

JNC TN1400 99-015

FBR 安全性試験炉の制御棒構造の具体化検討

1999年6月

核燃料サイクル開発機構

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番地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

FBR 安全性試験炉の制御棒構造の具体化検討

宇都 成昭*

要 旨

核燃料サイクル開発機構では FBR 大型炉の安全性向上に不可欠とされる各種炉内試験のための、FBR 安全性試験炉 SERAPH (Safety Engineering Reactor for Accident PHenomenology) の設計研究を実施してきた。

本報告書は、SERAPH で予定されている定常及び種々の過渡試験を遂行するのに不可欠な制御棒の構造概念について、中性子挙動の特質に着目した検討を行い、具体案の創出を含めてその成果をまとめたものである。

制御棒内に残存する重水による局所出力ピークの発生を集合体製造への新たな負荷を設けず回避し、かつ吸収材 (B_4C) からの発熱に対する除熱能力を確保し得る制御棒構造の適切な具体化を図った。2次元 S_N 輸送計算コード TWOTRAN-II を用いて制御棒周囲の詳細な出力分布特性を評価した結果、カドミウム製六角管を外枠とする重水フォロワー型制御棒が適切であることがわかった。

本研究成果は、核、熱及び構造設計との整合に配慮した制御棒設計とそれに基づく炉心構成の具体化に有効に反映される。

* 技術展開部 情報システム室

Investigation of control rod configuration in a new in-pile experimental reactor for FBR safety research

Nariaki Uto*

Abstract

A design study of a new in-pile experimental reactor, Safety Engineering Reactor for Accident Phenomenology (SERAPH), for FBR safety research has progressed at Japan Nuclear Cycle Development Institute.

This report describes research results on structure concepts of control rods needed to carry out steady-state and various transient in-pile experiments in SERAPH, based on a neutronic investigation focusing on neutron behavior around the control rod.

The author intends to clarify the concept of the control rod configuration with basic design needs : to prevent local power peaking near the rod from occurring, not to introduce additional design requirement to driver core fuel sub-assemblies, and to maintain the capability of heat removal from the neutron absorber (B_4C). A detail evaluation of power density characteristics around the rod using a two-dimensional S_N transport code TWOTRAN-II shows that a control rod followed by heavy water with a cadmium-made hexagonal tube has a good feature of satisfying the above design needs.

The results of this study are expected to be effective for designing the driver core, taking into account the balance among neutronic, thermal-hydraulic and structural performance of the control rod.

* Information System Section, Technology Management Division, JNC

目 次

要旨	
1. 序論	1
2. 集合体内出力分布評価手法	3
2.1 概要	3
2.2 2次元 XY 体系スーパーセルモデルの構成	3
2.3 実効断面積作成及び群縮約計算	5
2.4 スーパーセル計算及び出力分布算出	7
3. ヘリウムフォロワー型制御棒近傍での局所出力ピーク特性分析	8
3.1 概要	8
3.2 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル	8
3.3 計算結果及び考察	9
4. ヘリウムフォロワー型制御棒近傍での局所出力ピーク抑制方策	13
4.1 概要	13
4.2 非燃料ピンによる制御棒隣接燃料ピンの置換	13
4.2.1 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル	13
4.2.2 計算結果及び考察	14
4.3 カドミウムピンの設置	17
4.3.1 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル	17
4.3.2 計算結果及び考察	17
5. 重水フォロワー型制御棒での局所出力ピーク抑制の可能性	20
5.1 概要	20
5.2 カドミウムを用いた種々の方策	21
5.2.1 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル	21
5.2.2 計算結果及び考察	22
6. カドミウム製六角管・重水フォロワー型制御棒	33
6.1 概要	33
6.2 カドミウム製六角形状部の変更	33

6.3	必要カドミウム厚の1次元パラメータ解析-----	35
6.3.1	計算モデル-----	35
6.3.2	計算結果及び考察-----	37
6.4	2次元解析による評価-----	38
6.4.1	計算モデル-----	38
6.4.2	計算結果及び考察-----	39
7.	結論-----	42

謝辞

参考文献

付録1 B₄C制御棒チャンネルの発熱密度

付録2 TWOTRAN-IIコードの加速法の修正について

表リスト

- 表 2.3-1 218 群及び 22 群のエネルギー群構造
- 表 3.3-1 制御棒集合体に隣接する燃料ピンを種々の非燃料物質に置換した方策における隣接 S/A での各出力密度比
- 表 5.2.1-1 種々の局所出力ピーク抑制方策における隣接 S/A での各出力密度比
- 表 6.3.1-1 1次元平板体系を用いた計算条件
- 表 6.4.2-1 制御棒反応度値解析結果 (三次元 7 群拡散計算)

図リスト

- 図 1-1 SERAPH 重水冷却炉心構成及び各構成要素の水平断面図
- 図 2.2-1 2次元 XY 体系スーパーセルモデル
- 図 2.2-2 単位セルの選定方法
- 図 2.2-3 2種類の単位セルモデルの設定及び基本セルモデルの構成
- 図 2.2-4 物質領域及びメッシュ境界設定に基づく 13 種類の単位セルモデル
- 図 2.2-5 スーパーセルモデル 1/4 体系及び基本セルモデル構成
- 図 2.2-6 スーパーセルモデル 1/4 体系から全体系の構成手順
- 図 2.2-7 2次元 XY 体系スーパーセルモデルの作成結果
- 図 2.2-8 スーパーセルモデル作成フロー
- 図 2.3-1 SCALE4 コードシステムによる実効断面積作成及び群縮約計算フロー
- 図 2.3-2 218 群実効マクロ断面積の作成方法
- 図 2.3-3 22 群実効マクロ断面積の作成方法
- 図 2.4-1 TWOTRAN-II コードによるスーパーセル計算フロー
- 図 2.4-2 サンプル計算の計算条件、及び入力データ、計算結果
- 図 2.4-3 スーパーセル出力分布算出用プログラム計算フロー
- 図 2.4-4 サンプルのスーパーセル及び出力分布結果

- 図 3.2-1 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算条件図
- 図 3.2-2 制御棒挿入時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算条件図
- 図 3.2-3 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY スーパーセル計算体系及び計算条件
- 図 3.2-4 制御棒挿入時の 2 次元 XY スーパーセル計算体系及び計算条件
- 図 3.3-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布
- 図 3.3-2 制御棒挿入時の相対出力分布
- 図 4.2.1-1 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(ジルカロイ 4 ピン置換方策, チタンピン置換方策)
- 図 4.2.1-2 制御棒挿入時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(ジルカロイ 4 ピン置換方策, チタンピン置換方策)
- 図 4.2.1-3 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(ジルカロイ 4 ピン置換方策)
- 図 4.2.1-4 制御棒挿入時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(ジルカロイ 4 ピン置換方策)
- 図 4.2.1-5 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(チタンピン置換方策)
- 図 4.2.1-6 制御棒挿入時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(チタンピン置換方策)
- 図 4.2.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (ジルカロイ 4 ピン置換方策)
- 図 4.2.2-2 制御棒挿入時の相対出力分布 (ジルカロイ 4 ピン置換方策)
- 図 4.2.2-3 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (チタンピン置換方策)

- 図 4.2.2-4 制御棒挿入時の相対出力分布 (チタンピン置換方策)
- 図 4.3.1-1 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.1-2 制御棒挿入時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.1-3 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.1-4 制御棒挿入時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.2-2 制御棒挿入時の相対出力分布 (カドミウムピン置換方策)
- 図 4.3.2-3 種々の置換方策における最大局所出力ピーク (図 4.3.2-1 の 0.740
と記されたハッチングの部分) 位置での核分裂率エネルギー分布の
比較
- 図 4.3.2-4 カドミウムの無限希釈断面積
- 図 5.2.1-1 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.1-2 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(カドミウム案内管方策)
- 図 5.2.1-3 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(六角形状 C/R ch.方策)
- 図 5.2.1-4 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(除熱型カドミウムピン置換方策)

- 図 5.2.1-5 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(カドミウム案内管方策)
- 図 5.2.1-6 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(六角形状 C/R ch.方策)
- 図 5.2.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布
(除熱型カドミウムピン置換方策:カドミウムピン置換方策に対し、
フォロワー材に重水を採用した場合)
- 図 5.2.2-2(a) C/R ch.中心から第 2 層燃料ピンまでの X 方向相対中性子束分布
の比較
(カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.2-2(b) C/R ch.中心から第 2 層燃料ピンまでの Y 方向相対中性子束分布
の比較
(カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.2-3 第 2 層燃料ピンのうち C/R ch.中心から X 方向位置での燃料ピン平
均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.2-4 第 2 層燃料ピンのうち C/R ch.中心から Y 方向位置での燃料ピン平
均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.2-5 制御棒引き抜き時の相対出力分布
(カドミウム案内管方策:除熱型カドミウムピン置換方策に対し、
カドミウム製案内管とした場合)
- 図 5.2.2-6(a) C/R ch.中心から第 2 層燃料ピンまでの X 方向相対中性子束分布
の比較
(カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)
- 図 5.2.2-6(b) C/R ch.中心から第 2 層燃料ピンまでの Y 方向相対中性子束分布
の比較

(カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

図 5.2.2-7 第 2 層燃料ピンのうち C/R ch. 中心から X 方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

図 5.2.2-8 第 2 層燃料ピンのうち C/R ch. 中心から Y 方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

図 5.2.2-9 制御棒引き抜き時の相対出力分布
(六角形状 C/R ch. 方策 : C/R ch. - 隣接 S/A 間にカドミウム設置、カドミウムピン→燃料ピンとした場合)

図 5.2.2-10(a) C/R ch. 中心から第 2 層燃料ピンまでの X 方向相対中性子束分布の比較
(六角形状 C/R ch. 方策 vs 基準ケース)

図 5.2.2-10(b) C/R ch. 中心から第 2 層燃料ピンまでの Y 方向相対中性子束分布の比較
(六角形状 C/R ch. 方策 vs 基準ケース)

図 5.2.2-11 第 1 層燃料ピンのうち C/R ch. 中心から X 方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(六角形状 C/R ch. 方策 vs 基準ケース)

図 5.2.2-12 第 2 層燃料ピンのうち C/R ch. 中心から Y 方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較
(六角形状 C/R ch. 方策 vs 基準ケース)

図 5.2.2-13 燃料ピンの核分裂断面積及びカドミウム, ジルカロイ 4 の吸収断面積

図 6.2-1 六角形状 C/R ch. 方策を適用した制御棒集合体の水平断面図

図 6.2-2 カドミウム部と制御棒案内管の一体化

- 図 6.2-3 カドミウム製六角形状案内管を設定した C/R ch. に対する保護管—案内管ギャップ幅の縮小
- 図 6.2-4 カドミウム製六角形状案内管方策を適用した制御棒集合体の水平断面図
- 図 6.3.1-1 計算対象 C/R ch. 及びカドミウム厚パラメータ計算方法
- 図 6.3.1-2 X,Y 各方向での 1 次元平板モデル及び計算条件
- 図 6.3.2-1 カドミウム厚をパラメータとした時の X 方向における相対出力密度分布の比較
- 図 6.3.2-2 カドミウム厚をパラメータとした時の Y 方向における相対出力密度分布の比較
- 図 6.3.2-3 六角形状 C/R ch. 方策とカドミウム製六角形状案内管方策の X 方向における相対出力密度分布の比較
- 図 6.4.1-1 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 幾何形状及び計算体系図
(カドミウム製六角形状案内管方策)
- 図 6.4.1-2 制御棒引き抜き時の 2 次元 XY 計算体系及び計算条件
(カドミウム製六角形状案内管方策)
- 図 6.4.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布
(カドミウム製六角形状案内管方策 : X 方向における Cd 厚 0.3cm^t ,
コーティング材の厚み 0.55cm^t とした場合)
- 図 6.4.2-2 制御棒反応度価値解析に用いた炉心体系水平断面図
- 図 6.4.2-3 制御棒反応度価値解析に用いた炉心体系縦断面図 (円柱形状)
- 図 6.4.2-4 制御棒反応度価値解析に用いたドライバー燃料ピン及び集合体形状

図 6.4.2-5 制御棒反応度値解析に用いた主・後備炉停止系制御棒集合体の水平断面図

図 6.4.2-6 カドミウム厚を 0.3cm^{\dagger} とした時の X 方向における 1 次元及び 2 次元計算による相対出力密度分布の比較

図 6.4.2-7 燃料ピンの出力密度に対する流入中性子の寄与

図 6.4.2-8 カドミウム厚と第 1 燃料ピンにおける出力密度との関係

1. 序論

核燃料サイクル開発機構（以下、「サイクル機構」と呼ぶ）では FBR 大型炉の安全性向上に不可欠な各種炉内試験のための FBR 安全性試験炉 SERAPH (Safety Engineering Reactor for Accident PHenomenology) の設計研究を実施してきた。

SERAPH では定常試験に加え、種々のランプ及びパルス過渡試験が予定されており、ドライバー炉心の除熱のため重水が冷却材に用いられる。

これら試験の遂行や原子炉起動・出力調整には制御棒の運用が不可欠であるが、現行の設計研究では図 1-1(c),(d)に示すように、定常及びランプ過渡試験時には現行高速炉と同じくチャンネル型制御棒を用いる方向で検討が進められている。SERAPH 炉心は $\text{PuO}_2\text{-BeO}$ をドライバー炉心燃料に用いるが^{(1),(2)}、Pu の α 崩壊で発生する α 粒子が BeO との (α, n) 反応で生成する中性子により、燃料集合体は極めてホットな環境下で製造されることになる。チャンネル型制御棒では軽水炉で実績のあるクラスタ型制御棒のように燃料ピンと吸収材ピンが一つの集合体内に混在することはないため、制御棒、燃料集合体は相互に影響を与えることなく独立に製造できる点がチャンネル型制御棒の利点である。

通常の炉心設計では、制御棒フォロワー材には炉心冷却材と同じ物質が用いられる。SERAPH 炉心では重水が冷却材として用いられるが^{(1),(2)}、重水は他の原子炉材料と比べてはるかに高い減速比を有するため、重水を制御棒フォロワー材に用いた場合、特に制御棒引抜き時において中性子の減速・反射による制御棒近傍での局所出力ピークの発生が懸念される。したがって、局所出力ピークの発生による炉心核設計への影響を抑制する観点からは制御棒集合体内にできるだけ重水を含めないことが望ましいが、制御棒吸収材に対する除熱の確保がより困難になり、熱設計に厳しい影響を与える。局所出力ピークを発生する燃料ピンの PuO_2 濃度を低減する方策もピーク抑制には有効と考えられるが、 PuO_2 濃度の複数化は燃料集合体製造工程をより一層厳しくする。

そこで本研究では、吸収材 (B_4C) に対する除熱性確保と集合体製造をより厳しくするような負荷要因の排除を考慮しつつ、局所出力ピーク発生を適切に

抑制し得る制御棒構造の具体化について、評価に必要な計算手法の整備を含めて検討することとした。

2章では、制御棒構造を具体化する上で重要な物理特性である集合体内出力分布を適切に評価するため筆者らが既に整備した計算手法⁽³⁾について簡単に説明する。3章では局所出力ピークの発生について詳細な物理的分析を行う。4章では3章の分析結果に基づき、ヘリウムをフォロワー材とする制御棒に対して局所出力ピークを抑制し得る具体的方策を考案し、各方策における出力分布特性を基にピーク抑制効果について評価する。5章では重水をフォロワー材とする制御棒に対して局所出力ピーク抑制の可能性について考察する。6章では5章の考察結果を受け、集合体製造への新たな負荷要因の排除と中性子吸収材に対する除熱性確保に配慮したカドミウム製六角管・重水フォロワー型制御棒を考案し、局所出力ピークの抑制効果について議論する。7章で本研究の成果をまとめる。

2. 集合体内出力分布評価手法

2.1 概要

制御棒近傍で発生し得る局所出力ピークの適切な評価を基に制御棒構造の具体化を図るには、制御棒集合体に隣接するドライバー炉心燃料集合体内の燃料ピン毎の出力分布特性を詳細に分析することが必要である。

そこで筆者らは、この出力分布特性を評価するために中性子平均自由行程を考慮した 2 次元 XY 体系スーパーセルモデルを既に考案した⁽³⁾。本章ではそのスーパーセルモデルの構成方法、実効断面積の作成と群縮約計算、及びスーパーセルを用いた出力分布計算方法について概説する。

なお、ここで述べる評価手法は 3~6 章で行う 2 次元解析に共通して用いられる。

2.2 2 次元 XY 体系スーパーセルモデルの構成

図 1-1 に示した SERAPH 炉心のドライバー炉心領域における中性子平均自由行程は 3cm 程度である⁽³⁾。制御棒集合体（以下、C/R ch. と称する）とそれに隣接するドライバー燃料集合体（以下、隣接 S/A と称する）との境界付近で発生し得る局所出力ピークは中性子の減速を考慮すると、中性子平均自由行程がドライバー炉心のそれよりも短い中性子による寄与が支配的である。したがって、集合体ピッチが 10cm 弱であることを考慮すれば、局所出力ピークが核的に影響を及ぼし得る範囲は高々 C/R ch. 周囲の 6 体の隣接 S/A までであると考えられる。

そこで筆者らは、図 2.2-1 に示すような 2 次元 XY 体系スーパーセルモデルを用いて局所出力ピークを含む集合体内の出力分布を詳細に評価する方法を考案した⁽³⁾。同図に示したスーパーセルモデルは、中心に設置された 1 体の C/R ch.、それを囲む 6 体の隣接 S/A、さらにこれら 6 体の隣接 S/A を囲む 9 体分に相当する周辺の燃料集合体（以下、周辺 S/A と称する）の計 16 体分相当の集合体から構成される。

2.4 節で述べるように、このスーパーセルモデルを TWOTRAN-II コード⁽⁴⁾に適用した。本報では図 2.2-1 のスーパーセルモデルの体系左側から右側に向かう方向を X 方向、体系下端から上端に向かう方向を Y 方向と称する。水平方向に関しては 4 面すべてを反射境界条件とした。

ところで、設定したスーパーセルモデルは 1/4 対称形を有しており (図 2.2-2(a),(b)参照)、図 2.2-2(b)に示した 1/4 体系は X 方向を 4 つに、Y 方向を 2 つにそれぞれ均等分割してできる 8 つの要素から構成される (図中の①~⑧)。これら 8 つの構成要素は幾何学的に 2 種類に分けられ、ここではこれらを基本セルモデルと称する (図 2.2-2(c)参照)。

この基本セルモデルは図 2.2-3 に示す構成手順に従って幾何学的に異なる 2 種類の単位セルモデルから構成される (同図(a),(b)参照)。ここでは、燃料集合体の部分要素からなる単位セルモデルを S/A セルモデル、燃料集合体と制御棒集合体の各部分要素からなる単位セルモデルを C/R ch.セルモデルと称する。

これら 2 種類の単位セルを組み合わせることでスーパーセルモデルを構成することができる。図 2.2-2(b)に示した 1/4 体系において、②~⑧の基本セルモデル (図 2.2-2(c)の (イ)) はいずれも幾何学的には S/A セルモデルのみで構成できる。ところが実際に計算を行う場合、各基本セルモデルに設定する X,Y 各方向のメッシュ数はスーパーセル内で各基本セルモデルが占める位置によって異なる。例えば①・⑤の組と③・⑦の組とでは、⑤と⑦が互いに異なる形状を示すため、それぞれの組に設定される X 方向メッシュ境界も異なったものとなる。また 2.3 節で述べるように、群縮約計算の結果各メッシュに割り当てられる物質領域番号もその計算モデルの違いにより基本セルモデル毎に異なったものになる。そのため S/A セルモデルはさらに細かく分類され、結局スーパーセルモデルは図 2.2-4 に示すような計 13 種類の単位セルモデルの組み合わせで構成されることになる。

スーパーセルモデルの構成手順は次の通りである。まず図 2.2-5 に示すよう

に、8つの基本セルモデルの各々を2つの単位セルモデルの重ね合わせで作成し、スーパーセルモデル 1/4 体系を構成する。同図にはこれら基本セルモデルに1~8の番号を付けた。2つの単位セルモデルが重なる部分については、下側から重ねた単位セルモデル側を切り取る。次に、構成された 1/4 体系とそれを左右反転したものとを結合し、X 方向メッシュ境界を設定してスーパーセルモデル 1/2 体系を構成する（図 2.2-6 の [手順 1] 参照）。さらにこの 1/2 体系とそれを上下反転させたものとを結合し、Y 方向メッシュ境界を設定することによりスーパーセルモデルを構成する（図 2.2-6 の [手順 2] 参照）。

作成されたスーパーセルモデルの例を図 2.2-7 に示す。なお、メッシュ境界の設定は他の計算条件（中性子エネルギー群数、散乱次数、 S_N 次数等）の設定の下、計算機の最大許容メモリを考慮した上で行った⁽⁸⁾。

以上で述べたスーパーセルモデル作成に係わるフローを図 2.2-8 に示す。

2.3 実効断面積作成及び群縮約計算

実効断面積作成並びに群縮約計算に係わる一連の計算フローを図 2.3-1 に示す。同図に示すように、これらの計算は米国オークリッジ国立研究所で開発された SCALE4 コードシステム⁽⁹⁾に内蔵されているモジュールを用いて行った。

(1) 218 群実効マクロ断面積の作成（使用モジュール：CSASIX, CSASI, WAX）

ENDF-B/IVに基づく 218 群断面積セット CSRL⁽⁹⁾、及び SCALE4 システムのモジュールとして CSASI, CSASIX, WAX を用いて領域毎の 218 群実効マクロ断面積を作成した。この作成方法を図 2.3-2 に、218 群エネルギー構造を表 2.3-1 にそれぞれ示す。

燃料ピン領域については、図 2.3-2(a)に示すように六角形状非均質無限セルモデルに対して CSASIX を用いた。CSASIX はセルを構成する物質領域毎にその物質に含まれる各核種の実効マイクロ断面積を作成した上で 1 次元セル計算を行い、得られたセル内中性子束分布を重みとしてセル平均実効マクロ断面積を

作成する。CSASIX を用いた計算では、燃料ピンを構成する各領域（燃料ペレット、ギャップ、被覆管、周辺冷却材）毎並びにセル平均の 218 群実効マクロ断面積データを一括して格納するファイルが作成される。

燃料ピン領域以外の領域については、図 2.3-2(b)に示すように無限均質セルモデルに対して CSASI を用いた。CSASI は対象物質を構成する核種の実効マクロ断面積を計算し、これを基に 218 群実効マクロ断面積を作成する。CSASI を用いた計算では、それぞれの領域に対して 1 つのマクロ断面積ファイルが作成される。

以上により作成されたすべての物質領域に対する実効マクロ断面積ファイルを WAX にて一つのファイルに統合する（図 2.3-2(c)参照）。このファイルが次の群縮約計算に用いられる。なお、このファイル統合化において、燃料ピン領域についてはセル平均実効マクロ断面積データのみを取り出す。

(2) 群縮約計算（使用モジュール：XSDRNPM）

TWOTRAN-II を用いたスーパーセル計算における計算負荷をできるだけ低減するため、(1)で作成・統合された 218 群断面積データを 1 次元 S_N 輸送計算コード XSDRNPM により 22 群に縮約した。22 群エネルギー構造は表 2.3-1 に示す通りである。

XSDRNPM を用いた 22 群実効マクロ断面積作成方法を図 2.3-3 に示す。XSDRNPM は作成済みの多群（本研究では 218 群）実効マクロ断面積を入力データとして 1 次元 S_N 輸送計算を行い、その結果得られた中性子束分布を重みとして物質領域毎に実効マクロ断面積を少数群（本研究では 22 群）に縮約する。本研究の群縮約計算はすべて、散乱次数 3、 S_N 次数 8、中性子束及び固有値収束判定条件 5×10^{-4} 以下として行った。また計算では、図 2.3-3 に示すように左・右側境界をともに反射境界条件とし、軸方向にはバックリング長 1m を考慮した。

以上により 22 群実効マクロ断面積ファイルが作成される。ファイルは AMPX ワーキング形式、ISOTXS 形式（CCCC 形式）、ANISN コード形式の計 3 種類のものが得られる。これらのうち、ANISN コード形式のものを TWOTRAN-

IIコード用にフォーマット変換し、次節で述べるスーパーセル計算に用いる。

2.4 スーパーセル計算及び出力分布算出

スーパーセルモデル作成時に得られる TWOTRAN-II 用入力データ、及び前節で作成された TWOTRAN-II 用実効マクロ断面積データ (図 2.2-8 参照) を用いて、作成済みのスーパーセルモデルを対象とする 2 次元 XY 輸送計算を TWOTRAN-II コードを用いて行う。スーパーセル計算のフローを図 2.4-1 に、計算に係わる条件、入力データ、断面積データ、及び計算結果の例を図 2.4-2 にそれぞれ示す。図 2.4-1 にみるように、本研究では TWOTRAN-II 用の入力データ及び断面積データの作成までは機構所有の大型計算機を、TWOTRAN-II による計算では IBM ワークステーションを用いた。

本研究で設定した主要計算条件は以下の通りである。

- ・中性子エネルギー群数 : 22
- ・ S_N 次数 : 8
- ・境界条件 : 4 面ともすべて反射境界
- ・軸方向バックリング長 : 1m
- ・中性子束の収束判定条件 : $\epsilon < 10^{-4}$

以上の計算で得られたメッシュ毎の中性子束分布を用いて、スーパーセル全体にわたってのメッシュ毎及び燃料ピン毎の出力密度分布、及び燃料集合体毎の集合体平均出力密度を算出する。この際、中性子束は各燃料ピンでの出力密度を絶対値で評価できるように、スーパーセル全体での全出力が 1 となるように規格化する。

各種出力密度分布の算出に係わる計算フローを図 2.4-3 に示す。出力密度算出のためのプログラムは別途作成した³⁾。計算結果の一例を図 2.4-4 に示す。同図ではスーパーセルの 1/4 対称性を利用し、セル全体を 4 つに区画割りして区画毎に異なる特性を表示している。(a), (b) は燃料ピン毎の出力密度分布をそれぞれデジタル値、等高線図で表示したもので、(c) は集合体平均出力密度をデジタル値で表示、(d) はスーパーセルの幾何構成を表したものである。

3. ヘリウムフロー型制御棒近傍での局所出力ピーク特性分析

3.1 概要

制御棒近傍での局所出力ピークの発生を適切に抑制する方策を具体化するためには、局所出力ピーク発生に係わる物理的メカニズムについて詳細に分析することが必要である。

そこで本章では、前章で述べた計算手法を用いて、制御棒周囲における中性子物理挙動や局所出力ピークの発生位置及びその大きさに着目した集合体内出力分布特性の定量分析を行い、局所出力ピークの発生が炉心核特性に与える影響を把握した。

3.2 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル

現行の SERAPH 炉心体系列を示した図 1-1 において、(a)、(b)はそれぞれ炉心及びドライバー炉心燃料集合体の構成を表す。同図 (c) はスーパーセルモデルの対象にもなる出力調整棒（または安全棒）とその周囲の集合体配列を、(d) は出力調整棒及び安全棒の構成（制御棒挿入、引き抜き）を表している。制御棒吸収材には現行高速炉と同じ B_4C を用いている。

通常、制御棒設計においては、制御棒引き抜きに伴い冷却材がフォローし、制御棒案内管を充填する構造となっている。ところが SERAPH 炉心は冷却材に高い減速比を有する重水を用いるため、通常的设计でみられるのと同様にフォロー材を冷却材とすると、制御棒周辺に極大な大きさの局所出力ピークを発生することが予想される。したがってこれまでの SERAPH 設計研究では、図 1-1 に見るように案内管内側をヘリウム充填とする方向で検討を進めてきた。

ただ、最外位置にある案内管が円環状であることから、隣接する六角形状の燃料集合体との間には 2.5~10mm の隙間が生じ、その隙間に重水が残存することになる。この残存する重水で減速・反射された中性子も局所出力ピークの発生に寄与することが考えられる。

本節ではまず、フォロー材をヘリウムとし、上述の残存する重水が局所出

力ピークの発生とどのように係わっているかに重点をおいて出力分布特性を評価した。

計算対象とした制御棒及びその周囲の幾何形状（水平断面）を制御棒引き抜き時について図 3.2-1 に、制御棒挿入時について図 3.2-2 にそれぞれ示す。これらはともにフォロワー材をヘリウムとした体系で、既に例示した図 1-1 の体系と同じものである。これら各々を前章で述べた手順に従い TWOTRAN-II 計算用にモデル化したものを図 3.2-3, 3.2-4 にそれぞれ示す。

計算は制御棒引き抜き、挿入の両ケースについて行った。

3.3 計算結果及び考察

制御棒引き抜き、挿入時におけるスーパーセル体系出力密度分布の計算結果をそれぞれ図 3.3-1, 3.3-2 に示す。これらの図を基に、集合体内最大出力密度と集合体平均出力密度の比を求めた結果を表 3.3-1 に示す。本節の結果は同表中の「置換物質」欄の「未設置」欄に掲載した数値である。(a)は隣接 S/A のみに着目したもの、(b)は周辺 S/A のみに着目したもの、(c)はすべての燃料集合体を対象にしたものである。なお、後述する隣接 S/A 内の燃料ピンの一部を燃料以外の物質で置換した場合の結果も合わせて掲載した。

(1)制御棒引き抜き状態

まず、制御棒引き抜き状態における出力密度分布特性について考察する。

・ 局所出力ピークの発生状況

図 3.3-1(a)に見るように、局所出力ピークの発生位置はその大きさに依らずどの S/A 内においても C/R ch.にもっとも近い燃料ピン層のみに限られていることがわかる。この局所出力ピークの中でも最大の値（図 3.3-1(a)の中でハッチングされた 0.829）は最大の集合体平均出力密度の値 0.693 に対し、表 3.3-1(a)

に示すように約 20%大きな値を示している。

この位置で局所出力ピークが発生したのは、C/R ch.の案内管と隣接 S/A との間に存在する重水による影響である。隣接 S/A で発生した中性子は C/R ch.に流入する過程で、

- ①その一部はこの残存する重水で減速及び反射される。
- ②残りの大部分はこの残存重水領域を通過し、さらに C/R ch.のヘリウム充填領域も通過した後、対称位置にある残存重水領域で二度目の減速を受け、その後対面する隣接 S/A に流れ込む。

①は元の隣接 S/A において、②はそれと対面する隣接 S/A においてそれぞれ局所出力ピークを発生させる要因となる。

また、この位置における局所出力ピークの発生により、図 3.3-1(b)に見られるように隣接 S/A そのものの集合体平均出力密度も増大し、これに伴いどの隣接 S/A においても集合体平均出力密度が周辺 S/A のそれを上回っていることがわかる。

・ 試験遂行能力への影響

SERAPH 炉心は図 1-1 に示すように、種々の試験燃料を装荷するために設けられる円筒形試験孔を六角形集合体からなるドライバー炉心を取り囲む中空円筒体系で構成される。過渡試験ではドライバー炉心で発生した中性子を試験孔に供給することにより試験燃料を破損、溶融あるいは分散させる。試験遂行時のドライバー炉心は熱的に相当厳しい条件となるため、ドライバー炉心の出力密度をできる限り低く抑えつつ試験燃料に必要なエネルギーを投入することが炉心設計上の重要なポイントとなる。

これまで SERAPH 核設計研究では、下式で定義される入熱係数を炉心の試験遂行能力を評価する指標として用いている。

[入熱係数]

= [試験燃料の径方向平均軸方向最大出力密度] / [ドライバー部最大出力密度]

炉心の試験遂行能力を高めるには、できるだけ大きい入熱係数を得ることが要求される。入熱係数は定義式からわかるように、試験燃料とドライバー炉心の最大出力密度の比であることから、ドライバー炉心における出力ピーキングの増大は試験遂行能力の低下に直接影響することになる。したがって、SERAPH炉心の試験遂行能力を適切に評価するには、ドライバー炉心の出力ピーキングを適切に抑制することが必要となる。

これまでの炉心特性評価における出力ピーキングについては集合体内出力ピーキングを考慮せず、炉心全域にわたる径方向及び軸方向出力ピーキングのみとしていた。ところで図 3.3-1 に見るように、前述の局所出力ピークは集合体平均出力密度が最大値を示したドライバー燃料集合体で発生していることから、このピークの値がドライバー炉心における最大出力密度の真値を与える。すなわち、集合体平均出力密度の最大値に上述の 20%弱の集合体内出力ピーキングを考慮した値が真のドライバー炉心最大出力密度となる。

このことから、集合体内出力ピーキングを考慮した場合の入熱係数は、これまでのようにそれを考慮せず得られた入熱係数に対し、さらに 20%弱の低下を見込むことが必要となる。

ただし、上述の考察で明らかとなったように、局所出力ピークの発生は C/R ch. に隣接する S/A の中でも C/R ch.にもっとも近接する 1 層の燃料ピン列に限られている。したがって、例えばこの領域の燃料ピンのみ重水で減速・反射された中性子に対して適度な吸収効果が期待される燃料以外の物質に置換する、といった方策を講じれば、局所出力ピークの発生とそれに伴う入熱係数の低下を回避することは十分期待できる。

(2)制御棒挿入状態における局所出力ピークの発生状況

(1)と同様に、制御棒挿入状態における局所出力ピークの発生状況について考察する。

図 3.3-2(a)に見るように、どの隣接 S/A においても制御棒引き抜き状態でみられたような局所出力ピークの発生はみられない。

これは次の理由による。制御棒を挿入した場合、一旦 C/R ch.に流れ込んだ中

中性子はその大部分が C/R ch.内で吸収されてしまうため、(1)の“局所出力ピークの発生状況”で挙げた 2 種類の中性子挙動①、②のうち、②が局所出力ピークの発生に寄与することはない。

すなわち、制御棒を挿入した場合、制御棒引き抜き状態で局所出力ピークが発生した位置では、(1)で挙げた②以外の中性子源のみがその位置での出力密度の決定に寄与することになる。このため、この位置での出力密度は制御棒引き抜き状態の時に比べて大幅に抑制され、結果として局所出力ピークの発生には至らない。

以上、(1)及び(2)の考察結果から、局所出力ピークの発生により入熱係数及び炉心の試験遂行能力に影響を与え得るのは制御棒引き抜き状態の時のみで、その影響は入熱係数に対し 20%弱の低下であることがわかった。ただし、局所出力ピークの発生位置が隣接 S/A の中で C/R ch.にもっとも近い 1 層の燃料ピン列のみに限られていることから、これらの燃料ピンのみを燃料以外の物質で置換するなどの設計対策を施せば、局所出力ピークの発生とそれに伴う入熱係数への影響を回避することは十分可能であると言える。この具体的な回避方策については次章で詳細に議論する。

