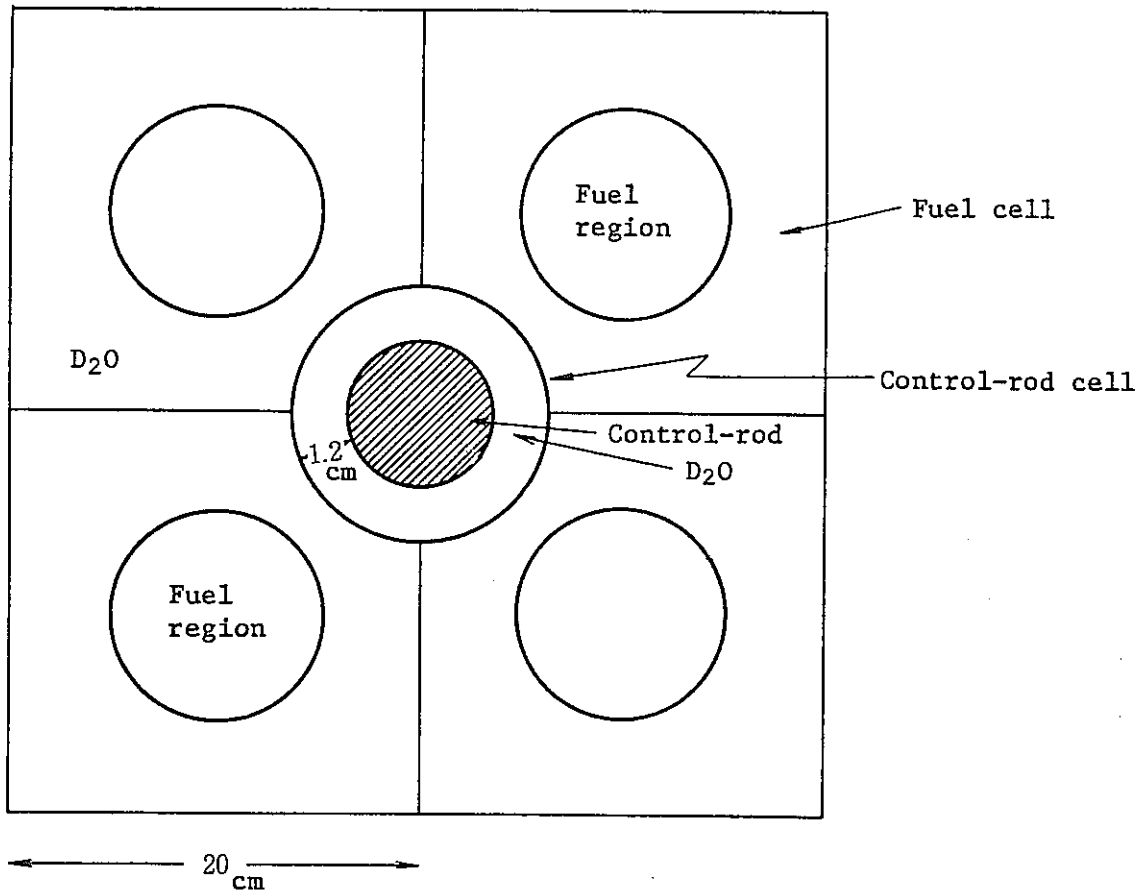


Fig. 23 Two-region multicell model used in the calculation of group-constants by WIMS

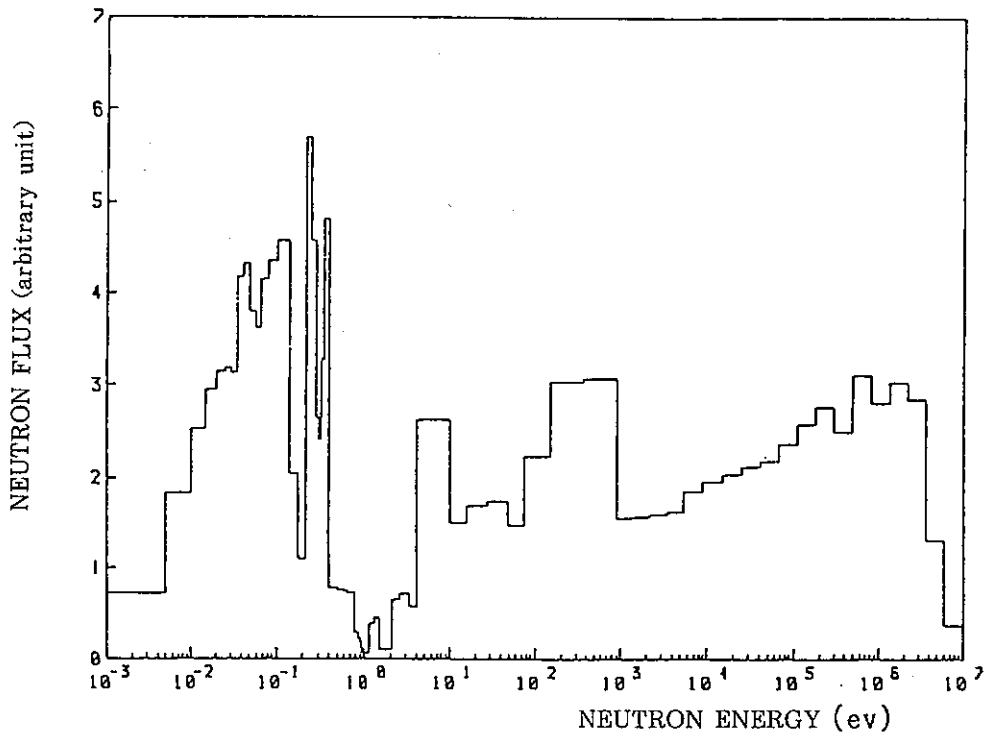


図27 20cm格子ピッチにおける中性子スペクトル
(圧力管内軽水)

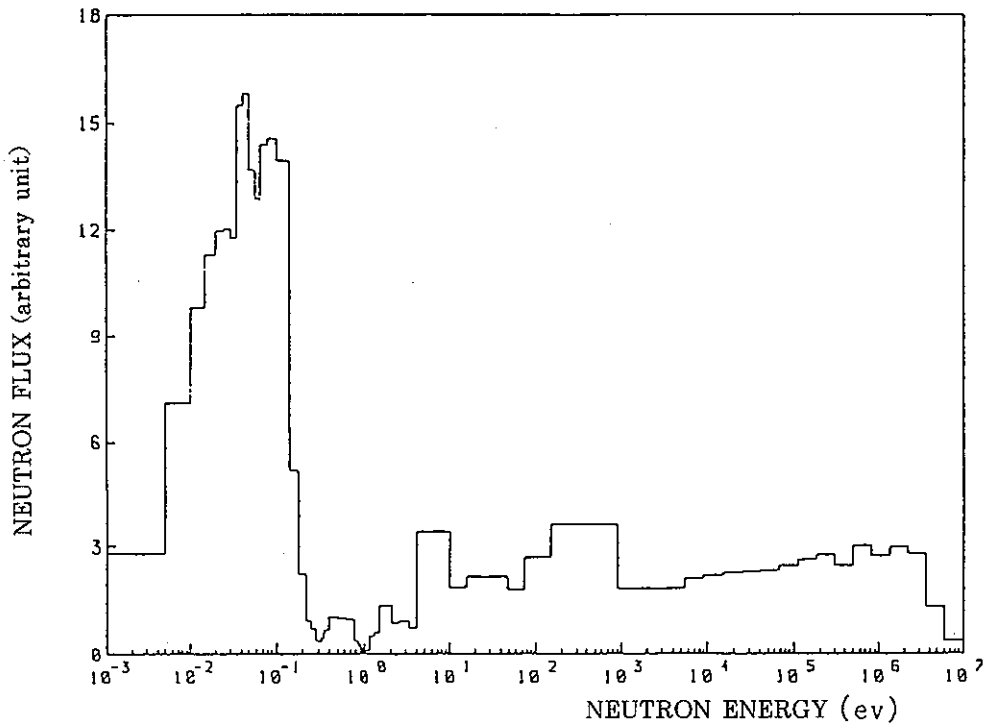


図28 30cm格子ピッチにおける中性子スペクトル
(圧力管内軽水)

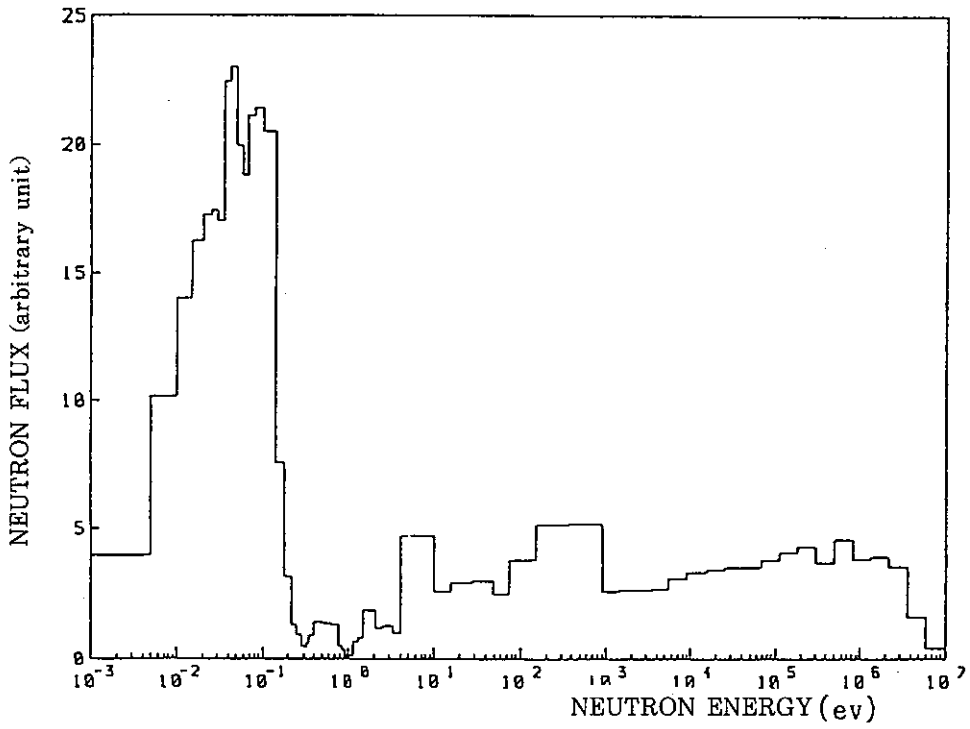


図29 35cm格子ピッチにおける中性子スペクトル
(圧力管内ボイド)

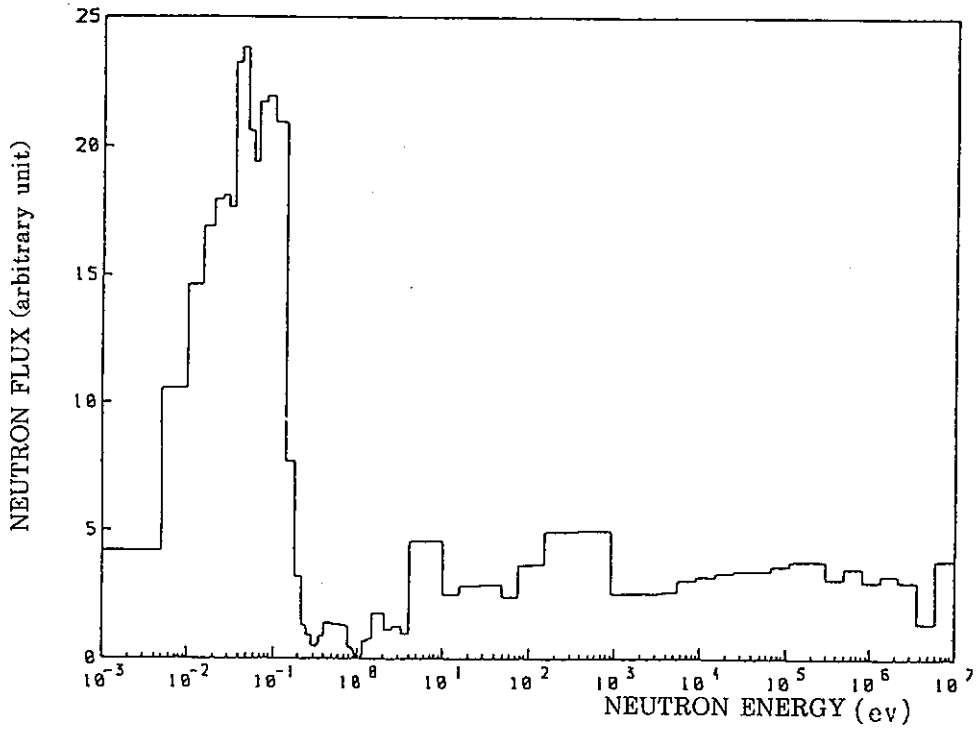


図30 35cm格子ピッチにおける中性子スペクトル
(圧力管内D₂O)

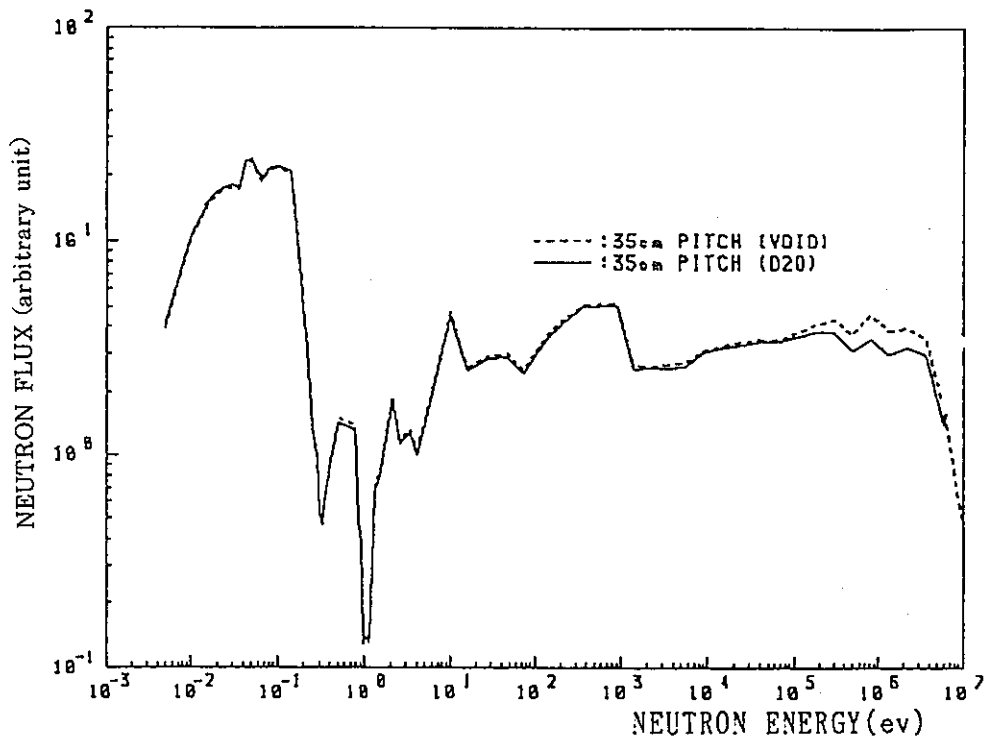


図31 35cm格子ピッチにおける中性子スペクトル比較
(圧力管内, ボイド及びD₂O)

重水水位: 200 cm
 冷却材物質: 軽水
 燃料: 1.2 w/o U

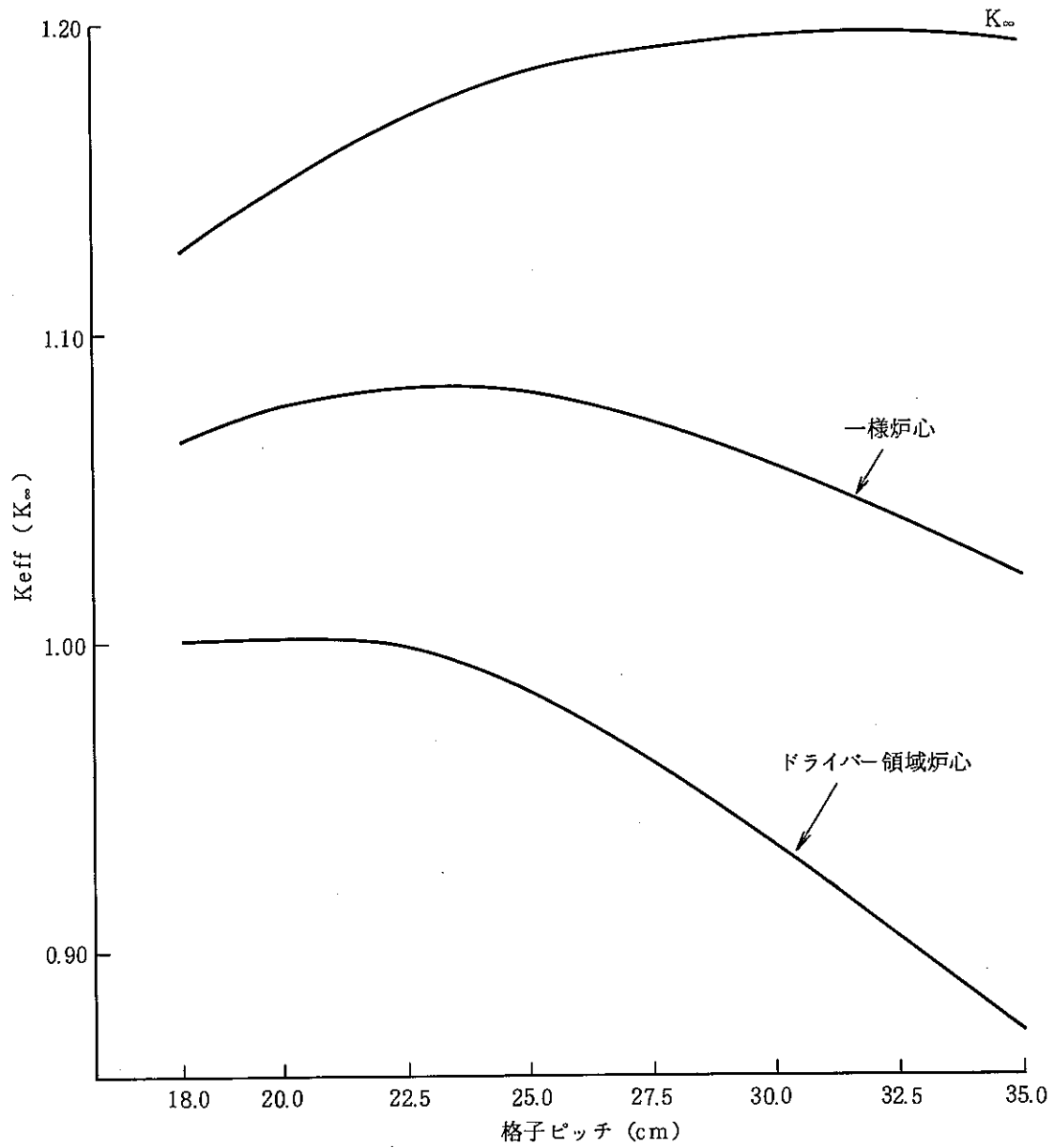


図32 各炉心における k_{eff} (k_{∞}) の格子ピッチ依存性の比較

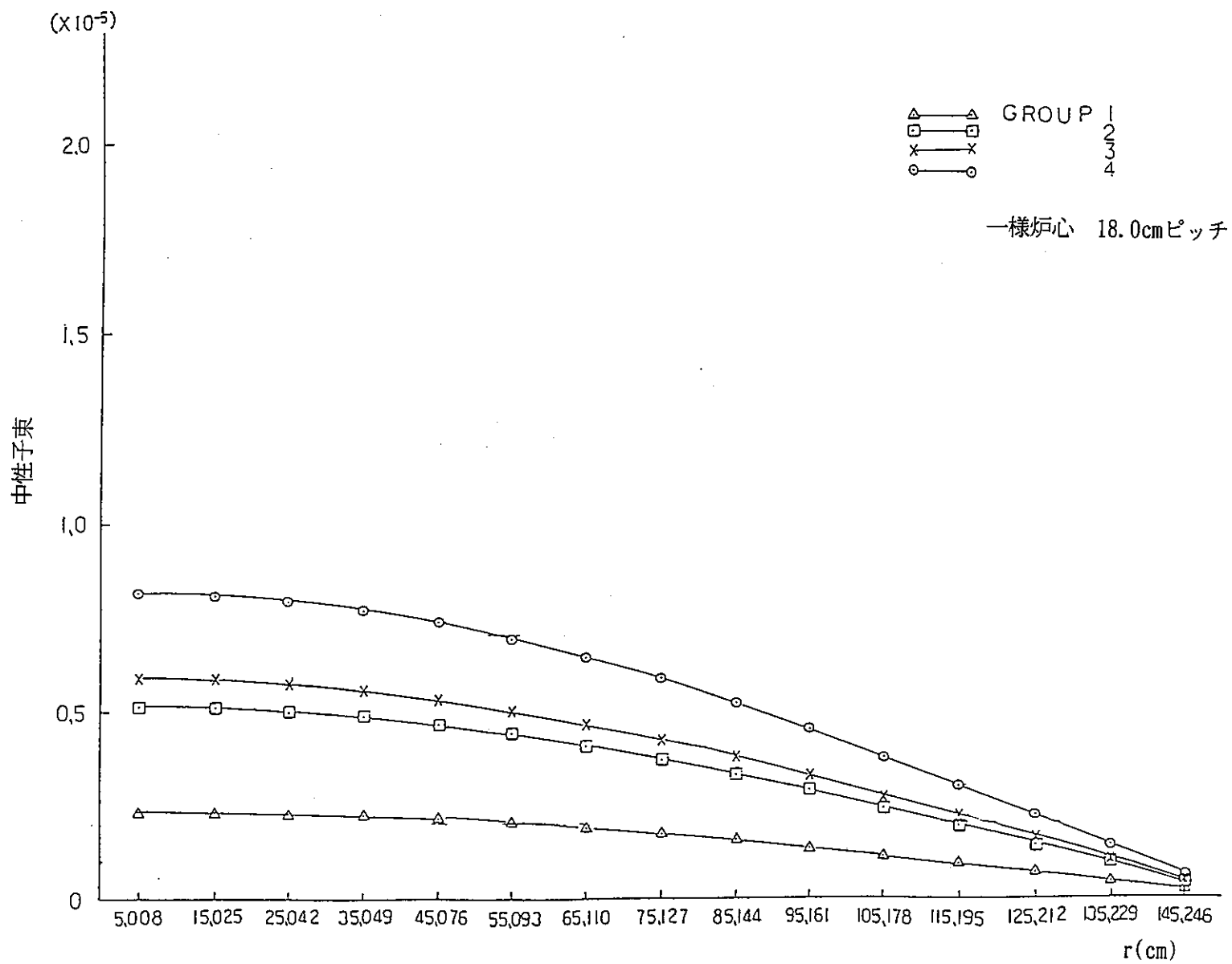


図33 炉心内中性子束分布 (1)

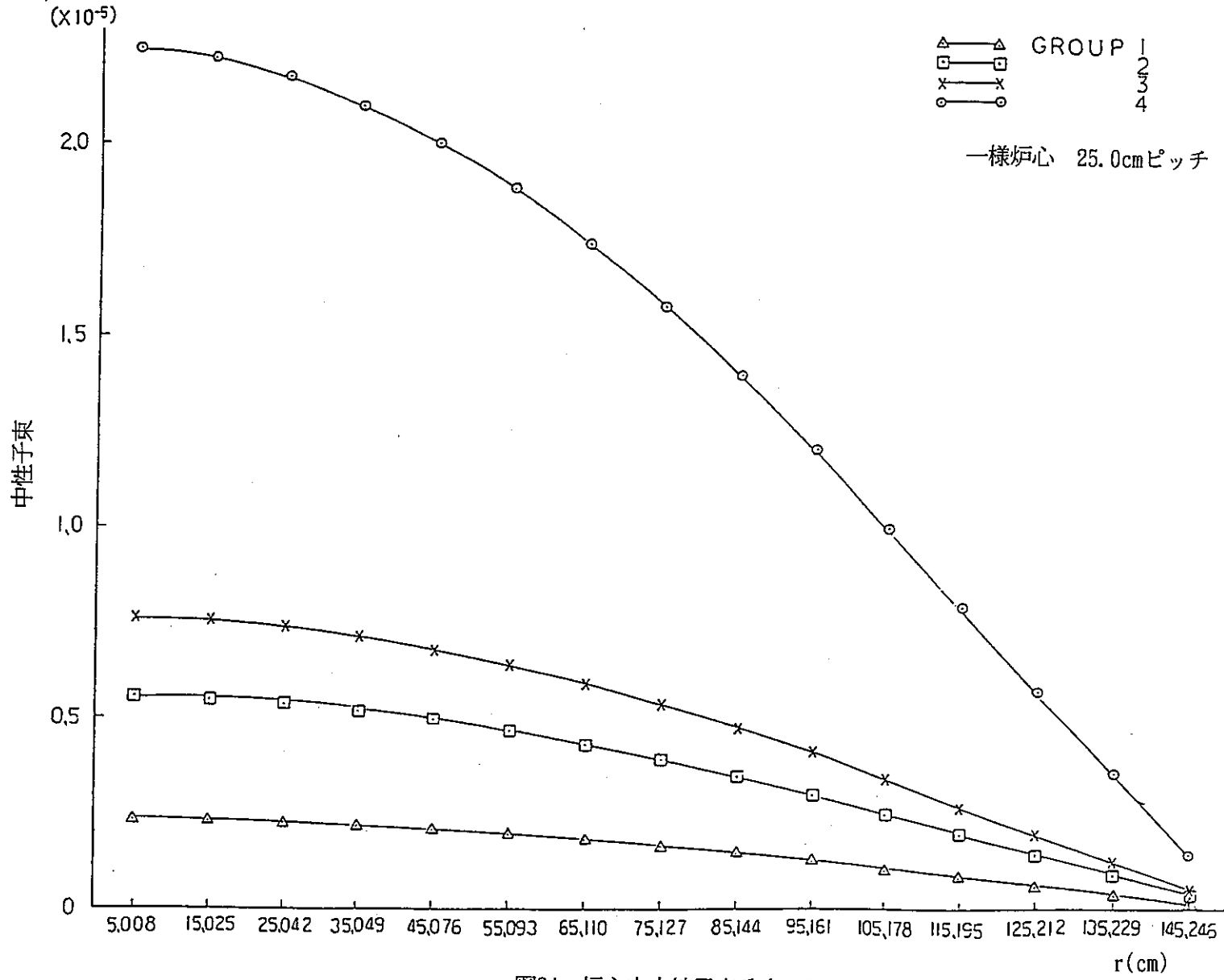


図34 炉心内中性子束分布 (2)

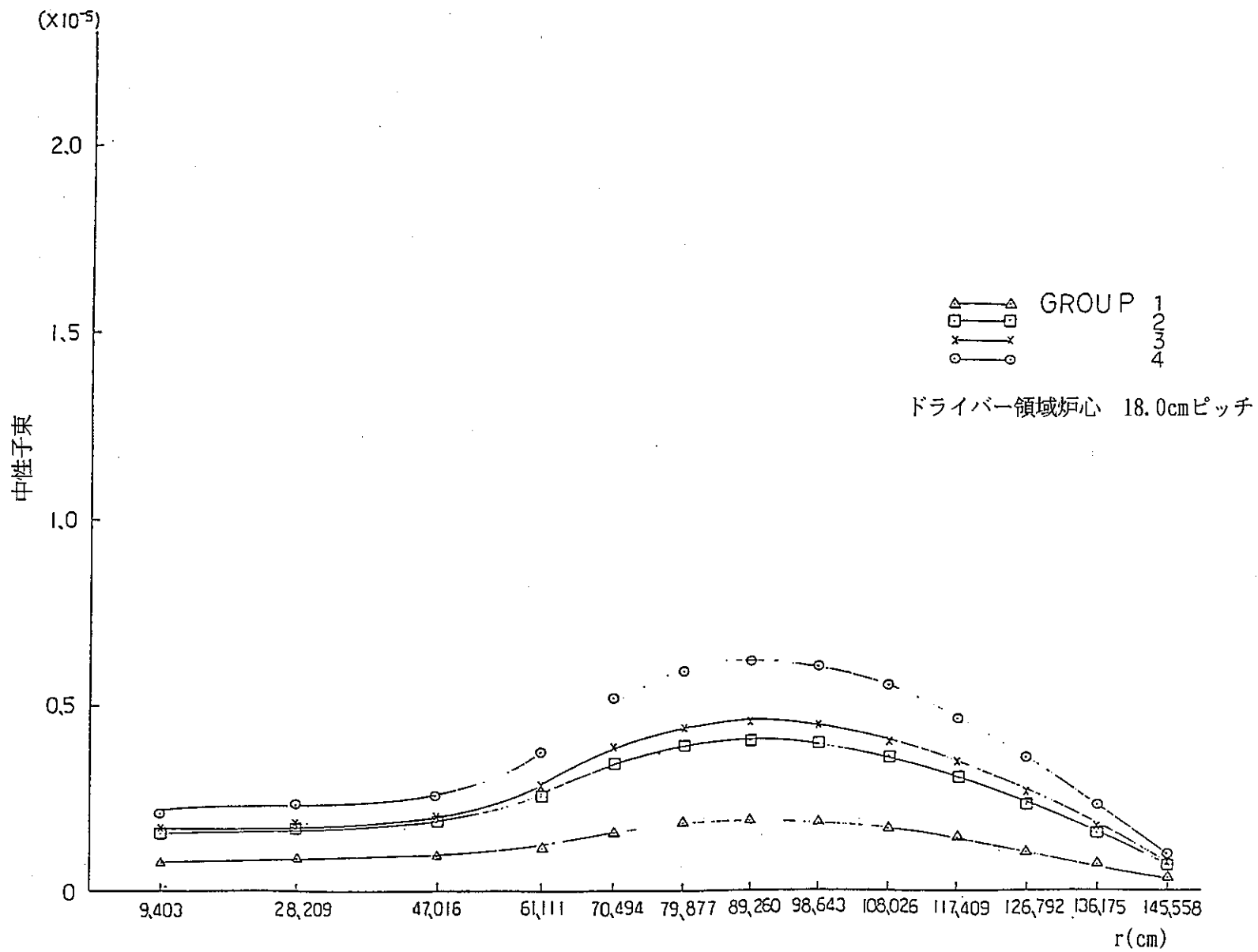


図35 炉心内中性子束分布 (3)

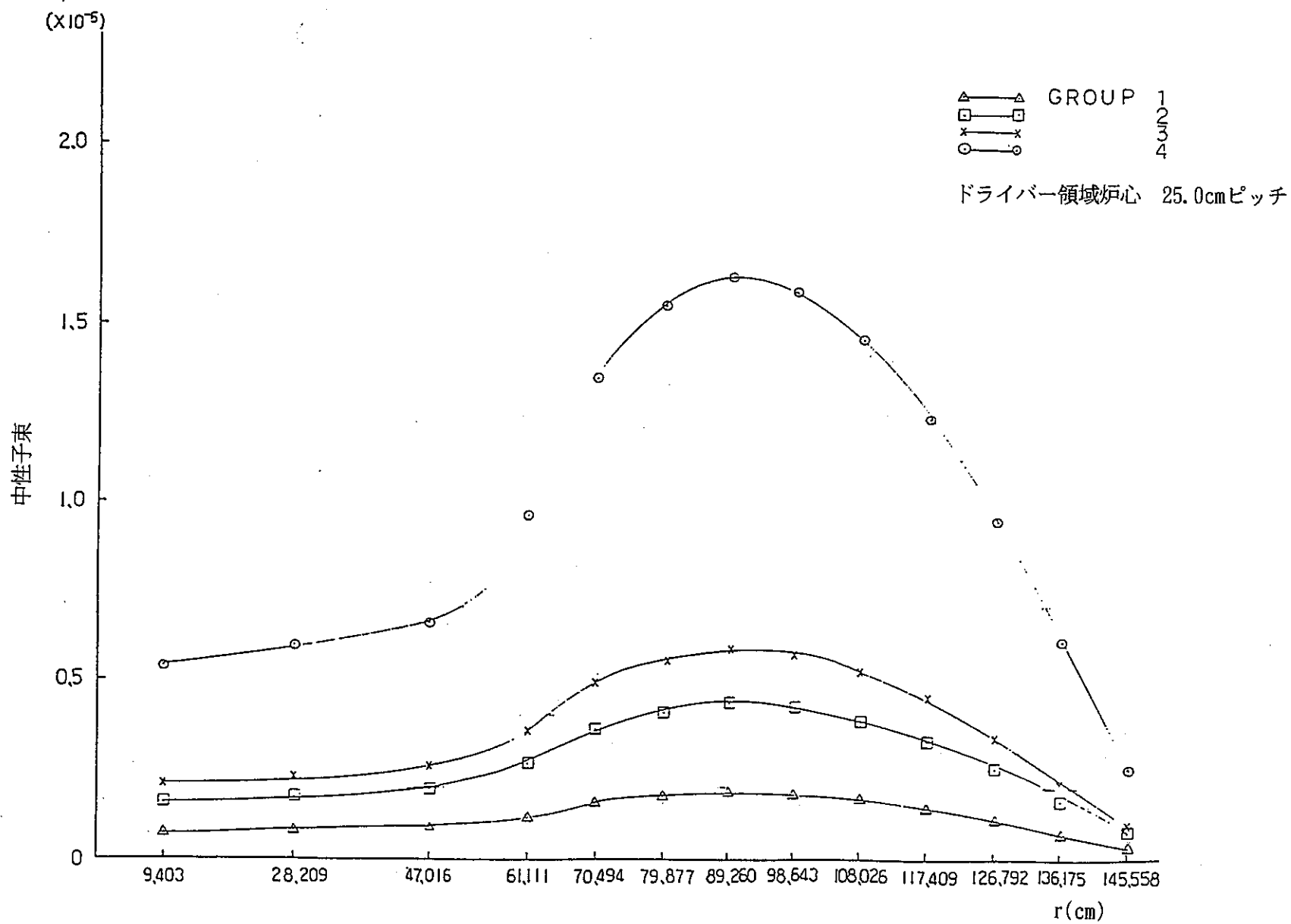


図36 炉心内中性子束分布 (4)