4. ヘリウムフォロワー型制御棒近傍での局所出力ピーク抑制方策

4.1 概要

前章で行った出力分布特性分析により、局所出力ピークの発生位置は隣接 S/A の中で C/R ch.にもっとも近い 1 層の燃料ピン列のみに限られることが明らかとなった。

本章ではこの知見に基づき、局所出力ピークを発生した 1 層の燃料ピン列のみを燃料以外の物質で置換することで局所出力ピークの抑制を図り、ピーク抑制の有効性について調べた。

置換物質として、4.2 節ではジルカロイ 4 とチタンを、4.3 節ではカドミウムを選定し、各節でその選定根拠を述べるとともに、各々の物質の局所出力ピーク抑制効果を評価した。以下、ジルカロイ 4、チタン、カドミウムの各々を上記 1 層の燃料ピン列と置換する方策をそれぞれジルカロイ 4 ピン置換方策、チタンピン置換方策、カドミウムピン置換方策と称する。

なお、前章と同様にフォロワー材はすべてヘリウムとした。

4.2 非燃料ピンによる制御棒隣接燃料ピンの置換

4.2.1 制御棒及び燃料集合体計算モデル

ここでは置換物質にジルカロイ 4 またはチタンを用いた場合について述べる。

(1) ジルカロイ 4

ドライバー炉心燃料集合体の各コーナーに設けるタイロッドと同じ物質として選定した。隣接 S/A 内の最外層ピンのうち、C/R ch.に隣接する箇所がすべて燃料以外の同一物質からなるピンで構成されることになるため、集合体製造への負荷はそれほど大きくないといえる。

(2) チタン

C/R ch.とその隣接 S/A 間に残存する重水で減速・反射された中性子のエネルギーはかなり低い。低エネルギー領域ではジルカロイ 4 よりも吸収断面積が大きいいため、上記(1)よりも局所出力ピーク抑制効果は大きいと予想される。ただし、タイロッドと異なる物質となるため、集合体製造は(1)に比べればやや煩雑になるが、試験体容器壁やスロット壁にも用いられる物質であるため、現行 SERAPH 炉心の環境場での使用上には特段問題点は存在しないと考えられる。

ジルカロイ 4 ピン置換方策またはチタンピン置換方策を適用した場合の制御棒及びその周囲の幾何形状（水平断面）を制御棒引き抜き時について図 4.2.1-1 に、制御棒挿入時について図 4.2.1-2 にそれぞれ示す。これらを 2 章で述べた手順に従い TWOTRAN-II 計算用にモデル化したものを、ジルカロイ 4 ピン置換方策の制御棒引き抜き時について図 4.2.1-3、制御棒挿入時について図 4.2.1-4 に、チタンピン置換方策の制御棒引き抜き時について図 4.2.1-5、制御棒挿入時について図 4.2.1-6 にそれぞれ示す。

4.2.2 計算結果及び考察

以下、隣接 S/A 内のピン層については、C/R ch 側から見て順に第 1 層、第 2 層、... と称することにする。すなわち、C/R ch に隣接するピン層が第 1 層、さらに隣接 S/A への内側に向かったの隣接ピン層が第 2 層となる。

(1)ジルカロイ 4 ピン置換方策

ジルカロイ 4 ピン置換方策を適用した場合の、制御棒引き抜き、挿入時におけるスーパーセル体系出力密度分布の計算結果をそれぞれ図 4.2.2-1、4.2.2-2 に示す。

・制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況

まず、制御棒引き抜き状態における出力密度分布特性について考察する。

図 4.2.2-1 にみるように、制御棒引き抜き状態において、局所出力ピークはその大きさに依らずどの隣接 S/A 内においても C/R ch.にもっとも近い 1 層の燃

料ピン列のみで発生していることがわかる。

この局所出力ピークの中でも最大の値（図 4.2.2-1 中でハッチングされた 0.880）は、最大の集合体平均出力密度の値 0.720 に対し、表 3.3-1(a)に示すように 22%程度大きな値を示している。この値は前章で示した置換物質を設けずに生じた集合体出力ピーキングとほぼ同じである。

すなわち、第 1 層の燃料ピンをジルカロイ 4 ピンに置換しても、さらにその内側の第 2 層燃料ピンで局所出力ピークが発生する。

この位置で局所出力ピークが発生したのは、C/R ch.の案内管と隣接 S/A 間での重水の存在に起因している。隣接 S/A で発生した中性子は置換物質として設定したジルカロイ 4 ピンを通過し、C/R ch.に流入しようとする過程で、

- ① その一部はこの残存する重水で減速・反射される。
- ② 残りの大部分はこの残存重水領域を通過し、さらに C/R ch.のヘリウム充填領域も通過した後、対称位置にある残存重水領域で二度目の減速を受け、その後対面する隣接 S/A に流れ込む。

①では元の隣接 S/A 内で、②ではそれと対面する隣接 S/A 内で影響を受けることになる。これら①、②により減速・散乱された中性子はかなり低いエネルギーとなるが、ジルカロイ 4 ではこの低エネルギーの中性子を吸収しきれず、吸収を免れた低エネルギー中性子が第 2 層燃料ピンに到達してしまったため、局所出力ピークを抑制できなかったものと考えられる。

・制御棒挿入状態の局所出力ピークの発生状況

次に、制御棒挿入状態における出力密度分布特性について考察する。

図 4.2.2-2 にみるように、どの隣接 S/A においても、制御棒引き抜き状態でみられたような局所出力ピークの発生はみられない。

これは次の理由による。制御棒を挿入した場合、一旦 C/R ch.に流れ込んだ中性子は、その大部分が C/R ch.内で吸収されてしまうため、“(1)制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況”で挙げた、2 種類の中性子挙動①、②のうち、②が局所出力ピークの発生に寄与することはない。

すなわち、制御棒を挿入した場合、制御棒引き抜き状態で局所出力ピークが

発生した位置では、“(1)制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況”で挙げた②以外の中性子源のみがその位置での出力密度の決定に寄与することになる。このため、この位置での出力密度は制御棒引き抜き状態の時に比べて大幅に抑制され、結果として局所出力ピークの発生には至らない。

以上から、ジルカロイ 4 ピン置換方策は制御棒引き抜き状態における隣接 S/A 内の局所出力ピークの抑制には有効でないといえる。

(2) チタンピン置換方策

チタンピン置換方策を適用した場合の、制御棒引き抜き、挿入時におけるスーパーセル体系出力密度分布の計算結果をそれぞれ図 4.2.2-3, 4.2.2-4 に示す。

・制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況

まず、制御棒引き抜き状態における出力密度分布特性について考察する。

図 4.2.2-3 にみるように、制御棒引き抜き状態において、ジルカロイ 4 ピン置換方策のときと同様に、局所出力ピークはその大きさに依らずどの隣接 S/A 内においても C/R ch.にもっとも近い 1 層の燃料ピン列のみで発生していることがわかる。

この局所出力ピークの中でも最大の値（図 4.2.2-3 中でハッチングされた 0.851）は、最大の集合体平均出力密度の値 0.721 に対し、表 3.3-1(a)に示すように 18%程度大きな値を示している。チタンの方がジルカロイ 4 よりも特に低エネルギー領域でより大きな吸収断面積を有することから、この値はジルカロイ 4 ピン置換方策の場合に得られた値（22%程度）よりも若干小さい。しかしながら、チタンピンで置換してもなお 20%弱の集合体出力ピーキングが残る。

すなわち、第 1 層の燃料ピンをチタンピンに置換しても、さらにその内側の第 2 層燃料ピンで局所出力ピークが発生する。

これは、ジルカロイ 4 よりも低エネルギー領域での吸収断面積が大きいチタンピンで置換しても、(1) ジルカロイ 4 ピン置換方策の中で挙げた 2 種類の中性子挙動①、②より減速・散乱された低エネルギーの中性子を吸収しきれず、

吸収を逃れた低エネルギー中性子が第 2 層燃料ピンに到達してしまったため、局所出力ピークを抑制することができなかつたものと考えられる。

・制御棒挿入状態の局所出力ピークの発生状況

次に、制御棒挿入状態における出力密度分布特性について考察する。

図 4.2.2-4 にみるように、どの隣接 S/A においても、制御棒引き抜き状態でみられたような局所出力ピークの発生はみられない。

したがって、ジルカロイ 4 ピン置換方策の場合と同じ理由により、局所出力ピークの発生には至らなかつたと考えられる。

以上、(1)、(2) の考察結果から、ジルカロイ 4 ピン置換方策及びチタンピン置換方策はともに、制御棒引き抜き状態における隣接 S/A 内の局所出力ピークの抑制には有効でないといえる。

4.3 カドミウムピンの設置

4.3.1 制御棒及び燃料集合体計算モデル

本節ではカドミウムピン置換方策を用いた場合について述べる。

カドミウムピン置換方策を適用した場合の制御棒及びその周囲の幾何形状(水平断面)を制御棒引き抜き時について図 4.3.1-1 に、制御棒挿入時について図 4.3.1-2 にそれぞれ示す。これらを 2 章で述べた手順に従い TWOTRAN-II 計算用にモデル化したものを制御棒引き抜き時について図 4.3.1-3 に、制御棒挿入時について図 4.3.1-4 にそれぞれ示す。これらの図からわかるように、置換物質の種類以外は前節のジルカロイ 4 ピン置換方策及びチタンピン置換方策の場合と全く同じ条件である。

4.3.2 計算結果及び考察

カドミウムピン置換方策を適用した場合の制御棒引き抜き、挿入時におけるスーパーセル体系出力密度分布の計算結果をそれぞれ図 4.3.2-1, 4.3.2-2 に示

す。

・制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況

図 4.3.2-1 にみるように、どの隣接 S/A においても集合体出力ピーキングは 5% 程度にまで抑えられている。したがって、カドミウムピンの適用は、ジルカロイ 4 ピン置換方策やチタンピン置換方策でみられた 20% 程度 of 出力ピーキングを抑制するのに有効に機能していることがわかる。

ここで、図 4.3.2-3 に示す最大出力密度となる燃料ピンでの核分裂率エネルギー分布をみってみる。比較のため、置換方策を設けないケース、ジルカロイ 4 ピン置換方策を適用したケース、チタンピン置換方策を適用したケースの各々についても合わせて掲載した。なお、規格化は全群和が 1 となるようにした。同図にみるように、これら 3 ケースに比べ、カドミウムピン置換方策では熱エネルギー領域 (1eV 以下) での核分裂率が大きく低下していることがわかる。

これは図 4.3.2-4 に示すカドミウムの吸収断面積特性に起因する。同図からわかるように、10eV から 0.2 eV まで中性子エネルギーが低下すると、カドミウムの吸収断面積は 5 桁増大する。すなわち、熱エネルギー領域の中性子に対してカドミウムは吸収断面積が急激に増大する特性を示す。前節の“(1)制御棒引き抜き状態の局所出力ピークの発生状況”で挙げた、2 種類 of 中性子挙動①、②より減速・散乱された低エネルギーの中性子は、このカドミウムの吸収断面積特性によりその多くが吸収されて第 2 層燃料ピンまで到達できないため、隣接 S/A 内の局所出力ピークは抑制されたものと考えられる。

なお、カドミウムピン置換方策の場合に限って、TWOTRAN-II の加速法であるリバランス法によりリバランス固有値を反復計算にて求める際、収束しなかった。このため、収束解に影響を与えないように配慮した上で該当箇所を修正し、修正版 TWOTRAN-II にて収束解を得た。詳細は付録 2 に示す。

・制御棒挿入状態における局所出力ピークの発生状況

図 4.3.2-2 にみるように、ジルカロイ 4 ピン置換方策、チタンピン置換方策と

同じ理由により、局所出力ピークの発生には至らなかったと考えられる。

・試験遂行能力への影響

制御棒引き抜き時については、図 4.3.2-1 にみるようにカドミウムピン設置に伴う局所出力ピーク抑制効果により、体系全体の最大出力密度は隣接 S/A 内ではなくその周辺 S/A 内で発生していることがわかる (0.754 と記されたハッチング箇所)。すなわち、カドミウムピン置換方策は、隣接 S/A で発生していた局所出力ピークを十分に抑制し、局所出力ピーク発生に伴う入熱係数の低下を回避させるのに有効に機能している。

制御棒挿入時については、図 4.3.2-2 にみるように C/R ch.近傍で局所出力ピークの発生はみられず、体系全体の最大出力密度は周辺 S/A 内で発生していることから、局所出力ピークが発生し入熱係数の低下を招くということは生じ得ない。

以上のことから、本節で検討したカドミウム置換方策は、局所出力ピークの発生とそれに伴う入熱係数の低下を招かない有効な方策であることが示された。

5. 重水フォロワー型制御棒での局所出力ピーク抑制の可能性

5.1 概要

前章の結果から、制御棒に隣接する 1 層の燃料ピン列をカドミウムに置換する方策が局所出力ピークの抑制に有効に機能することがわかった。

ところで、前章までの検討では制御棒フォロワー材が局所出力ピークの発生を誘発するのを回避するためヘリウムフォロワーとしていた。しかしながら、制御棒吸収材である B_4C からの発熱に対する除熱性確保の観点からは、フォロワー材にはヘリウムガスよりもドライバー冷却材と同じ重水を用いることが望ましい。付録 1 に示すように、SERAPH の中性子環境場での制御棒発熱密度が通常の高速炉の場合に比べ 3 倍程度に相当する $300W/cm^3$ 程度となり得ることを考慮すると、ヘリウムフォロワーとする案は設計がかなり厳しいと判断され、重水フォロワーの適用が一層望まれる。

重水フォロワーとした場合、フォロワーからの中性子減速・反射により局所出力ピーク問題が再び顕在化するものの、局所出力ピーク発生の物理的メカニズムについては前章までで検討した C/R ch 案内管と隣接 S/A 間に残存する重水による影響の場合と基本的に同じである。したがって、前章にて局所出力ピーク問題解決への有効性が確認されたカドミウムピン置換方策は、重水フォロワーの場合にも同様に有効であることが期待される。

そこで本章では、前章で検討したカドミウムピン置換方策を重水フォロワー型制御棒に適用した場合に、前章と同様の局所出力ピーク抑制効果が得られるかどうかについて調べた。

ところで、カドミウムピン置換方策が局所出力ピークの抑制に有効であることの本質的な要因は、カドミウムを隣接 S/A と制御棒領域中の重水との間に設けることである。したがって、カドミウムをドライバー燃料集合体ではなく制御棒領域内に設置する制御棒構造を用いても局所出力ピークの抑制が期待できる。このような制御棒設計を採り入れることは、ドライバー燃料集合体製造に余分な負荷を掛けない点で望ましい。

そこで本章では、カドミウムを制御棒領域内に設ける具体的な方策として、

制御棒外枠を現行のジルカロイ 4 からカドミウム製とし、さらに隣接 S/A との間の重水を極力排除するため現行の円環形状から六角形状とする重水フォロワー型制御棒構造を考案した。この方策についても局所出力ピーク抑制の可能性について調べることにした。

5.2 カドミウムを用いた種々の方策

5.2.1 制御棒及び周辺燃料集合体計算モデル

本章では、カドミウムを用いた以下 3 つの方策について検討した。なお表 5.2.1-1 に、以下 3 つの方策と 3 章で検討した燃料ピンの置換を行わない体系（同表中の“未方策（基準ケース）”）及び前章で検討したカドミウムピン置換方策（同表中の“カドミウムピン置換方策”）との相違点についてまとめた。

(1) 除熱型カドミウムピン置換方策

4 章で検討したカドミウムピン置換方策に対し制御棒フォロワー材をヘリウムから重水に変更した方策で、制御棒吸収ピンの除熱性確保を考慮したもの。

(2) カドミウム案内管方策

(1)の方策において、制御棒案内管そのものをカドミウム製とした方策で、(1)よりもさらに局所出力ピークの抑制効果が期待できるもの。

(3) 六角形状 C/R ch. 方策

現行の円環形状制御棒集合体の案内管と隣接 S/A の間に残存する重水領域をカドミウムで埋めることで案内管外側領域をカドミウム製六角形状とする制御棒構造とし、かつカドミウムピン置換方策により置換されたカドミウムピンを元の燃料ピンに戻したもの。

上記(1)～(3)の各方策を適用した場合の制御棒及びその周囲の幾何形状（水平断面）を制御棒引き抜き時について図 5.2.1-1～5.2.1-3 にそれぞれ示す。これ

らを2章で述べた手順に従い TWOTRAN-II 用にモデル化したものを図 5.2.1-4～5.2.1-6 にそれぞれ示す。

なお、前章までに行った出力分布特性評価によれば、制御棒を全挿入とした状態では局所出力ピークの発生は見られないと判断されることから、本章では制御棒挿入状態については計算対象外とした。

5.2.2 計算結果及び考察

前節で述べた(1)～(3)の各方策について、集合体内出力密度分布計算の結果を基準ケースも含めて相互比較し、局所出力ピーク抑制に対する有効性を考察する。

なお中性子束は、これまでと同様に、各燃料ピンでの出力密度を絶対値で評価できるように、スーパーセル体系全体での全出力が1となるように規格化した。この規格化条件はすべての方策について適用した。

隣接 S/A 内のピン層については、前章と同様に C/R ch 側から見て順に第1層、第2層、... と称することにする。

(1) 除熱型カドミウムピン置換方策

フォロワー材を重水とした本方策における集合体内出力密度分布を図 5.2.2-1 に示す。同図に見るように、図 4.3.2-1 に示したヘリウムフォロワーの場合に比べ、カドミウムピンにもっとも近い燃料ピン層に限って局所出力ピークの発生が見られる。この層の中でも、最大の値（図 5.2.2-1 中でハッチングされた 0.978）は、最大の集合体平均出力密度の値 0.729 に対し表 5.2.2-1(a)に示すように 30%以上の大きな値を示している。この値は基準ケース（ヘリウムフォロワー・置換物質なし）に生じた集合体出力ピーキングよりも2倍程度大きい。

すなわち、第1層の燃料ピンをカドミウムピンとしても、さらにその内側の第2層燃料ピンで大きな局所出力ピークが発生することがわかった。

この位置で局所出力ピークが発生したのは、C/R ch.の案内管と隣接 S/A 間での重水の存在に加え、重水フォロワーとしたことによる重水インベントリーの増加に起因している。隣接 S/A で発生した中性子は、第1層ピンを通過し、C/R

ch.に流入しようとする過程で、

- ①その一部は、この残存する重水で減速反射される。
- ②残りの大部分は、この残存重水領域を通過した後、さらに C/R ch.の重水フォロワー領域で反射される。
- ③②の重水フォロワー領域で減速を受け通過した後、対象位置にある残存重水領域で二度目の減速を浮け、その後対面する隣接 S/A に流れ込む。

①, ②は元の隣接 S/A 内で、③はそれと対面する隣接 S/A 内で生じる中性子挙動である。これら①, ②, ③による減速・散乱された中性子は、かなり低いエネルギーであり、これらの中性子の大部分は第1層燃料ピンに流れ込む。

これら3種のうち、特に②は図 4.3.2-1 に示したヘリウムフォロワーの場合には見られなかった、新たに生じた中性子減速・反射挙動である。また③についても、対称位置での残存重水領域で受ける二度目の減速は、ヘリウムフォロワーの場合と共通の挙動であるが、その前の重水フォロワー領域での減速は、②と同様に重水フォロワーの場合において初めて生じた挙動である。

この一連の中性子挙動を詳細に分析するため、C/R ch の中心から第2層ピンに至るまでの径方向中性子束分布を図 5.2.2-2(a),(b)に示す。両図とも、本除熱型カドミウムピン置換方策における結果に加えて、フォロワー材の違いによる比較を行うため、前章で検討したカドミウムピン置換方策の結果も示した。なお、タイロッドの存在が中性子挙動に与える影響も見するため、同図(a)では C/R ch 中心から集合体面に直角に向かう方向（以下、X 方向と称する。後述する(2), (3)の方策においても同様。）の、同図(b)では同じくタイロッドの存在する集合体コーナーに向かう方向（以下、Y 方向と称する。後述する(2), (3)の方策においても同様。）の中性子束分布を示した。また、計算に用いた 22 群構造に対し、図 5.2.2-13 に示す燃料ピンの核分裂断面積のエネルギー特性を基に各中性子エネルギーが出力密度に与える寄与を分析するため、以下のように 3 群化して図示した。

- ① 高エネルギー領域 : 3.74keV 以上
- ② 中速エネルギー領域 : 1.3eV ~ 3.74 keV
- ③ 低エネルギー領域 : 1.3eV 以下

①は核分裂断面積が小さい領域、②は共鳴領域を有する核分裂断面積が中間的な大きさの領域、③は ^{239}Pu の 0.29 eV での共鳴核分裂ピークを含む核分裂断面積がもっとも大きい領域である。

X 方向における比較

まず、タイロッドの存在の影響が生じ得ない X 方向の中性子束分布を示した図 5.2.2-2(a)を見てみる。重水フォロワーとした除熱型カドミウムピン置換方策では、重水の存在により、ヘリウムフォロワーのカドミウムピン置換方策に比べて特にフォロワー領域において中速及び低エネルギー中性子の増大が顕著となっている。ところが第 2 層燃料ピン領域での低エネルギー中性子束は、カドミウム領域での急激な落ち込みにより低く抑えられている。

ここで図 5.2.2-13(2)に示したカドミウムの吸収断面積エネルギー曲線を見てみる。低エネルギー領域でのカドミウムの吸収断面積は高・中速エネルギー領域に比べて 3 桁以上も大きな値を示していることがわかる。このカドミウムの吸収断面積特性は、重水フォロワーで減速・反射され生成した低エネルギー中性子の吸収に効果的であり、第 2 層燃料ピンの出力密度の抑制に寄与することとなる。

図 5.2.2-2(a),(b)の第 2 層燃料ピン領域での中速・低エネルギー中性子束についてさらに詳しく見てみる。中速エネルギー中性子束については両方策でほとんど差が見られないが、低エネルギー中性子束については除熱型カドミウムピン置換方策の方がわずかながら増大していることがわかる。これは、図 5.2.2-3(1)に示す第 2 層燃料ピンでの中性子スペクトル分布の比較にも現れており、重水による減速・反射で生成した低エネルギー中性子のうちカドミウムが吸収しきれず残存した寄与分を示すものである。図 5.2.2-13(1)に示した燃料ピンの核分裂断面積曲線に見るように、低エネルギー領域での核分裂断面積は中速エネルギー領域に比べて概ね 1 桁以上大きな値を示している。したがって、わずかとはいえ、ここでの例のように燃料ピンにおいて低エネルギー領域への中性子束のシフトが生じると、出力密度の大きな増加を招くことになる。

この様子は、図 5.2.2-3(2)に示す第 2 層燃料ピン領域での核分裂率エネルギー

分布に現れている。低エネルギー中性子束は元々レベルが低く、フォロワー材の重水への置換による変動も小さいにもかかわらず、核分裂率は除熱型カドミウムピン置換方策の方が 2 倍近く大きな値を示している。しかしながら、同図からわかるように、核分裂率に対し最大の寄与を示している中速エネルギー領域では、前述したように両方策で中性子束レベルにはほとんど差が見られなかったことから、核分裂率についても大きな差は見られない。

以上のことから、X 方向についてまとめると次のようになる。除熱型カドミウムピン置換方策では低エネルギー領域での 2 倍近い核分裂率の増大を招いたものの、最大の寄与を示す中速エネルギー領域での核分裂率に大きな増大が生じなかったため、図 5.2.2-1 に示したように、第 2 層燃料ピンでの出力密度は図 4.3.2-1 の場合を上回るものの、顕著なピークの発生には至らなかったと言える。

Y 方向における比較

次に、タイロッドの存在下での比較を示した図 5.2.2-2(b)の Y 方向の中性子束分布を見てみる。Y 方向についてはカドミウムピンを通過しないため、図 5.2.2-2(a)の X 方向中性子束分布と比較すると、両方策とも低エネルギー中性子束レベルは増大していることがわかる。特に除熱型カドミウムピン置換方策においては、図 5.2.2-13(2)に示したタイロッドを構成するジルカロイ 4 の吸収断面積曲線に見るように低エネルギー領域での吸収断面積がカドミウムに比べて 3~4 桁程度低いため、Y 方向上では重水フォロワーからの減速・反射による低エネルギー中性子のほとんどが吸収を受けず、直接第 2 層燃料ピンに流れ込むことになる。したがって、タイロッド周囲のカドミウムピンによる低エネルギー中性子吸収効果が多少あるものの、タイロッドから第 2 層燃料ピンに向かう低エネルギー中性子束の減少は X 方向に比べて非常に緩やかになっていることがわかる。

この様子を図 5.2.2-3(1)と図 5.2.2-4(1)の中性子スペクトル分布の比較で見つめる。約 0.3eV 以下のエネルギー領域を見ると、除熱型カドミウムピン置換方策では X 方向においてはカドミウムピン置換方策とほぼ同レベルに抑えられて

いた中性子束が、Y 方向においてはカドミウムピン置換方策に比べて明らかに大きな値を示している。このエネルギー領域の中性子束レベルは低いものの、前述したようにこのエネルギー領域は ^{239}Pu の共鳴核分裂ピークが存在する 0.29eV を含んでいるため、図 5.2.2-4(2)に見るようにこの共鳴ピーク位置付近での核分裂率が除熱型カドミウムピン置換方策では急激に増大していることがわかる。特に $0.1\sim 1.3\text{eV}$ のエネルギー領域での除熱型カドミウムピン置換方策における核分裂率は、最大の寄与を示している中速エネルギー領域での核分裂率の最大値にほぼ匹敵しており、X 方向の場合に比べて著しい増大を示している。

この結果、図 5.2.2-1 のハッチングで示されているタイロッドに近接する燃料ピンでの出力密度は、それ以外の第 2 層燃料ピンに比べて顕著な局所出力ピークとなって現れたといえる。

以上で述べた X,Y 方向での中性子束分布の特性分析結果を踏まえ、除熱型カドミウムピン置換方策の局所出力分布抑制効果についてまとめると次のようになる。制御棒中心と結んだ線上にカドミウムピンが存在する燃料ピンでは、重水フォロワーからの減速・反射による低エネルギー中性子がカドミウムにより比較的効率良く吸収され、顕著な出力ピークは発生しない。反面、タイロッドに隣接する燃料ピンでは、この低エネルギー中性子がほとんど吸収されずに流れ込むため、顕著な局所出力ピークを発生する。したがって、ここで検討した除熱型カドミウムピン置換方策は局所出力ピークの抑制に有効ではないといえる。

(2)カドミウム案内管方策

本方策は、案内管をこれまでのジルカロイ製からカドミウム製とすることでカドミウム設置領域を増やし、(1)の除熱型カドミウムピン置換方策に比べて重水フォロワーで減速・反射された低エネルギー中性子の吸収の増大化を図ったものである。これにより、以下の観点で局所出力ピークの抑制に有効に機能することが予想される。

- (1) 重水フォロワーで減速・反射された低エネルギー中性子を隣接 S/A に流入する前に一旦カドミウム案内管に通させることで、隣接 S/A に反射・流入しようとする中性子を大幅に抑制する（除熱型カドミウムピン置換方策の②で述べた低エネルギー中性子の隣接 S/A への流入量の抑制）。
- (2) 重水フォロワーで減速されそこを通過した低エネルギー中性子を対面する隣接 S/A に流入する前に一旦カドミウム案内管に通させることで、対面する隣接 S/A に流入しようとする中性子を大幅に抑制する（除熱型カドミウムピン置換方策の③で述べた低エネルギー中性子の隣接 S/A への流入量の抑制）。

すなわち、重水フォロワーで減速・反射あるいは通過して隣接 S/A に流入しようとする低エネルギー中性子を二重のカドミウム領域を設けることで吸収し、さらにカドミウムピンが存在しないタイロッドに隣接する燃料ピンに流入しようとする低エネルギー中性子についても、その大部分をカドミウム製案内管で吸収しようとするのが本方策のポイントである。

この方策を適用した場合の集合体内出力密度分布を図 5.2.2-5 に示す。同図に見るように、どの隣接 S/A においても、前節の除熱型カドミウムピン置換方策で見られたような大きな局所出力ピークの発生は見られないことがわかる。

図 5.2.2-5 の結果を中性子挙動に着目し詳細に分析するため、除熱型カドミウムピン置換方策の場合と同様に、X 及び Y 方向における C/R ch.の中心から第 2 層ピンに至るまでの径方向中性子束分布を図 5.2.2-6(a),(b)に示す。ここでは、除熱型カドミウムピン置換方策における結果と比較した。3 群によるエネルギー分割も除熱型カドミウムピン置換方策の場合と同様である。

X 方向における比較

まず、タイロッドの存在の影響が生じ得ない X 方向の中性子束分布を示した図 5.2.2-6(a)を見てみる。除熱型カドミウムピン置換方策でも局所出力ピーク発生の要因となった低エネルギー中性子束を見ると、カドミウム案内管方策ではカドミウム製案内管での急激な落ち込みの後、第 1 層カドミウムピンでも緩

やかな落ち込みが見られる。したがって、同図の (1), (2) の比較からわかるように、二重のカドミウム領域の存在は除熱型カドミウムピン置換方策での 1 領域のみのカドミウムに比べ、低エネルギー中性子束の大幅な低減に対しより有効に機能していることがわかる。

このような特性は、図 5.2.2-7(1)に示す第 2 層燃料ピンでの中性子スペクトル分布にも現れている。除熱型カドミウムピン置換方策で残存していた、出力密度増大化への感度が非常に大きい 1.3eV 以下の中性子束が、カドミウム案内管方策では大きく低減されている。したがって、同図(2)に示す第 2 層燃料ピンでの核分裂率エネルギー分布に見るように、1.3eV 以下での核分裂率は半分程度にまで減少しており、これが局所出力ピークの抑制に大きく貢献する。

以上のことから、タイロッドに隣接しない燃料ピンにおいては、二重のカドミウムによる低エネルギー中性子の吸収が有効に機能し、局所出力ピークは生じない。

Y 方向における比較

次に、タイロッドの存在下での比較を示した図 5.2.2-6(b)の Y 方向の中性子束分布を見てみる。X 方向と同様に低エネルギー中性子束に着目すると、カドミウムピンでの吸収がないため緩やかな低減しか示さなかった除熱型カドミウムピン置換方策に比べて、カドミウム案内管方策では案内管での急激な落ち込みが見られる。この特性は、X 方向の場合と同様に、図 5.2.2-8(1)に示す第 2 層燃料ピンでの中性子スペクトル分布において、1.3eV 以下での中性子束に両方策間で大きな差を生じていることにも現れている。したがって、同図(2)に示す燃料ピンでの核分裂率エネルギー分布に見るように、1.3eV 以下のエネルギー領域では、最大値と同程度の値を示していた除熱型カドミウムピン置換方策での核分裂率に比べ、カドミウム案内管方策では半分以下にまで激減しており、中速エネルギー領域で見られる最大値を大きく下回っていることがわかる。

このことから、タイロッドに隣接する燃料ピンにおいても、重水フォロワーで反射された低エネルギー中性子をタイロッドで通過させる前にカドミウムで吸収しておけば、局所出力ピークの発生は回避できるといえる。

以上で述べた X,Y 方向での中性子束分布の特性分析結果を踏まえ、カドミウム案内管方策の局所出力分布抑制効果についてまとめると次のようになる。ドライバー集合体内に設置したカドミウムピンとカドミウム案内管による二重のカドミウム領域は、どの位置の燃料ピンに対しても低エネルギー中性子の流入抑制に有効に機能し、局所出力ピークの発生には至らない。したがって、ここで検討したカドミウム案内管方策は局所出力ピーク抑制に対して有効な一方策であるといえる。

(3)六角形状 C/R ch. 方策

本方策は、(1)除熱型カドミウムピン置換方策において設けられたカドミウムピンを元の燃料ピンに戻し、かつこれによって削減されたカドミウムを制御棒案内管と隣接 S/A 間の六角形状領域にカドミウムを設けることで補填するものである。すなわち、燃料集合体製造への新たな負荷要因を排除しながら、(2)のカドミウム案内管方策が示した重水フォロワーの利用による制御棒吸収材の除熱性確保及びカドミウムの中性子吸収による局所出力ピークの抑制を達成することが、本方策の狙いである。

局所出力ピークについては、以下の点が有効に機能することでその抑制が実現できるものと期待される。

- (1) 除熱型カドミウムピン置換方策の①, ②, ③で述べた中性子挙動に係わる、残存する重水の減速・反射効果が大幅に抑制される。
- (2) 重水フォロワーで減速・反射された低エネルギー中性子を隣接 S/A に流入する前に一旦カドミウム領域に通させることで、隣接 S/A に反射・流入しようとする中性子を大幅に抑制する（除熱型カドミウムピン置換方策の②で述べた低エネルギー中性子の隣接 S/A への流入量の抑制）。
- (3) 重水フォロワーで減速されそこを通過した低エネルギー中性子を対面する隣接 S/A に流入する前に一旦カドミウム領域に通させることで、対面する隣接 S/A に流入しようとする中性子を大幅に抑制する（除熱型カドミウムピン置換方策の③で述べた低エネルギー中性子の隣接 S/A への流入量の抑

制)。

- (4) 除熱型カドミウムピン置換方策に比べて、タイロッド近傍におけるカドミウムの存在とそれに伴う重水インベントリーの低下により、タイロッドに隣接する燃料ピンに流入する低エネルギー中性子を大幅に抑制する。

本方策を適用した場合の集合体内出力密度分布を図 5.2.2-9 に示す。同図に見るように、どの隣接 S/A においてもカドミウム案内管方策と同様、局所出力ピークの発生には至っていないことがわかる。

図 5.2.2-9 の結果を中性子挙動に着目し詳細に分析するため、既に述べた(1),(2)の 2 方策と同様に、X 及び Y 方向における C/R ch. の中心から第 2 層ピンに至るまでの径方向中性子束分布を図 5.2.2-10(a),(b) に示す。ここでは、隣接 S/A 内のピン配列が同条件で、制御棒構造・材質及びフォロワー材の違いのみによる比較を行うため、基準ケース（ヘリウムフォロワー・置換物質なし）における結果も示した。3 群によるエネルギー分割は上述の 2 方策の場合と同様である。