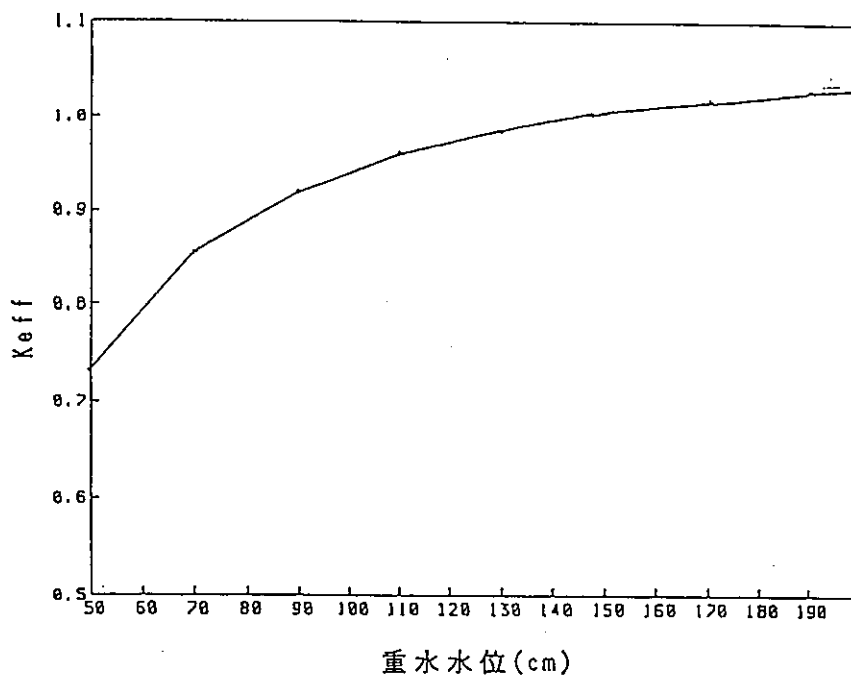


図37 ボイド領域直径83cmの重水水位による k_{eff} 変化
(1.2U一様炉心)

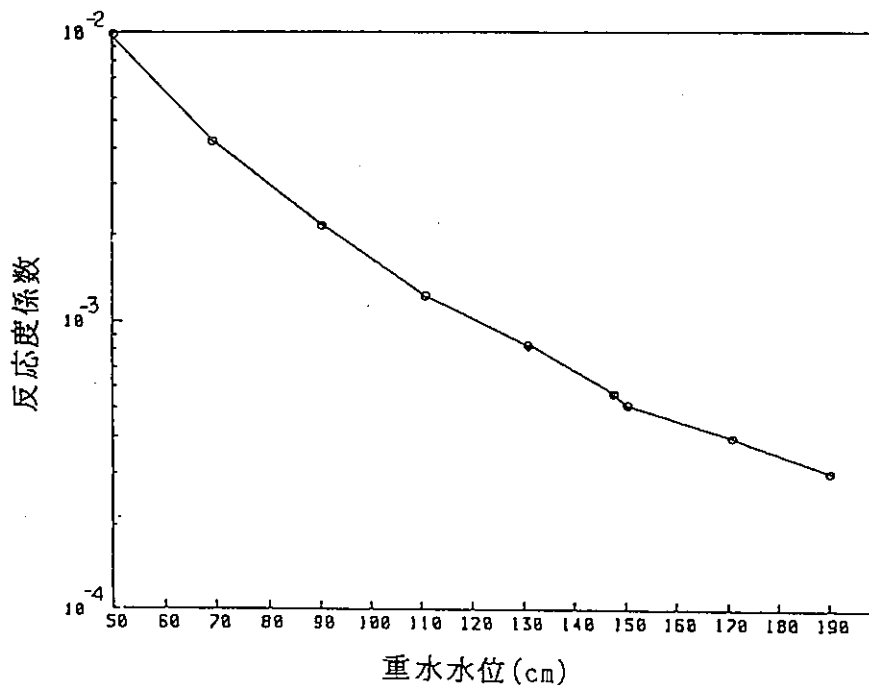


図38 ボイド領域直径83cmの重水水位反応度係数
(1.2U一様炉心)

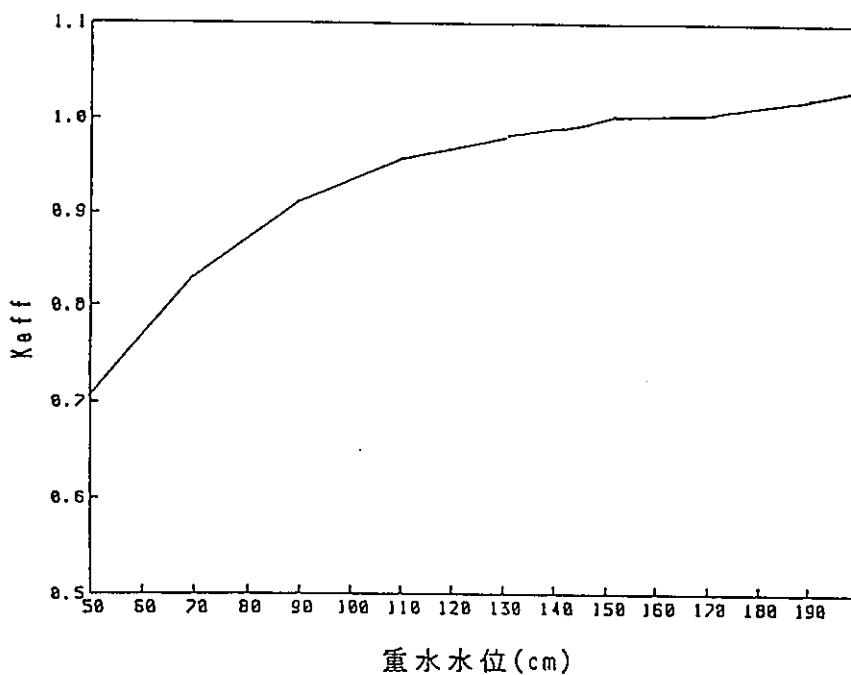


図39 ボイド領域直径88cmの重水水位による k_{eff} 変化
(1.2U一様炉心)

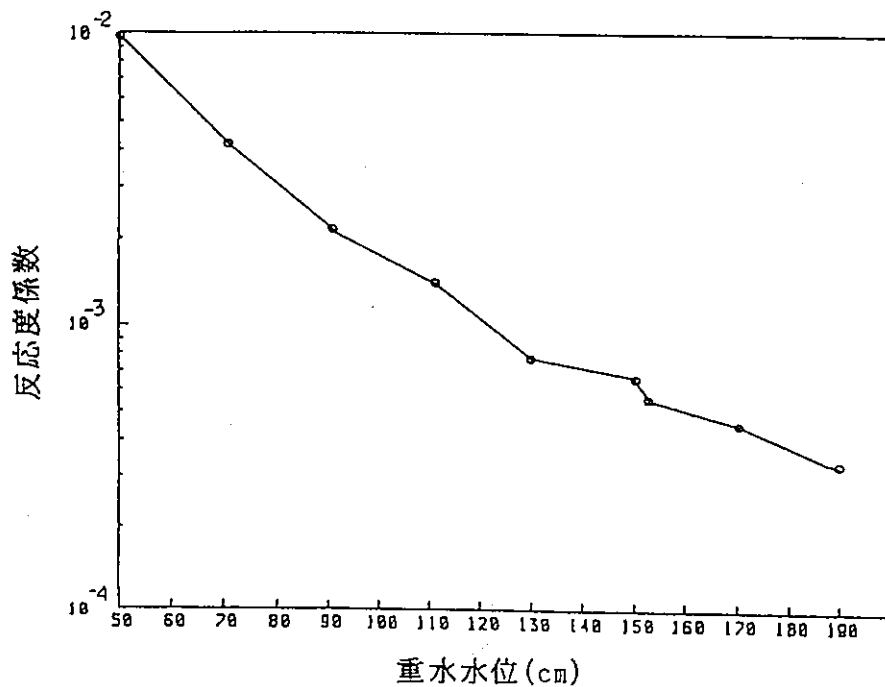


図40 ボイド領域直径88cmの重水水位反応度係数
(1.2U一様炉心)

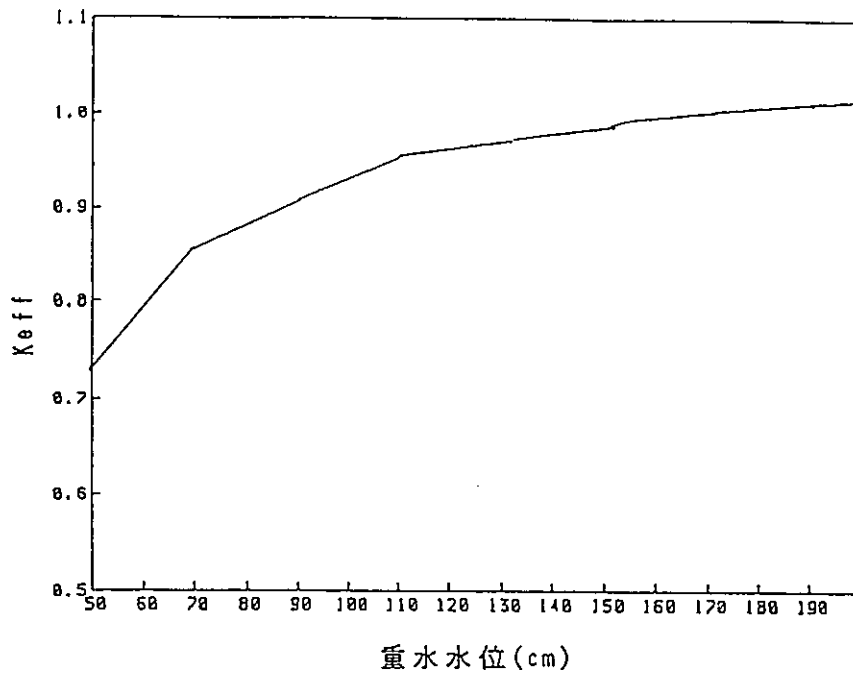


図41 ボイド領域直径118cmの重水水位による k_{eff} 変化
(8S/5S/1.2U/1.2U装荷炉心)

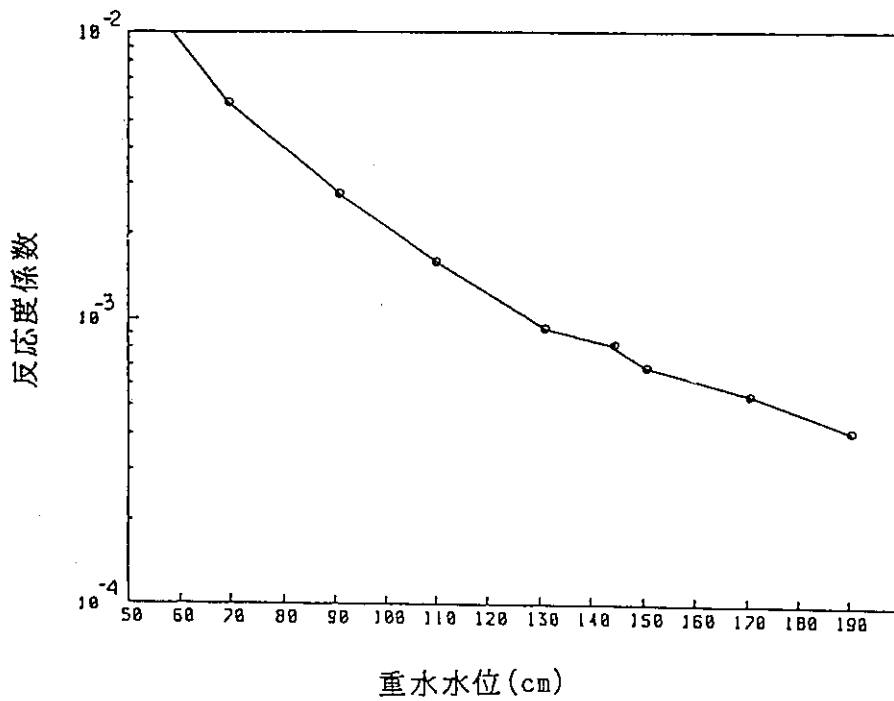


図42 ボイド領域直径118cmの重水水位反応度係数
(8S/5S/1.2U/1.2U装荷炉心)

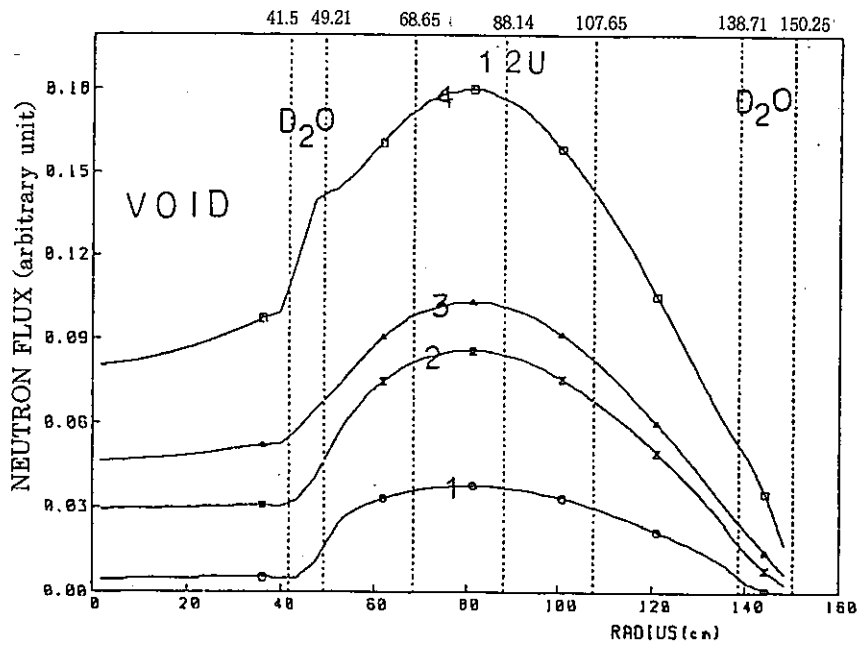


図43 (1) ボイド領域直径83cmの中性子束分布 (1.2U ALL)

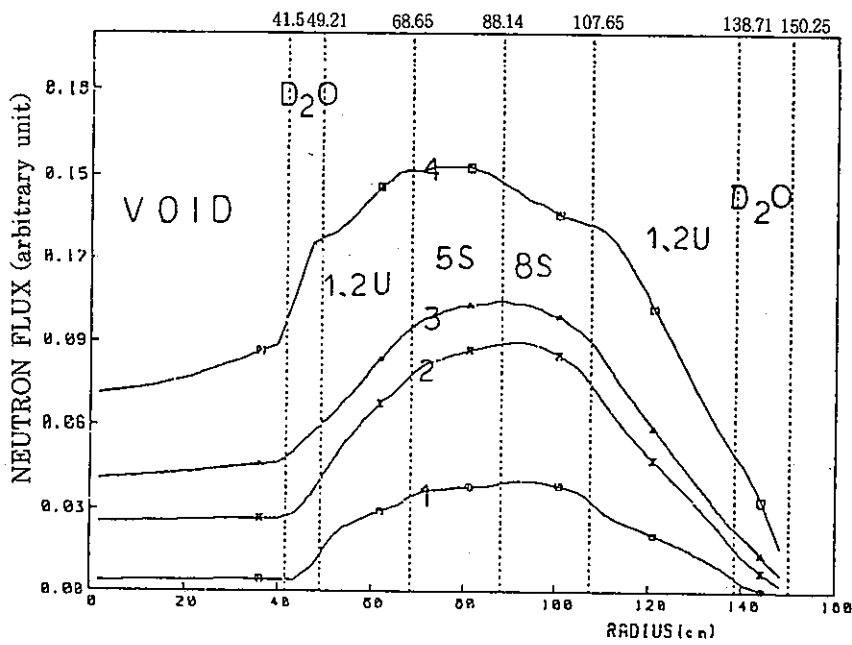


図43 (2) ボイド領域直径83cmの中性子束分布 (1.2U/5S/8S/1.2U)

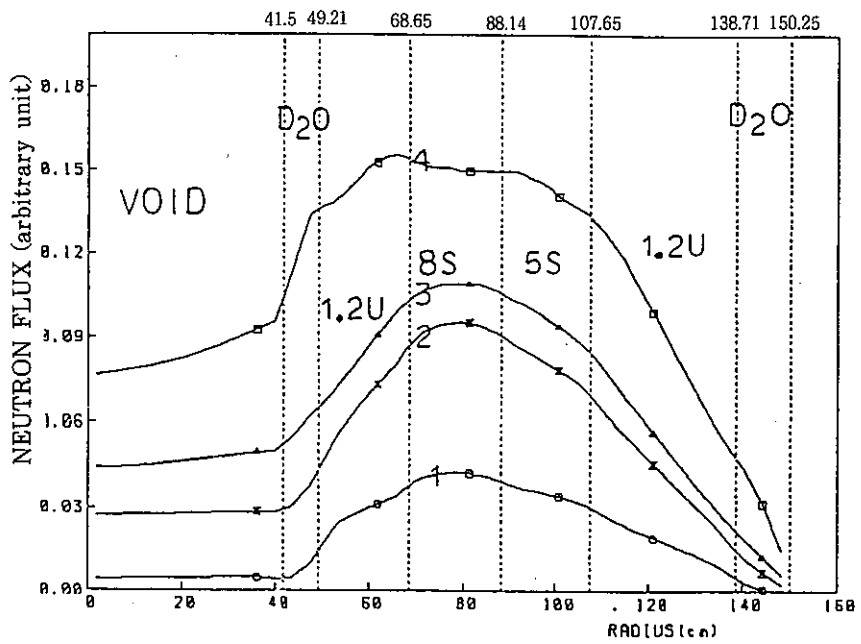


図43 (3) ボイド領域直径83cmの中性子束分布 (1.2U/8S/5S/1.2U)

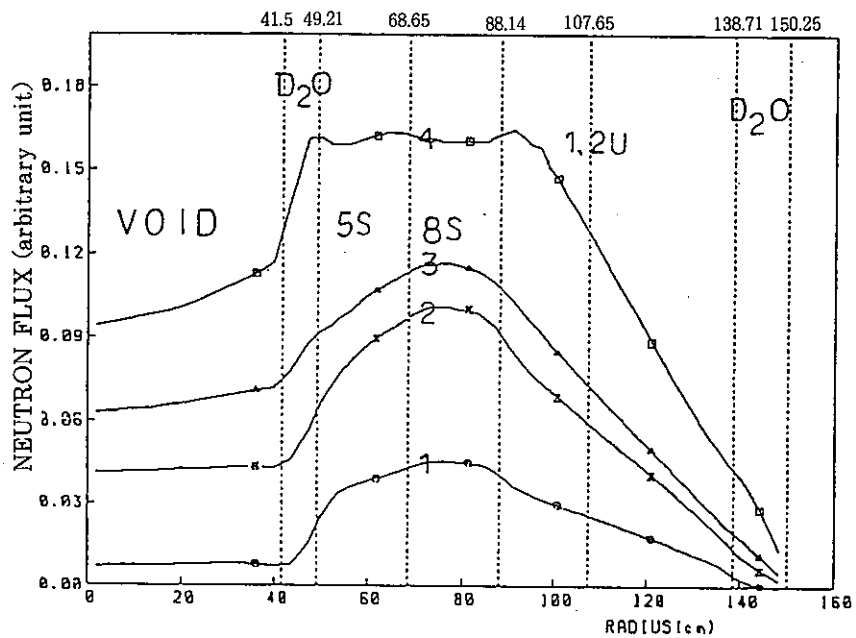


図43 (4) ボイド領域直径83cmの中性子束分布 (5S/8S/1.2U/1.2U)

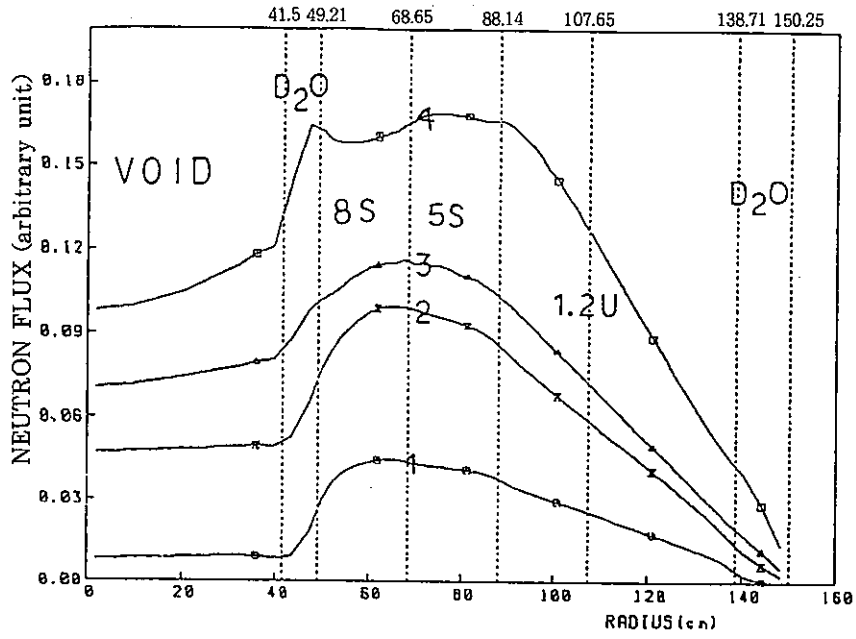


図43 (5) ボイド領域直径83cmの中性子束分布 (8S/5S/1.2U/1.2U)

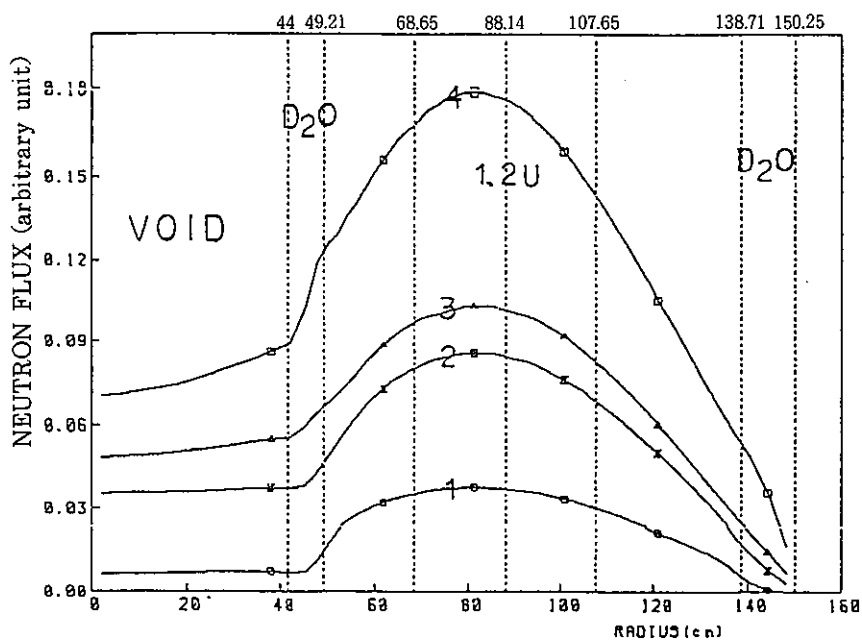


図44 (1) ボイド領域直径88cmの中性子束分布 (1.2U ALL)

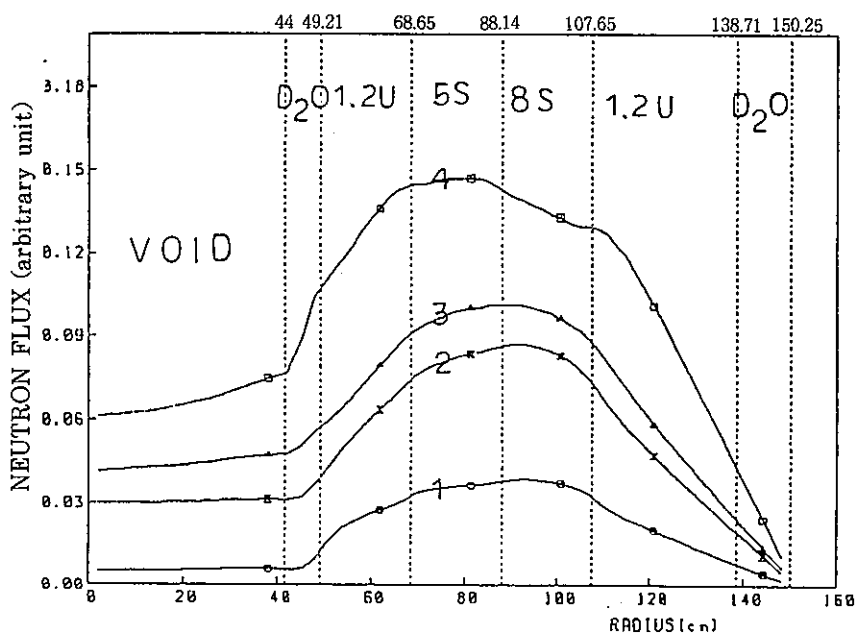


図44 (2) ボイド領域直径88cmの中性子束分布 (1.2U/5S/8S/1.2U)

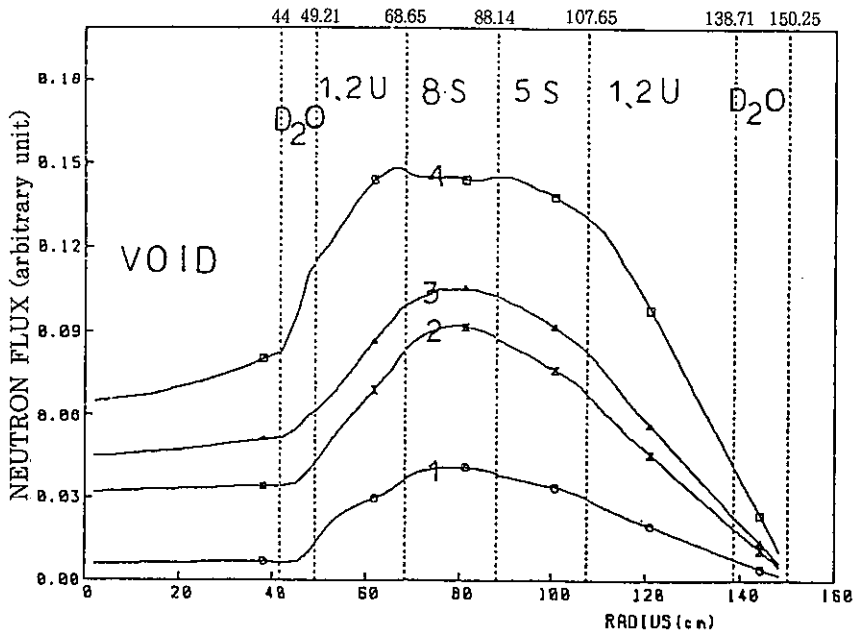


図44 (3) ボイド領域直径88cmの中性子束分布 (1.2U/8S/5S/1.2U)

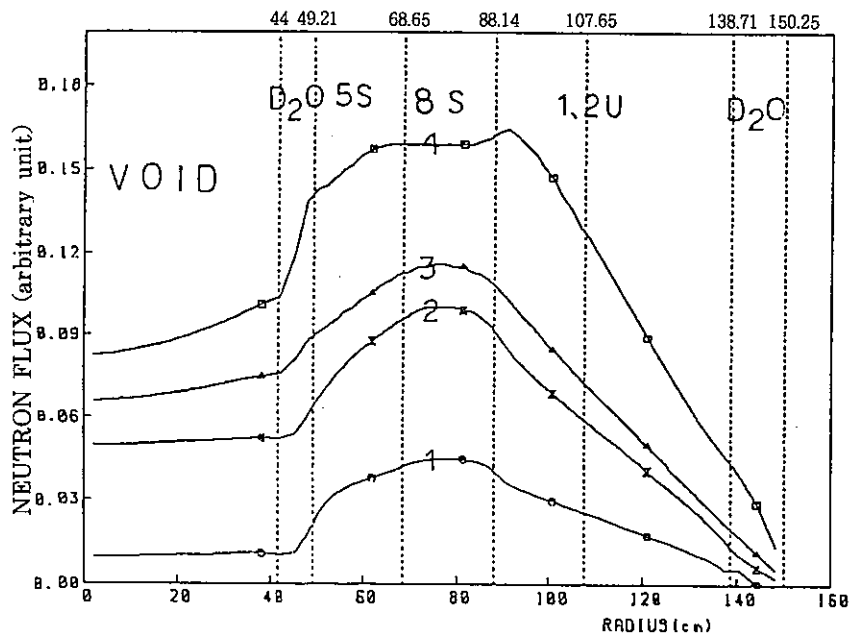


図44 (4) ボイド領域直径88cmの中性子束分布 (5S/8S/1.2U/1.2U)

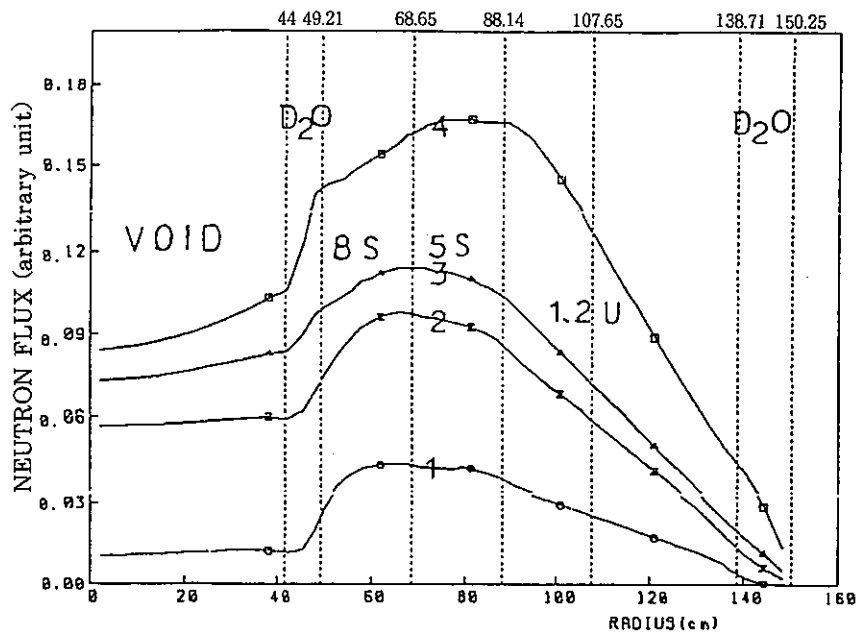


図44 (5) ボイド領域直径88cmの中性子束分布 (8S/5S/1.2U/1.2U)

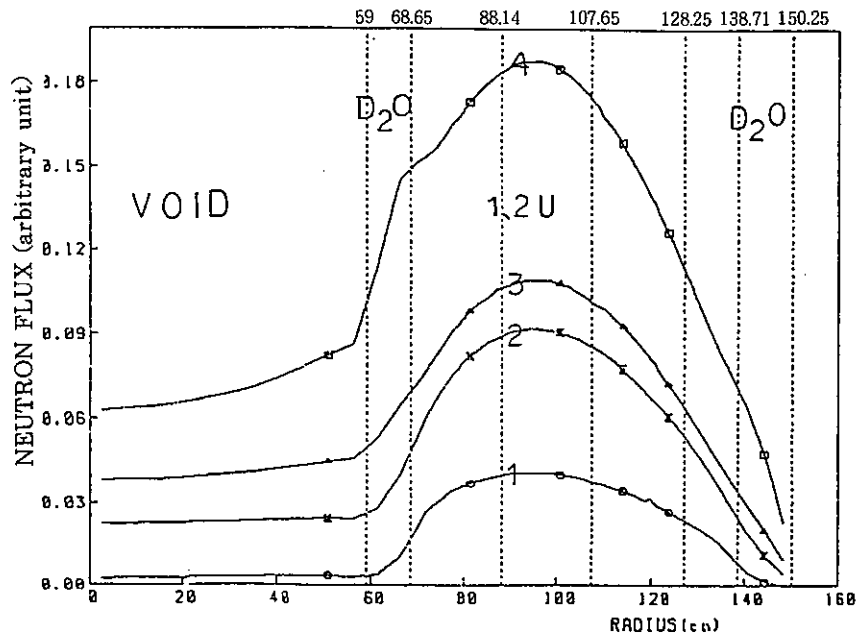


図45 (1) ボイド領域直径118cmの中性子束分布 (1.2U ALL)