X 方向における比較

まず、タイロッドの存在の影響が生じ得ない X 方向の中性子束分布を示した図 5.2.2-10(a) を見てみる。前述と同様に低エネルギー中性子束に着目すると、重水インベントリーがはるかに少ない基準ケースに比べ、カドミウム領域での吸収が有効に機能し、第 1, 2 層燃料ピンで急激に落ち込んでいる様子が見られる。

第 1 層燃料ピンにおける中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布を図 5.2.2-11(1),(2) に示す。カドミウムの吸収により、1.3eV 以下の低エネルギー中性子束が基準ケースに比べて低減していることがわかる。このため、同じエネルギー領域での核分裂率も基準ケースの場合の半分程度にまで低減しており、全核分裂率の低下に大きく貢献している様子が見られる。

この六角形状 C/R ch. 方策と基準ケースの比較から次のことがいえる。重水インベントリーの比較では基準ケースの方がはるかに少ないものの、制御棒側か

ら第 1 層燃料ピンに流れ込もうとする中性子は流れ込む直前にわずかながら残存する重水で減速されるため、第 1 層燃料ピンでの局所出力ピーク発生は避けられない。すなわち、制御棒側から第 1 層燃料ピンに中性子が流れ込もうとする過程で、燃料ピンへの流入直前に重水が存在すると、例えそのインベントリーがわずかであっても局所出力ピークの発生につながるというのが重要なポイントである。反面、六角形状 C/R ch.方策では、重水で減速・反射された低エネルギー中性子の大部分は第 1 層燃料ピンに流れ込む直前に必ずカドミウムによる吸収を受ける。そのため、重水インベントリーは多いものの、局所出力ピークの発生は回避できることになる。

Y 方向における比較

次に、タイロッドの存在下で比較を示した図 5.2.2-10(b)の Y 方向の中性子束分布を見てみる。X 方向と同様に低エネルギー中性子束に着目すると、タイロッドから第 2 層燃料ピンに流れ込む前にカドミウムによる吸収を受けるため、X 方向と同様にカドミウム領域での急激な落ち込みが見られる。タイロッド内で中速エネルギー中性子が幾分減速されることと、タイロッド構成材料であるジルカロイ 4 の低エネルギー中性子に対する吸収断面積が小さいことにより、タイロッド領域でわずかに増大している様子が見られるが、第 2 層燃料ピンでは基準ケースよりも低く抑えられていることがわかる。

第 2 層燃料ピンにおける中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布を図 5.2.2-12(1),(2)に示す。X 方向の場合と全く同様に、六角形状 C/R ch.方策ではカドミウムの吸収により、1.3eV 以下の低エネルギー中性子束が基準ケースに比べて低減しており、それに伴い核分裂率も半分程度にまで低減していることがわかる。

したがってタイロッドを通過する Y 方向においても、六角形状 C/R ch.方策は重水インベントリーがはるかに少ない基準ケースに比べ、カドミウム領域での低エネルギー中性子の吸収が有効に機能し、局所出力ピークの発生は回避される。

以上で述べた X,Y 方向での中性子束分布の特性分析結果を踏まえ、六角形状 C/R ch.方策の局所出力分布抑制効果についてまとめると次のようになる。ここで検討した六角形状 C/R ch.方策は、隣接 S/A の第 1 層燃料ピンに沿って設置されたカドミウム領域の存在が重水フォロワーからの低エネルギー中性子を効率良く吸収し、局所出力ピークの発生を招かない。本方策ではカドミウム領域から第 1 層燃料ピンへ中性子が流入する過程で重水を排除する構造としたことが局所出力ピークの抑制につながった重要なポイントである。既述したように、この方策はカドミウム設置に際しドライバー燃料集合体の仕様変更を必要とせず、かつ重水フォロワーとしている。したがって、集合体製造への新たな負荷抑制及び制御棒領域の除熱性確保とのバランスが取れている点で、有望な局所出力ピーク抑制方策といえる。

6. カドミウム製六角管・重水フォロワー型制御棒

6.1 概要

現状の SERAPH 設計研究では、10m/sec 程度の高流速の重水をドライバー炉心に流すことにより試験遂行過程における炉心の冷却性を確保する方向で検討が進められている⁽²⁾。このため、前章で検討した六角形状 C/R ch.方策におけるカドミウム製六角形状部の壁面外側には、隣接 S/A 内を流れる冷却材から高い圧力がかかると考えられ、カドミウムの構造健全性が懸念される。したがって、六角形状部の隣接 S/A 側の一部をカドミウムの構造強度補強用にコーティング材で置換するといった工学的対応が必要になると考えられる。ところがこれは、カドミウム厚の減少とそれに伴う局所出力ピーク抑制機能の低下を招くことになる。

そこで本章では、前章で検討した方策に対して、六角形状部の外縁を固定しながらカドミウム厚を変化させることにより、局所出力ピークの抑制に必要なカドミウム厚を調べた。カドミウムを削減した部分に対して設けられるコーティング材については、減速能が小さく、かつ現行の SERAPH 設計研究において炉心構造材料に選定されているジルカロイ 4 を暫定的に用いることとした。

以下では、まずコーティング材設置に必要な空間を確保するために行ったカドミウム製六角形状部の変更内容について述べる。次に、必要カドミウム厚を求めるために行った 1 次元パラメータ解析における計算モデルと得られた出力密度分布特性についての考察、その評価結果の妥当性を確認するために行った 2 次元スーパーセル計算による考察について述べる。

6.2 カドミウム製六角形状部の変更

前章で検討した六角形状 C/R ch.方策における制御棒構造水平断面図を図 6.2-1 に再掲する。本章では同図に示したカドミウム領域の一部を削減し、その部分にコーティング材を設けた場合の隣接 S/A における出力密度分布特性を評価する。

ところで図 6.2-1 に見るように、カドミウム厚はもっとも薄い部分 (X 方向厚) で 0.25cm^t 、もっとも厚い部分 (Y 方向厚) で 1.0cm^t である。したがって、同図に示した制御棒構造に対してコーティング材を設ける場合、それに必要な空間は X 方向で最大 0.25cm^t までしかとれないことになる。工学的に考えてコーティング材設置には 0.5cm^t 程度の空間は必要であるとすれば⁽⁷⁾、図 6.2-1 に示した制御棒構造にコーティング材を設ける設計は現実的にかなり厳しいといえる。

そこで、図 6.2-1 の構造に対して以下に示す 2 つの変更を施し、前章で述べた方策に対し制御棒設計に影響を与えず、かつコーティング材の設置を可能とする制御棒構造を考案した。

(1)六角形状制御棒案内管の設置

図 6.2-2(1)に示すように、前章で検討した六角形状 C/R ch.方策では、もっとも外側のカドミウム領域とジルカロイ 4 製制御棒案内管が分離した構造となっている。これらを一つにまとめても設計に影響を与えることは特段考えられないことから、図 6.2-2(2)に示すように、ここではこれらをカドミウムで一体化させ、六角形状制御棒案内管と改めることとした。

これにより、同図に示すように X 方向のカドミウム厚は 0.55cm^t にまで拡張されたが、まだコーティング材設置に十分な空間が確保できたとは言い難いため、次に示す変更をさらに適用した。

(2)制御棒保護管－案内管間のギャップ幅の縮小

図 6.2-2(2)の(a) (図 6.2.3-(1)にも再掲) に見るように、上記(1)の変更を適用した場合、制御棒挿入状態における保護管と案内管の間には 0.5cm^t の重水ギャップが確保されている。このギャップ幅は制御棒駆動に支障のない程度 ($0.2\sim 0.3\text{cm}$ 程度) まで縮小することが可能であると考えられる。

そこで、図 6.2-3(2)に示すように(1)で設置した六角形状制御棒案内管の内径を 0.6cm^t 縮小した構造を考案した。これにより、ギャップ幅は 0.2cm^t に縮小されたとともに、X 方向のカドミウム厚は 0.85cm^t まで拡張され、Y 方向につ

いては 1.6 cm^t のカドミウム厚が確保されている。したがって、カドミウム領域の一部をコーティング材に置き換えるのに必要な空間は適切に確保できると判断される。なお、ギャップ幅の縮小によりギャップに存在する重水のインベントリーは減少するが、保護管内側の重水インベントリーは変更なく確保されているため、制御棒吸収材の除熱性能に影響を与えることはない⁽⁷⁾といえる。

上記(1)及び(2)の変更を施してできた制御棒構造の水平断面図を図 6.2-4 に示す。同図の(1)はコーティング材を設置しない場合で、それに対しカドミウム製六角形状案内管の外側をコーティング材で置換した場合の概念図が同図の(2)である。

本研究では、前章の六角形状 C/R ch. 方策にこれら(1)及び(2)の変更を施したものをカドミウム製六角形状案内管方策と称する。また、この方策を適用してできる図 6.2-4(2)に示したような構造を持つ制御棒をカドミウム製六角管・重水フォロワー制御棒と称する。

次節では、図 6.2-4(2)に示したコーティング材の厚みをパラメータとした 1次元解析について述べる。

6.3 必要カドミウム厚の1次元パラメータ解析

6.3.1 計算モデル

本解析では、前節 6.2 で考案した C/R ch. を対象にカドミウム厚と局所出力ピーク発生の有無の関係について調べた。

解析は次のようにして行った。図 6.3.1-1(2)に示すように、X 方向のカドミウム厚を $x \text{ cm}^t$ としてパラメータに設定し、X, Y 両方向に対して x を図 6.3.1-1(1)の状態から 0.05 cm^t 刻みで変化させた(このとき、Y 方向のカドミウム厚は $x + 0.75 \text{ (cm}^t)$)。ここで、カドミウム厚を狭めたことで生じる空間については、既に述べたように本研究では暫定的にジルカロイ 4 を用いてコーティングすることとした。

制御棒挿入状態については、前章までの議論で局所出力ピークの発生が問題となった制御棒引き抜き状態のみを対象とした。

ところで、前章までにおいて議論した 2 次元 XY スーパーセル計算に基づく出力密度分布特性は、X 方向、Y 方向の方向別分析により適切に評価することができた。この方向別評価の妥当性と 2 次元モデルを用いた場合の計算負荷を考慮して、本節では 1 次元 S_N 輸送計算を各方向に適用することにより出力密度分布特性を評価した。計算には断面積データを 218 群から 22 群に縮約する際に用いる XSDRNPM を使用した。計算条件を表 6.3.1-1 に示す。

計算は、評価に影響を与えないことを考慮した上で、使用計算メモリに係わる各種パラメータ（物質領域数、エネルギー群数、メッシュ分割数）を適切に制約して行った。物質領域数、エネルギー分割数については 2 章で述べた 2 次元 XY 計算の場合と同様の考えに基づいて設定した。1 次元平板モデルの作成とそのモデルに対するメッシュ分割については次のようにして行った。

(1) 1 次元平板モデルの作成

X, Y 各方向面における 1 次元平板モデルを図 6.3.1-2 に示す。同図の(1)は X 方向、(2)は Y 方向におけるモデルをそれぞれ表す。これらの計算対象領域は、同図の(3)に見るように C/R ch.中心から隣接 S/A を経て、さらにそれに隣接する周辺 S/A の半分までとした。境界条件については、左・右境界は反射境界とし、軸方向にはバックリング長 1m を考慮した。

ここで、図 6.3.1-2(3)に示すように、Y 方向については C/R ch.中心からカドミウム厚が最長である部分に向かった場合、隣接 S/A に対しては集合体間ギャップを通過することとなる。

この場合、燃料ピンが存在しないため局所出力ピークを評価することができない。そこで、同図の(2)に示すように、C/R ch.を通過後、燃料ピン領域（タイロッドを含む：幅=0.844cm/本）7 本分を隣接 S/A とし、さらに 6 本半を周辺 S/A の半集合体（同図(3)の(b)の実線部分）とした 1 次元平板モデルを設定した。

(2)メッシュ分割

(1)で作成された X, Y 各方向のモデルのメッシュ分割は、局所出力ピークを含む出力密度分布特性を詳細に評価するために、隣接 S/A、周辺 S/A 内で異なる集合体にもっとも近接する燃料ピン 1 本については 4 メッシュ分割（メッシュ幅=1.8mm）とし、それ以外の燃料ピンは燃料ピン 1 本毎に 2 メッシュ分割（メッシュ幅=3.6mm）とした。

6.3.2 計算結果及び考察

計算で得られた出力密度分布を図 6.3.2-1, 2 に示す。図 6.3.2-1 は X 方向、図 6.3.2-2 は Y 方向における相対出力密度分布を示す。いずれのケースにおいても、隣接 S/A 内の C/R ch.にもっとも近接する燃料ピン（以下、第 1 燃料ピンと称する）以外の最大出力密度を 1 に規格化した。この規格化した値からの増大率で局所出力ピークの大きさを表すこととし、以下で議論を進める。

図 6.3.2-1(4)に見るように、X 方向においてカドミウム厚が 0.3cm^t となった時に第 1 燃料ピンにおいて 1%程度の局所出力ピークが発生している。この時の Y 方向については、図 6.3.2-2(4)の実線に見るカドミウム厚が 1.05cm^t の時であり、局所出力ピークの発生は見られない。このことから、X 方向において 0.3cm^t をやや上回るカドミウム厚を設ければ、局所出力ピークの抑制を達成できると考えられる。

ところで、前章で行った六角形状 C/R ch.方策に対する 2 次元スーパーセル計算では、X 方向のカドミウム厚が 0.25cm^t であっても局所出力ピークの発生は見られなかった。したがって、この 2 次元スーパーセル計算の結果と本章で行った 1 次元計算の結果を比較する限り、本章で検討したカドミウム製六角形状案内管方策の方がわずかではあるがより大きいカドミウム厚が必要である、ということになる。ところが、カドミウム製六角形状案内管方策の場合は 1 次元体系、六角形状 C/R ch.方策の場合は 2 次元体系による評価であるため、両者

の制御棒構造モデルの違い以外に、評価体系の次元の違いが局所出力ピーク抑制に必要なカドミウム厚の違いに影響していることが考えられる。

そこで、図 6.2-1 に示した六角形状 C/R ch.方策の X 方向のみを 1 次元でモデル化した計算を行い、局所出力ピークの発生状況について調べた。

計算結果を図 6.3.2-3 に示す。カドミウム製六角形状案内管方策における X 方向のカドミウム厚を 0.3 cm^t 、 0.35 cm^t とした本章の 1 次元計算結果についても合わせて掲載した。同図から、六角形状 C/R ch.方策は、1 次元計算では C/R ch.にもっとも近接する隣接 S/A 内の燃料ピンにおいて 3%程度の局所出力ピークを示していることがわかる。したがって、1 次元計算は 2 次元計算に比べて局所出力ピークを過大評価する傾向にあるといえる。また、同じ 1 次元計算では、カドミウム製六角形状案内管方策におけるカドミウム厚 0.3 cm^t 、 0.35 cm^t のいずれのケースにおいても、六角形状 C/R ch.方策に比べて局所出力ピークの発生が抑えられていることがわかる。これらのことから、本章で検討しているカドミウム製六角形状案内管方策においては、図 6.3.2-3 でわずかに見られた 1 次元計算によるカドミウム厚 0.3 cm^t の場合の局所出力ピークが 2 次元計算では発生しないことが予想される。

このことを確認するため、以下ではカドミウム製六角形状案内管方策において、X 方向のカドミウム厚を 0.3 cm^t としたケースについて 2 次元スーパーセル計算を行うこととした。

6.4 2次元解析による評価

6.4.1 計算モデル

本節では、前節 6.3 で検討したカドミウム製六角形状案内管方策において、X 方向のカドミウム厚を 0.3 cm^t とした制御棒引き抜き時の体系を対象に 2 次元 XY 計算を実施した。

本方策を適用した場合の制御棒及びその周囲の幾何形状（水平断面）を制御

棒引き抜き時について図 6.4.1-1 に示す。この体系を 2 章で述べた手順に従い TWOTRAN-II 用にモデル化したものを図 6.4.1-2 に示す。

6.4.2 計算結果及び考察

計算結果を図 6.4.2-1 に示す。同図に見るように、どの隣接 S/A 内の燃料ピンにおいても局所出力ピークが発生していないことがわかる。

このことから、2 次元 XY 計算による出力密度分布特性評価により、X 方向にカドミウム厚 0.3cm^t を有するカドミウム製六角形状案内管方策は制御棒吸収材の除熱性を確保しつつ局所出力ピークの発生を回避し得る有効な方策であることが確認された。このとき、X 方向には 0.55cm^t の余分な空間が生じるが、コーティング材の設置が必要とされる場合の必要空間は適切に確保されている。

カドミウムを制御棒領域に設けることは制御棒吸収体内での中性子吸収率を下げるため、定性的には制御棒反応度値の低下を招く。これについては、今後定量的な評価検討が望まれるが、表 6.4.2-1 に示すように（対応する解析体系は図 6.4.2-2～6.4.2-5 に掲載）現状の炉心設計研究において必要制御棒反応度値を十分充足し得る見通しが得られていることから⁶⁾、本章で検討したカドミウム製六角形状案内管方策が制御棒反応度値に与える影響は軽微であるといえる。

・出力密度分布に関する 1 次元計算と 2 次元計算の違いについて

図 6.4.2-6 に、X 方向における 1 次元計算と 2 次元計算による相対出力密度分布を示す。同図に見るように、第 1 燃料ピンの出力密度は 1 次元計算結果の方が 4% 程度大きい。

この要因を定性的に考察する。図 6.4.2-7 に示すように、●で示した燃料ピンの出力密度に寄与する中性子を大きく 8 方向に分割する。2 次元計算では、各領域の X 方向厚みはその Y 方向位置に依存するが、1 次元計算ではどの Y 方向位置においても同じ領域での Y 方向厚みは一定である。このことから、①、⑥、⑦、⑧の各方向からの中性子については、1 次元、2 次元の両モデルとも●の燃料ピンの出力密度に対して同程度の寄与を示す。

ところが、②、③の方向については、2次元モデルの方がカドミウム厚がより大きい領域からの中性子の流入割合が多くなるため、1次元モデルに比べて●の燃料ピンの出力密度への寄与は低くなる。X方向のカドミウム厚が 0.3cm^t のとき、同じくY方向厚みは 1.05cm^t であるが、1次元計算によるこれら両ケースの相対出力密度分布を図6.3.2-1(4)と図6.3.2-2(4)とで比較すると、C/R ch.に最近接する燃料位置でY方向のケースの方が20%程度小さな値を示している。このことから、カドミウム厚のより大きな領域からの中性子は●の出力密度への寄与がより低くなることが確かめられる。ただし、2次元計算におけるX方向カドミウム厚は、図6.3.2-2(4)の場合のようにどのY方向位置においても一定値(1.05cm^t)をとるのではなく、Y方向位置によって異なる。このため、X方向カドミウム厚をともに 0.3cm^t とした1次元及び2次元計算の比較では、●での相対出力密度への寄与の差は20%までには至らない。

また④、⑤の方向については、1次元計算ではすべての燃料領域からの中性子による寄与となるが、2次元計算では一部タイロッド領域が混在するため、●の燃料位置に寄与する中性子源としては2次元計算の方が小さくなる。これも②、③の方向の場合と同様に、2次元計算における●位置での相対出力密度への寄与をより小さくする。

以上のことから、●の出力密度に寄与する中性子源の違いにより、1次元計算は2次元計算に比べて●での相対出力密度を過大評価するといえる。言い換えれば、1次元計算は保守側の評価を与えることになるが、図6.4.2-6の計算結果では2次元計算結果との差が4%程度であることから、簡易的ながら1次元計算でも2次元計算に比べて過度な保守性を与えずにカドミウム設置による局所出力ピーク抑制効果を適切に評価できるといえる。

ここで、1次元計算におけるカドミウム厚と第1燃料ピンにおける出力密度との関係を整理し、1次元計算の下で局所出力ピークが4%となるX方向のカドミウム厚を求める。このカドミウム厚は2次元XY計算相当の条件下で局所出力ピークが0%、すなわち局所出力ピークの発生を抑制するのに最小限必要

なカドミウム厚を与えることになる。

1次元計算にて得られたカドミウム厚と第1燃料ピンにおける出力密度との関係を図6.4.2-8に示す。グラフ化においては、カドミウム厚が前節6.3で述べた 0.3 cm^t より小さいケースについても計算を追加した。その結果、同図の(a)に示すように、2次元XY計算相当の条件の下、最小で 0.26 cm^t のX方向カドミウム厚を設ければ局所出力ピークの発生は抑制できるといえる。

7. 結論

SERAPH で予定されている定常及び種々の過渡試験遂行のために必要な制御棒構造の具体化を図るため、制御棒周囲の局所出力ピーク抑制効果に着目した集合体内出力密度分布特性評価を実施した。

その結果、カドミウム製の六角管を外枠とする重水フォロワー型制御棒が、中性子吸収材 (B_4C) に対する除熱性を確保し、かつドライバー燃料集合体製造への新たな負荷要因を排除しつつ、制御棒周囲における局所出力ピークの発生を抑制し得る有望な方策であることがわかった。

本成果は、今後カドミウムコーティング材の機械的強度特性や制御棒の機械的な駆動方法等との整合を図ることが求められるものの、チャンネル型制御棒については常陽や仏国フェニックス炉等の高速炉で使用実績を有していること、フォロワー材である重水は新型転換炉ふげんで冷却材としての使用実績を有することを考慮すれば、開発要素を含めた炉心設計へのインパクトを十分低く抑えられる点で重要な知見であるといえる。今後、炉心を含めた施設設計を進める上で重要な研究成果として活用されることが期待される。

謝辞

本研究を進めるに当たって、多くの方々から貴重なご助言を賜りました。

原子力システム株式会社の水野正弘氏には、筆者の度々の要望にも係わらず進んで大量の核計算並びに精巧な図表の作成を実施して頂いたことに加え、筆者の物理的評価においても常々貴重なご助言を頂きました。これらは筆者にとり何よりの大きな心の支えになりました。

(株) 東芝・原子力技術研究所の山岡光明氏には制御棒反応度価値解析についてご協力を賜りました。

ナトリウム・安全工学試験部高速炉安全工学グループの佐藤一憲サブグループリーダーにはカドミウムコーティング材に関して貴重なご助言を賜りました。また、同グループの近藤悟グループリーダーにはご多忙の身であるにも係わらず本報告書を熱心に査読して頂きました。

ここに感謝の意を表し、これらの方々へ厚くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) N. Uto, et al., "Evaluation of neutronic characteristics of in-pile test reactor for fast reactor safety research," *Proc. Int. Conf. on the Physics of Reactors (PHYSOR96)*, Vol.2, D-93, Mito, September 16-20, 1996.
- (2) 大洗工学センター SERAPH 計画技術検討グループ：「FBR 安全性炉内試験計画 (SERAPH 計画) の検討」、PNC TN9410 94-154 (1995 年 3 月)。
- (3) 水野 正弘, 宇都 成昭：「FBR 安全性試験炉の集合体内出力分布計算手法の整備」、JNC TN9400 98-007 (1998 年 11 月)。
- (4) K. D. Lathlop and F. W. Brinkley, "Theory and Use of the TWOTRAN-II Program," LA-4432 (1970).
- (5) N. F. Landers and L. M. Petrie, "CSAS4 : An Enhanced Criticality Safety Analysis Module with An Optimum Pitch Search Option," Oak Ridge National Laboratory.
- (6) W. E. Ford, C. C. Webster and R. M. Westfall, "A 218-Group Neutron Cross-section Libraries in the AMPX Master Interface Format for Criticality Safety Studies," ORNL/CSD/TM-4 (1976).
- (7) 佐藤一憲氏、私信 (1998 年 11 月)。
- (8) 山岡光明氏、私信 (1998 年 3 月)。

表 2.3-1 218 群及び 22 群のエネルギー群構造

群 数		上限エネルギー (eV)	群 数		上限エネルギー (eV)	群 数		上限エネルギー (eV)	群 数		上限エネルギー (eV)
1	1	2.0000e+07	11	56	3.0000e+03	15	111	2.5000e+01	18	166	1.2000e+00
	2	2		6.4340e+06	57		2.5800e+03	112		2.2500e+01	167
3		4.8000e+06		58	2.2900e+03		113	2.1000e+01		168	1.1500e+00
4		4.3040e+06		12	59		2.2000e+03	114		2.0000e+01	169
3	5	3.0000e+06	60		1.8000e+03		115	1.9000e+01		170	1.1300e+00
	6	2.4790e+06	61		1.5500e+03		116	1.8500e+01		171	1.1200e+00
	7	2.3540e+06	62		1.5000e+03		117	1.7000e+01		172	1.1100e+00
	8	1.8500e+06	63	1.1500e+03	118		1.6000e+01	173		1.1000e+00	
4	9	1.5000e+06	64	9.5000e+02	119		1.5100e+01	174		1.0900e+00	
	10	1.4000e+06	65	6.8300e+02	120		1.4400e+01	175		1.0800e+00	
	11	1.3560e+06	66	6.7000e+02	121		1.3750e+01	176		1.0700e+00	
	12	1.3170e+06	67	5.5000e+02	122		1.2900e+01	177		1.0600e+00	
5	13	1.2500e+06	13	68	3.0500e+02	16	123	1.1900e+01	178	1.0500e+00	
	14	1.2000e+06		69	2.8500e+02		124	1.1500e+01	179	1.0400e+00	
	15	1.1000e+06		70	2.4000e+02		125	1.0000e+01	180	1.0300e+00	
	16	1.0100e+06		71	2.1000e+02		126	9.1000e+00	181	1.0200e+00	
	17	9.2000e+05	72	2.0750e+02	127		8.1000e+00	182	1.0100e+00		
	18	9.0000e+05	73	1.9250e+02	128		7.1500e+00	183	1.0000e+00		
	19	8.7500e+05	74	1.8600e+02	129		7.0000e+00	184	9.7500e-01		
	20	8.6110e+05	75	1.2200e+02	130		6.7500e+00	185	9.5000e-01		
6	21	8.2000e+05	76	1.1900e+02	131	6.5000e+00	186	9.2500e-01			
	22	7.5000e+05	77	1.1500e+02	132	6.2500e+00	187	9.0000e-01			
	23	6.7900e+05	78	1.0800e+02	133	6.0000e+00	188	8.5000e-01			
	24	6.7000e+05	79	1.0000e+02	134	5.4000e+00	189	8.0000e-01			
	25	6.0000e+05	80	9.0000e+01	135	5.0000e+00	190	7.5000e-01			
	26	5.7300e+05	81	8.2000e+01	136	4.7500e+00	191	7.0000e-01			
	27	5.5000e+05	82	8.0000e+01	137	4.0000e+00	192	6.5000e-01			
7	28	4.9952e+05	14	83	7.6000e+01	17	138	3.7300e+00	19	193	6.0000e-01
	29	4.7000e+05		84	7.2000e+01		139	3.5000e+00		194	5.5000e-01
	30	4.4000e+05		85	6.7500e+01		140	3.1500e+00		195	5.0000e-01
	31	4.2000e+05		86	6.5000e+01		141	3.0500e+00		196	4.5000e-01
	32	4.0000e+05		87	6.1000e+01		142	3.0000e+00		197	4.0000e-01
8	33	3.3000e+05	88	5.9000e+01	143	2.9700e+00	198	3.7500e-01			
	34	2.7000e+05	89	5.3400e+01	144	2.8700e+00	199	3.5000e-01			
	35	2.0000e+05	90	5.2000e+01	145	2.7700e+00	20	200	3.2500e-01		
	36	1.5000e+05	91	5.0600e+01	146	2.6700e+00		201	3.0000e-01		
	37	1.2830e+05	92	4.9200e+01	147	2.5700e+00		202	2.7500e-01		
9	38	1.0000e+05	93	4.8300e+01	148	2.4700e+00		203	2.5000e-01		
	39	8.5000e+04	94	4.7000e+01	149	2.3800e+00		204	2.2500e-01		
	40	8.2000e+04	95	4.5200e+01	150	2.3000e+00	205	2.0000e-01			
	41	7.5000e+04	96	4.4000e+01	151	2.2100e+00	206	1.7500e-01			
	42	7.3000e+04	97	4.2400e+01	152	2.1200e+00	207	1.5000e-01			
10	43	6.0000e+04	98	4.1000e+01	153	2.0000e+00	208	1.2500e-01			
	44	5.2000e+04	99	3.9600e+01	154	1.9400e+00	21	209	1.0000e-01		
	45	5.0000e+04	100	3.9100e+01	155	1.8600e+00		210	9.0000e-02		
	46	4.5000e+04	101	3.8000e+01	156	1.7700e+00		211	8.0000e-02		
	47	3.0000e+04	102	3.7000e+01	157	1.6800e+00		212	7.0000e-02		
48	2.5000e+04	103	3.5500e+01	158	1.5900e+00	213		6.0000e-02			
11	49	1.7000e+04	104	3.4600e+01	159	1.5000e+00	214	5.0000e-02			
	50	1.3000e+04	105	3.3750e+01	160	1.4500e+00	215	4.0000e-02			
	51	9.5000e+03	106	3.3250e+01	161	1.4000e+00	22	216	3.0000e-02		
	52	8.0300e+03	107	3.1750e+01	162	1.3500e+00		217	2.5300e-02		
	53	6.0000e+03	108	3.1250e+01	18	163	1.3000e+00	218	1.0000e-02		
54	3.9000e+03	109	3.0000e+01	164		1.2500e+00	219	1.0000e-05			
55	3.7400e+03	15	110	2.7500e+01		165	1.2250e+00				

表 3.3- 1 制御棒集合体に隣接する燃料ピンを種々の非燃料物質に置換した方策における隣接 S/A での各出力密度比^{*1}

*1 : 図 3.3-1, 3.3-2, 4.2.2-1, 4.2.2-2, 4.2.2-3, 4.2.2-4, 4.3.2-1, 4.3.2-2 に示した各領域に分割した時の各々の相対平均出力 (×10⁴)

(a) ①隣接ドライバー燃料集合体 (隣接 S/A) 内最大出力値 と ②最大出力値をもつ隣接ドライバー燃料集合体平均出力値の比較

制御棒状態	置換物質	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未設置	0.829	0.693	19.62
	ジルカロイ 4	0.880	0.720	22.22
	チタン	0.851	0.721	18.03
	カドミウム	0.740	0.708	4.52
挿入状態	未設置	0.745	0.637	16.95
	ジルカロイ 4	0.761	0.659	15.48
	チタン	0.759	0.658	15.34
	カドミウム	0.756	0.654	15.60

(b) ①周辺ドライバー燃料集合体 (隣接 S/A) 内最大出力値 と ②最大出力値をもつ周辺ドライバー燃料集合体平均出力値の比較

制御棒状態	置換物質	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未設置	0.705	0.675	4.44
	ジルカロイ 4	0.727	0.694	4.75
	チタン	0.731	0.694	5.33
	カドミウム	0.754	0.725	4.00
挿入状態	未設置	0.810	0.773	4.79
	ジルカロイ 4	0.828	0.791	4.68
	チタン	0.828	0.790	4.81
	カドミウム	0.849	0.812	4.56

(c) ①隣接、周辺ドライバー燃料集合体 (隣接 S/A) 内最大出力値 と ②隣接、周辺ドライバー燃料集合体平均出力の最大値の比較

制御棒状態	置換物質	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未設置	0.829	0.693	19.62
	ジルカロイ 4	0.880	0.720	22.22
	チタン	0.851	0.721	18.03
	カドミウム	0.754	0.725	4.00
挿入状態	未設置	0.810	0.773	4.79
	ジルカロイ 4	0.828	0.791	4.68
	チタン	0.828	0.790	4.81
	カドミウム	0.849	0.812	4.56

表 5.2.1-1 種々の局所出力ピーク抑制方策における隣接 S/A での各出力密度比^{*1}

*1 : 図 3.3-1, 4.3.2-1, 4.2.2-2, 5.2.2-1, 5.2.2-5, 5.2.2-9 に示した各領域に分割した時の各々の相対平均出力 (×10⁴) なお、表中の基準ケースとは表 3.3-1 の置換物質：未設置のケースを指す。

(a) ①隣接ドライバー燃料集合体 (隣接 S/A) 内最大出力値 と ②最大出力値をもつ隣接ドライバー燃料集合体平均出力値の比較

制御棒状態	方策内容	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未方策 (基準ケース)	0.829	0.693	19.62
	カドミウムピン置換方策	0.740	0.708	4.52
	除熱型カドミウムピン置換方策	0.978	0.729	34.16
	カドミウム案内管方策	0.731	0.703	3.98
	六角形状 C/R ch. 方策	0.717	0.683	4.98

(b) ①周辺ドライバー燃料集合体内最大出力値 と ②最大出力値をもつ周辺ドライバー燃料集合体平均出力値の比較

制御棒状態	方策内容	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未方策 (基準ケース)	0.705	0.675	4.44
	カドミウムピン置換方策	0.754	0.725	4.00
	除熱型カドミウムピン置換方策	0.736	0.708	3.95
	カドミウム案内管方策	0.769	0.740	3.92
	六角形状 C/R ch. 方策	0.729	0.701	3.99

(c) ①隣接、周辺ドライバー燃料集合体内最大出力値 と ②隣接、周辺ドライバー燃料集合体平均出力の最大値の比較

制御棒状態	方策内容	①	②	①/②×100 [%]
引抜き状態	未方策 (基準ケース)	0.829	0.693	19.62
	カドミウムピン置換方策	0.754	0.725	4.00
	除熱型カドミウムピン置換方策	0.978	0.729	34.16
	カドミウム案内管方策	0.769	0.740	3.92
	六角形状 C/R ch. 方策	0.729	0.701	3.99

表6.3.1-1 1次元平板体系を用いた計算条件

項 目	設 定 値
S _N 次数	S ₈
非等方散乱次数	P3
実効増倍率の収束判定誤差	1×10 ⁻⁴ 以下
中性子束の収束判定誤差	1×10 ⁻⁴ 以下
軸方向高さ (m)	1.0
バックリング係数	1.421
内側反復計算最大反復回数 (回)	20
外側反復計算最大反復回数 (回)	100

表 6.4.2-1 制御棒反応度価値解析結果*

(3次元7群拡散計算)

ケース	keff	制御棒反応度価値	
		計算値 (% Δ k/k')	必要価値 (% Δ k/k')
全制御棒引き抜き	1.02873	—	
主炉停止系			3.0
全数挿入	0.95177	7.86	
ワンロッドスタック；第1リング	0.96404	6.52	
ワンロッドスタック；第2リング・スロット側	0.96188	6.76	
ワンロッドスタック；第2リング・スロット垂直側	0.95799	7.18	
後備炉停止系			2.0
全数挿入	0.98835	3.97	
ワンロッドスタック；スロット側	0.99688	3.11	
ワンロッドスタック；スロット垂直側	0.99795	3.00	

*解析体系は図 6.4.2-2～6.4.2-5 に掲載。

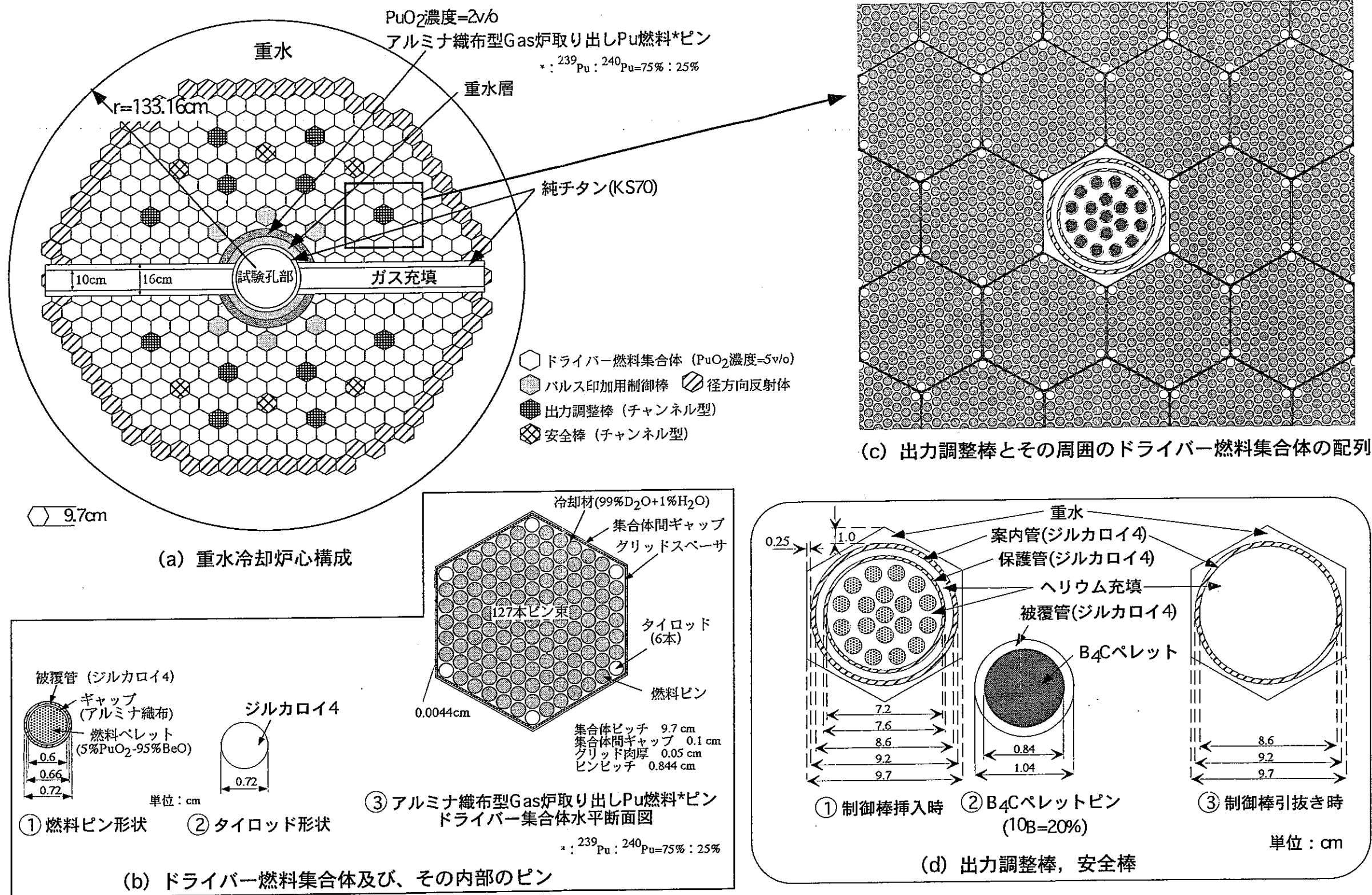
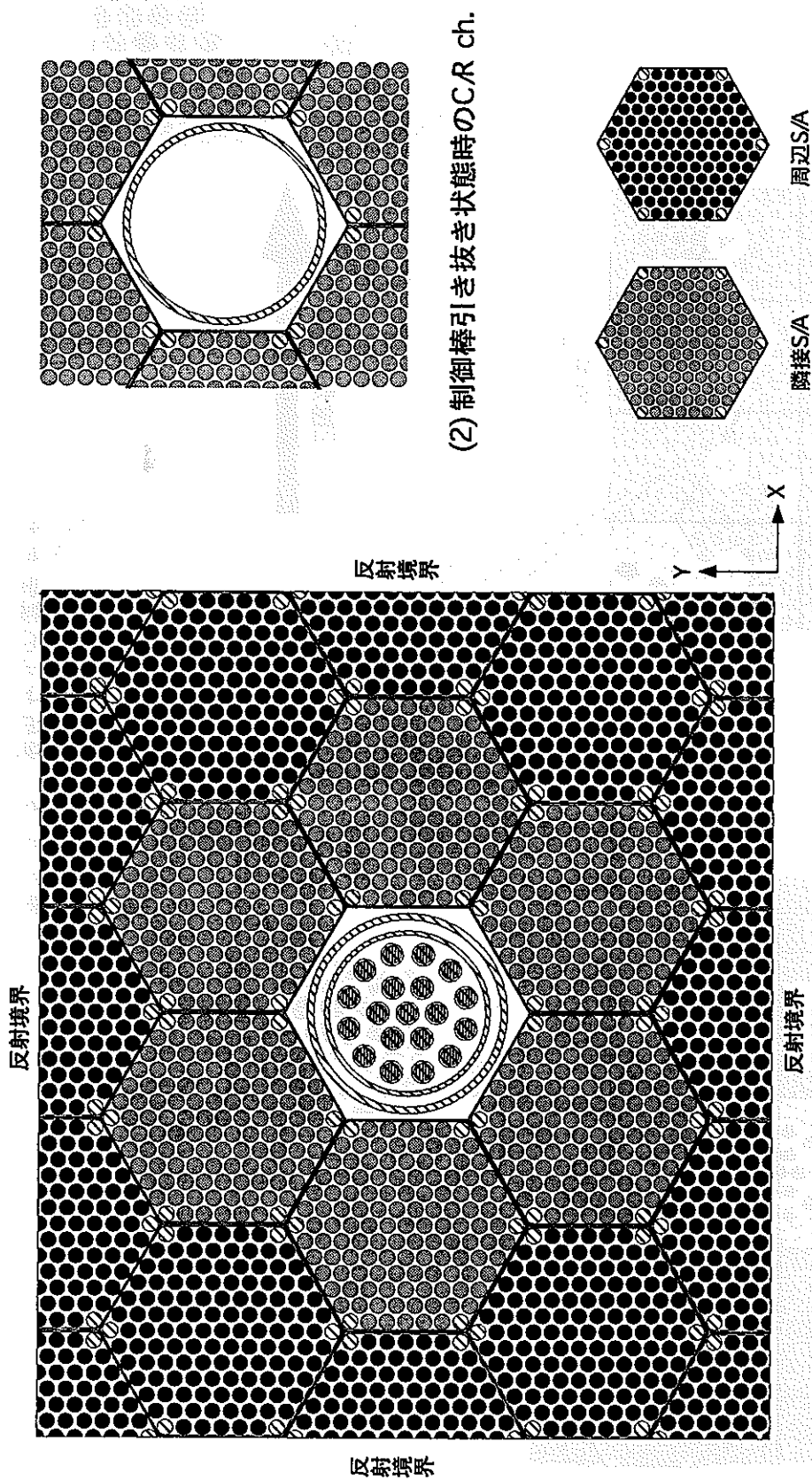


図 1-1 SERAPH重水冷却炉心構成及び各構成要素の水平断面図



(2) 制御棒引き抜き状態時のC/R ch.

(3) ドライバー燃料集合体

(1) 制御棒挿入状態時の2次元体系XYスーパーセルモデル

図 2.2-1 2次元XY体系スーパーセルモデル

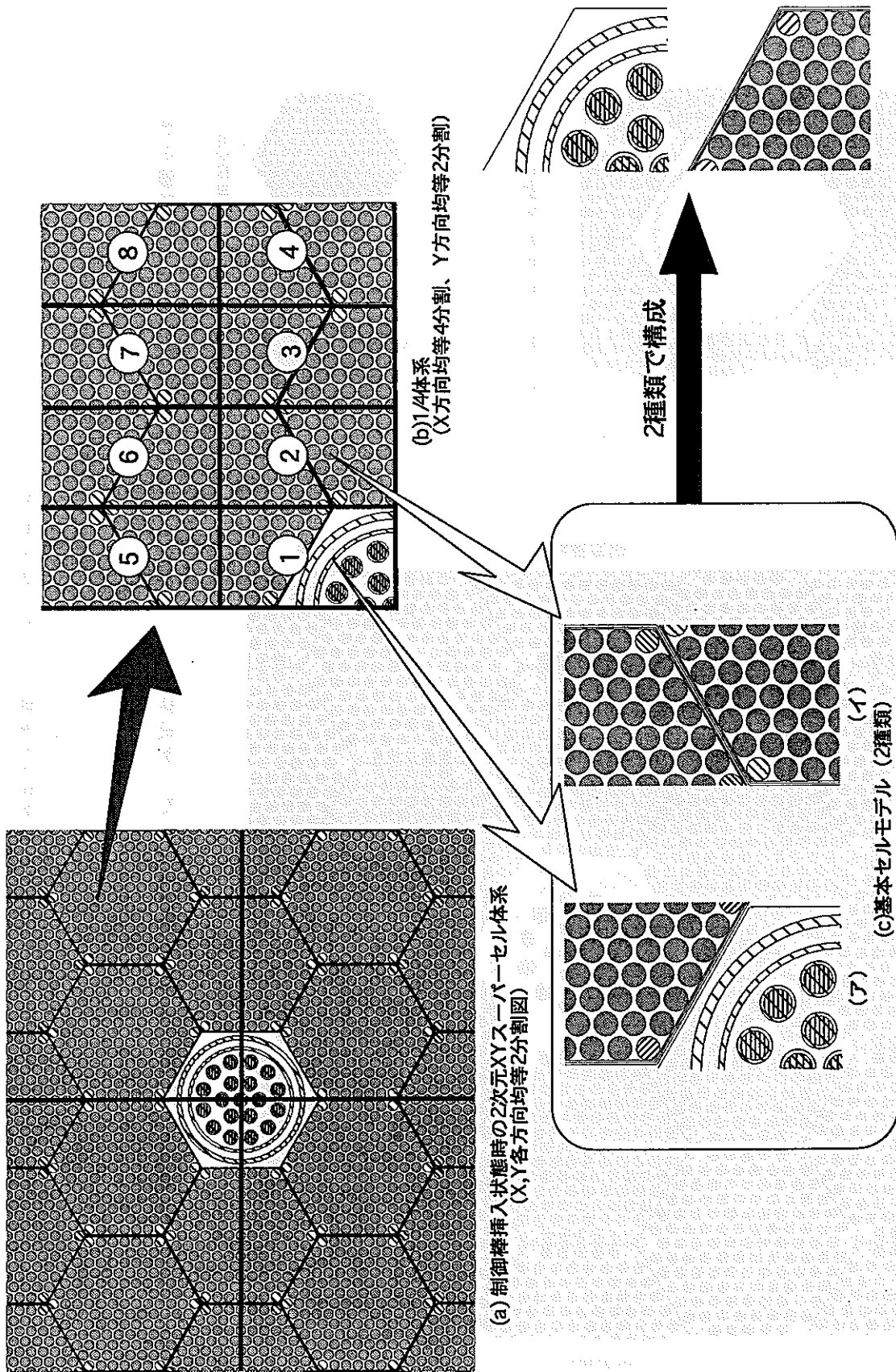


図 2.2-2 単位セルの選定方法

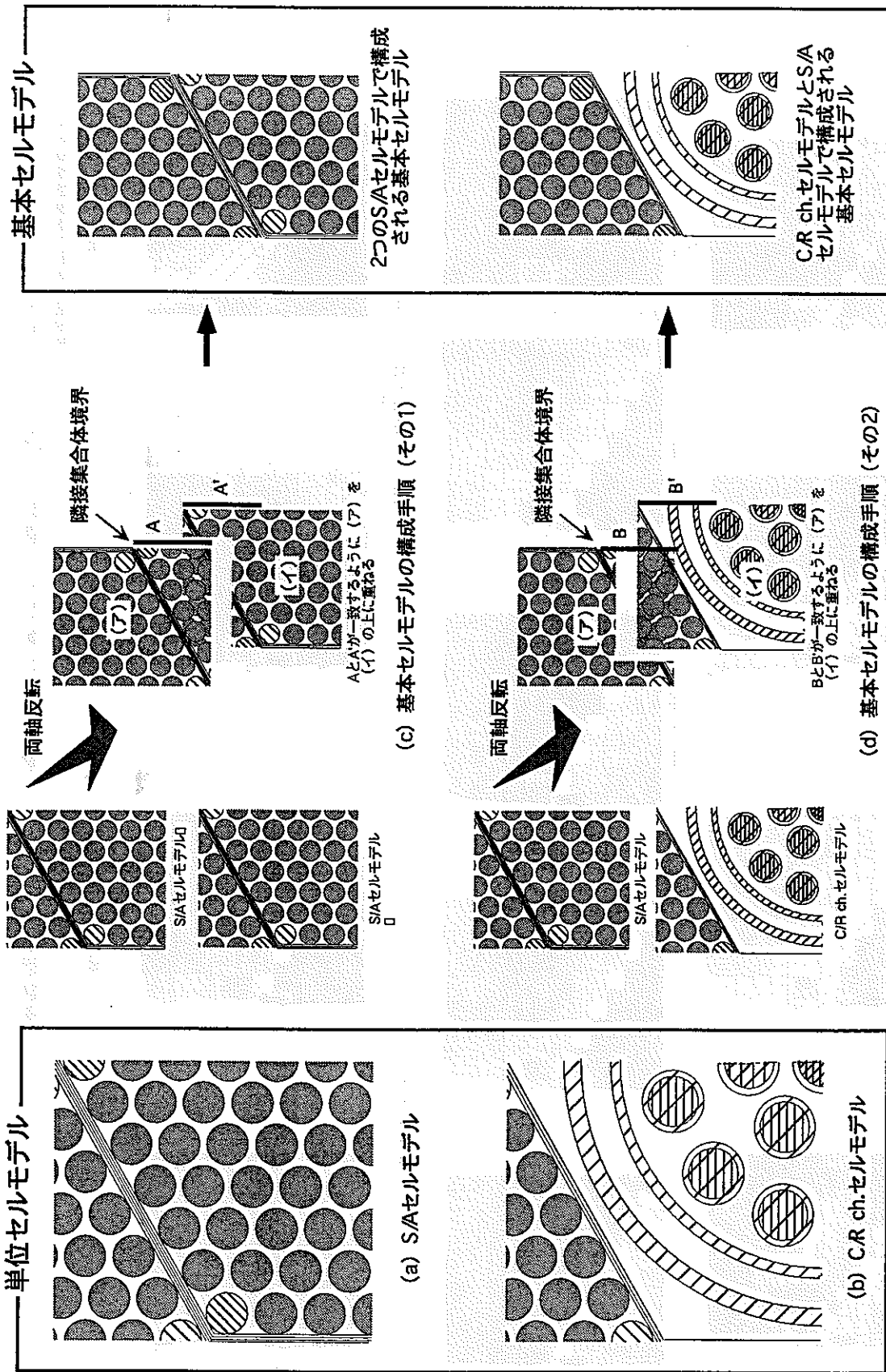


図 2.2-3 2種類の単位セルモデルの設定及び基本セルモデルの構成

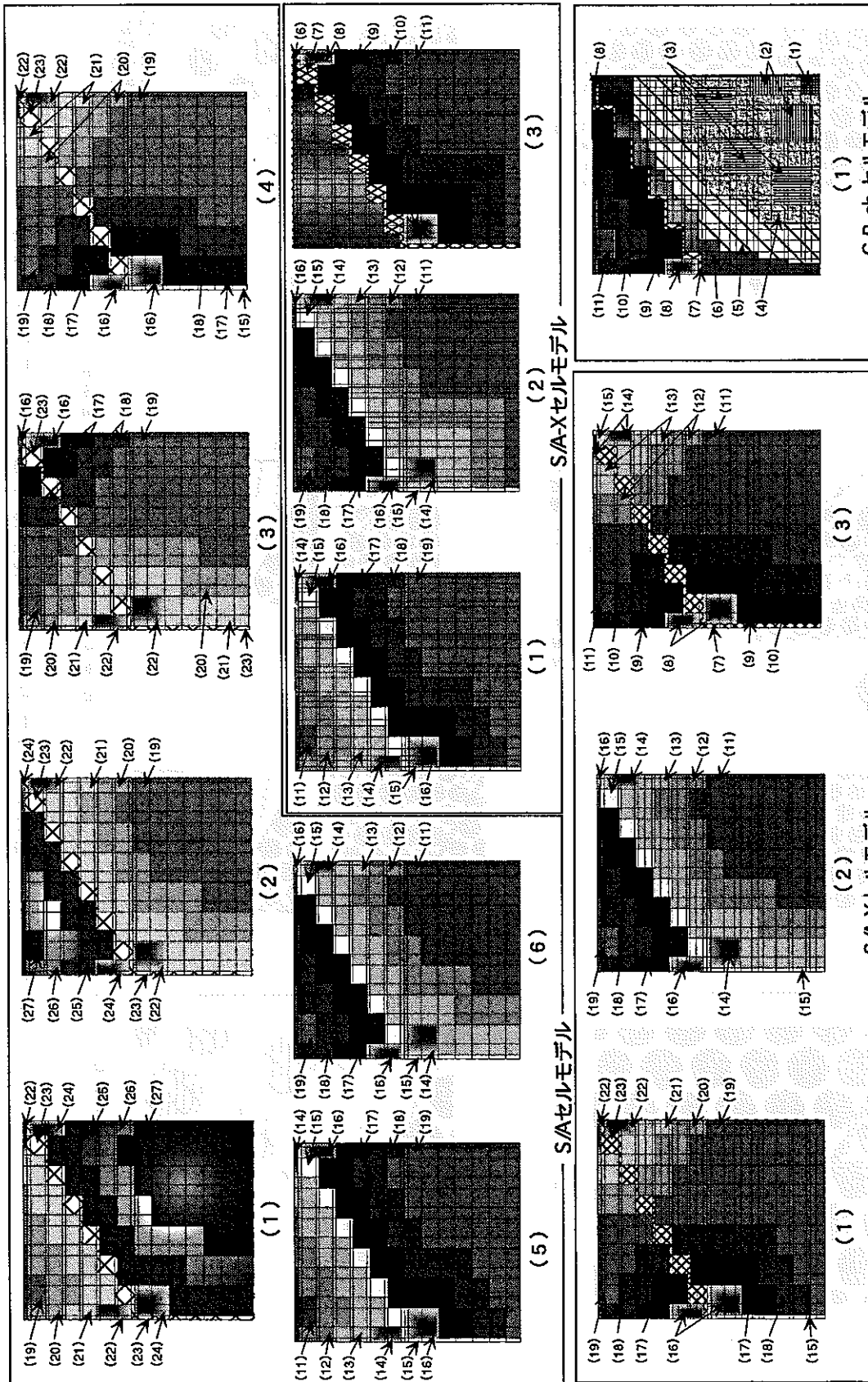
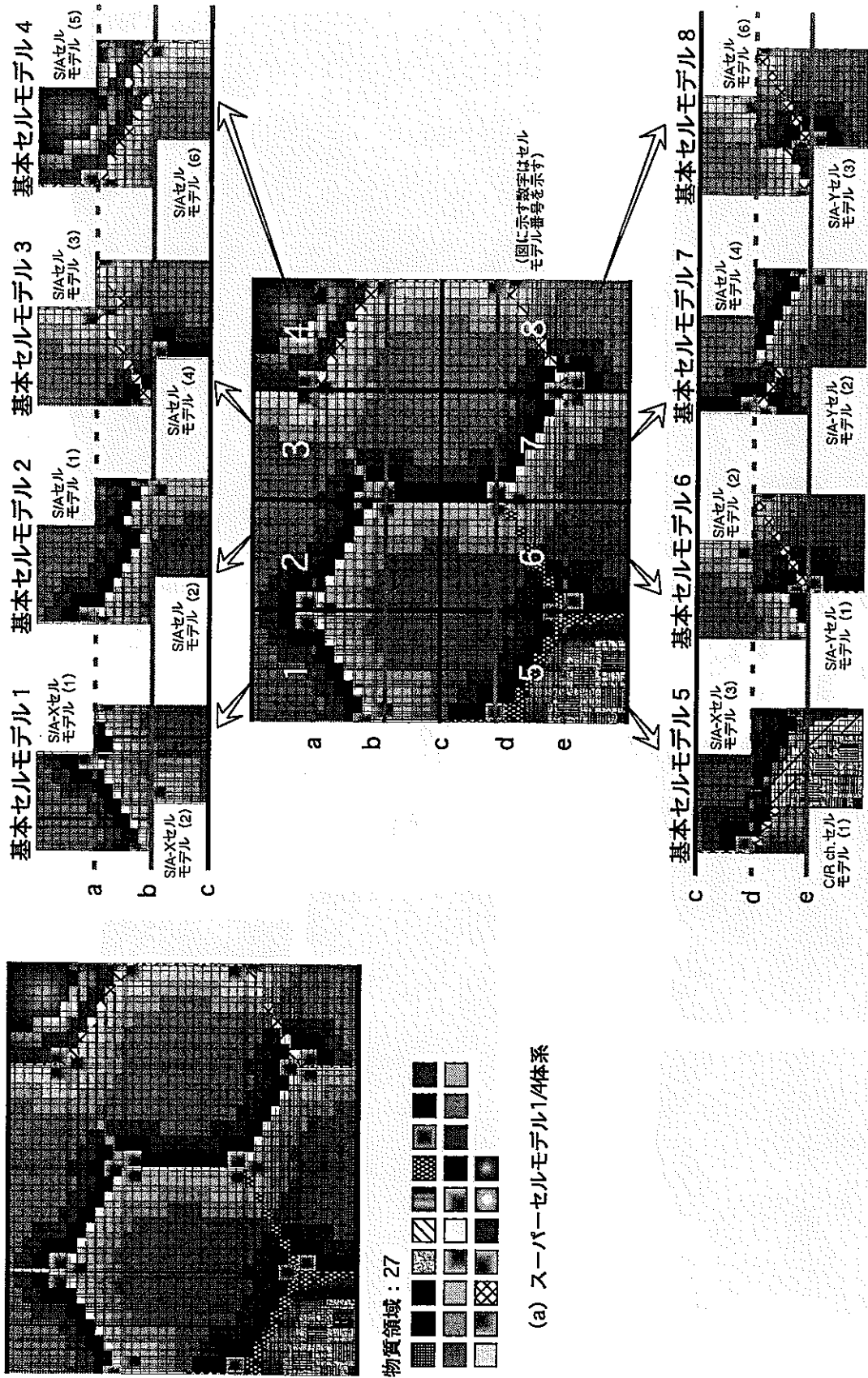