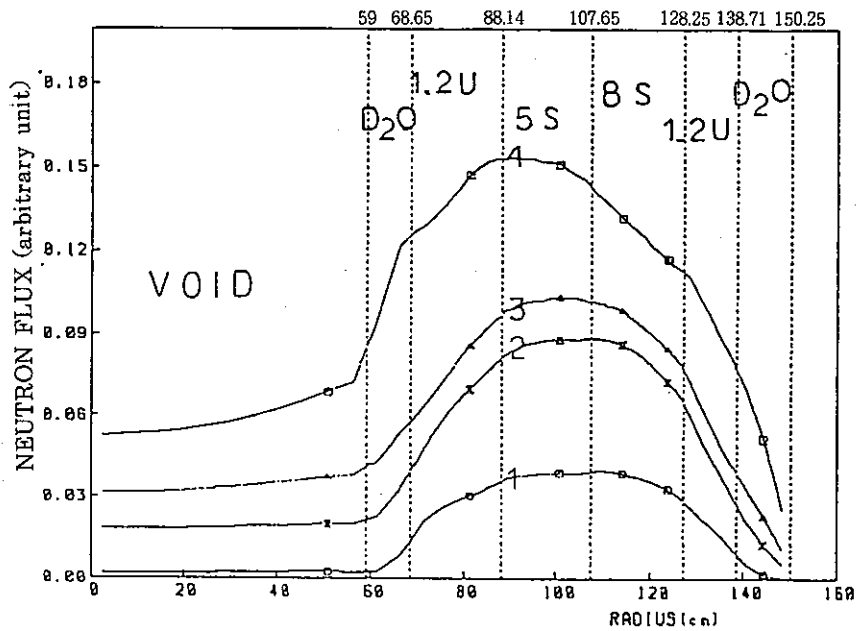


図45 (2) ボイド領域直径118cmの中性子束分布 (1.2U/5S/8S/1.2U)

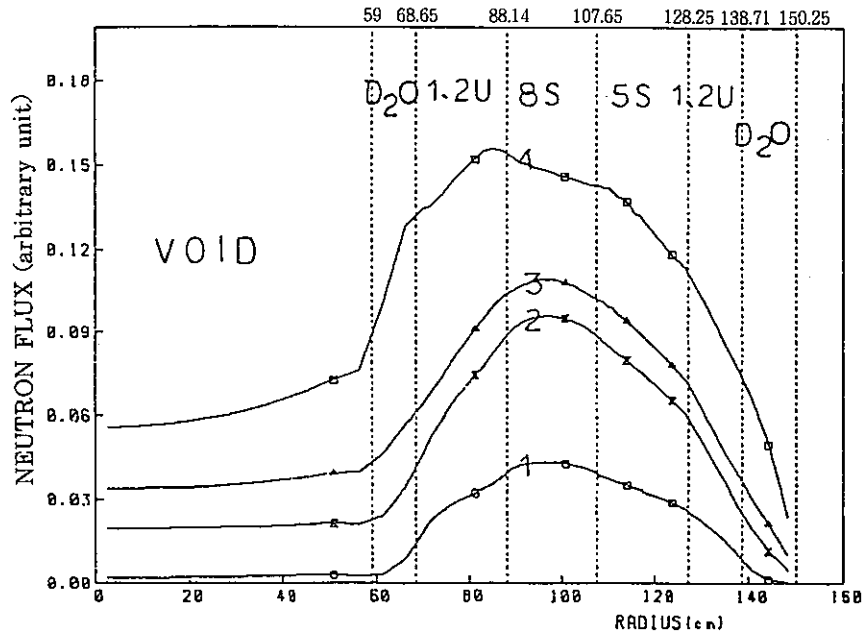


図45 (3) ボイド領域直径118cmの中性子束分布 (1.2U/8S/5S/1.2U)

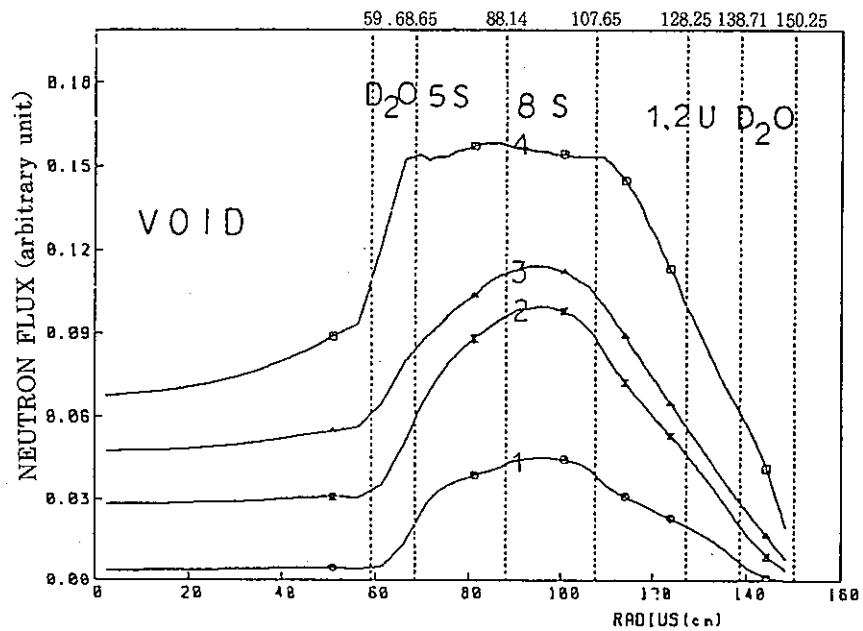


図45 (4) ボイド領域直径118cmの中性子束分布 (5S/8S/1.2U/1.2U)

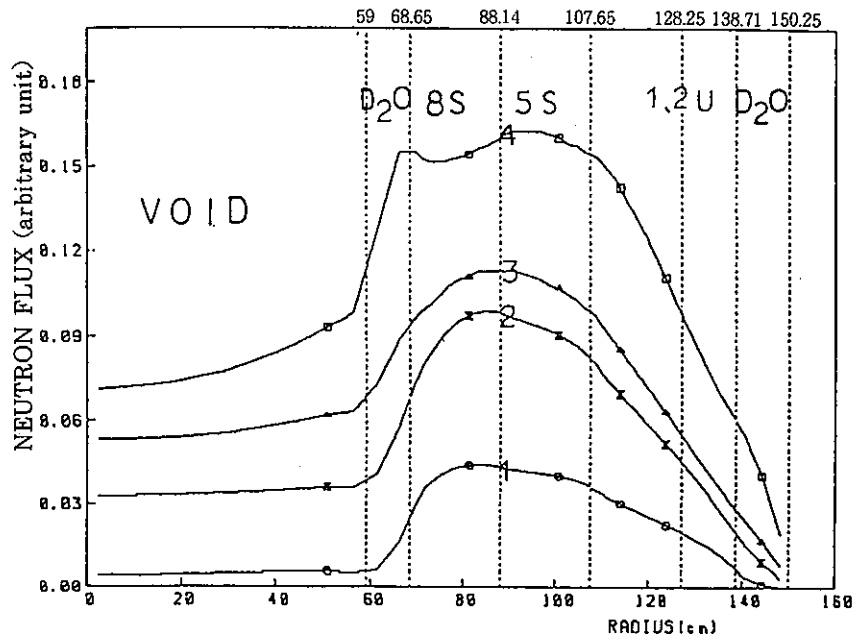


図45 (5) ボイド領域直径118cmの中性子束分布 (8S/5S/1.2U/1.2U)

付録1. TWOTRANとCITATIONコードの比較

TWOTRANとCITATIONコードの計算値 (k_{eff}) の比較について、X-Y形状2次元モデル及びR-Z形状2次元モデルで実施した。結果を表1及び表2に示す。表1及び表2の結果は、格子ピッチ、重水水位等の炉心条件が異なっているが表1では0.7%以内で、表2では0.9%以内で両コードの計算値は一致している。

表1 TWOTRANとCITATIONコードの比較*1 (X-Y形状2次元モデル)

ボイド率 (%)	TWOTRAN	CITATION	差(%) ^{*2}
0	1.0835981	1.0913751	-0.7
100	1.1108989	1.1070299	0.3

*1 2次元X-Y体系、軸方向バックリング 2.467×10^{-4} (水位2m)

格子ピッチ 24.2cm, 1.2%U燃料一様炉心

*2 [差(%)]=[(TWOTRAN-CITATION)/CITATION]*100

表2 TWOTRANとCITATIONコードの比較*1 (R-Z形状2次元モデル)

ボイド率 (%)	TWOTRAN	CITATION	差(%) ^{*2}
0	1.00830311	1.0024295	0.59
100	1.01115549	1.0019421	0.92

*1 臨界重水水位(実験値) : 107.05cm(0%ボイド), 105.59cm(100%ボイド)

格子ピッチ25.0cm, 1.2%U燃料一様炉心

*2 差(%) : [(TWOTRAN-CITATION)/CITATION]*100

付録2. 制御棒反応度値実験解析

TWOTRAN コードを用いて制御棒反応度値の解析を実施するに当たり、出来る限りCITATION コードを用いた従来の解析手法に準じて実施し、TWOTRAN及びCITATION コードそのものの解析精度の違いを確認しておきたいため、あらかじめ両コードを用いた実験解析を実施した。

実験解析の炉心は、22.5cm格子ピッチ、0%ボイドの1.2w/oU燃料が一様装荷された炉心で、図1に示す種々の制御棒挿入パターンのうち、●印を示した対称位置4本が全挿入された体系である。図1の炉心中央部点線領域が詳細なメッシュ分割を行った領域である。この部分のメッシュ分割は図2の通りである。制御棒が挿入される格子では、図2の制御棒領域と書かれた部分に制御棒の定数を配置する。また、制御棒に隣接する燃料領域にはマルチセル計算で取り出した制御棒を囲む燃料領域での定数を配置する。その他の部分は通常の定数を配置する。

解析結果を表1に示す。この結果から、実験値に対しCITATIONコードを用いた結果は約1%で、TWOTRANコードを用いた結果は約3%で一致し、両コードの解析精度及び手法、モデル化の妥当性を確認できた。

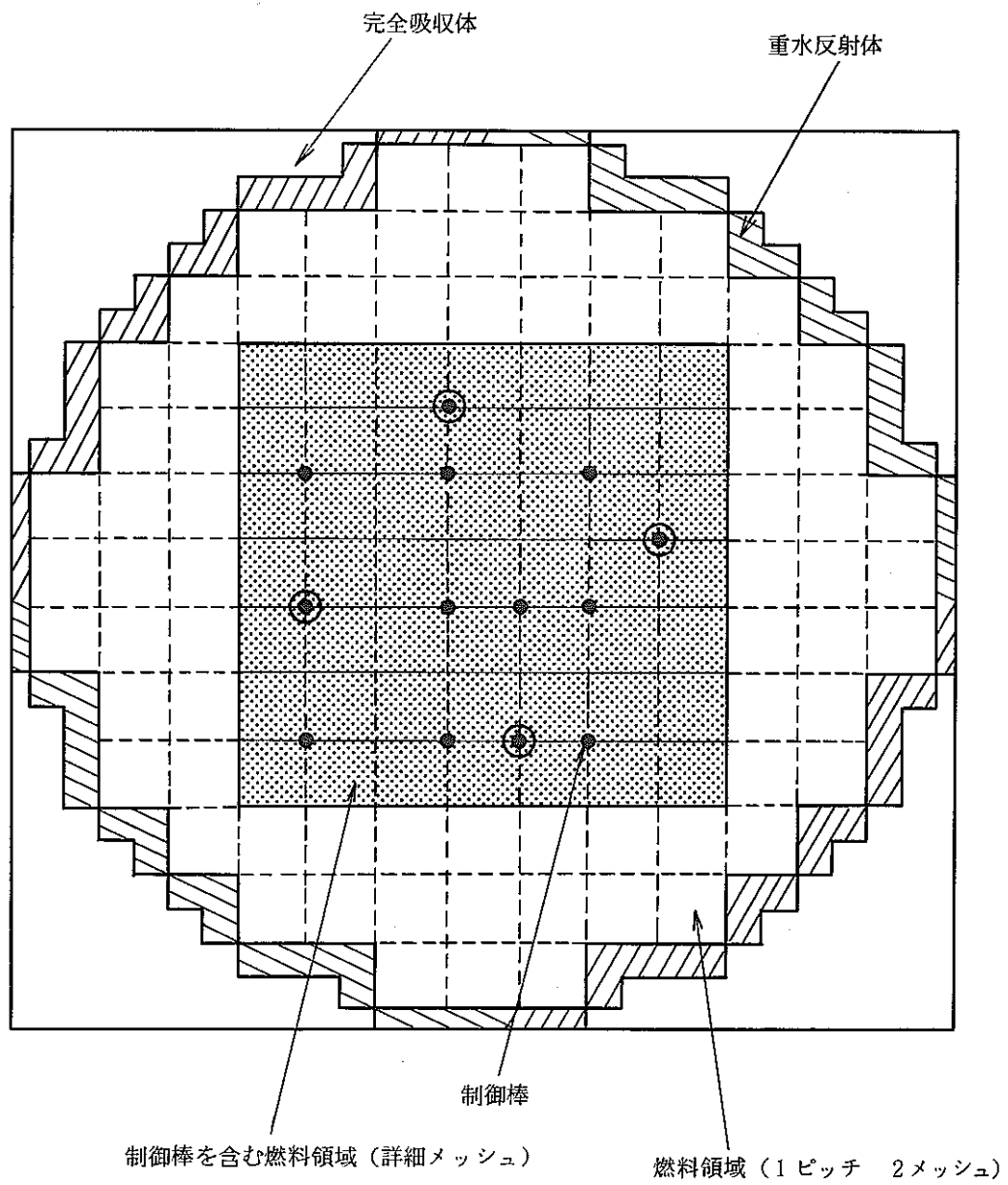


図1 制御棒挿入炉心の形状モデル

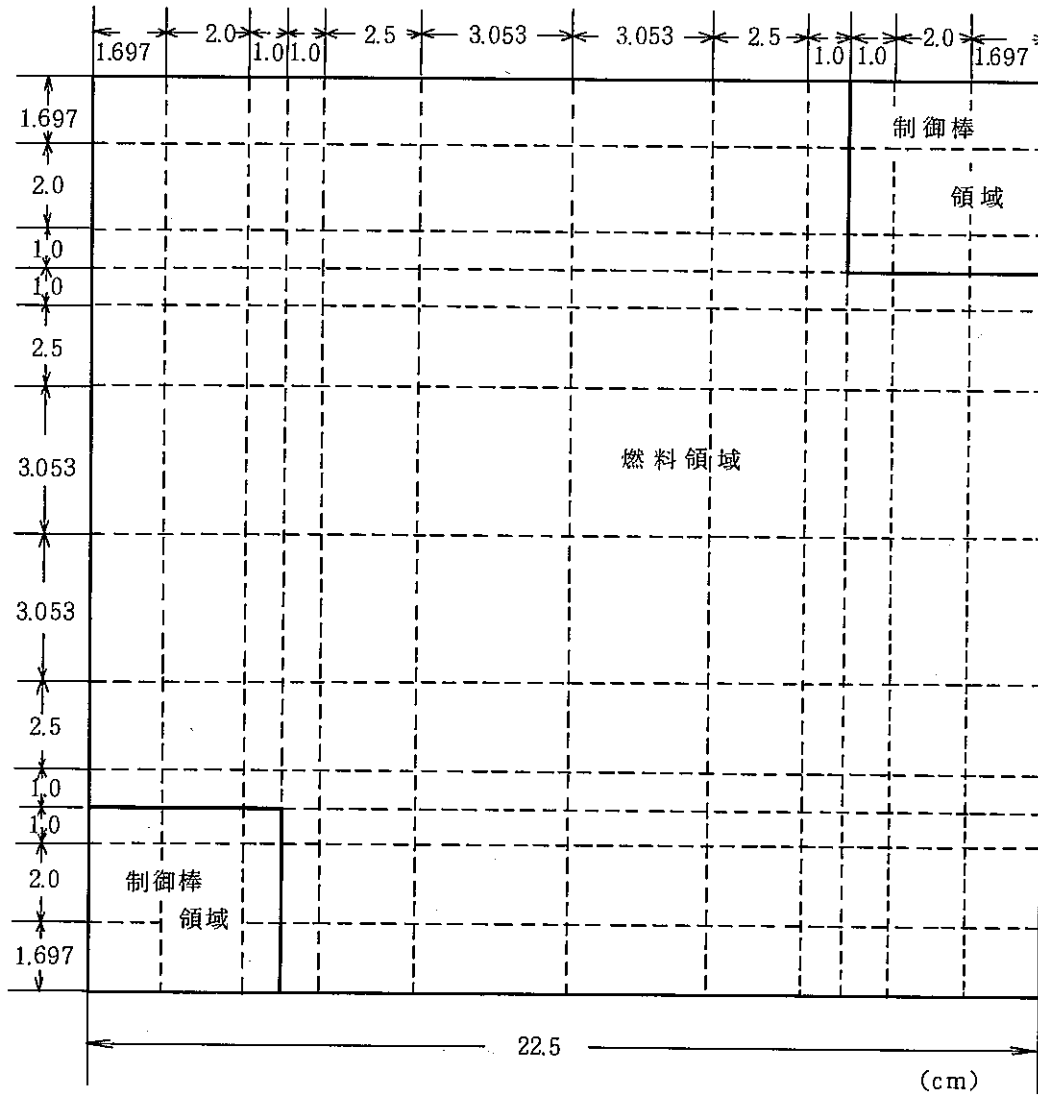


図2 制御棒及び制御棒に隣接する格子の詳細メッシュ分割

表1 TWOTRAN及びCITATION コードによる制御棒反応度
 値実験解析結果

	引き抜き時 実効増倍率	挿入時 実効増倍率	反応度 (%ΔK/K)
実験	-----	-----	-3.52
CITATION	1.00000	0.9655829	-3.56
TWOTRAN	1.00005627	0.967065225	-3.41

付録3. WIMS-ATRコードのマルチセルモデル入力データ

(1) セルの幾何形状入力

制御棒と燃料格子のセルを指定するデータ（一部）をリスト1に示す。使用するセルの種類はプレリユードデータの“NCEL”で指定する。この例では制御棒と燃料の2種類であるから，“NCEL 2”が入力されている。

制御棒を表すセルは“CELL 1 1”のデータから始まる。図1に示した制御棒がモデル化され、指定されている。これを囲む燃料格子はこのデータの後に続く。“NCEL 2 4”が燃料格子のセルに関するデータの始まりである。“2 4”は2番目のセルが4つあることを示している。

(2) WIMSで編集された領域

マルチセル計算での編集された領域の出力をリスト2に示す。領域の判別はマテリアル番号から推測する。この場合、1～14までが制御棒の領域であり、24～42が燃料の領域である。

(3) 定数を抽出する領域を指定する入力

WIMSで編集された領域から必要な定数を抽出するためのデータはリスト3のようなになる。“REGI-1 24 42”は燃料格子領域の指定であり，“REGI-2 1 14”は制御棒領域の指定である。定数はこの順序でFT24ファイルに出力される。

リスト1 WIMS-ATRマルチセル計算データ (セルの指定)

```

*TTL 0 0 0 1 1 DCA 1.2U02 22.5CM PITCH MAUTI-CELL MODEL
CELL      7
SEQU      4
NGRO     14 5
NMES     120
NREG     43 8
NMAT     31
NROD    -1 84 -8 40 6 2 2 1
NROD    -2 28 -8 60 5 5 2 1
NROD    -3 28 -8 60 5 8 2 1
NREA      6
NCEL      2 ..... 定義するセルの数
PREOUT
BCONST
GRFO     1 2 5 11 ..... 4群の指定
GRTH     2 3 5
CITA     4 4
LPFD     3 6 24 24 25 25 26 26 24 24 25 25 26 26
CELL     1 1 ..... セル1(制御棒)
ANNU     1 0.7500 1 * SUS
ANNU     2 1.5425 2 * D20
ANNU     3 2.3350 2 * D20
ANNU     4 2.4770 3 * SUS
ANNU     5 3.0330 4 * NO2
ANNU     6 3.1750 3 * SUS
ANNU     7 3.2600 4 * NO2
ANNU     8 3.4020 3 * SUS
ANNU     9 3.9580 4 * NO2
ANNU    10 4.1000 3 * SUS
ANNU    11 4.4000 5 * D20
ANNU    12 4.7000 5 * D20
ANNU    13 5.1000 5 * D20
ANNU    14 5.3000 5 * D20
ARRA     1 1 36 2.7550 0.0872665
ARRA     2 1 48 3.6800 0.0654498
MESH     1 1 1 1 1      1 1 1 1 1 ¥
          1 1 1 1
NPIJ     13
* ..... セル番号 (燃料)
CELL     2 4 ..... セルの個数
ANNU     1 0.3000 8 * H20
~~~~~
          続く
          ~~~~~
    
```

リスト 2 WIMS-ATRの出力 (編集された領域)

ZONE	RADIUS	VOLUME	MATERIAL
	0.		
1	0.75000E+00	0.17671E+01	3.
2	0.15425E+01	0.57077E+01	2
3	0.23350E+01	0.96538E+01	2
4	0.24770E+01	0.21467E+01	3
5	0.26758E+01	0.32182E+01	4
6	0.28833E+01	0.36237E+01	6
7	0.30330E+01	0.27825E+01	7
8	0.31750E+01	0.27694E+01	3
9	0.32600E+01	0.17184E+01	4
10	0.34020E+01	0.29720E+01	3
11	0.35982E+01	0.43142E+01	4
12	0.38059E+01	0.48317E+01	30
13	0.39580E+01	0.37100E+01	31
14	0.41000E+01	0.35947E+01	3
15	0.44000E+01	0.80111E+01	5
16	0.47000E+01	0.85766E+01	5
17	0.51000E+01	0.12315E+02	5
18	0.55000E+01	0.13320E+02	5
19	0.59000E+01	0.14326E+02	5
20	0.64000E+01	0.19321E+02	5
21	0.69000E+01	0.20892E+02	5
22	0.74000E+01	0.22462E+02	5
23	0.81000E+01	0.34086E+02	5
24	0.81222E+01	0.11310E+01	8
25	0.81735E+01	0.26256E+01	8
26	0.81957E+01	0.11445E+01	8
27	0.82152E+01	0.10031E+01	8
28	0.82530E+01	0.19541E+01	8
29	0.83333E+01	0.41848E+01	8
30	0.84955E+01	0.85795E+01	8
31	0.87039E+01	0.11261E+02	8
32	0.91935E+01	0.27525E+02	13
33	0.93249E+01	0.76470E+01	16
34	0.94408E+01	0.68311E+01	8
35	0.96257E+01	0.11076E+02	8
36	0.96990E+01	0.44479E+01	8
37	0.97902E+01	0.55837E+01	8
38	0.99068E+01	0.72206E+01	8
39	0.10064E+02	0.98423E+01	8
40	0.10277E+02	0.13600E+02	8
41	0.11096E+02	0.55051E+02	14
42	0.11314E+02	0.15294E+02	17
43	0.11425E+02	0.79643E+01	8
44	0.11492E+02	0.48489E+01	8
45	0.11536E+02	0.31247E+01	8
46	0.11565E+02	0.21557E+01	8
47	0.11590E+02	0.17670E+01	8
48	0.11616E+02	0.19036E+01	8
49	0.11651E+02	0.25724E+01	8
50	0.11703E+02	0.38356E+01	8
51	0.11782E+02	0.58406E+01	8
52	0.11857E+02	0.55195E+01	8
53	0.11954E+02	0.74186E+01	8
54	0.12051E+02	0.10850E+02	8
55	0.12148E+02	0.11011E+02	8

↑
制御棒の領域
↓

↑
燃料の領域
↓

リスト3 定数を抽出するための領域指定

PART 5 15 45 50 69

```

DIFF 1 1 1
BEGI
LPFD 3 6 13 13 14 14 15 15 13 13 14 14 15 15
BEGI 13
DEFF 1 1 1
REGI -1 24 42 ..... 燃料領域の指定
BEGI
LPFD 2 4 6 6 30 30 6 6 30 30
BEGI 13
DIFF 2 0 0
REGI -1 1 14 ..... 制御棒領域の指定
NOBU
BUCK 1.0E-10 1.0E-10
    