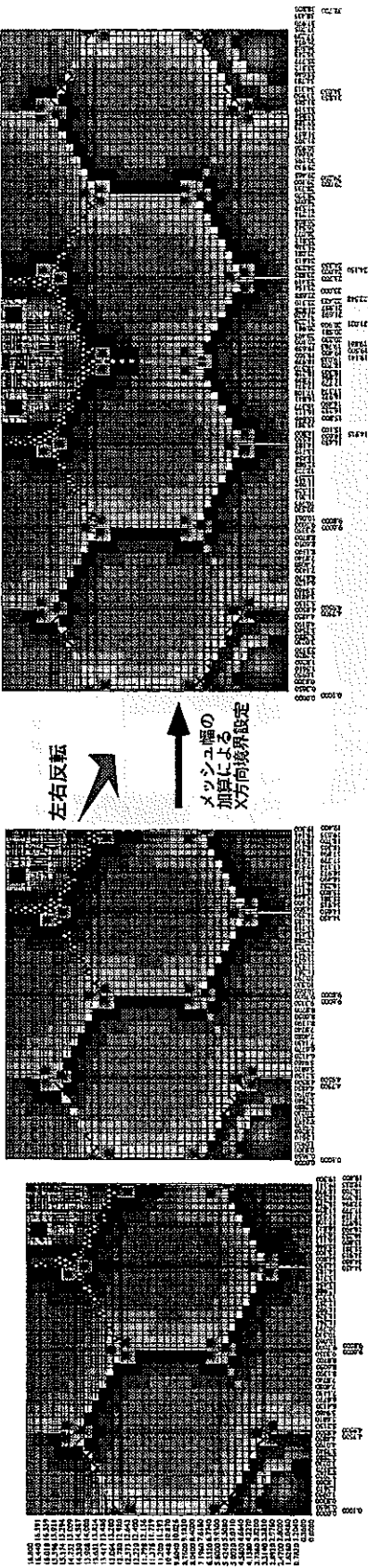
図 2.2-4 物質領域及びメッシュ境界設定に基づく13種類の単位セルモデル



(b) スーパーセルモデル1/4体系を構成する8つの基本セルモデルに対して2つの単位セルモデルを重ね合わせて構成した場合

図 2.2-5 スーパーセルモデル1/4体系及び基本セルモデル構成

[手順1] スーパーセルモデル1/4体系を用いてスーパーセルモデルのY方向1/2体系を構成及びX方向メッシュ境界の設定



[手順2] スーパーセルモデルのY方向1/2体系モデルからスーパーセルモデルの構成及びY方向メッシュ境界の設定

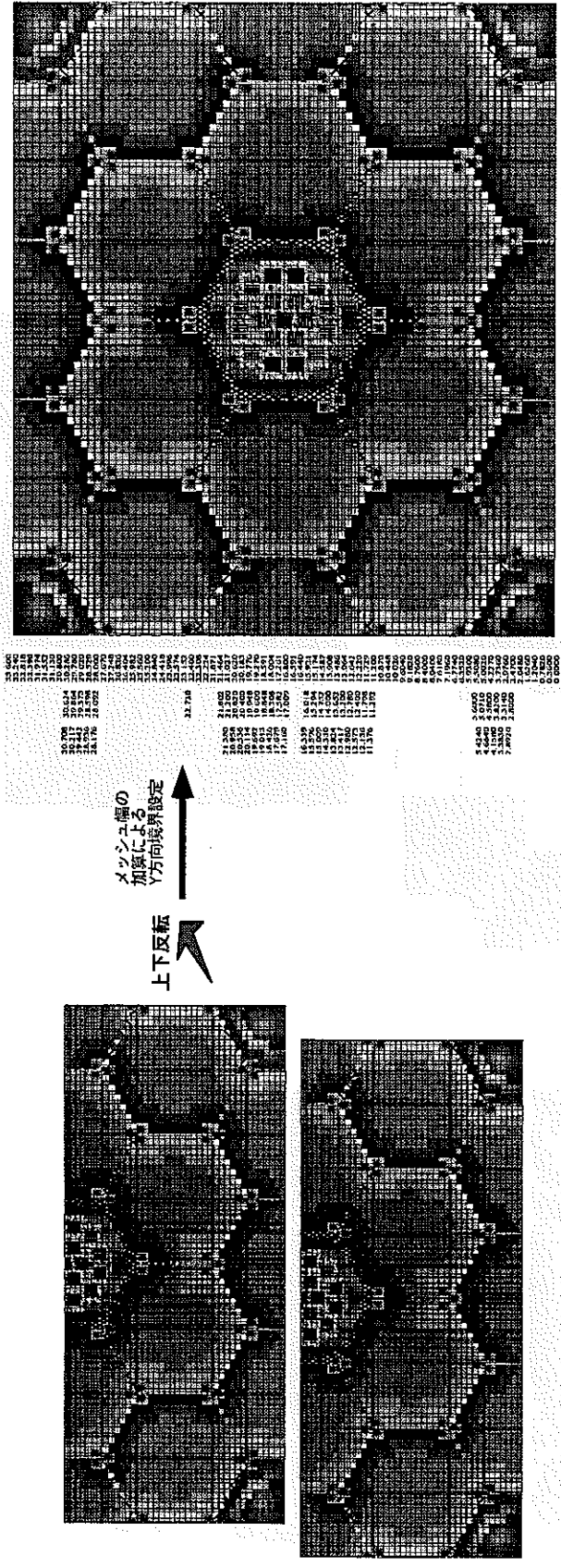


図 2.2-6 スーパーセルモデル1/4体系から全体系の構成手順

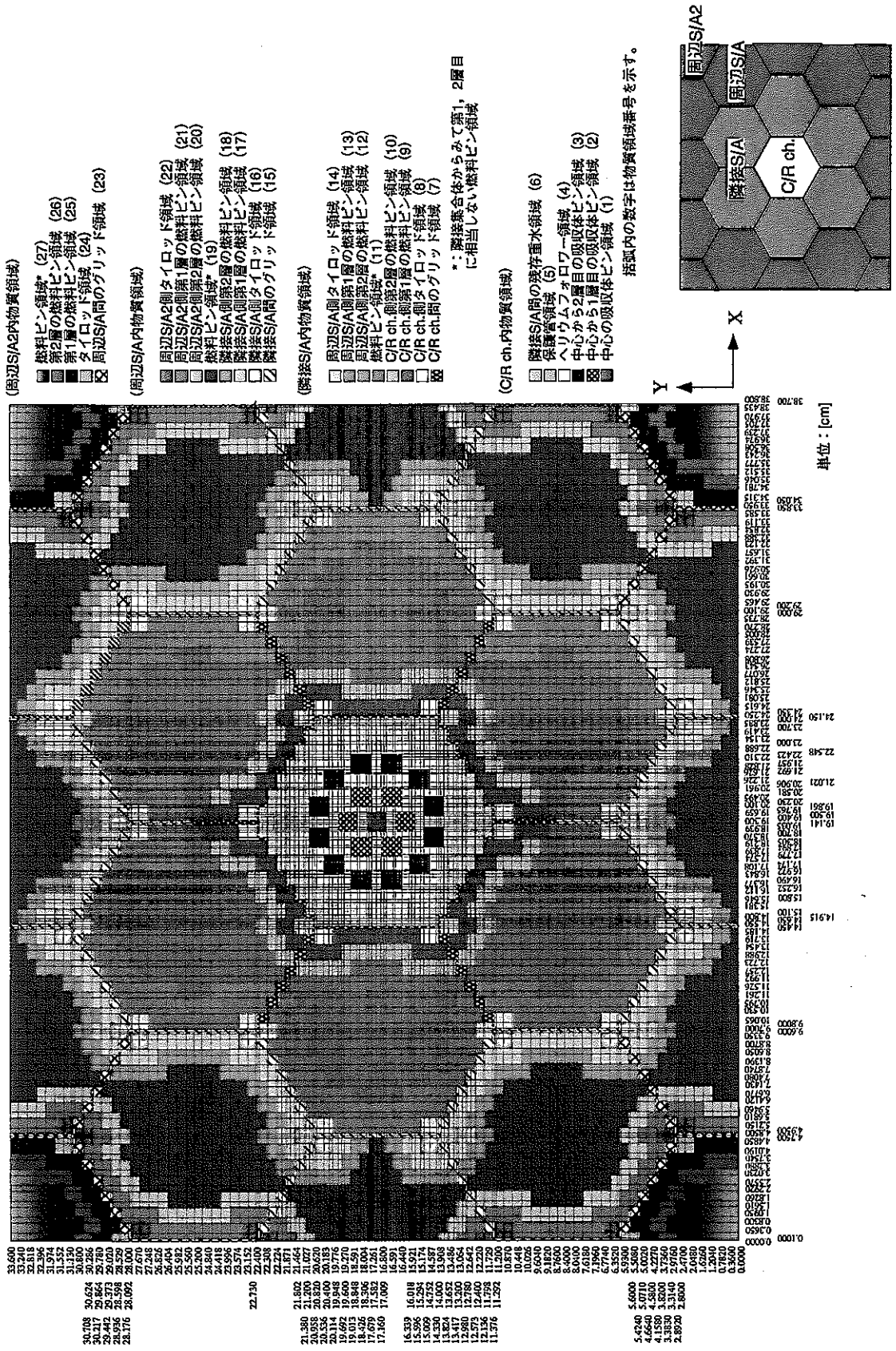


図 2.2-7 2次元XY体系スーパーセルモデルの作成結果

動作環境：大型計算機

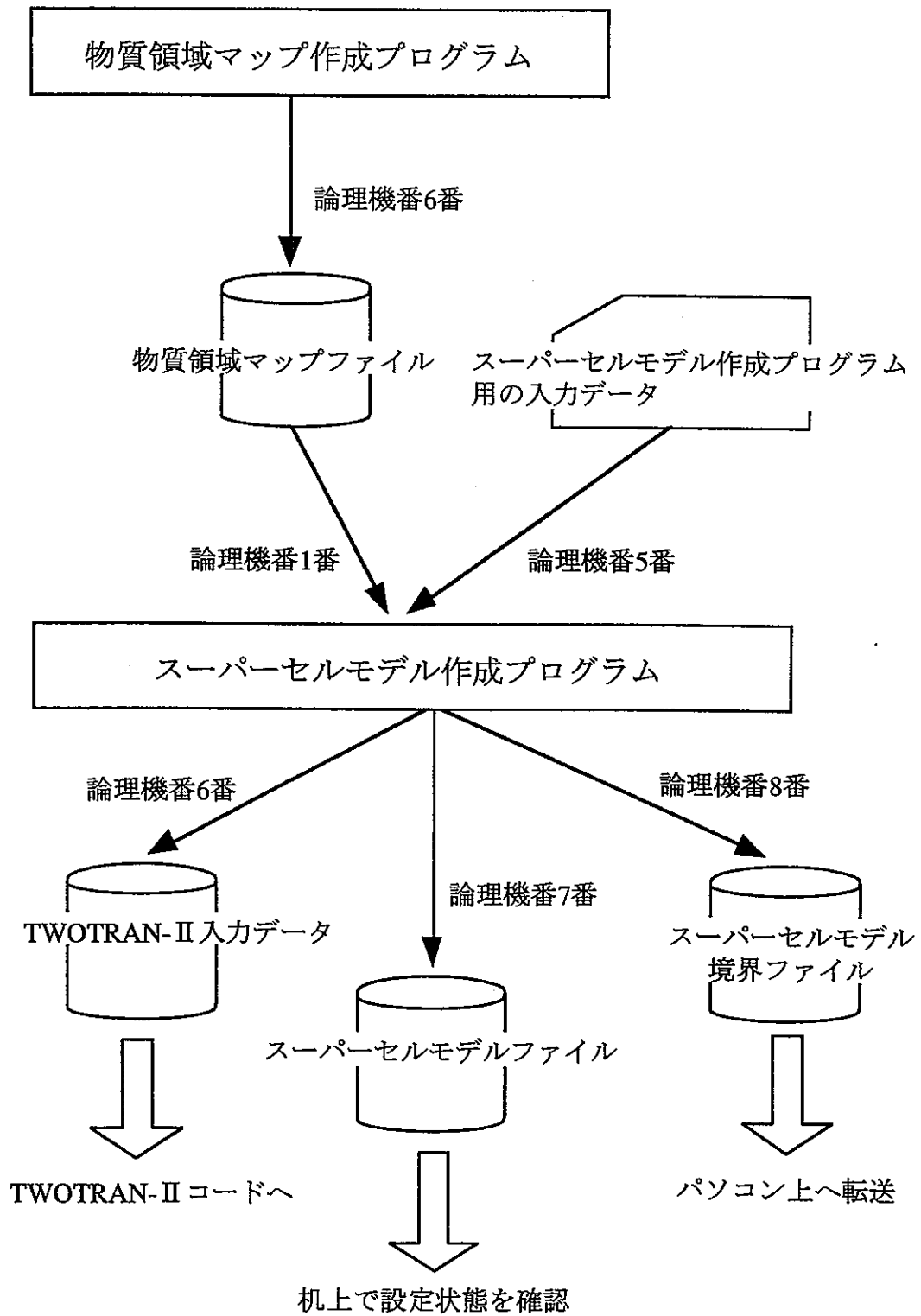


図 2.2-8 スーパーセルモデル作成フロー

<大型計算機>

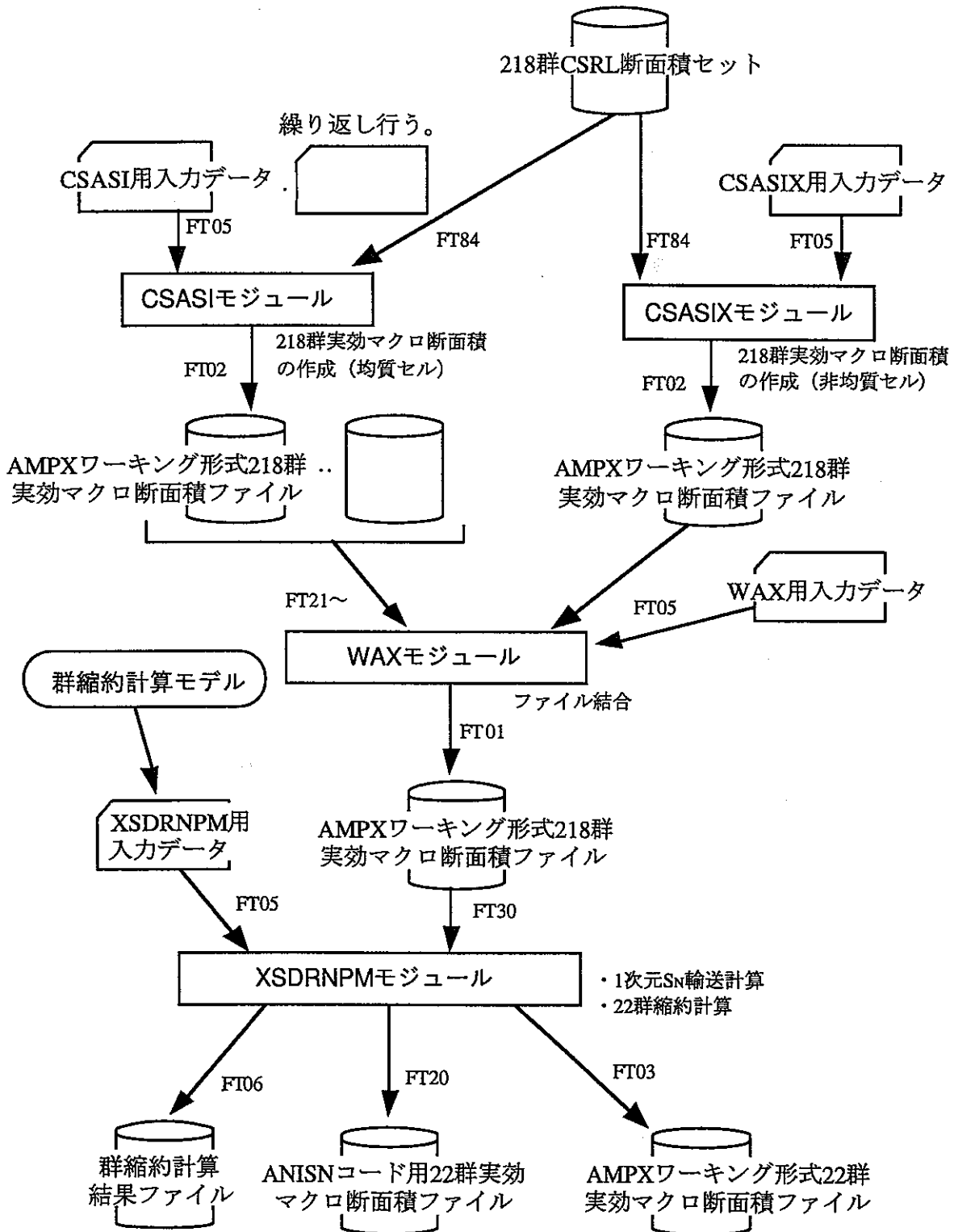


図 2.3-1 SCALE4 コードシステムによる実効断面積作成及び群縮約計算フロー

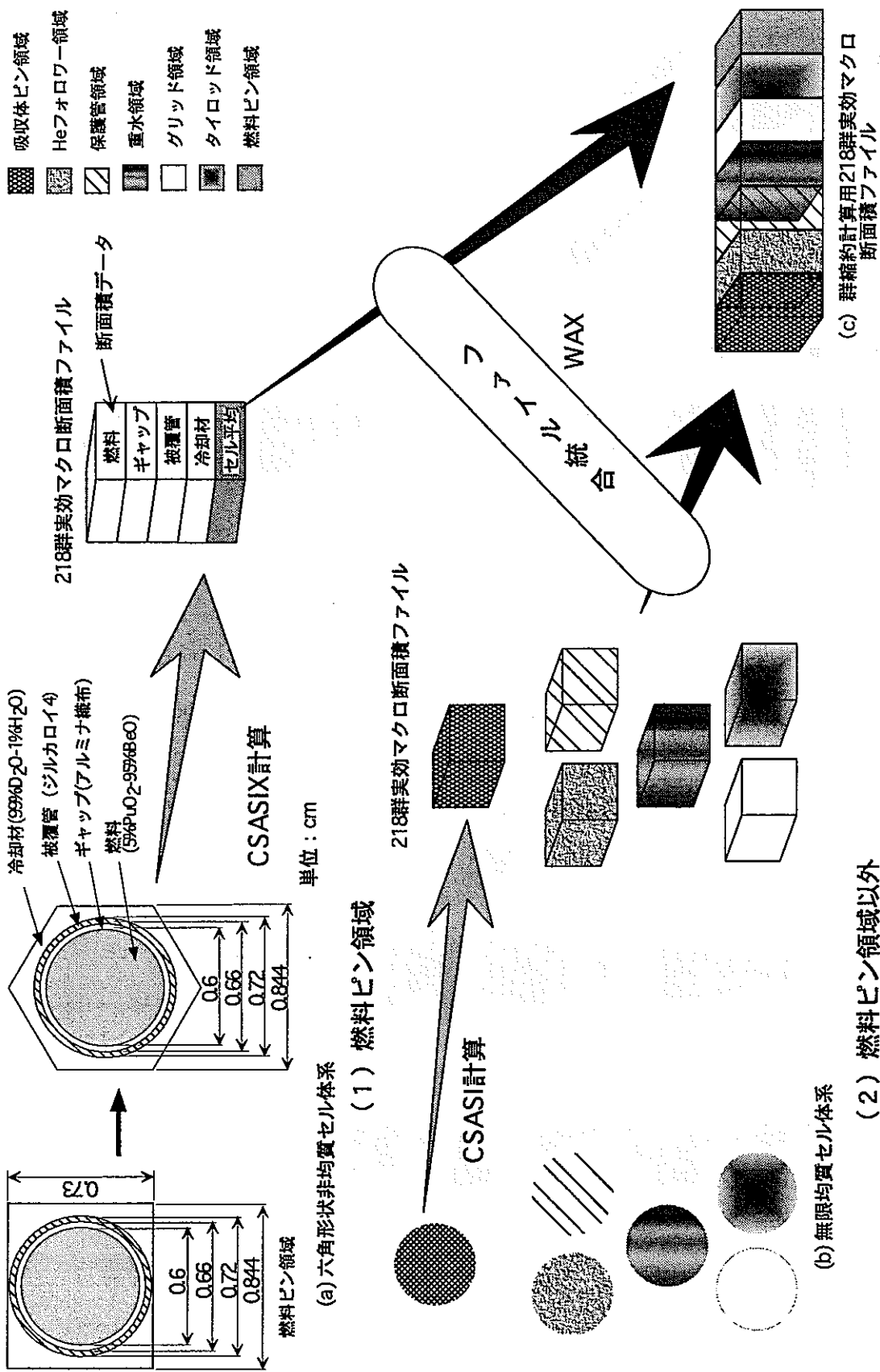


図 2.3-2 218群実効マクロ断面積の作成方法

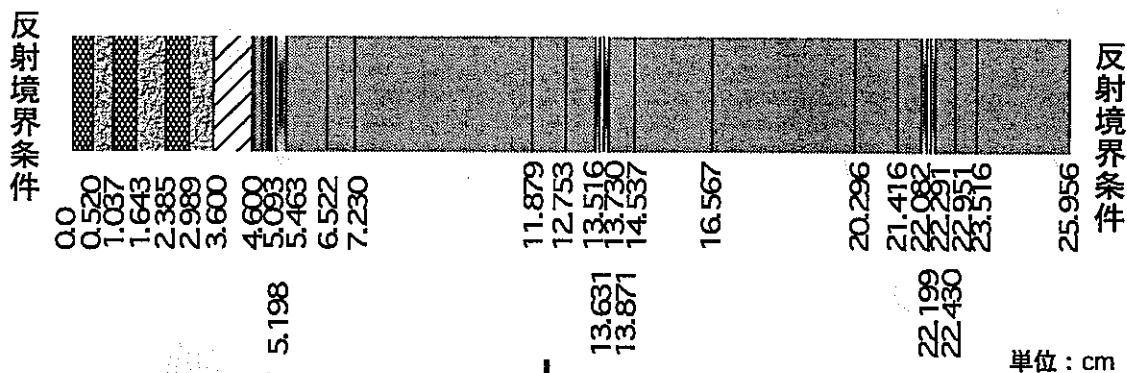


(a) 218群実効マクロ断面積ファイル

XSDRNPMモジュール計算

計算条件
 P1次数=P₀~P₃成分、S_N次数=S₈
 中性子束、固有値計算の収束判定値<5×10⁻⁴
 軸方向バックリング=1m

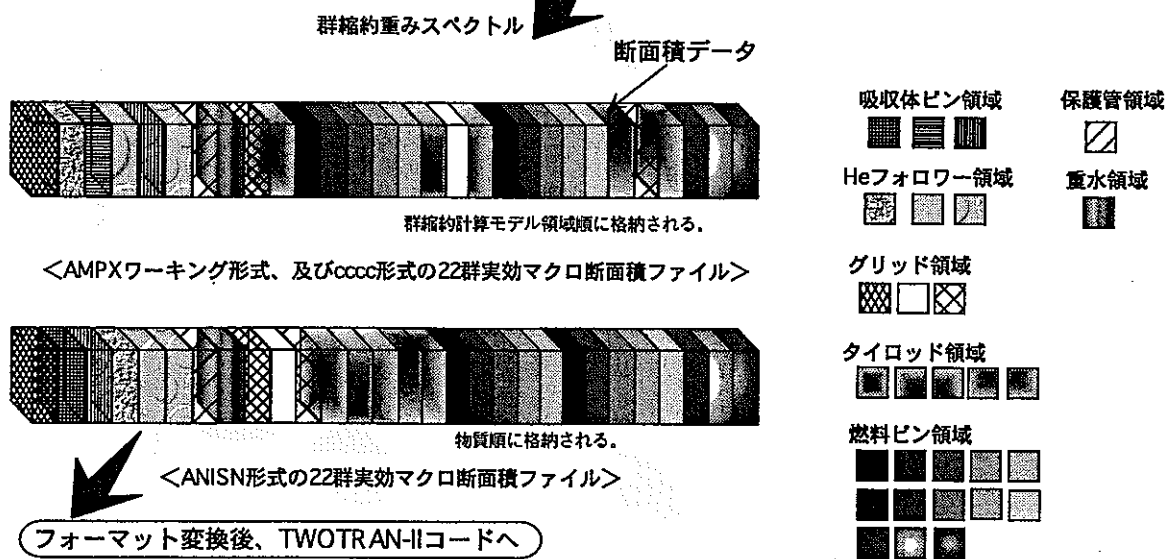
(b) 群縮約計算モデルに設定後、1次元臨界計算（1次元S_N輸送計算）を実行する。



単位：cm

各領域ごとの中性子束分布の算出

(c) 群縮約計算による22群実効マクロ断面積の作成



(d) 出力される22群実効マクロ断面積ファイル

図2.3-3 22群実効マクロ断面積の作成方法

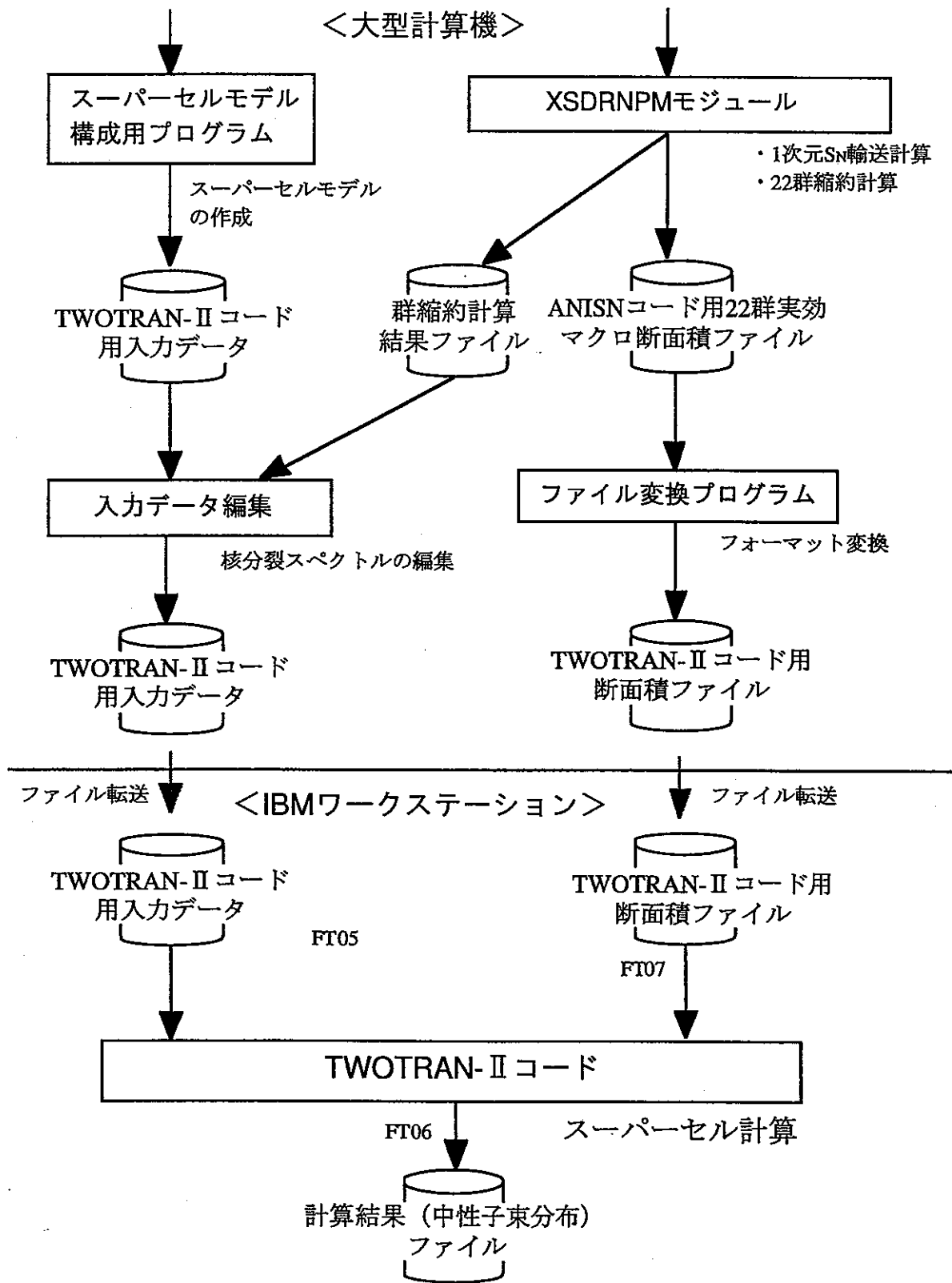


図 2.4-1 TWOTRAN-IIコードによるスーパーセル計算フロー

<IBMワークステーション>

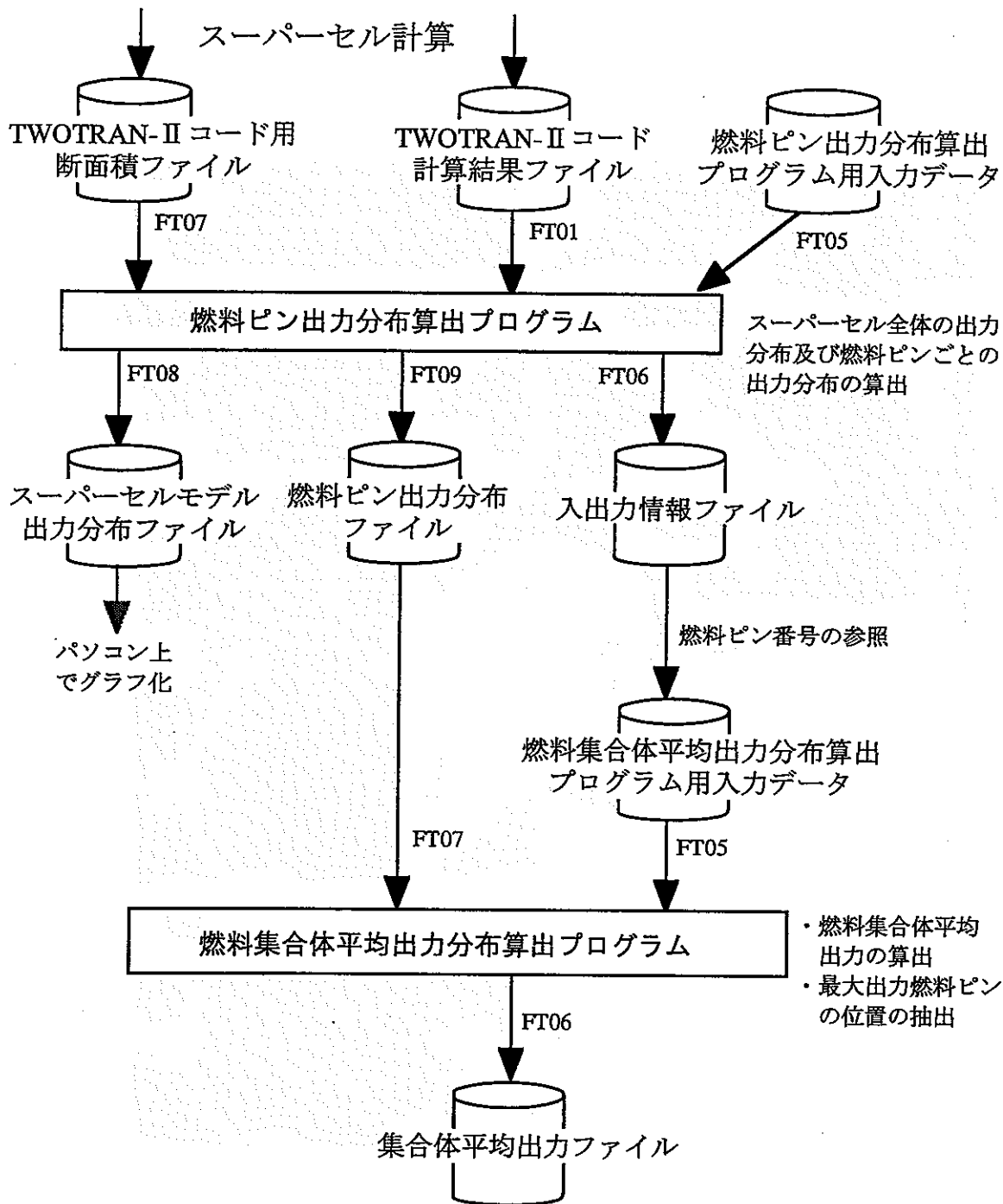


図 2.4-3 スーパーセル出力分布算出用プログラム計算フロー

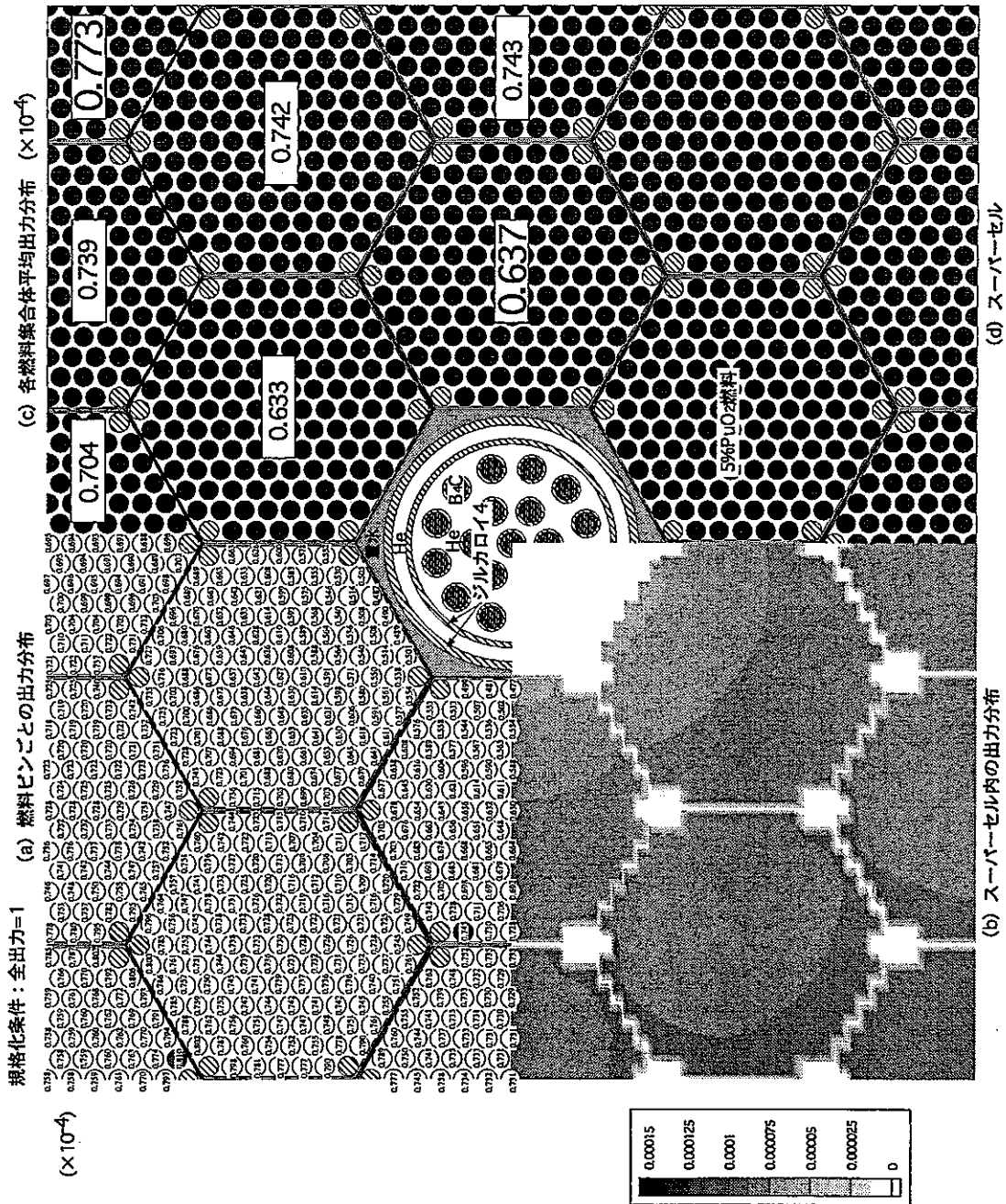


図 2.4-4 サンプルのスーパーセル及び出力分布結果

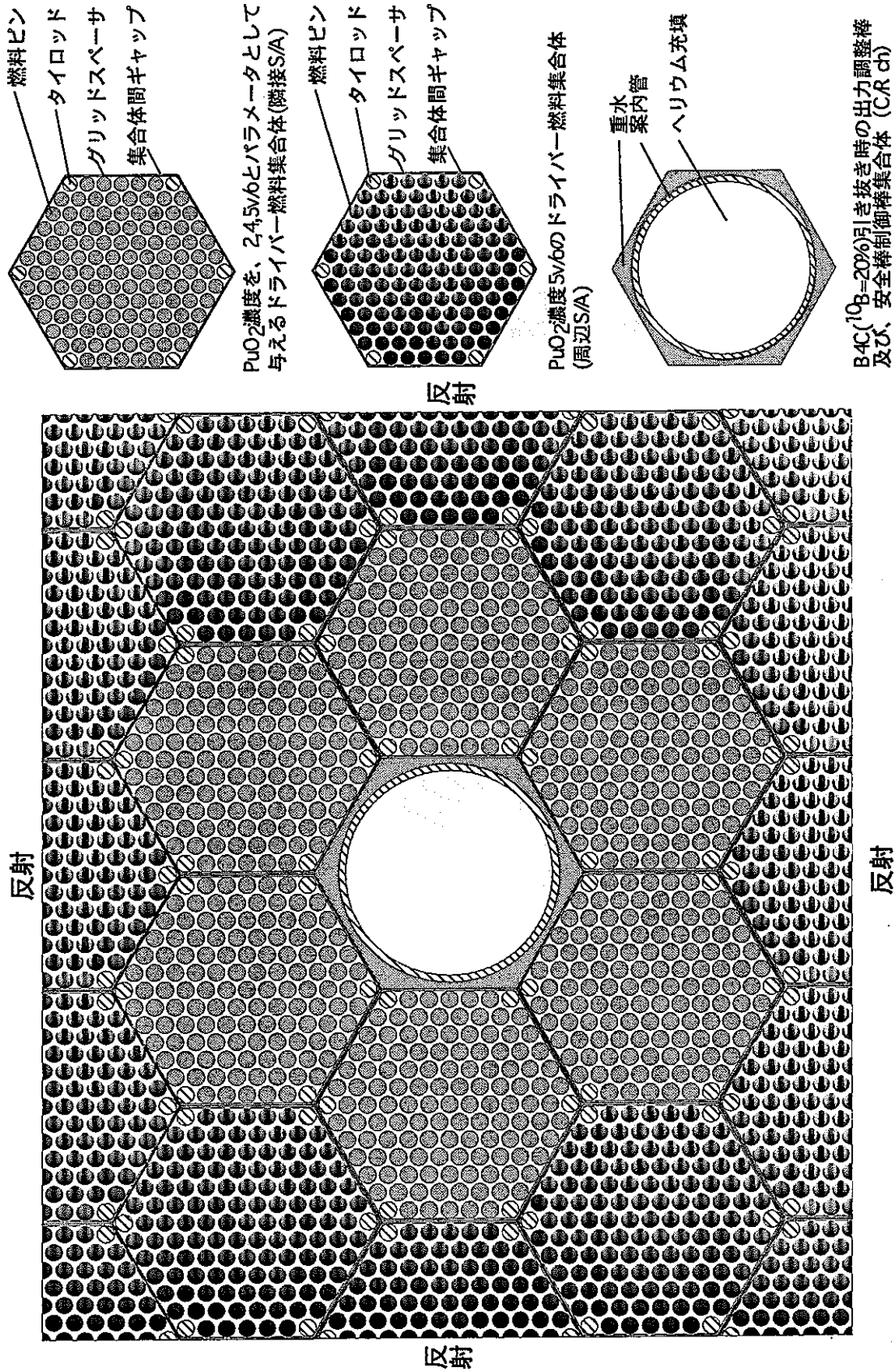


図 3.2-1 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図

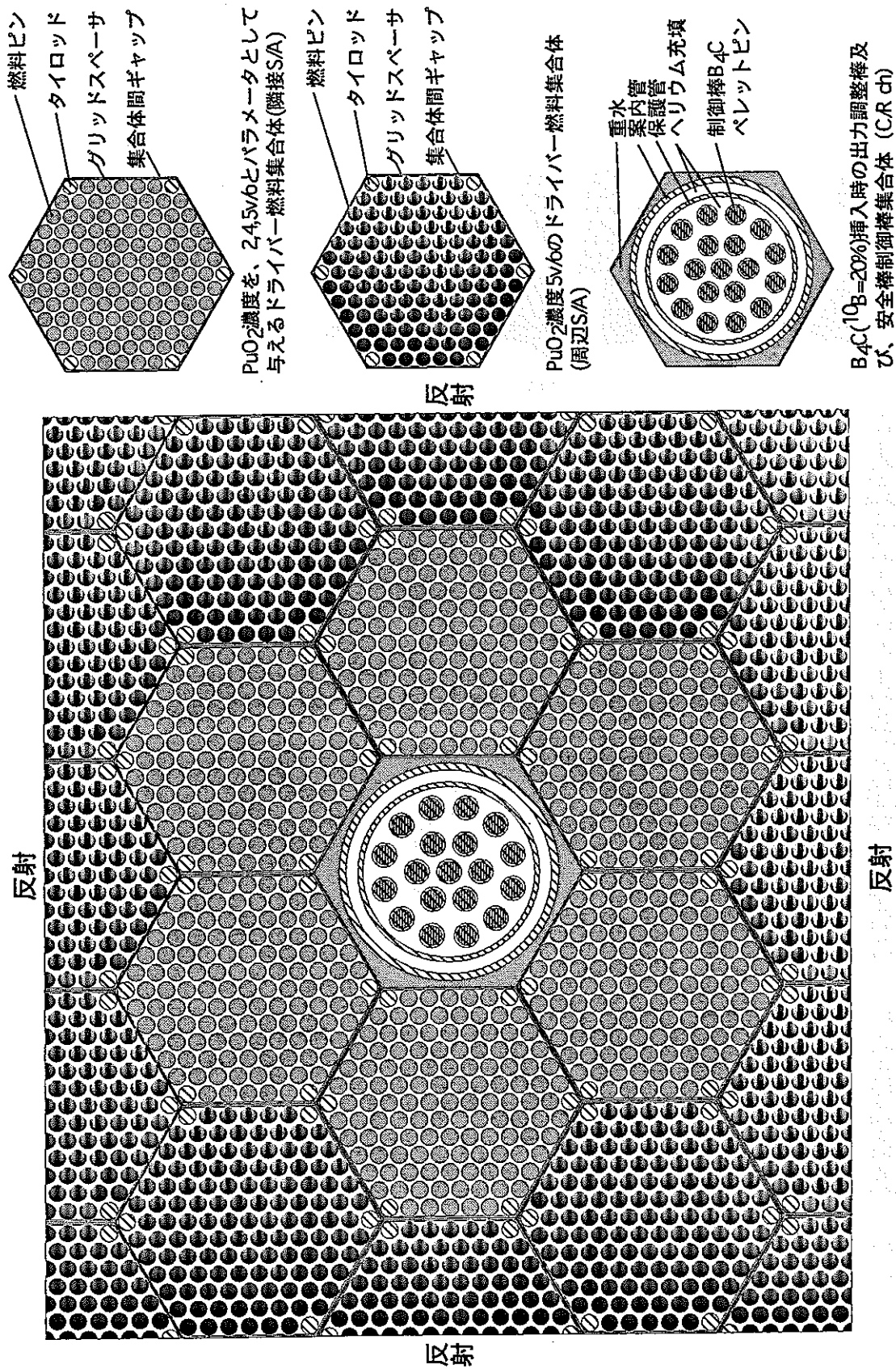
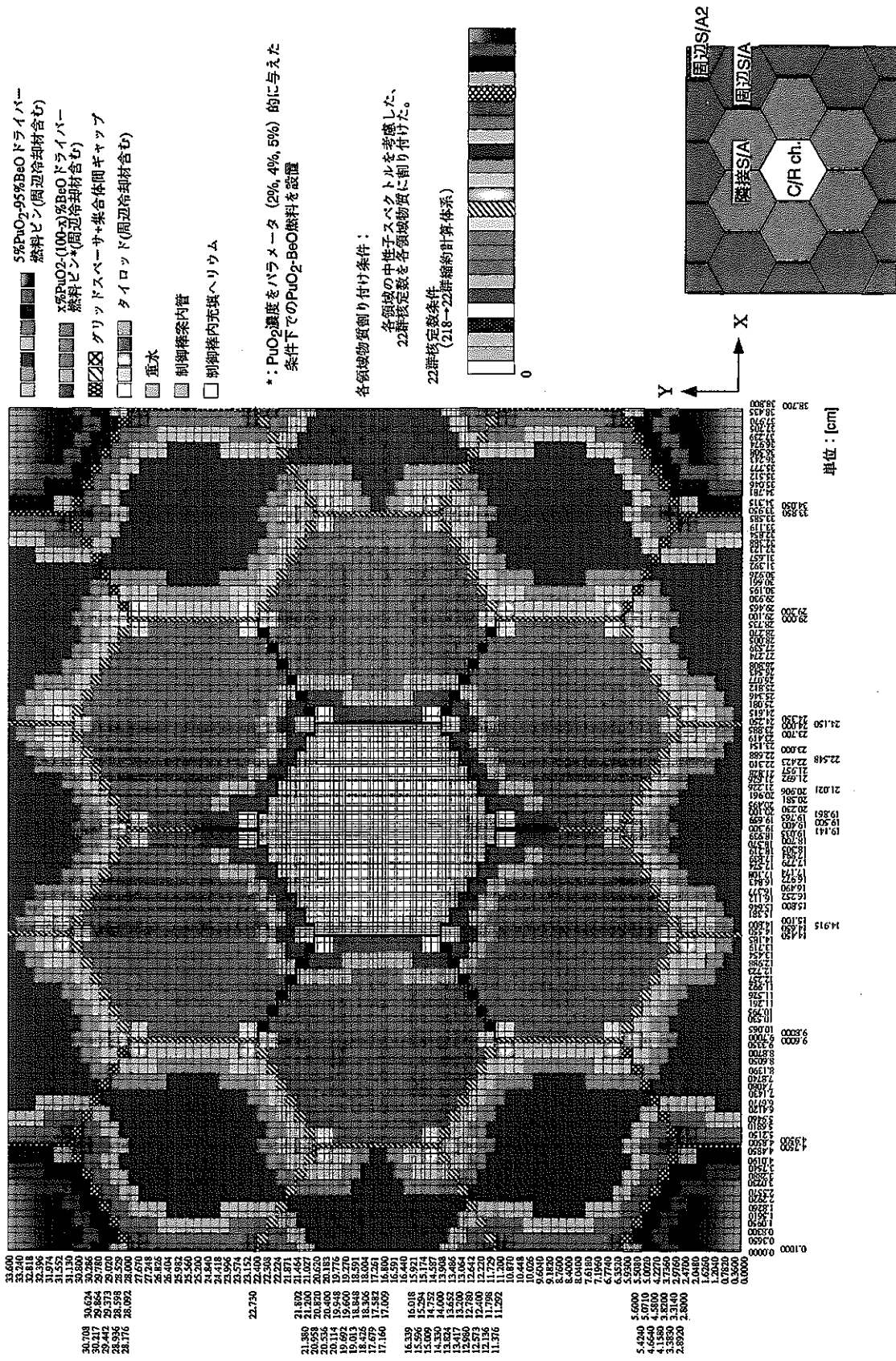


図 3.2-2 制御棒挿入時の2次元XY幾何形状及び計算条件図



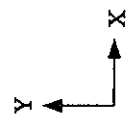
- 5%PuO₂-95%BeOドライバー
燃料ピン(周辺冷却材含む)
- 5%PuO₂-(100-α)%BeOドライバー
燃料ピン*(周辺冷却材含む)
- グリッドスペーサー+集合体間ギャップ
- タイロッド(周辺冷却材含む)
- 重水
- 制御棒案内管
- 制御棒内充填ヘリウム

*: PuO₂濃度をパラメータ (20%, 4%, 5%) 的に与えた
条件下でのPuO₂-BeO燃料を配置

各領域物質割り付け条件:

各領域の中性子スベクトルを考慮した、
22群核定数を各領域物質に割り付けた。

22群核定数条件
(218→22群縮約計算体系)



単位: [cm]

33.600	19.141	14.915	0.1000
33.240	19.141	14.915	0.1000
32.880	19.141	14.915	0.1000
32.520	19.141	14.915	0.1000
32.160	19.141	14.915	0.1000
31.800	19.141	14.915	0.1000
31.440	19.141	14.915	0.1000
31.080	19.141	14.915	0.1000
30.720	19.141	14.915	0.1000
30.360	19.141	14.915	0.1000
30.000	19.141	14.915	0.1000
29.640	19.141	14.915	0.1000
29.280	19.141	14.915	0.1000
28.920	19.141	14.915	0.1000
28.560	19.141	14.915	0.1000
28.200	19.141	14.915	0.1000
27.840	19.141	14.915	0.1000
27.480	19.141	14.915	0.1000
27.120	19.141	14.915	0.1000
26.760	19.141	14.915	0.1000
26.400	19.141	14.915	0.1000
26.040	19.141	14.915	0.1000
25.680	19.141	14.915	0.1000
25.320	19.141	14.915	0.1000
24.960	19.141	14.915	0.1000
24.600	19.141	14.915	0.1000
24.240	19.141	14.915	0.1000
23.880	19.141	14.915	0.1000
23.520	19.141	14.915	0.1000
23.160	19.141	14.915	0.1000
22.800	19.141	14.915	0.1000
22.440	19.141	14.915	0.1000
22.080	19.141	14.915	0.1000
21.720	19.141	14.915	0.1000
21.360	19.141	14.915	0.1000
21.000	19.141	14.915	0.1000
20.640	19.141	14.915	0.1000
20.280	19.141	14.915	0.1000
19.920	19.141	14.915	0.1000
19.560	19.141	14.915	0.1000
19.200	19.141	14.915	0.1000
18.840	19.141	14.915	0.1000
18.480	19.141	14.915	0.1000
18.120	19.141	14.915	0.1000
17.760	19.141	14.915	0.1000
17.400	19.141	14.915	0.1000
17.040	19.141	14.915	0.1000
16.680	19.141	14.915	0.1000
16.320	19.141	14.915	0.1000
15.960	19.141	14.915	0.1000
15.600	19.141	14.915	0.1000
15.240	19.141	14.915	0.1000
14.880	19.141	14.915	0.1000
14.520	19.141	14.915	0.1000
14.160	19.141	14.915	0.1000
13.800	19.141	14.915	0.1000
13.440	19.141	14.915	0.1000
13.080	19.141	14.915	0.1000
12.720	19.141	14.915	0.1000
12.360	19.141	14.915	0.1000
12.000	19.141	14.915	0.1000
11.640	19.141	14.915	0.1000
11.280	19.141	14.915	0.1000
10.920	19.141	14.915	0.1000
10.560	19.141	14.915	0.1000
10.200	19.141	14.915	0.1000
9.840	19.141	14.915	0.1000
9.480	19.141	14.915	0.1000
9.120	19.141	14.915	0.1000
8.760	19.141	14.915	0.1000
8.400	19.141	14.915	0.1000
8.040	19.141	14.915	0.1000
7.680	19.141	14.915	0.1000
7.320	19.141	14.915	0.1000
6.960	19.141	14.915	0.1000
6.600	19.141	14.915	0.1000
6.240	19.141	14.915	0.1000
5.880	19.141	14.915	0.1000
5.520	19.141	14.915	0.1000
5.160	19.141	14.915	0.1000
4.800	19.141	14.915	0.1000
4.440	19.141	14.915	0.1000
4.080	19.141	14.915	0.1000
3.720	19.141	14.915	0.1000
3.360	19.141	14.915	0.1000
3.000	19.141	14.915	0.1000
2.640	19.141	14.915	0.1000
2.280	19.141	14.915	0.1000
1.920	19.141	14.915	0.1000
1.560	19.141	14.915	0.1000
1.200	19.141	14.915	0.1000
0.840	19.141	14.915	0.1000
0.480	19.141	14.915	0.1000
0.120	19.141	14.915	0.1000

図 3.2-3 制御棒引き抜き時の2次元XYスーパーセル計算体系及び計算条件

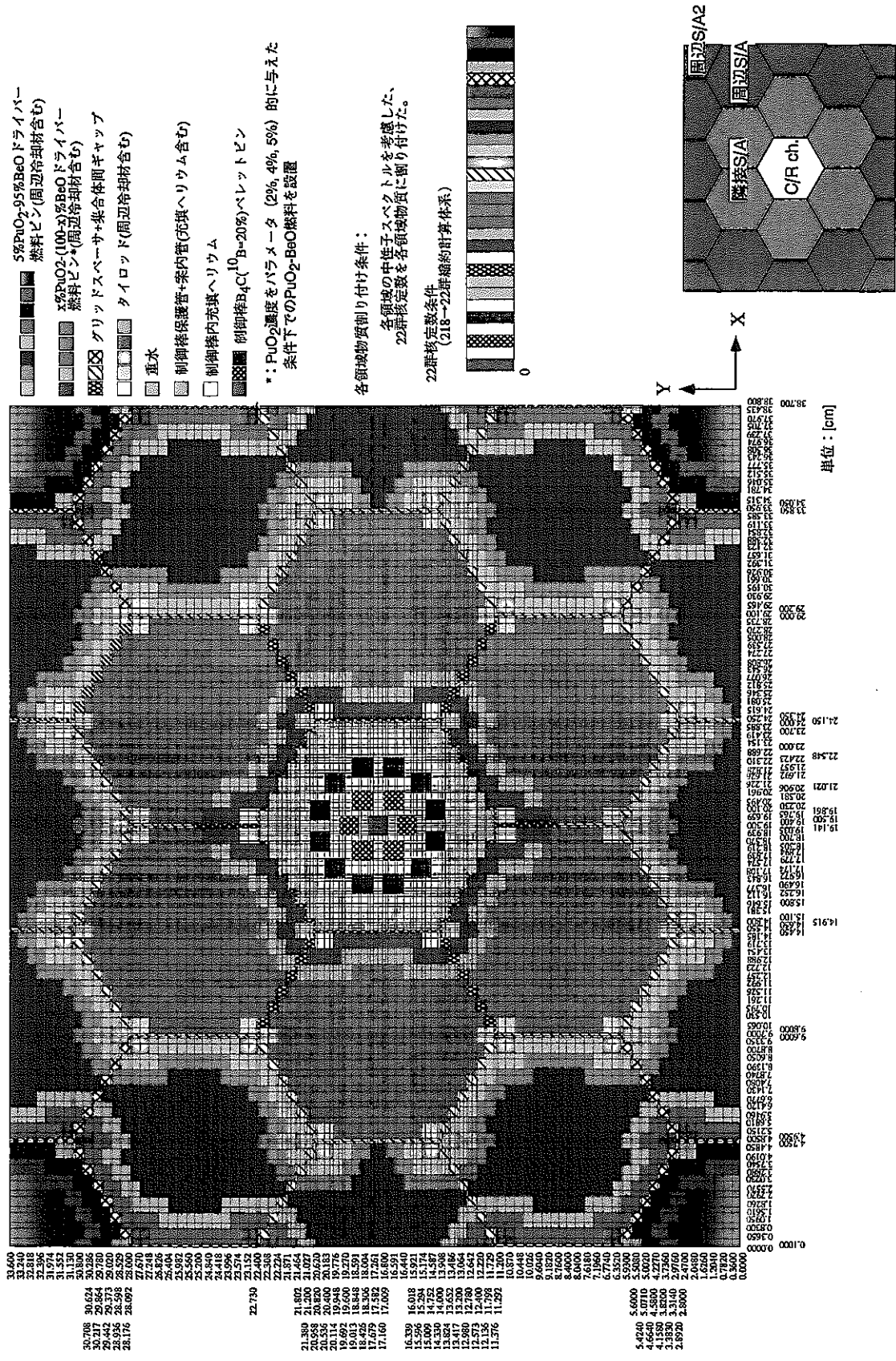


図 3.2-4 制御棒挿入時の2次元XYスーパーセル計算体系及び計算条件

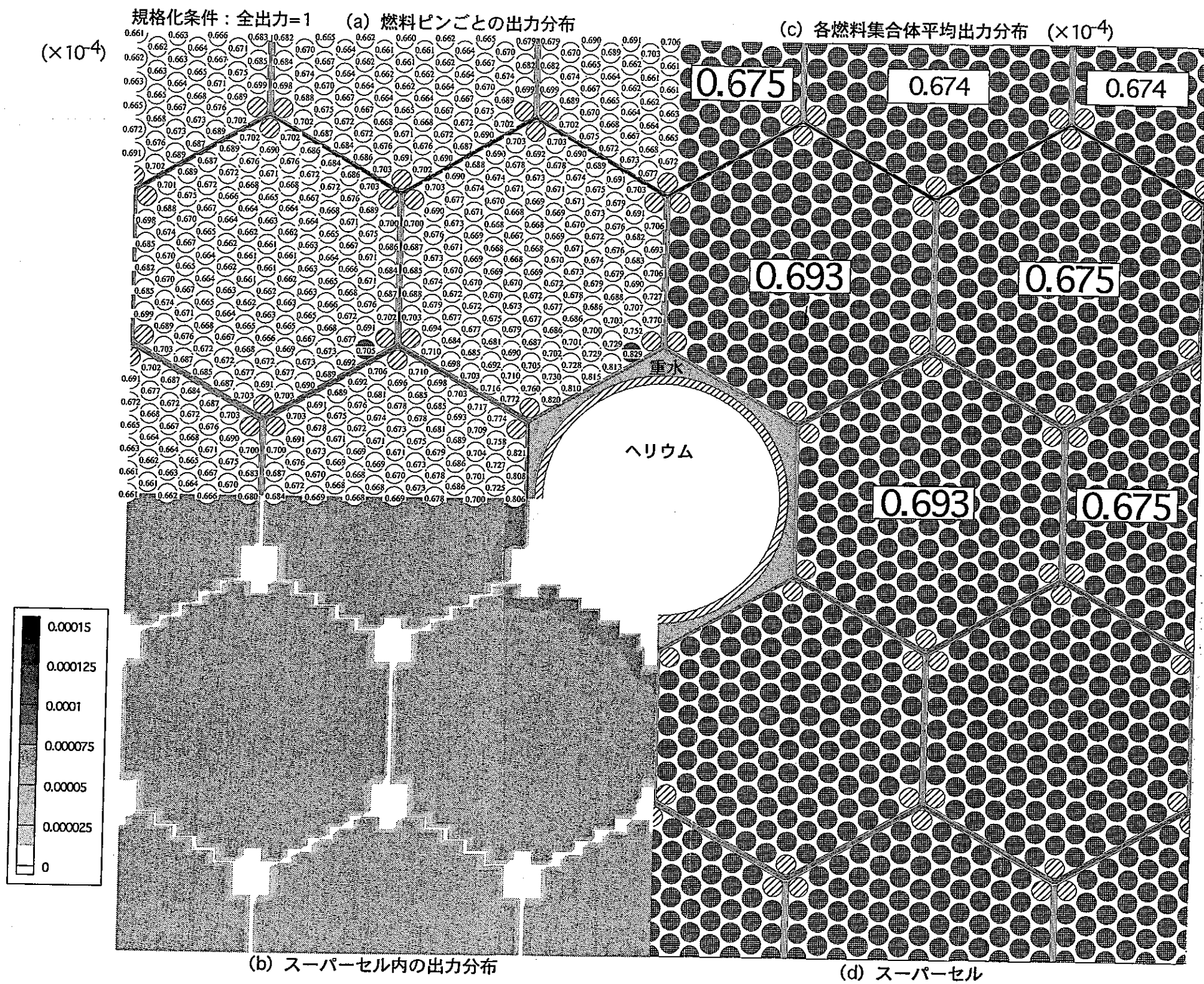


図 3.3-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布

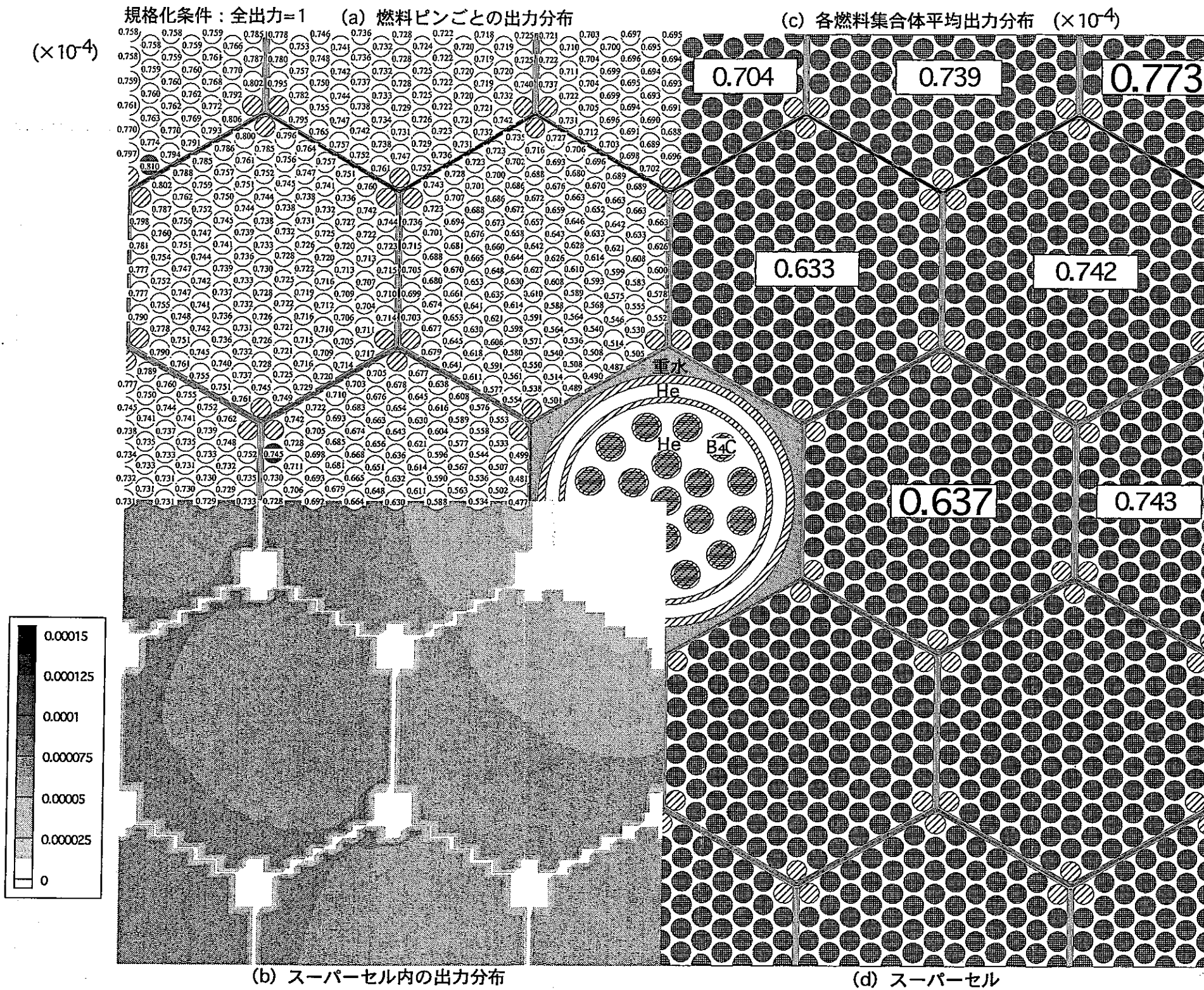


図 3.3-2 制御棒挿入時の相対出力分布

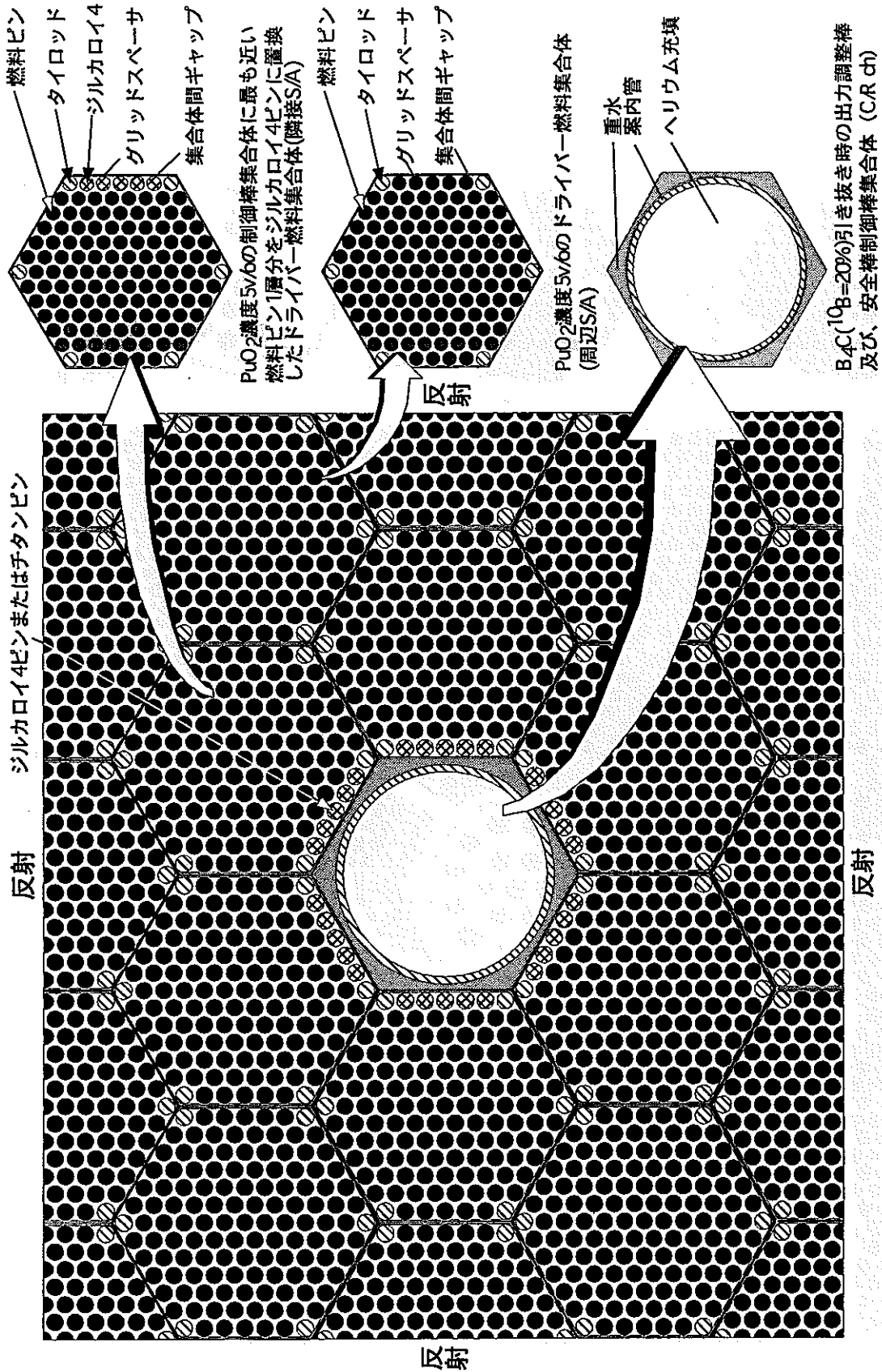


図 4.2.1-1 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
 (ジルカロイ4ピン置換方策、チタンピン置換方策)

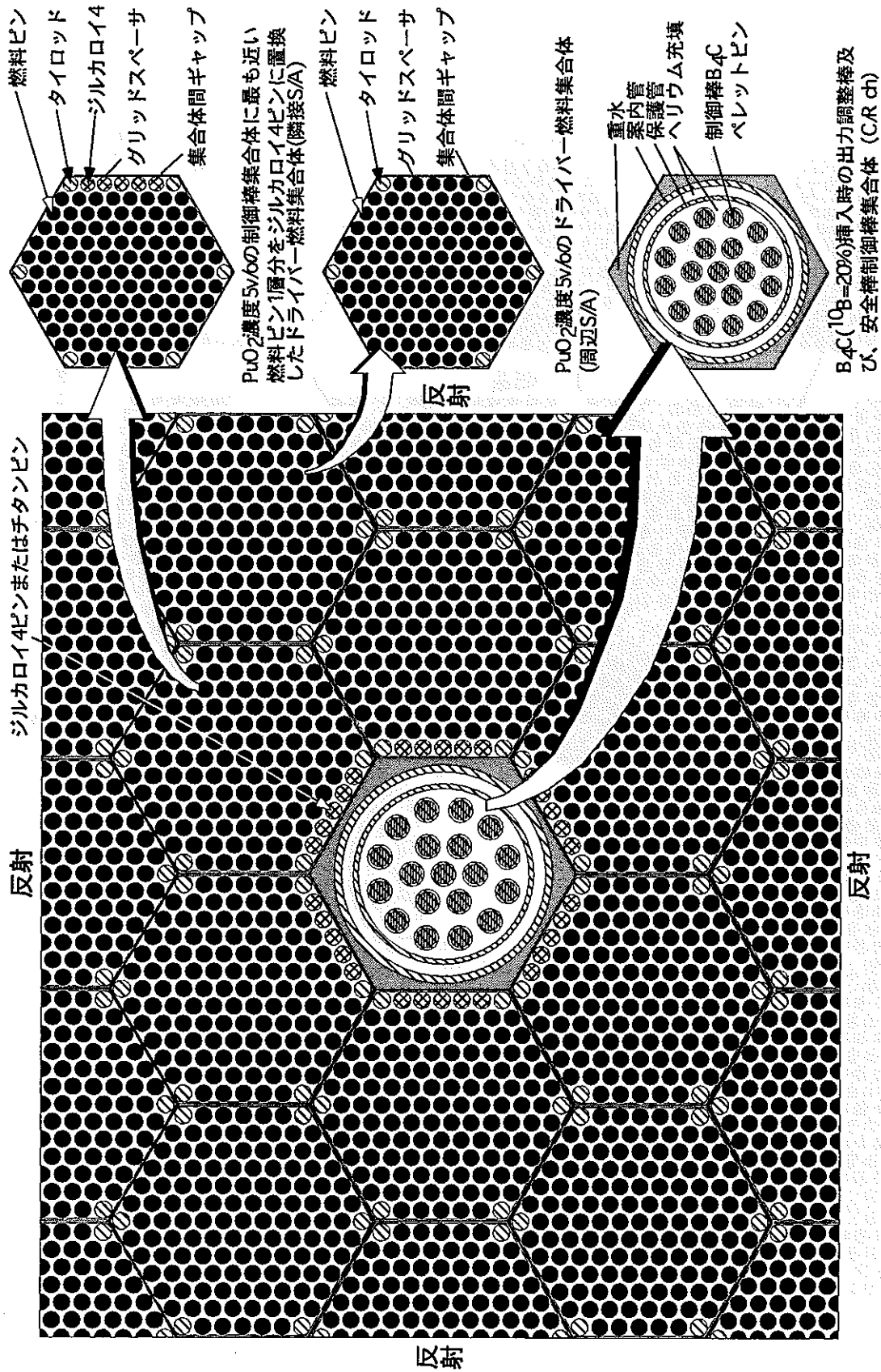


図 4.2.1-2 制御棒挿入時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(ジルカロイ4ピン置換方策、チタンピン置換方策)

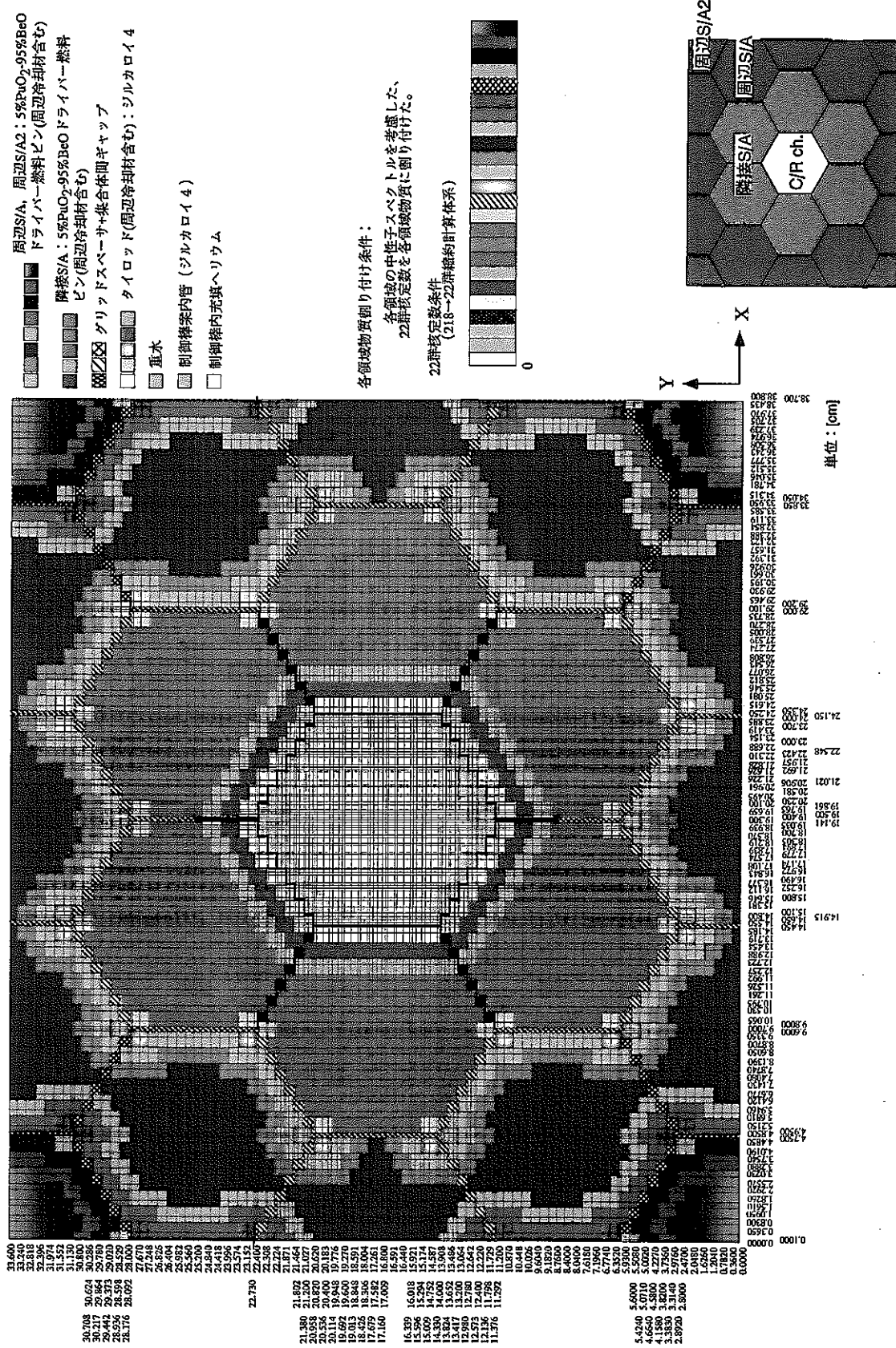


図 4.2.1-3 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (ジルカロイ4ピン置換方策)

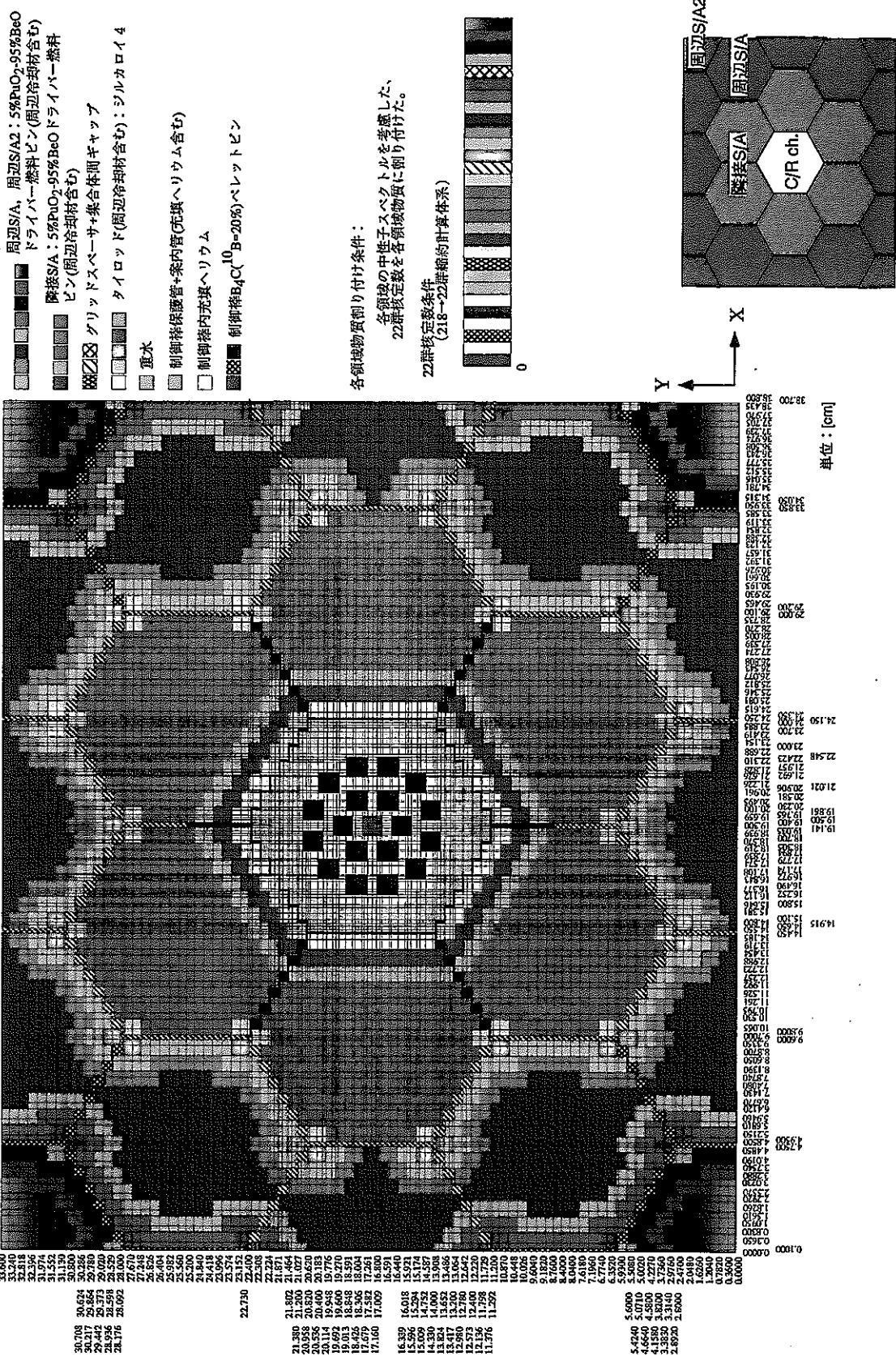


図 4.2.1-4 制御棒挿入時の2次元XY計算体系及び計算条件 (ジルカロイ4ピン置換方策)