```

付録4. 格子寸法計算式

三角格子と四角格子について、検討対象となる寸法の計算式と数値例をまとめた。

燃料集合体（クラスター）の

最大半径は8.85cm（直径17.7cm），

取付けの為の最小半径は6.825cm（直径13.65cm）

である。

制御棒の

取付け部外半径は6.9cm（直径13.8cm），

本体半径は4cm（直径8cm）

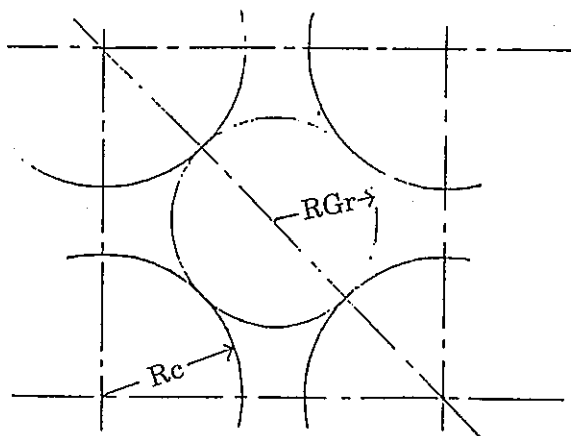
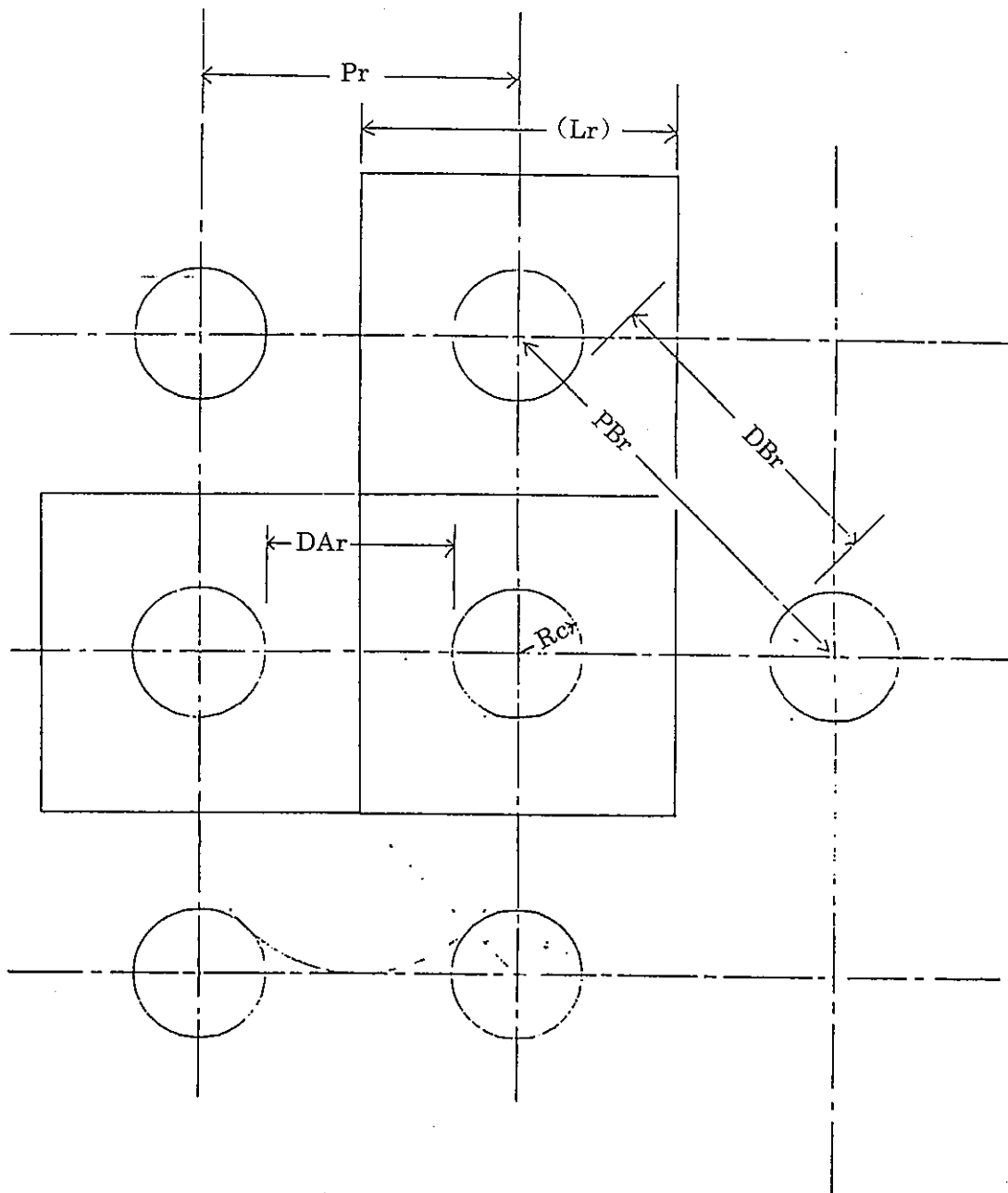
である。

取付け部の構造を変更することによって、四角格子ピッチ18cm相当の三角格子から、制御棒の取付けは可能である。

但し、燃料クラスターフランジ部の上部に制御棒機構をのせるような構造が必要である。

正 方 格 子

RE _r	格子等価 (等面積) 円半径	$= \frac{1}{\sqrt{\pi}} P_r$	=P _r
P _r	正方格子ピッチ	$= \sqrt{\pi} RE_r$	
(L _r)	格子の1辺の長さ		
PB _r	格子中心間距離 (長辺)	$= \sqrt{2} P_r$	
S _r	格子面積	$= P_r^2$ $= \pi (RE_r)^2$	
R _c	クラスター集合体外接円半径		
DA _r	クラスター集合体外接円間距離(A)	$= P_r - 2R_c$	
DB _r	” (B)	$= PB_r - 2R_c$	
RG _r	クラスター間隙部にとれる最大円半径	$= \frac{\sqrt{2}}{2} P_r - R_c$	
	$R_c \leq \frac{\sqrt{2}-1}{2} P_r$ で最大円は格子からはみだす。		



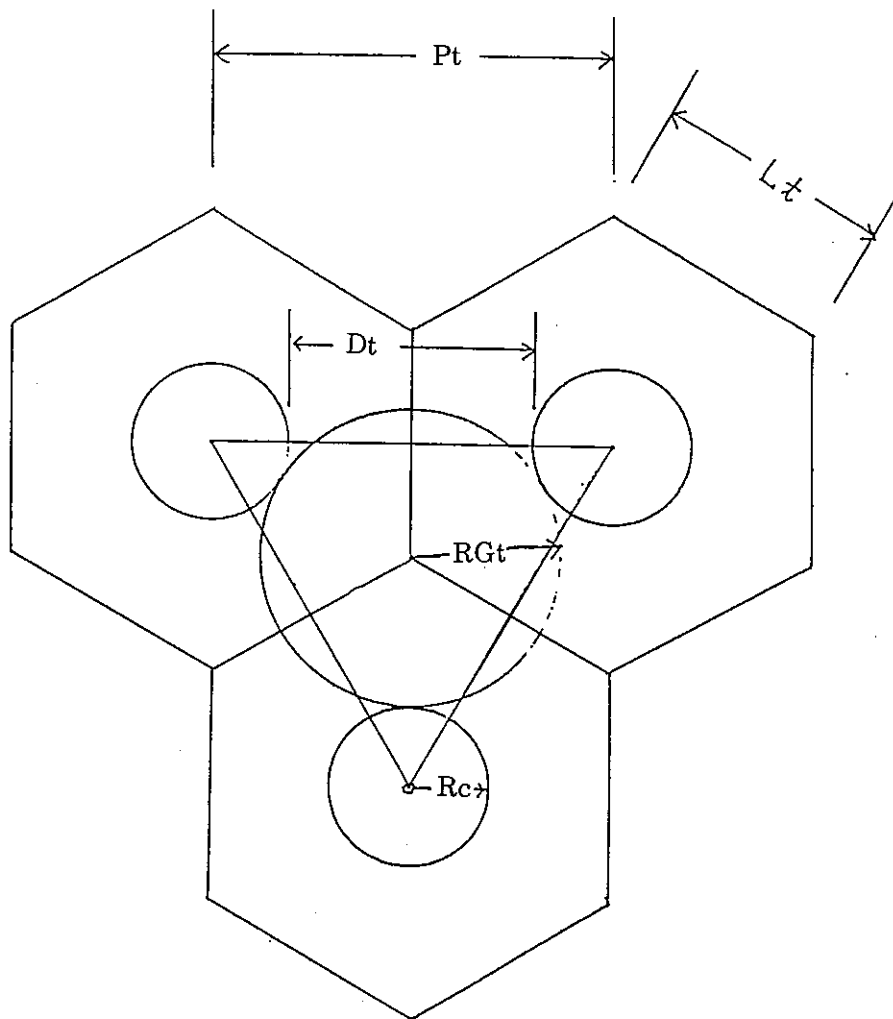
正 方 格 子 計 算 式

$$\begin{aligned} S_r &= P_r^2 \\ &= \pi R_e^2 \end{aligned}$$

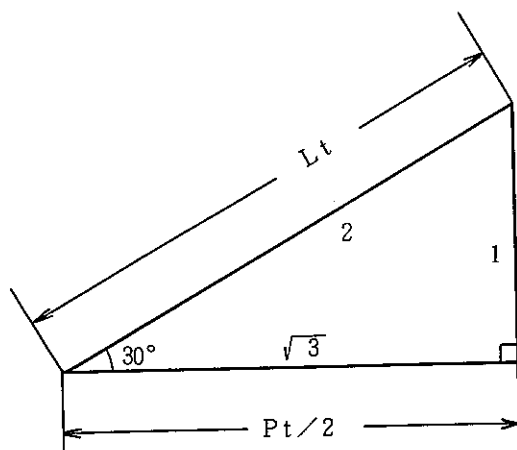
$$\therefore P_r = \sqrt{\pi} R_e ; R_e = \frac{1}{\sqrt{\pi}} P_r$$

三 角 格 子

RE_t	格子等価（等面積）円半径	$= \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}} P_t$
P_t	三角格子ピッチ	$= \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}}} RE_t$
L_t	格子の1辺の長さ	$= \frac{\sqrt{3}}{3} P_t$
S_t	格子面積	$= \frac{\sqrt{3}}{2} P_t^2$ $= \pi (RE_t)^2$
R_c	クラスター集合体外接円半径	
D_t	クラスター集合体外接円間距離	$= P_t - 2R_c$
RG_t	クラスター間隙部にとれる最大円半径	$= P_t - R_c$ $= \frac{\sqrt{3}}{3} P_t - R_c$



三角格子計算式



$$L_t = \frac{P_t}{2} * \frac{2}{\sqrt{3}}$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{3} P_t$$

$$S_t = 6 * \frac{1}{2} L_t * \left(\frac{1}{2} P_t\right)$$

$$= \frac{3}{2} L_t * P_t$$

$$= \frac{3}{2} * \frac{\sqrt{3}}{3} P_t * P_t$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} P_t^2$$

$$= \pi (RE_t)^2$$

$$\therefore (RE_t)^2 = \frac{1}{\pi} \frac{\sqrt{3}}{2} P_t^2$$

$$RE_t = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2\pi}} P_t$$

(数値例)

共通	Rc	燃料集合体最大半径	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	8.85	6.825	6.825	6.825						
正方形格子	Pr	正方形格子ピッチ	18.	20.	22.5	25.0	25.0	18.	20.	22.5	25.0	25.0	20.	20.	22.5						
	PBr	格子中心間距離(長辺)	25.4558	28.2843	31.8198	35.3553	35.3553	25.4558	28.2843	31.8198	35.3553	35.3553	28.2843	28.2843	31.8198						
	REr	格子等価(等面積)円半径	10.1554	11.2838	12.6943	14.1047	14.1047	10.1554	11.2838	12.6943	14.1047	14.1047	11.2838	11.2838	12.6943						
	Sr	格子面積	324.	400.	506.25	625.	625.	324.	400.	506.25	625.	625.	400.	400.	506.25						
	DAr	燃料集合体最外端間距離A	0.3	2.3	4.8	7.3	7.3	4.8	2.3	4.8	7.3	7.3	2.3	2.3	4.8						
	DBr	燃料集合体最外端間距離B	7.7558	10.5843	14.12	17.6553	17.6553	14.12	10.5843	14.12	17.6553	17.6553	10.5843	10.5843	14.12						
	RGr	燃料集合体間隙部最大円半径	3.8779	5.29	7.06	8.83	8.83	7.06	5.29	7.06	8.83	8.83	5.29	5.29	7.06						
三角格子	Pt	三角格子ピッチ	19.3423	21.4914	24.1778	26.8642	26.8642	24.1778	21.4914	24.1778	26.8642	26.8642	21.4914	21.4914	24.1778						
	REt	格子等価(等面積)円半径	10.1554	11.2838	12.6943	14.1047	14.1047	10.1554	11.2838	12.6943	14.1047	14.1047	11.2838	11.2838	12.6943						
	Lt	格子辺長(六角形の一边)	11.1673	12.4081	13.9591	15.5101	15.5101	11.1673	12.4081	13.9591	15.5101	15.5101	12.4081	12.4081	13.9591						
	St	格子面積	324.	400.	506.25	625.	625.	324.	400.	506.25	625.	625.	400.	400.	506.25						
	Dt	燃料集合体最外端間距離	1.642	3.7914	6.4778	9.1642	9.1642	6.4778	3.7914	6.4778	9.1642	9.1642	3.7914	3.7914	6.4778						
	RGt	燃料集合体間隙部最大円半径	2.317	3.558	5.109	6.66	6.66	5.109	3.558	5.109	6.66	6.66	3.558	3.558	5.109						

付録5. 試験領域（ボイド領域）の形状と寸法

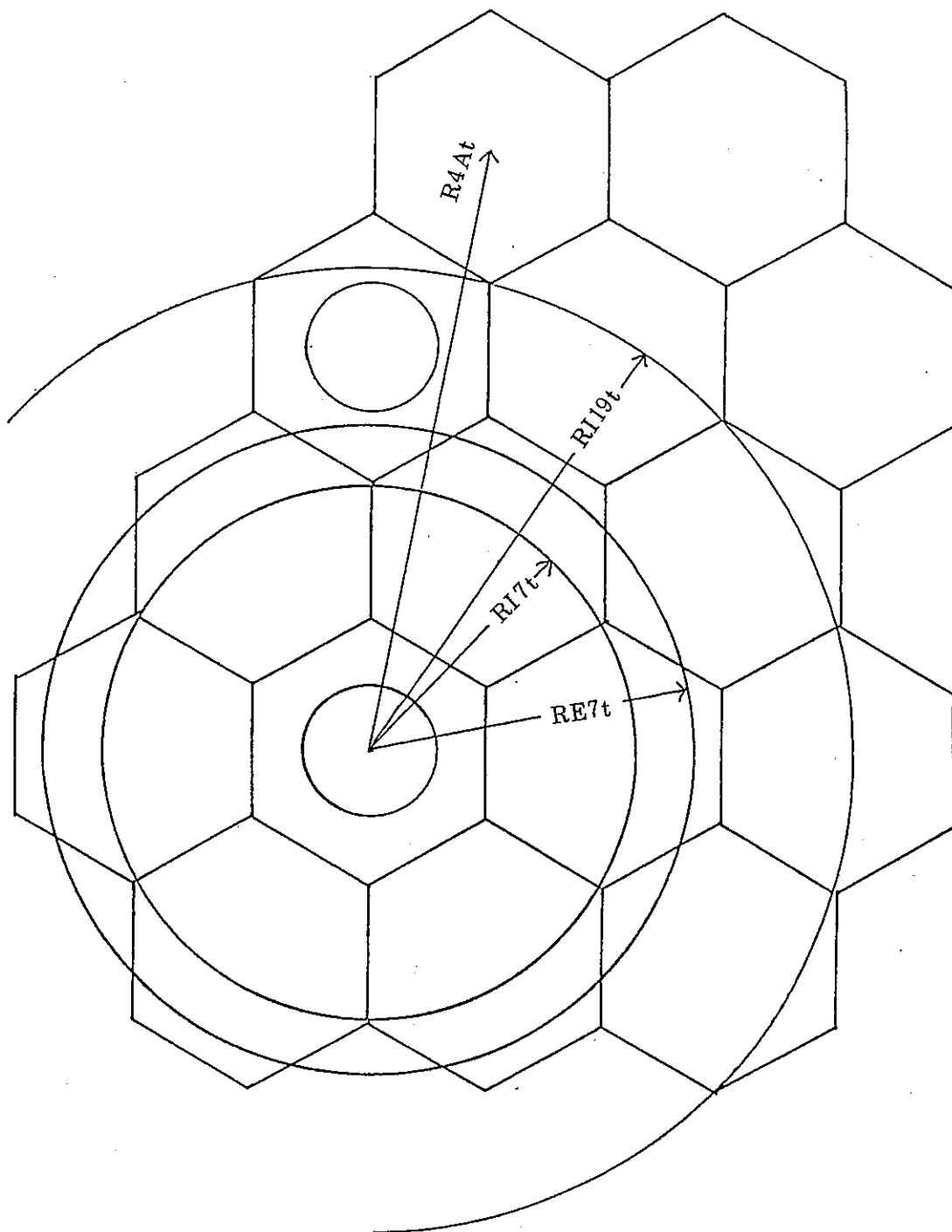