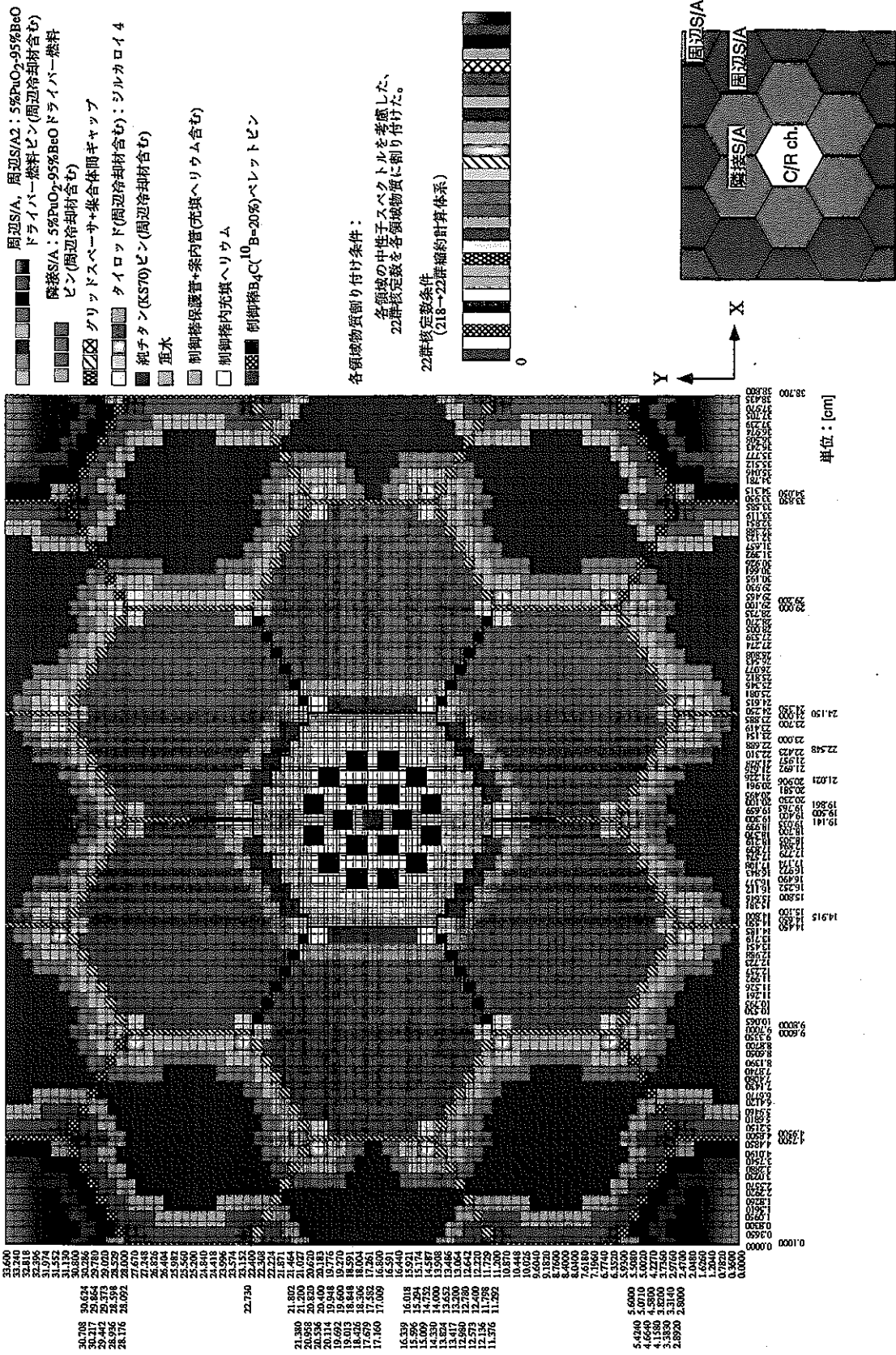


図 4.2.1-6 制御棒挿入時の2次元XY計算体系及び計算条件 (チタンピン置換方案)

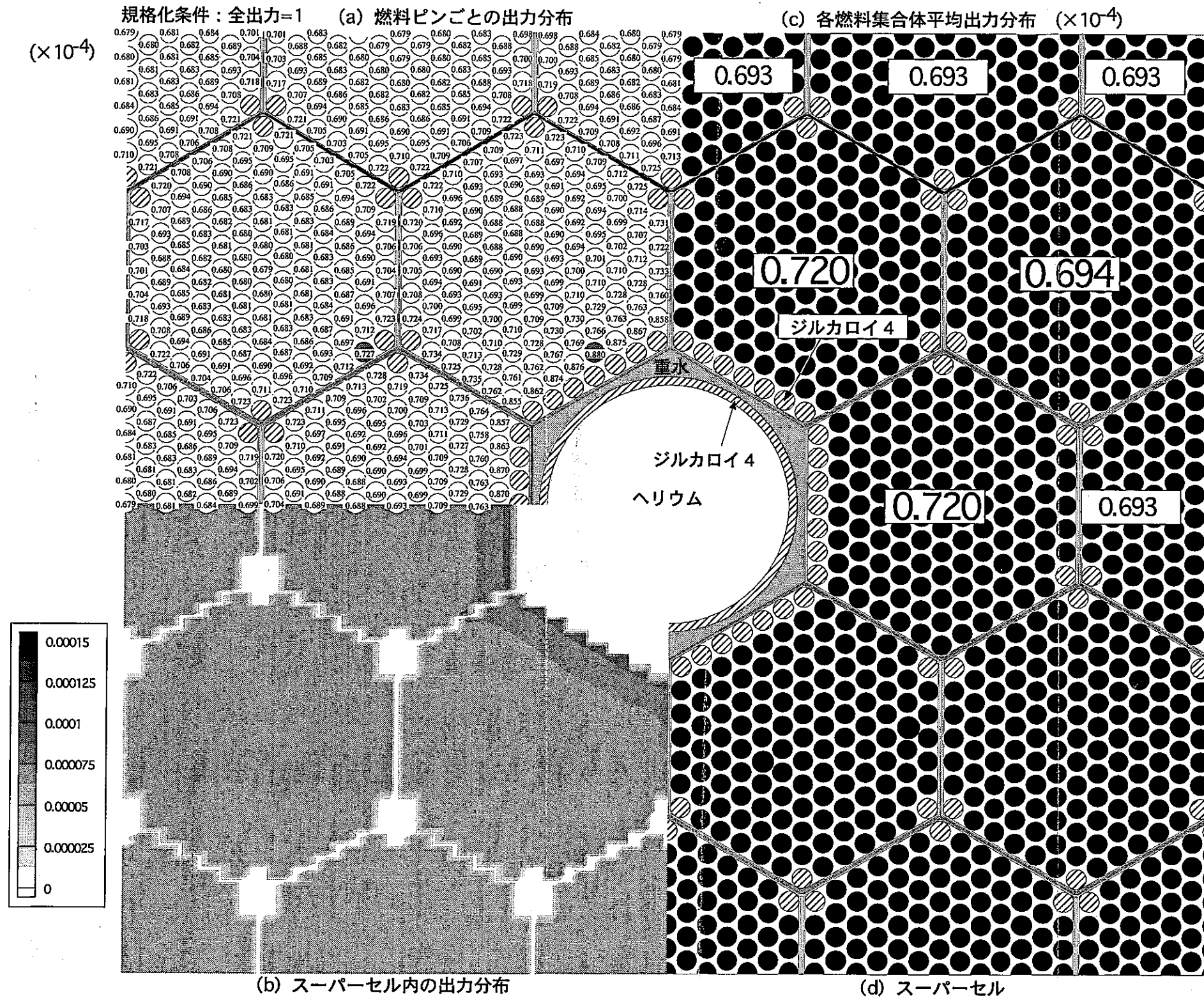


図4.2.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (ジルカロイ4ピン置換方策)

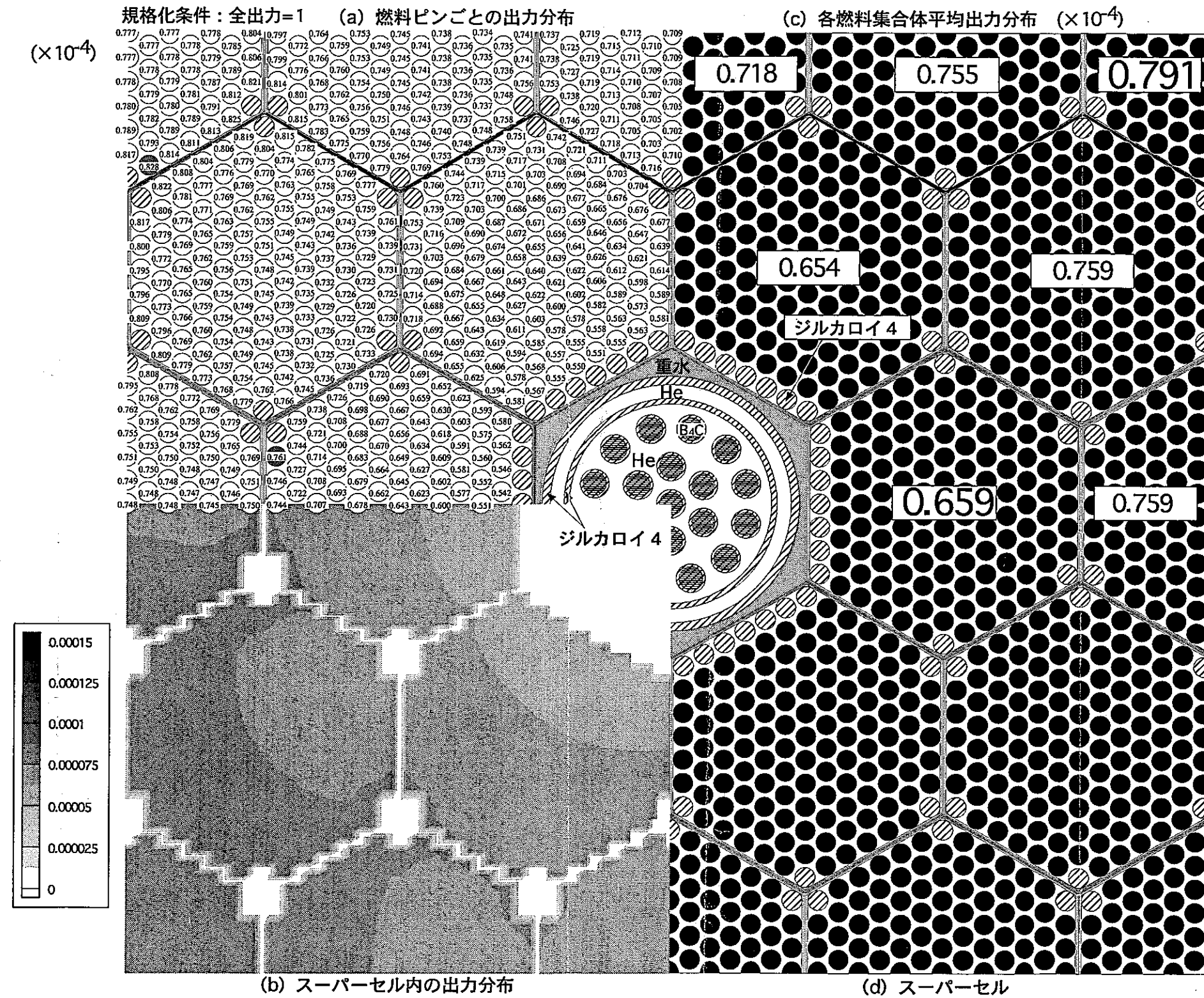


図 4.2.2-2 制御棒挿入時の相対出力分布 (ジルカロイ4ピン置換方策)

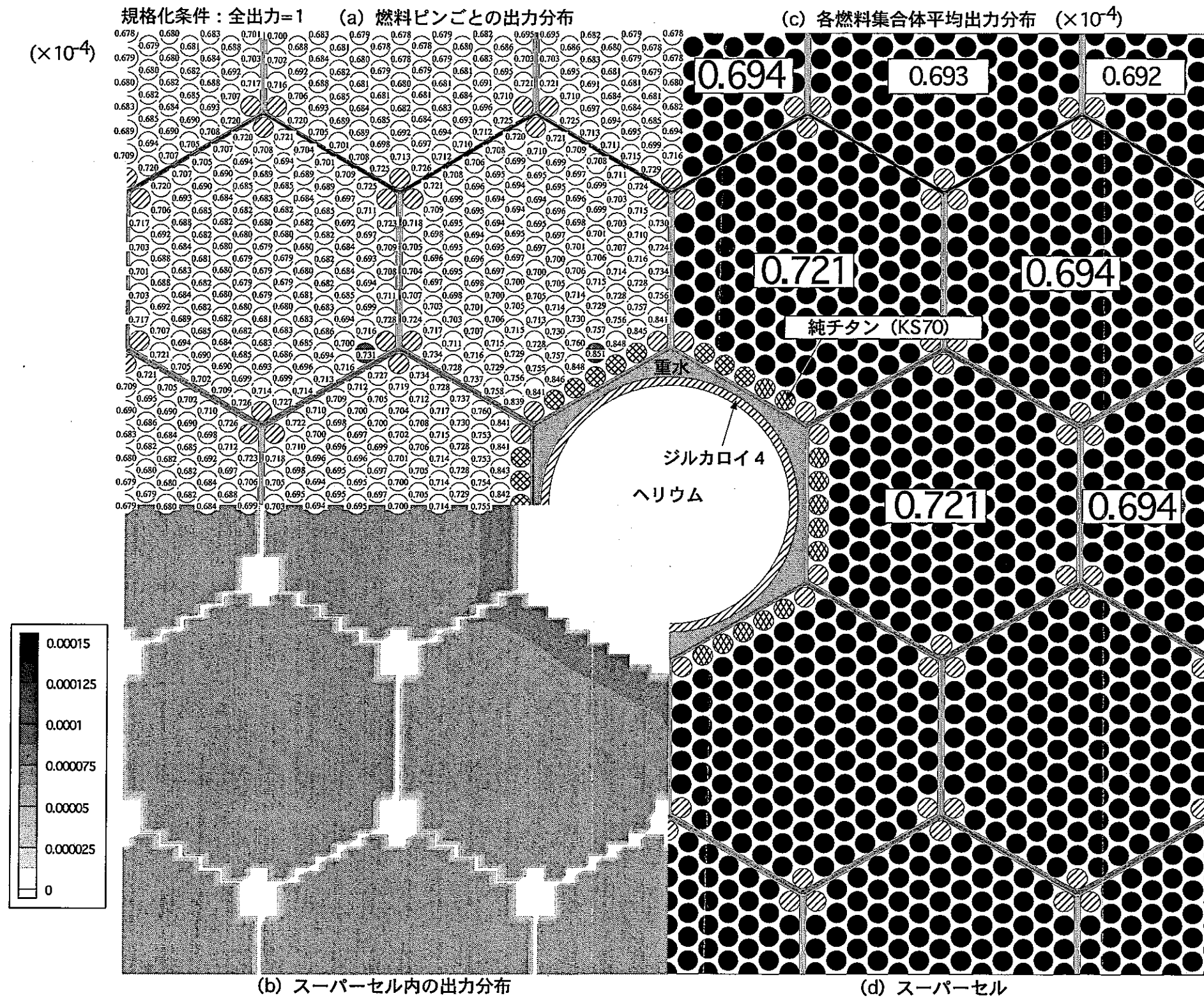


図 4.2.2-3 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (チタンピン置換方策)

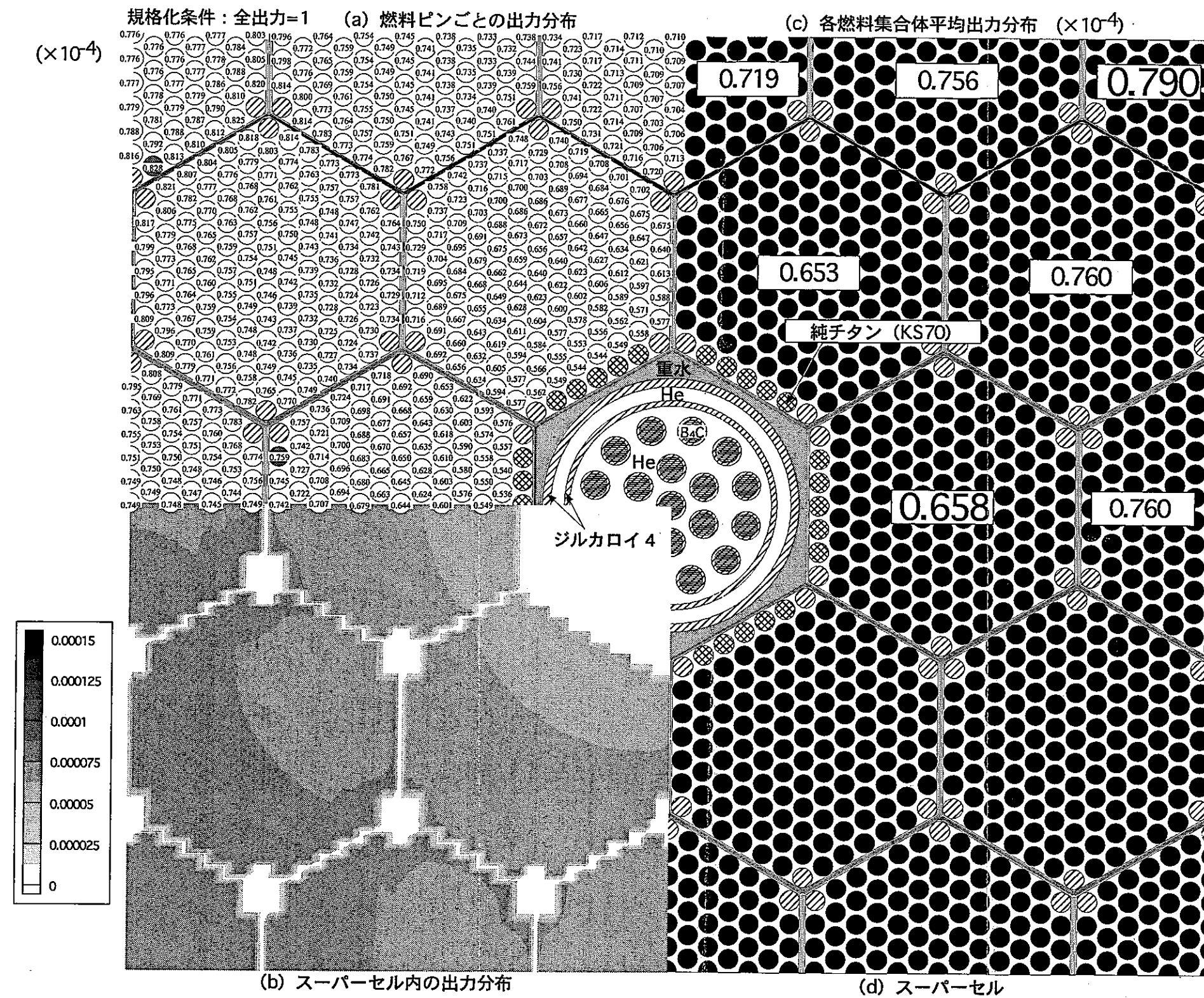


図 4.2.2-4 制御棒挿入時の相対出力分布 (チタンピン置換方策)

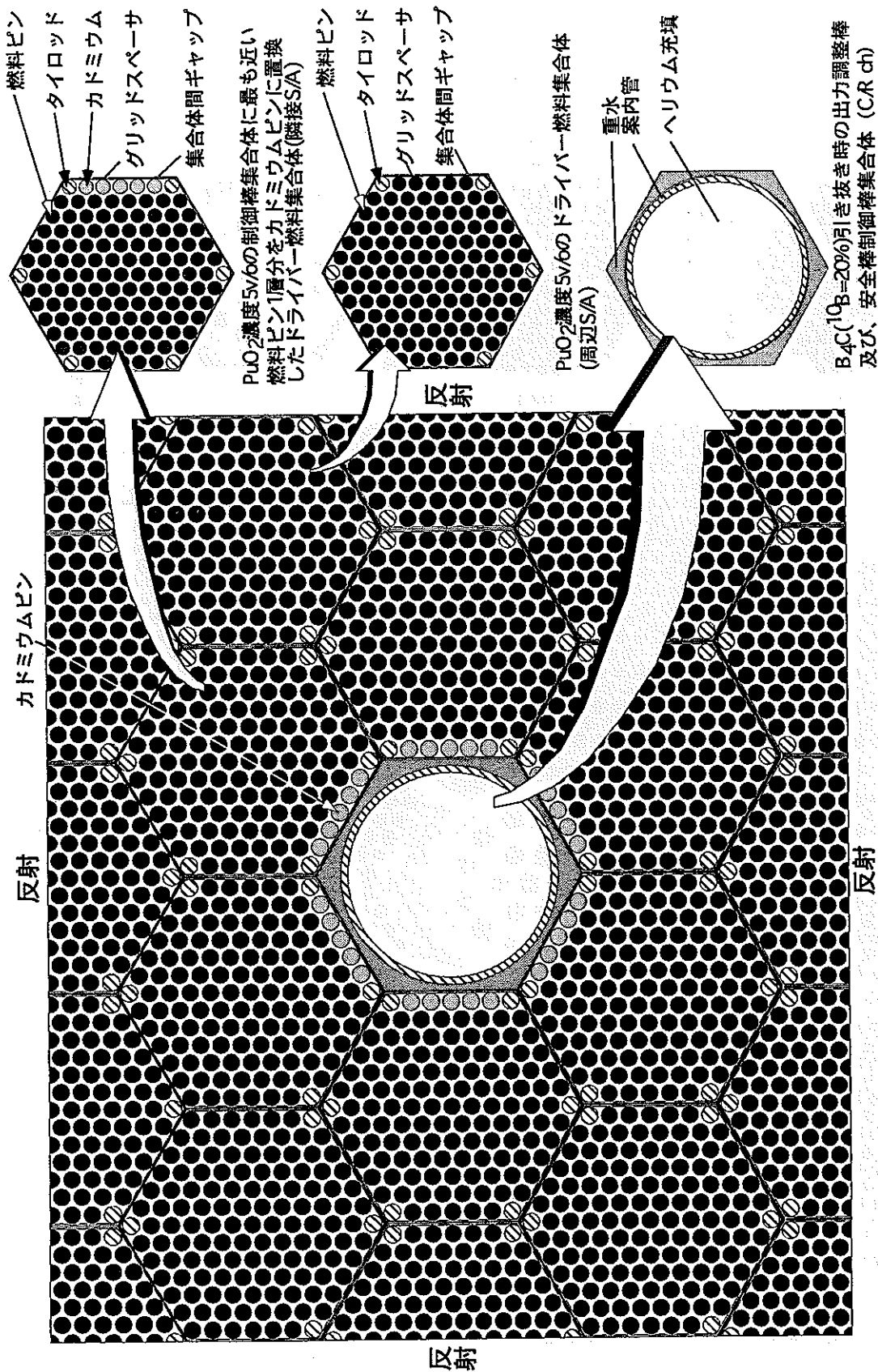
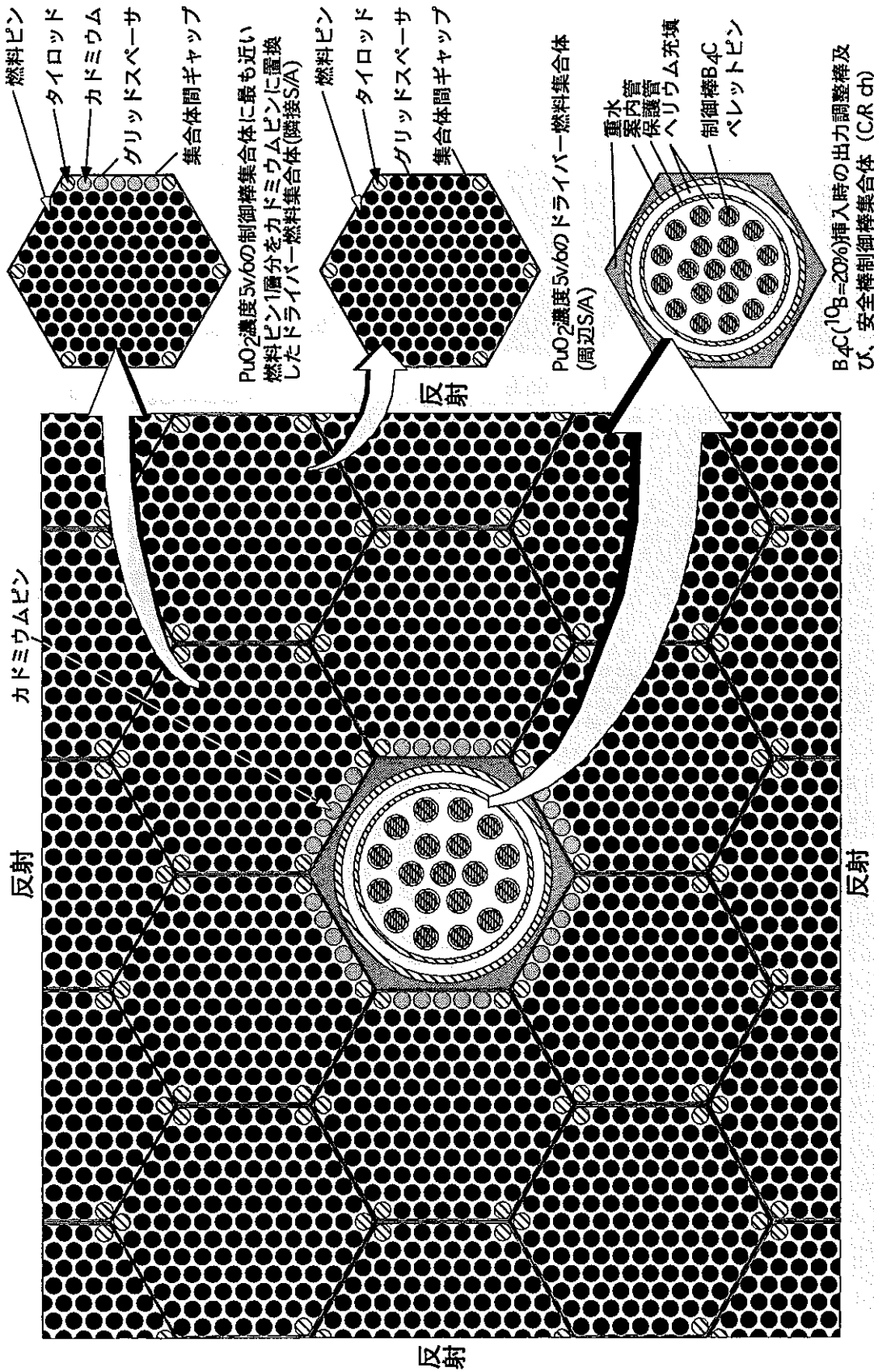


図 4.3.1-1 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(カドミウムピン置換方策)



B₄C(¹⁰B=20%)挿入時の出力調整棒及び、安全棒制御棒集合体 (C/R ch)

図 4.3.1-2 制御棒挿入時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(カドミウムピン置換方策)

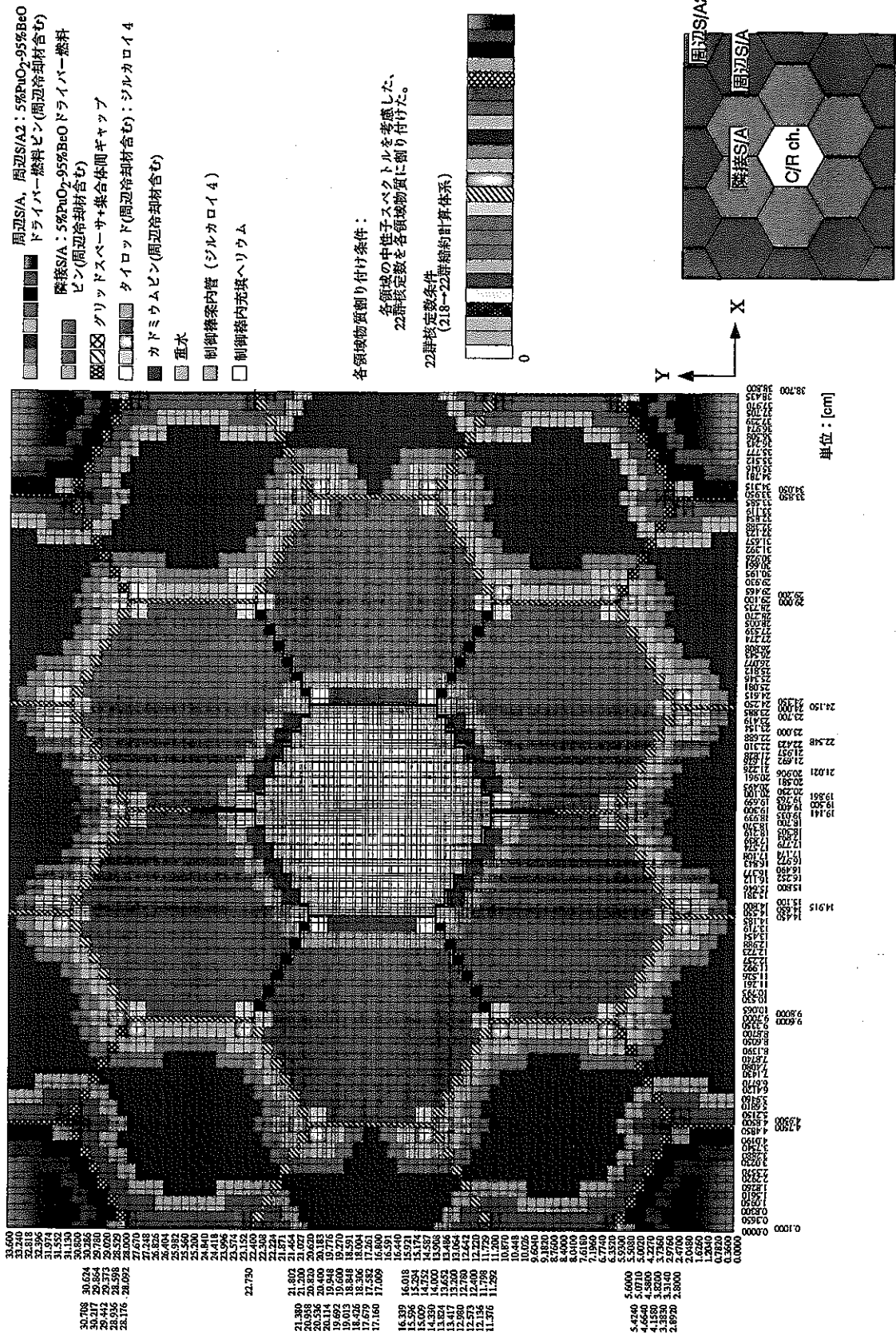


図 4.3.1-3 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (カドミウムビン置換方策)

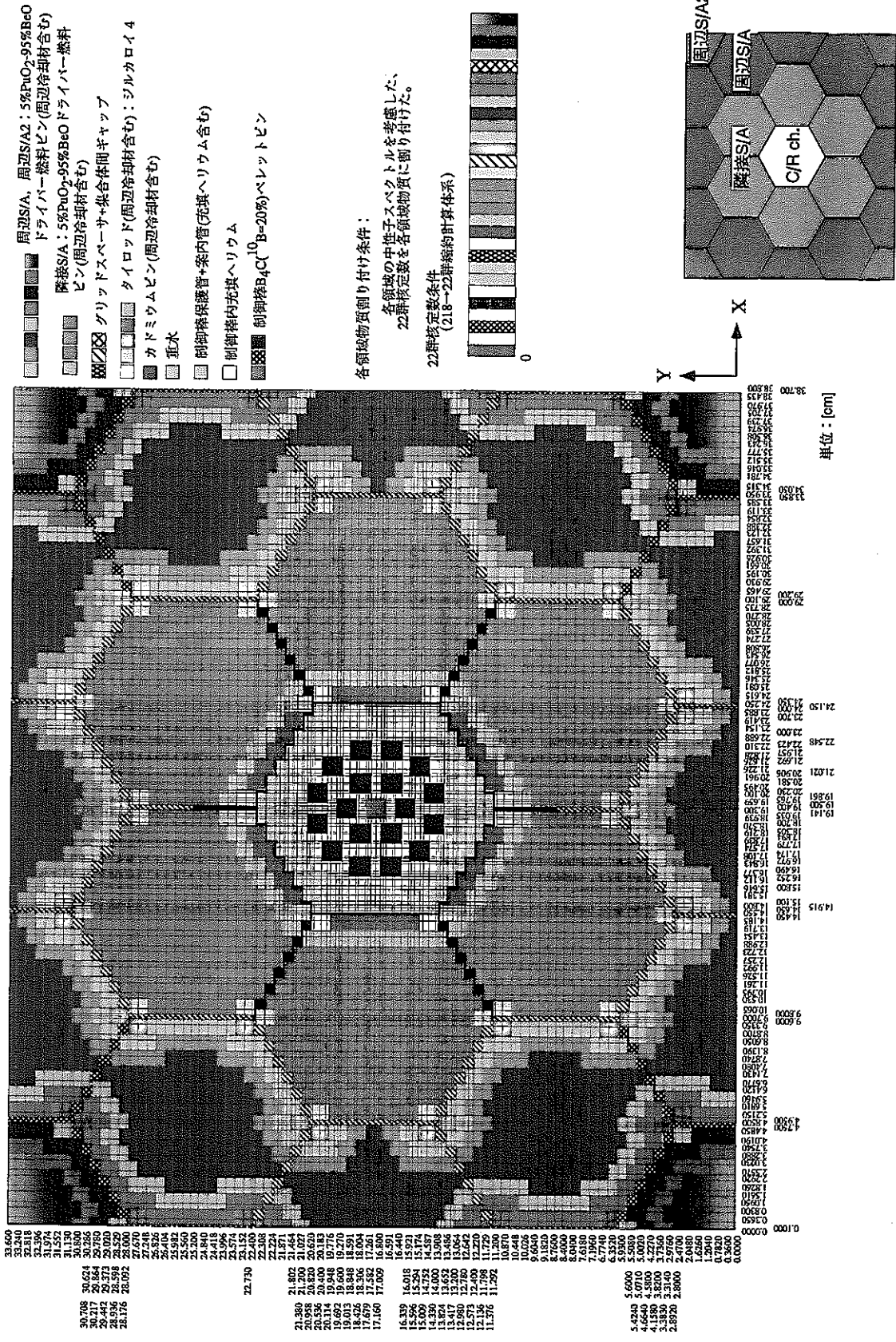


図 4.3.1-4 制御棒挿入時の2次元XY計算体系及び計算条件 (カドミウムピン置換方案)