三角格子2種類、四角格子2種類の配置について、格子ピッチ20cm（四角格子相当）を前提として、試験領域空洞部の大きさを評価した。

臨界性が確認されているのは、直径88cmの円筒形空洞部であるが、従来検討されていた1m×1mの正方形空洞部と比較するとかなり小さく、試験体系からの要求を満たせるか否か、再検討が必要である。

三 角 格 子 (A)

RE _t	格子等価 (等面積) 円半径		
P _t	三角格子ピッチ		
S _t	格子面積	$= \frac{\sqrt{3}}{2} P_t^2 = \frac{3\sqrt{3}}{2} L_t^2$	
L _t	格子の1辺の長さ = 格子外接円半径	$= \frac{\sqrt{3}}{3} P_t$	
S7 _t	2層 (= 7体) の格子面積	$= 7 * S_t$	
RE7 _t	2層 (= 7体) の等価円半径	$= \sqrt{(S7_t / \pi)}$	
RI7 _t	第3層の格子の内接半径 第3層 12体 第3層まで 7+12=19体	$= 2 L_t$	
S19 _t	第3層まで19体の格子面積	$= 19 * S_t$	
RE19 _t	第3層までの等価円半径	$= \sqrt{(S19_t / \pi)}$	
RI19 _t	第4層格子の内接半径	$= \sqrt{A^2 + B^2}$	
		$A = \frac{1}{2} P_t$	
		$B = \frac{7}{2} * L_t = \frac{7}{2} * \frac{\sqrt{3}}{3} P_t$	
R4A _t	第4層格子中心点半径A (炉心中心に近い方)	$= \sqrt{C^2 + B^2}$ $C^2 = (4.5 L_t)^2$ $B^2 = \left(\frac{1}{2} P_t \right)^2$	

三角格子 (A)



三角格子の計算式(A)

$$RI19_t = \text{SQRT} \left\{ \left(\frac{1}{2} P_t \right)^2 + \left(\frac{7}{3} L_t \right)^2 \right\}$$

三角格子の数値例 (A)

正方格子ピッチ $P_r = 20\text{cm}$ 相当の

三角格子ピッチ $P_t = 21.4914\text{cm}$ を例とする。

$$2\text{層まで}7\text{体分の格子面積は } 7 * S_t = 7 \times 400 = 2800\text{cm}^2$$

$$2\text{層まで}7\text{体分の等価円半径は } RE_{7t} = \sqrt{S_{7t}/\pi} = 29.8541\text{cm}$$

$$\text{第}3\text{層格子の内接半径は } RI_{7t} = 2L_t = 2 \times 12.4081$$

$$\begin{aligned} \text{等価円半径と内接半径との差 : } RE_{7t} - 2 \times L_t &= 29.8541 - 2 \times 12.4081 \\ &= 5.0379 \end{aligned}$$

$$\text{第}3\text{層まで}19\text{体分の格子面積は } S_{19t} = 19 \times S_t = 19 \times 400 = 7600$$

$$\text{第}3\text{層まで}19\text{体分の等価半径は } RE_{19t} = \sqrt{S_{19t}/\pi} = 49.1849\text{cm}$$

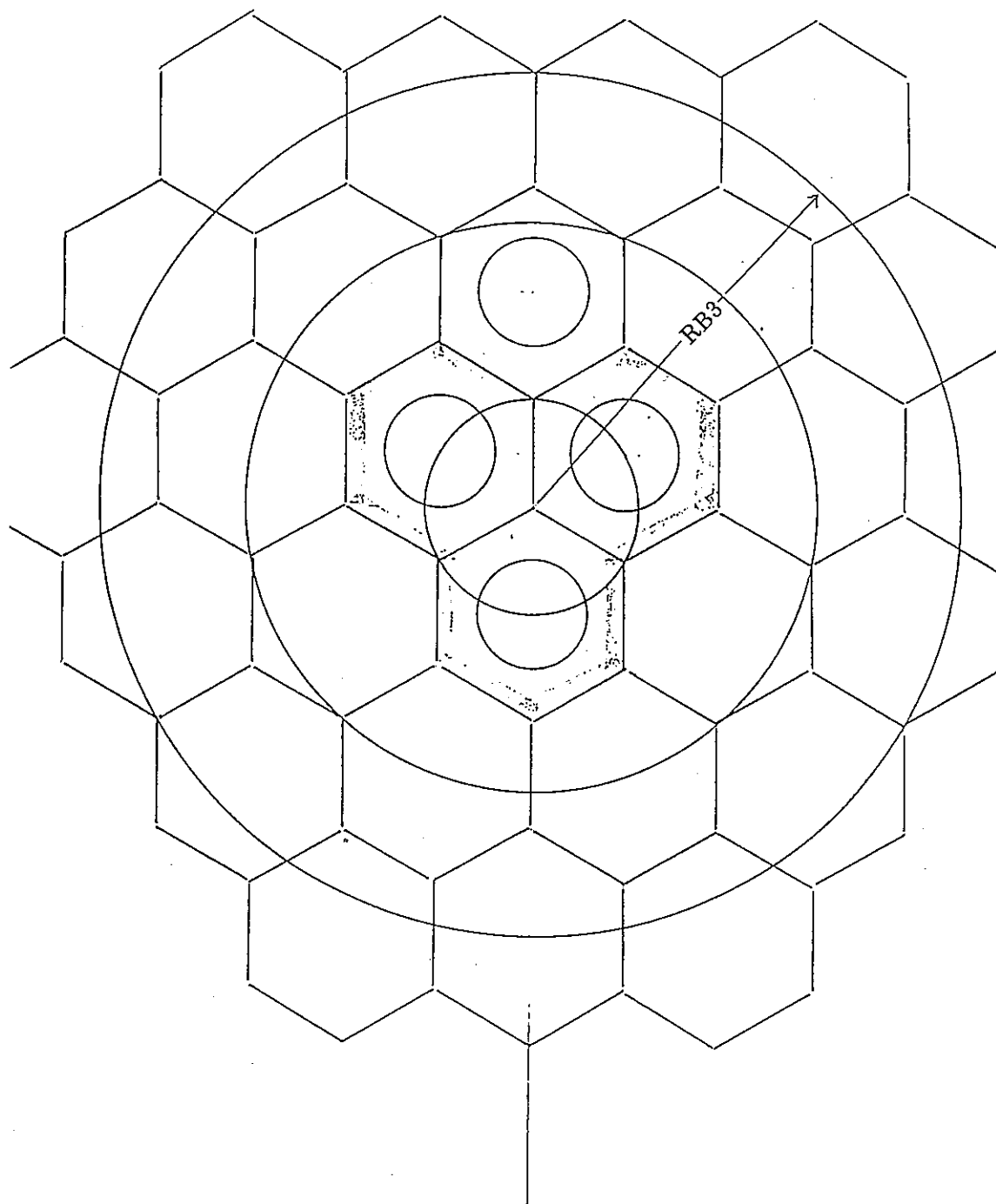
$$\text{第}4\text{層格子の内接半径は } RI_{19t} = \sqrt{A^2 + B^2} = 44.7379\text{cm}$$

$$\text{等価円半径と内接半径との差は } 49.1849 - 44.7379 = 4.4470$$

$$\text{第}4\text{層格子中心点A半径は } RA_{4t} = \sqrt{(4.5 \times 12.4)^2 + \left(\frac{21.4914}{2}\right)^2} = 56.8611$$

燃料集合体最大半径を 8.85cm とすると、 $56.8611 - 8.85 = 48.01\text{cm}$ までの円が切取り可能となる。

三角格子 (B)



三角格子(B)の数値例

第1層	3体
第2層	9体
第3層	15体

第3層までを除去した場合の空洞部半径 RB3 (第4層格子にかからない半径) は,

$$\begin{aligned}
 RB3 &= 4 \times L_1 \\
 &= 4 \times 12.4081 \quad (\text{四角格子}20\text{cm相当}) \\
 &= 49.6324\text{cm}
 \end{aligned}$$

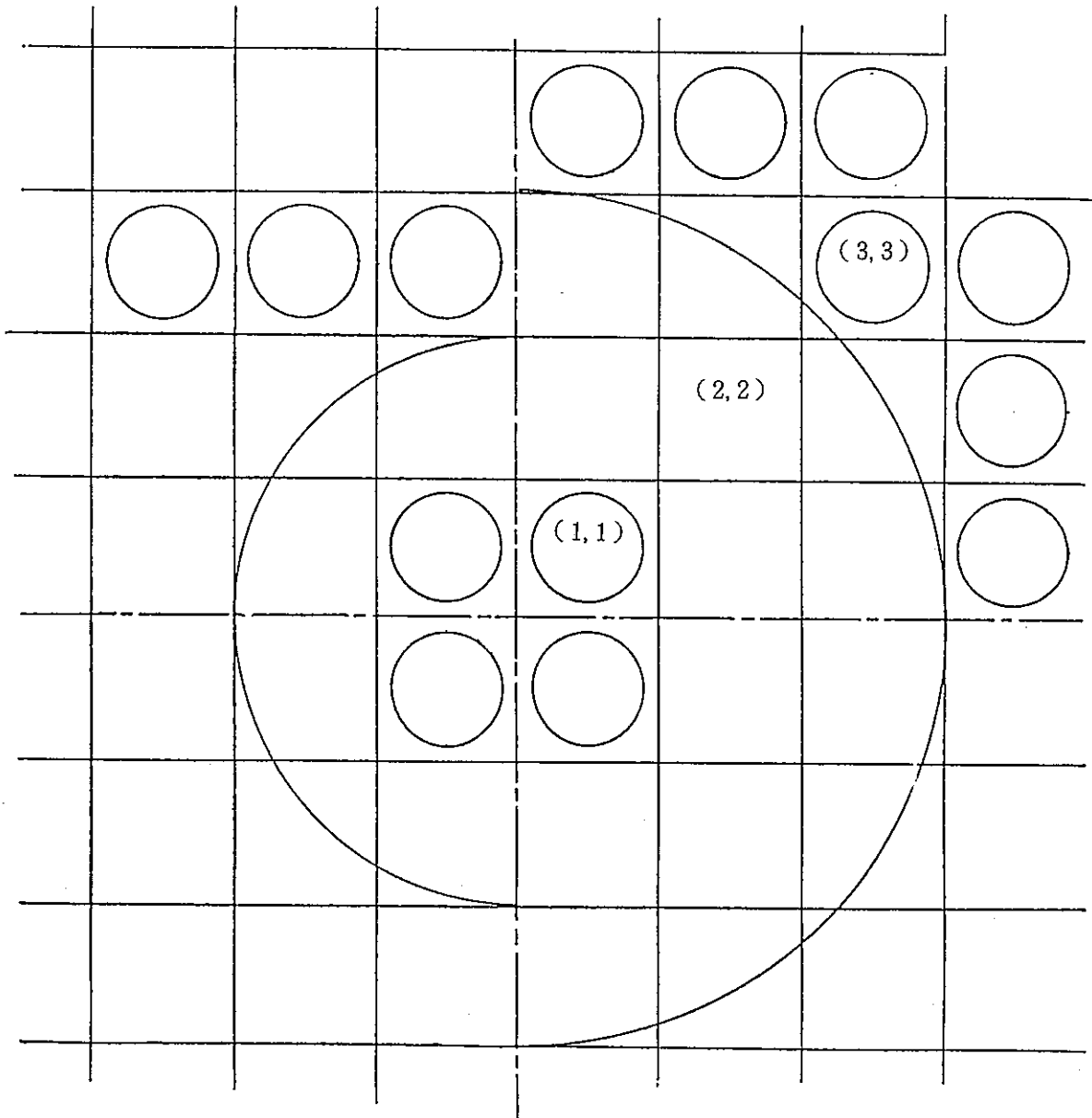
第3層までの等価半径は,

$$\begin{aligned}
 3 + 9 + 15 &= 27 \quad (\text{体}) \\
 27 \times 400 &= 10800\text{cm}^2 \\
 \text{等価円半径 } RB3X &= \sqrt{10800/\pi} = 58.6323
 \end{aligned}$$

重水領域厚さは,

$$58.6323 - 49.6324 = 9.0\text{cm}$$

三角格子 (C)



四角格子の数値例(C)

I) 格子(3.3)の中心点の半径 (pitch 20cmの場合)

$$50\text{cm} \times \sqrt{2} = 70.7107$$

II) 半径60cmとの差

$$70.7107 - 60 = 10.7107\text{cm}$$

III) クラスタ-取付寸法 $R = 8.85\text{cm}$ であれば

格子(3.3)にクラスタ-取付可能

IV) クラスタ- 8×4 体を除去すると

$$S = 400 \times 8 \times 4 = 12800\text{cm}^2$$

$$\text{等価半径} = \sqrt{12800/\pi} = 63.8308\text{cm}$$

従って

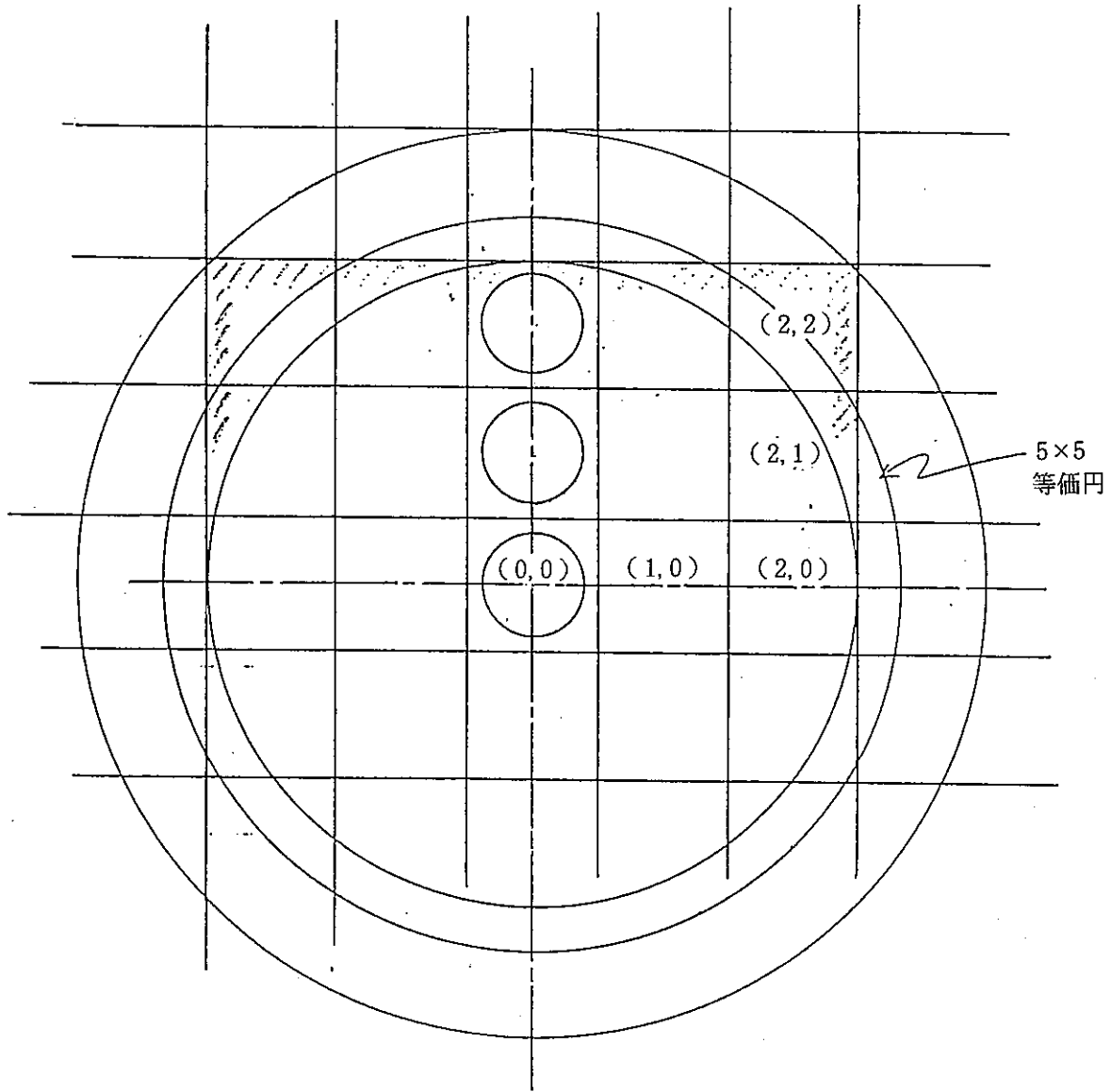
$$\text{重水厚さは } 63.8308 - 60 = 3.8308\text{cm}$$

V) クラスタ-を $(4 \times 4) = 16$ 体除去する半径40cmの空洞を設ける。

$$\text{等価半径} \sqrt{400 \times 16/\pi} = 45.1352$$

$$\text{重水厚さ } 45.1352 - 40 = 5.1352$$

四角格子 (D)



四角格子の数値例(D)

I) 1m×1mの等価半径

$$\pi r^2 = 100^2, \quad r = 100/\sqrt{\pi} = 56.41896$$

II) 20cm pitchの場合

$$(2, 2) \text{ 格子中心点半径} = \sqrt{2} \times 40 = 56.5685$$

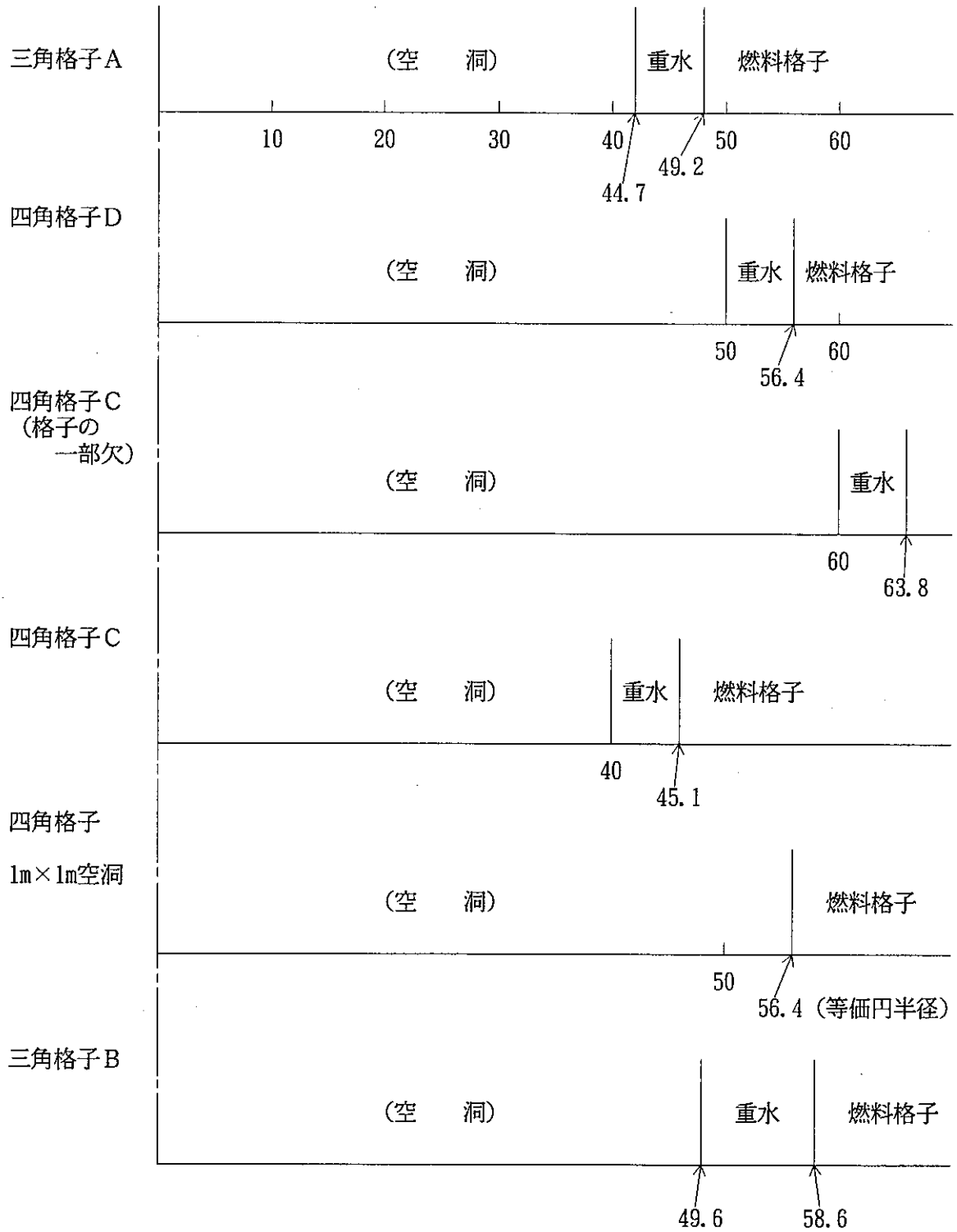
∴ クラスターの取付け最小半径=6.825cmである為、半径50cmの空洞を作ると格子(2, 2)にはクラスターを設置できない。

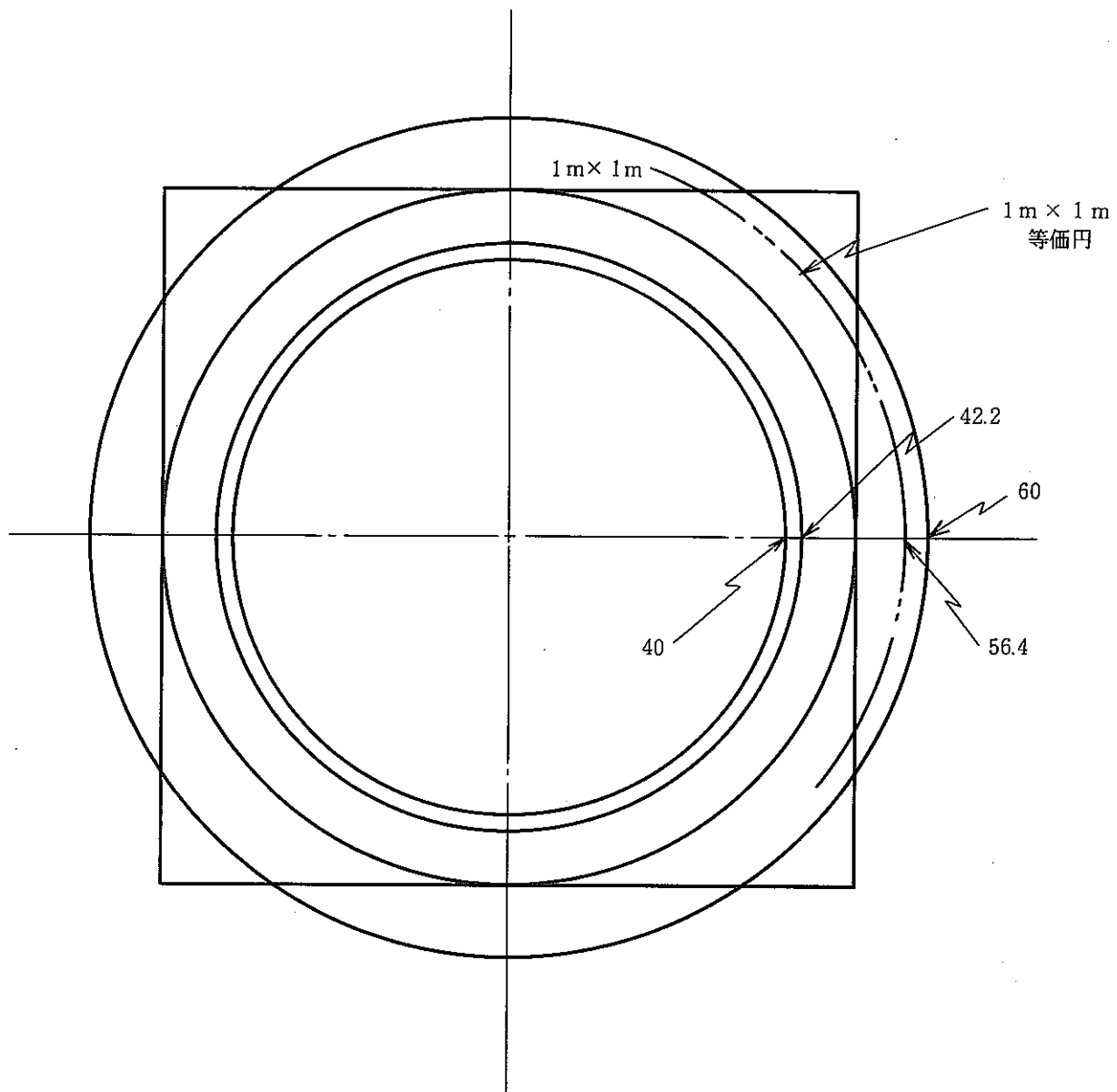
III) 20cm pitchで5×5の集合体を除去してR=50cmの空洞を設けると、

$$56.41896 - 50 = 6.41896 \text{ cm の等価厚重水領域となる。}$$

試験領域の比較

- 格子ピッチは20cm四角格子相当
- 注記のない場合は、空洞部は燃料装荷格子にかからない。





空洞部の大きさの比較