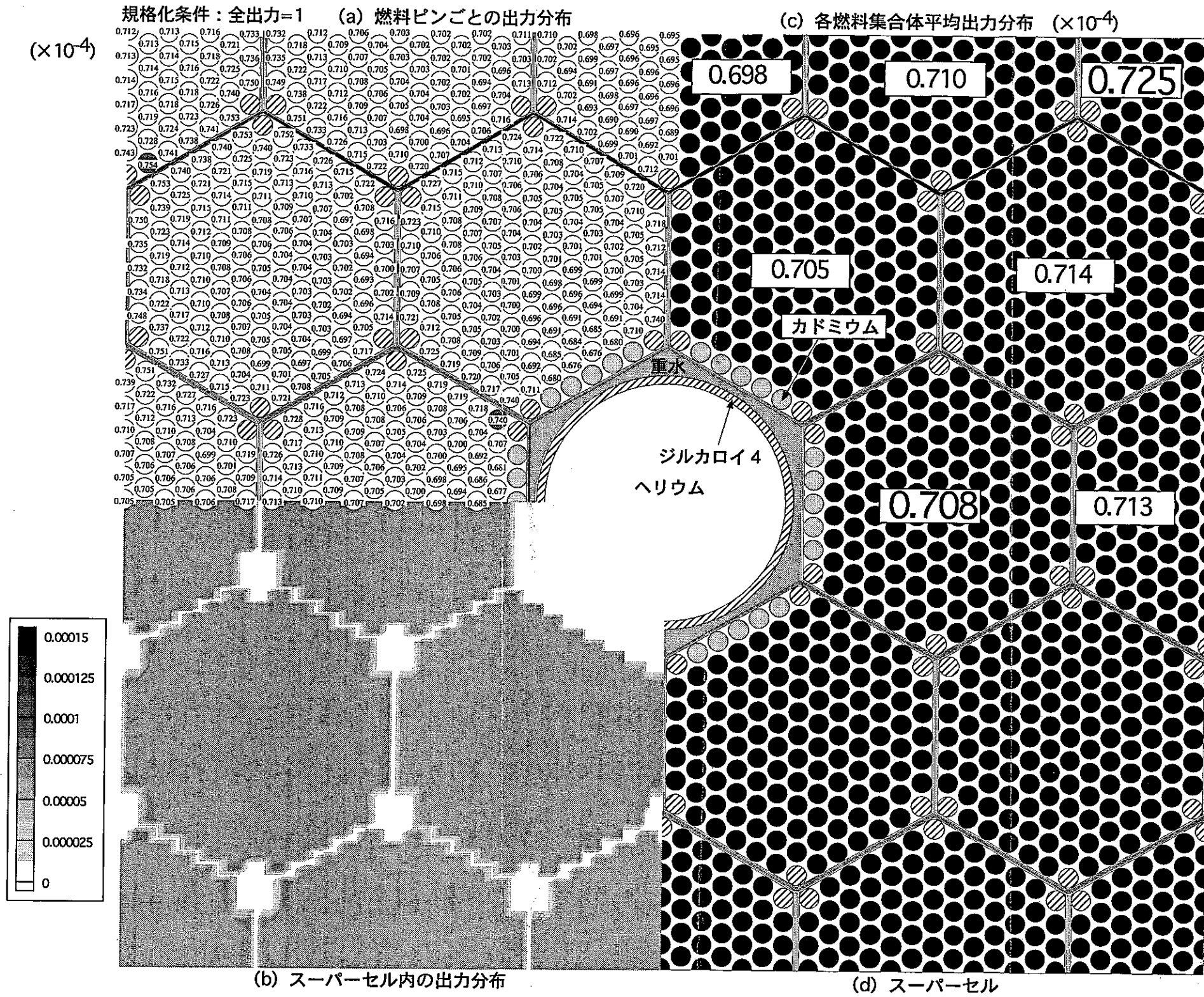


図4.3.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (カドミウムピン置換方策)

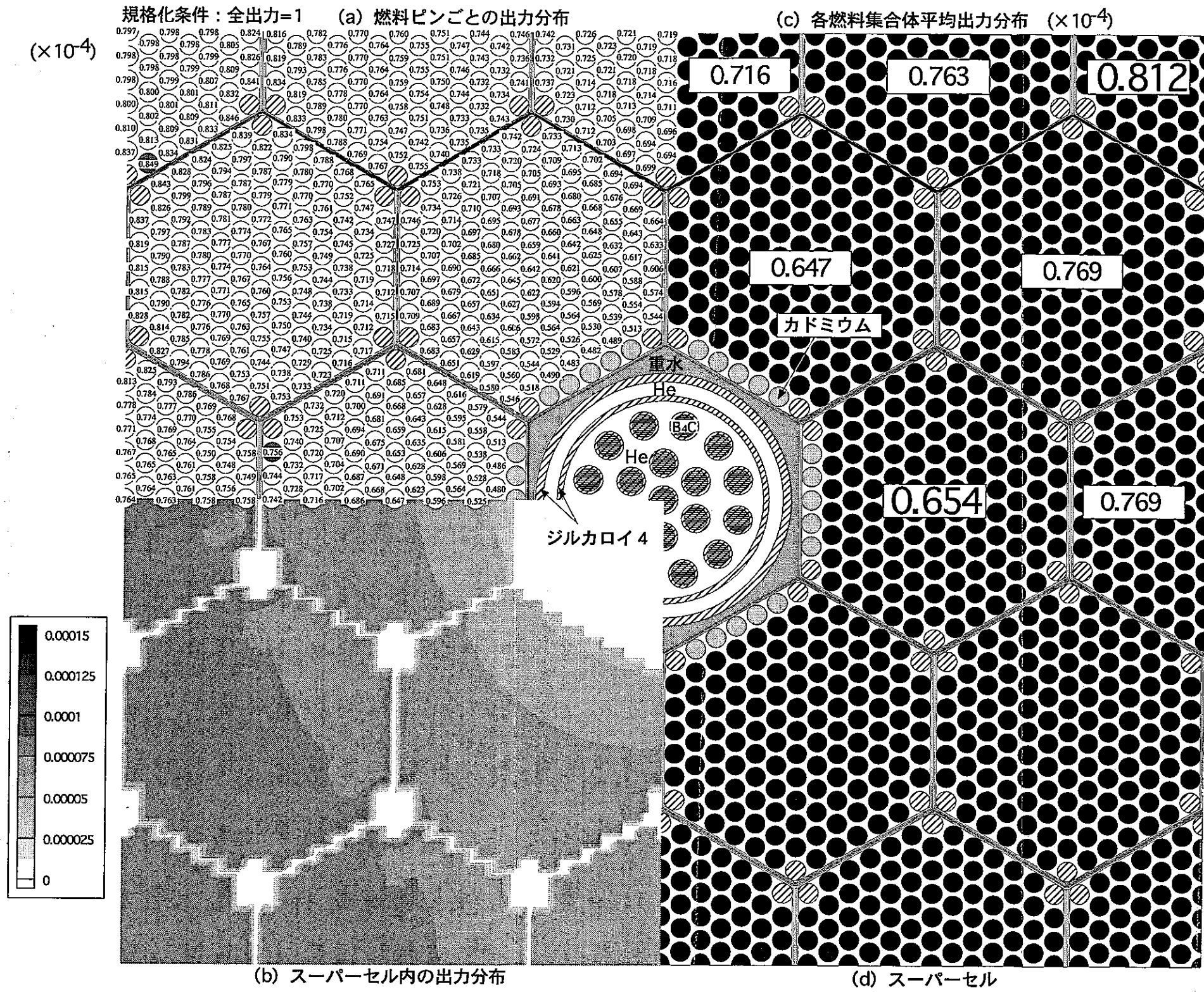


図4.3.2-2 制御棒挿入時の相対出力分布 (カドミウムピン置換方策)

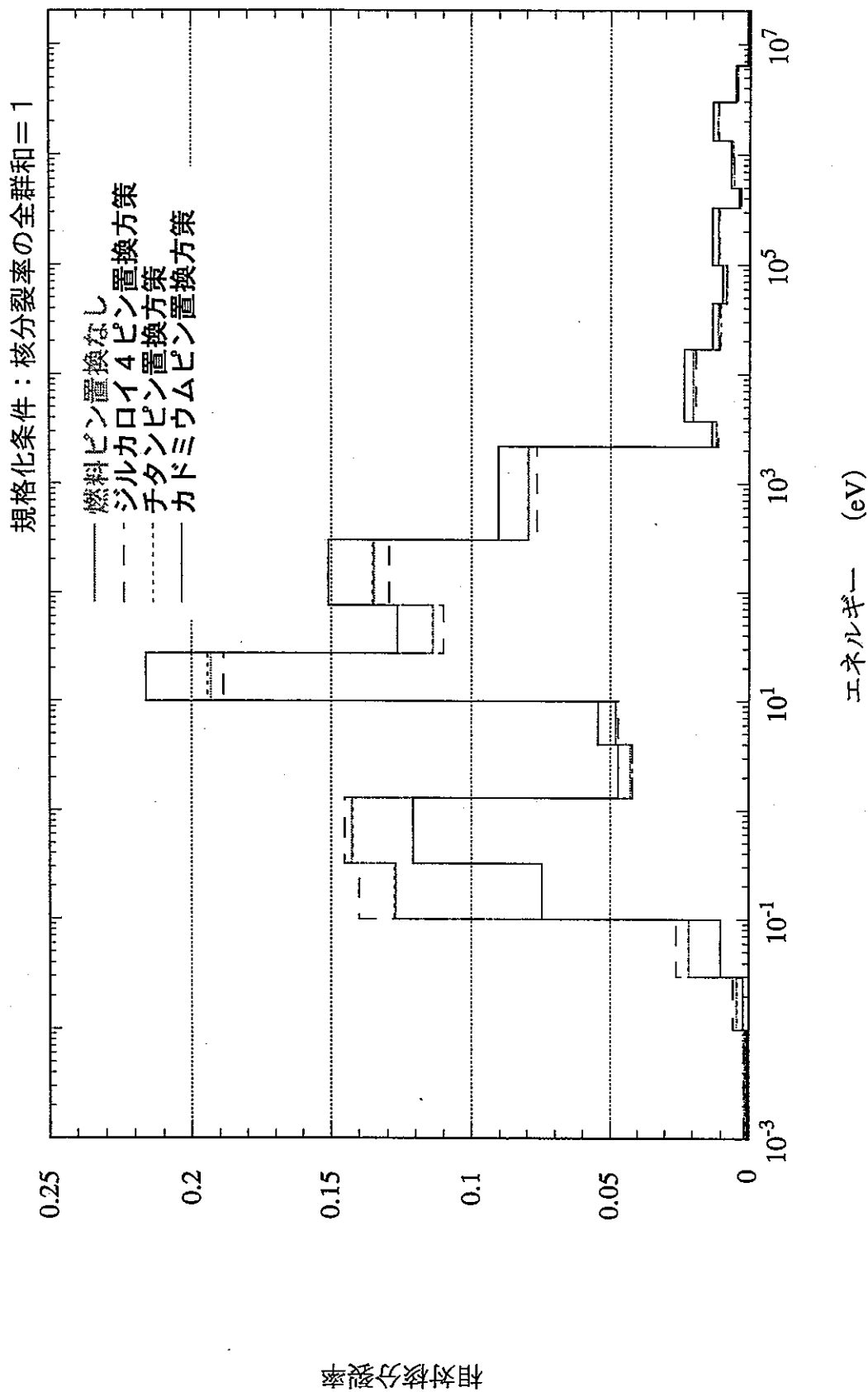


図4.3.2-3 種々の置換方策における最大局所出力ピク (図4.3.2-1の0.740と記されたハッチングの部分) 位置での核分裂率エネルギー分布の比較

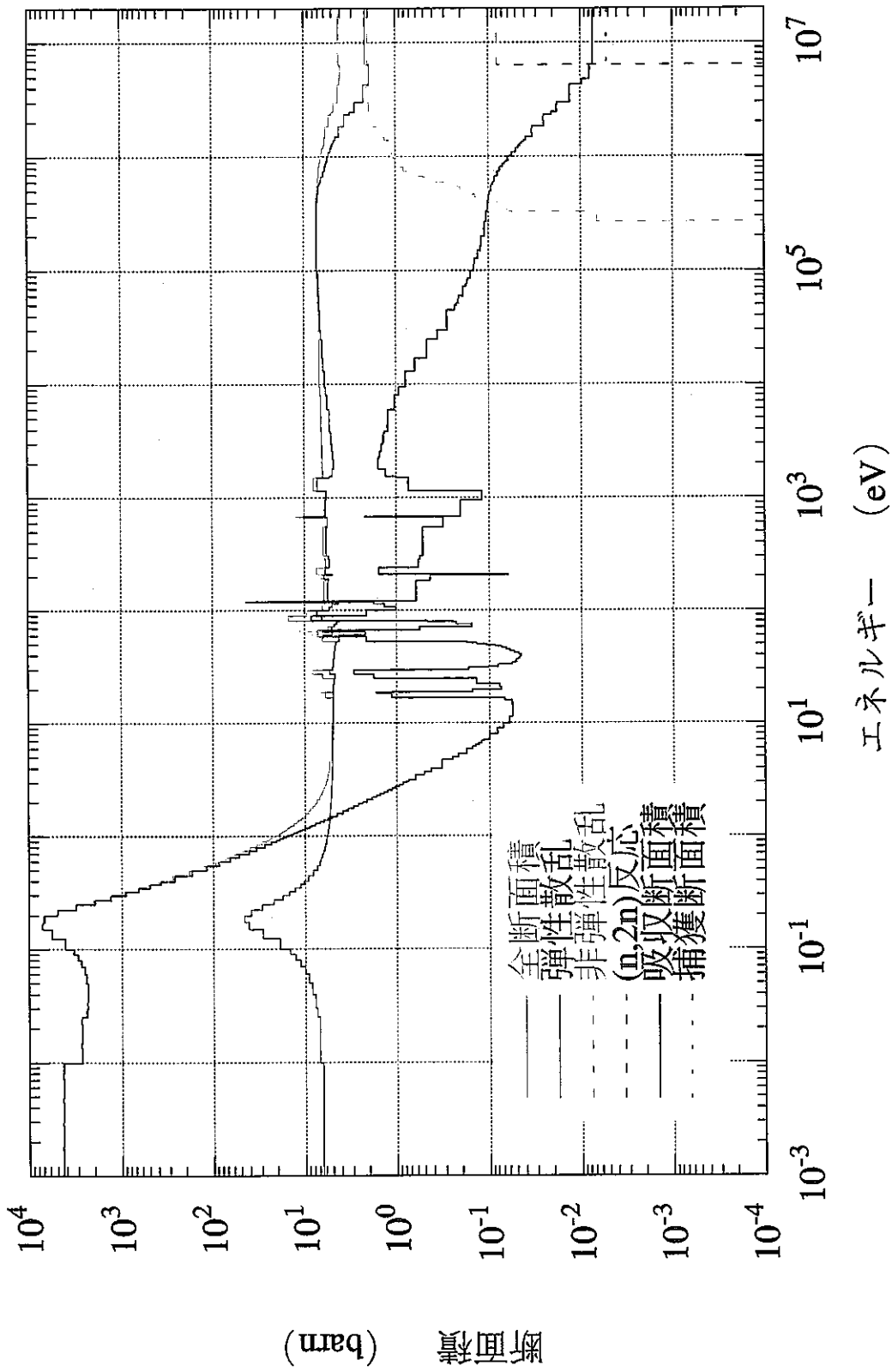


図4.3.2-4 カドミウムの無限希釈断面積

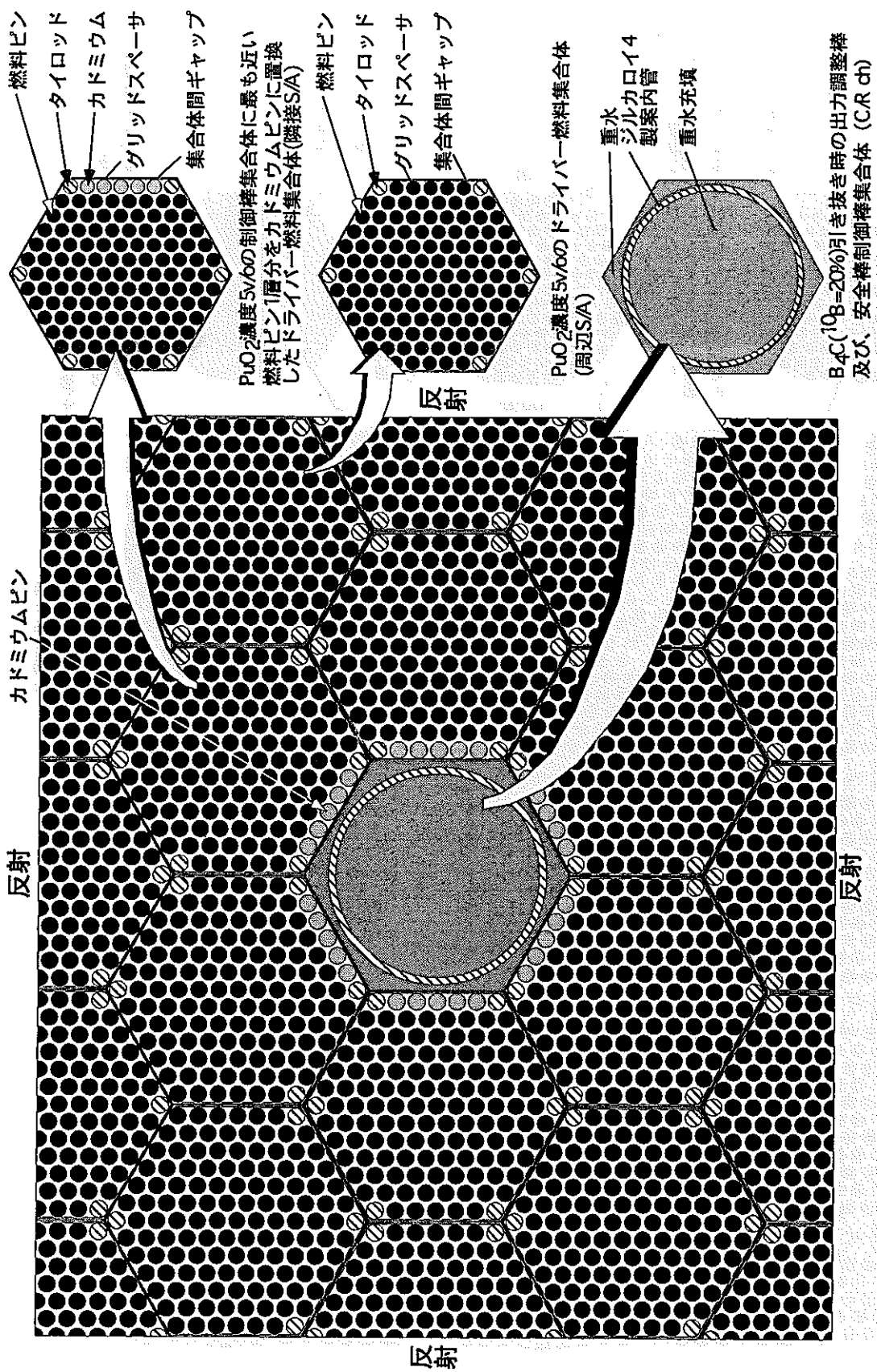


図 5.2.1-1 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(除熱型カドミウムピン置換方策)

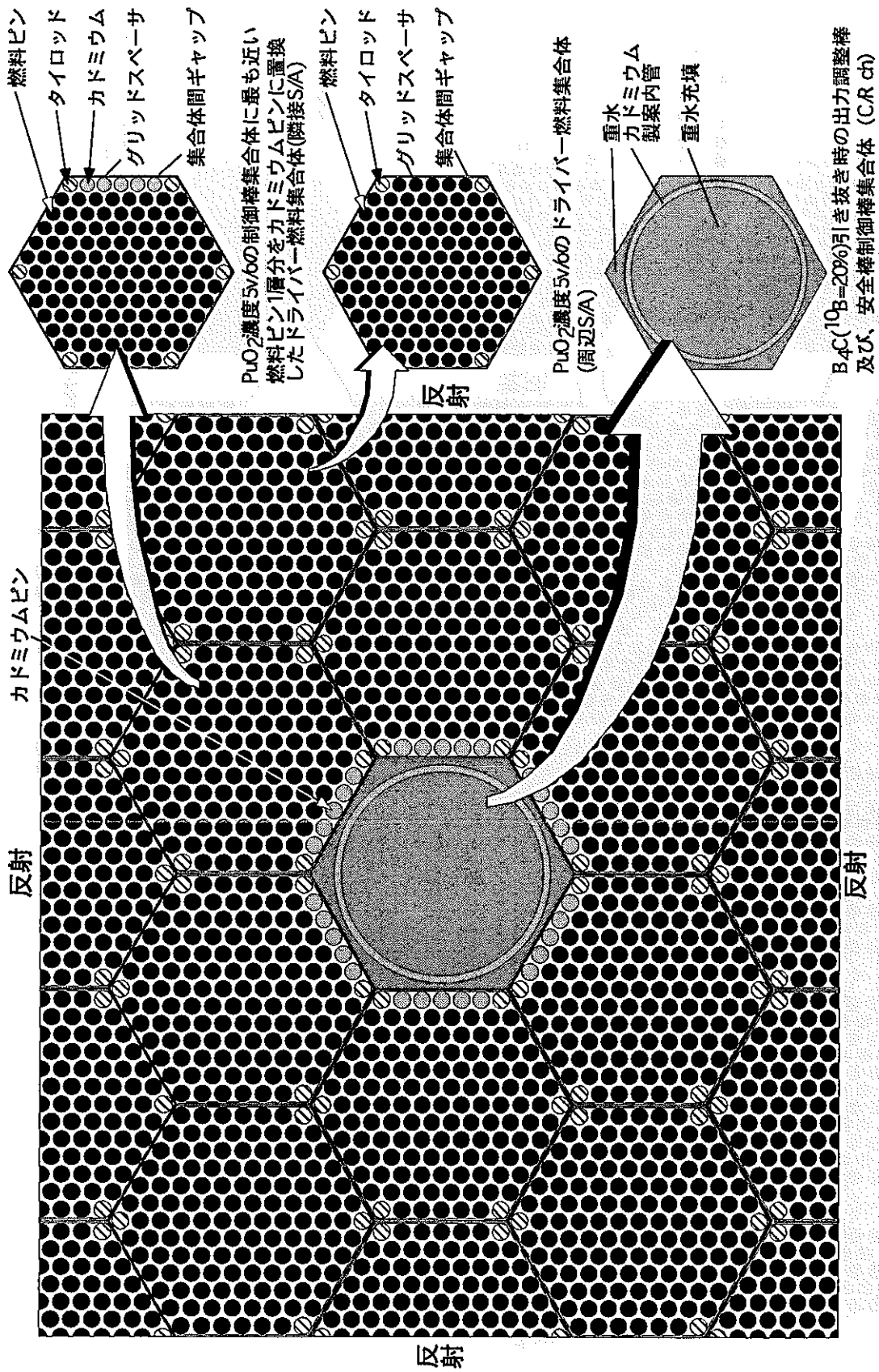


図 5.2.1.1-2 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(カドミウム案内管方策)

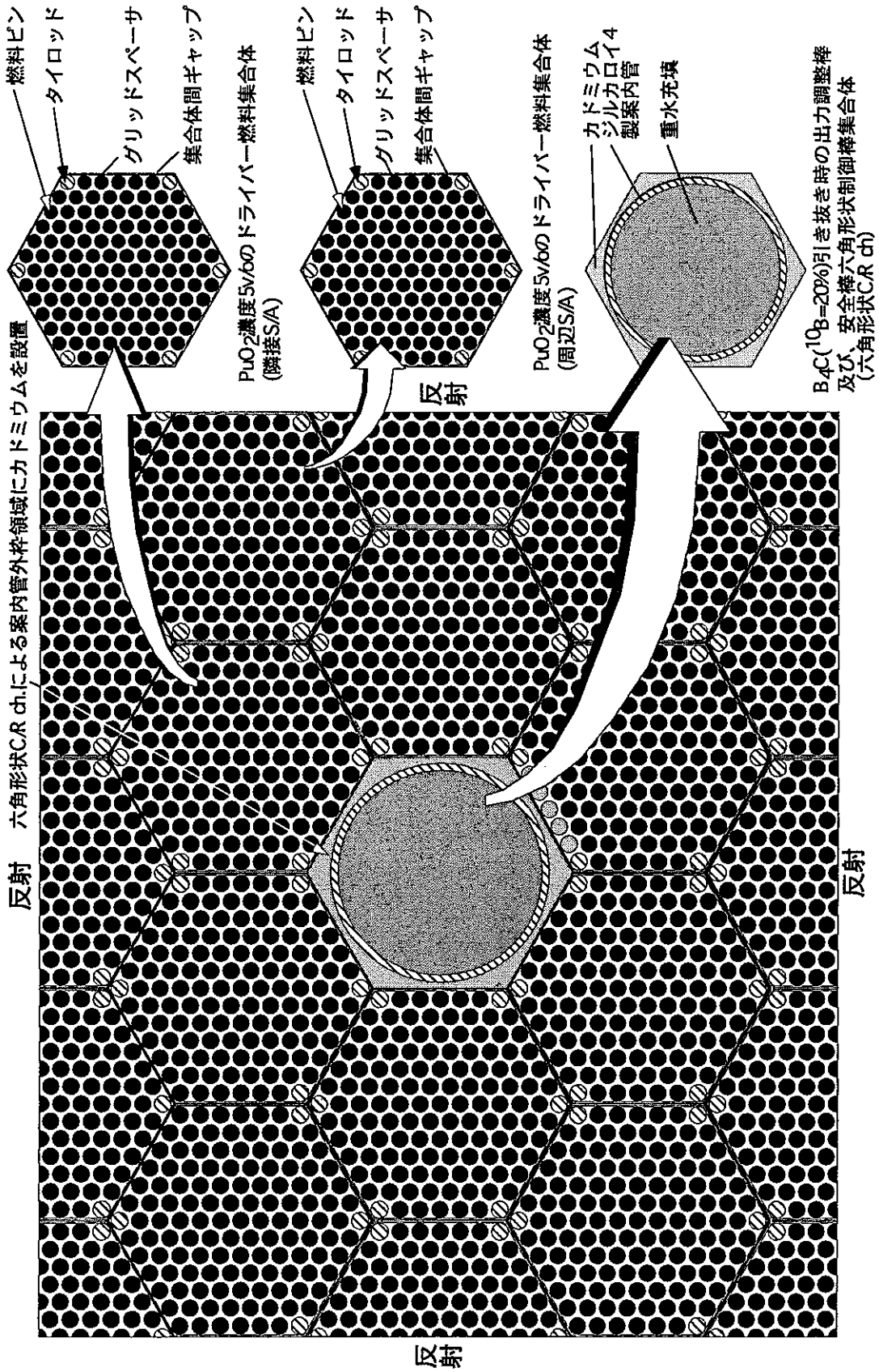


図 5.2.1-3 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(六角形状C/R ch.方策)

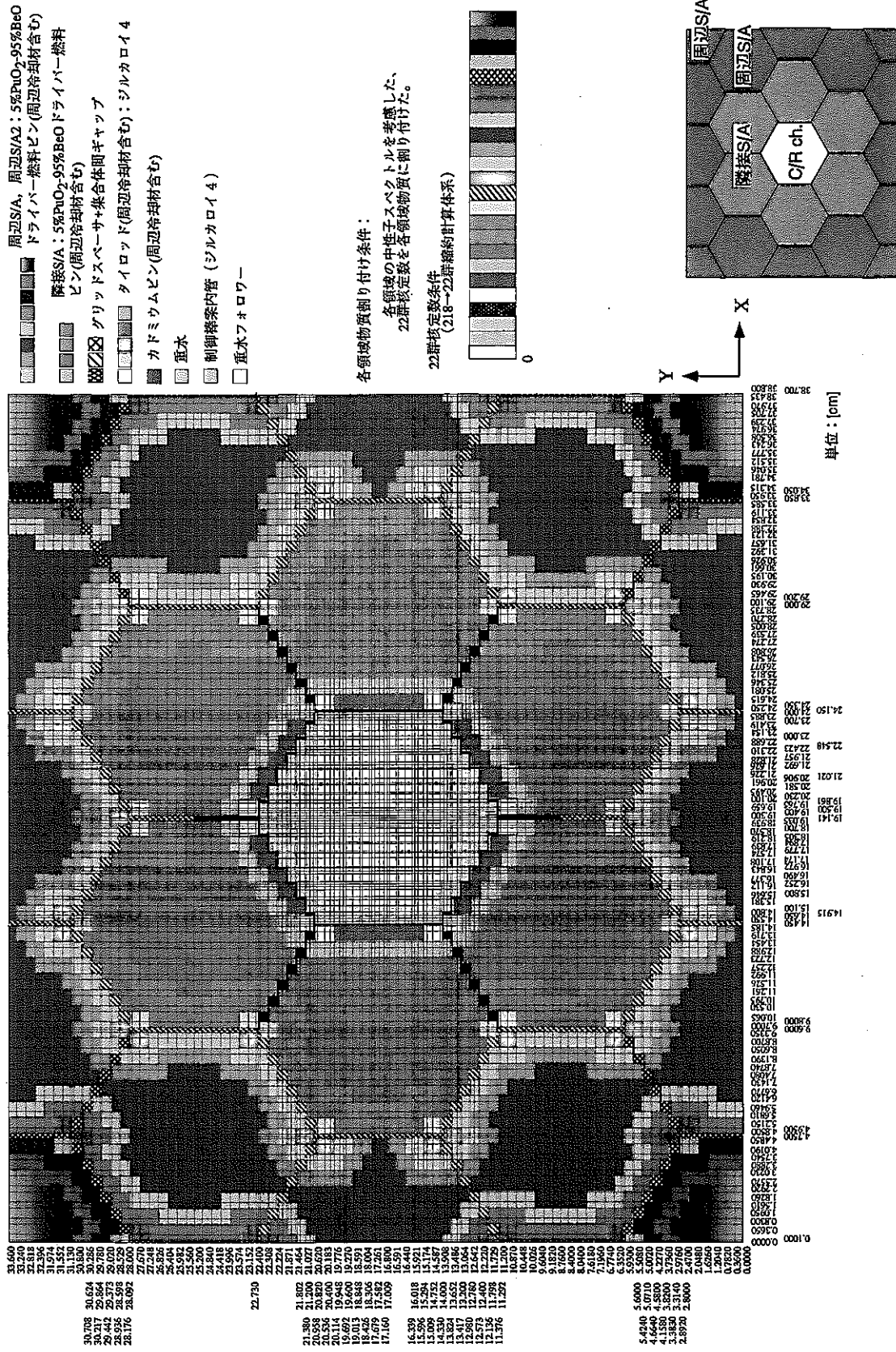


図5.2.1-4 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (除熱型カドミウムピン置換方策)

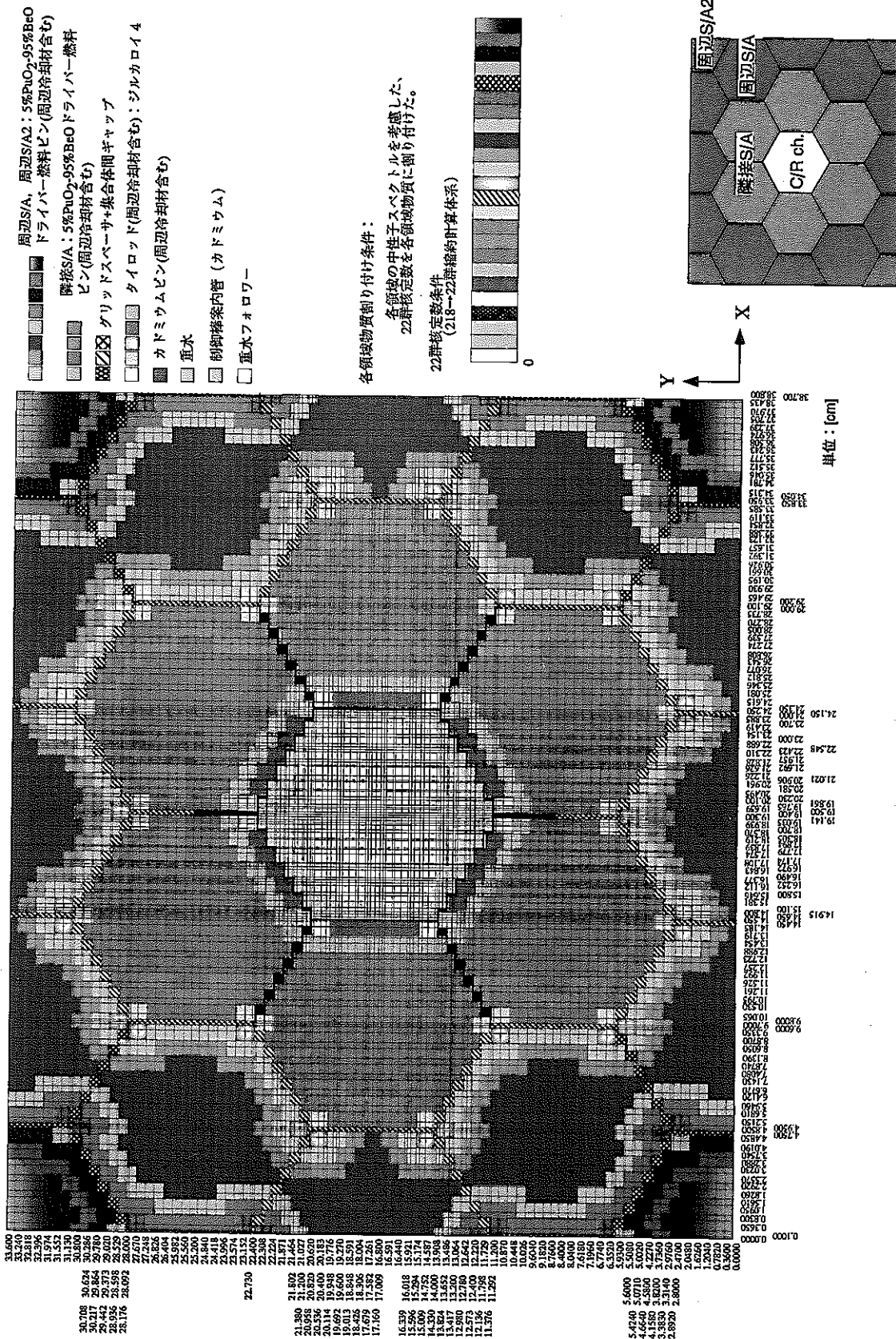


図 5.2.1-5 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (カドミウム案内管方策)

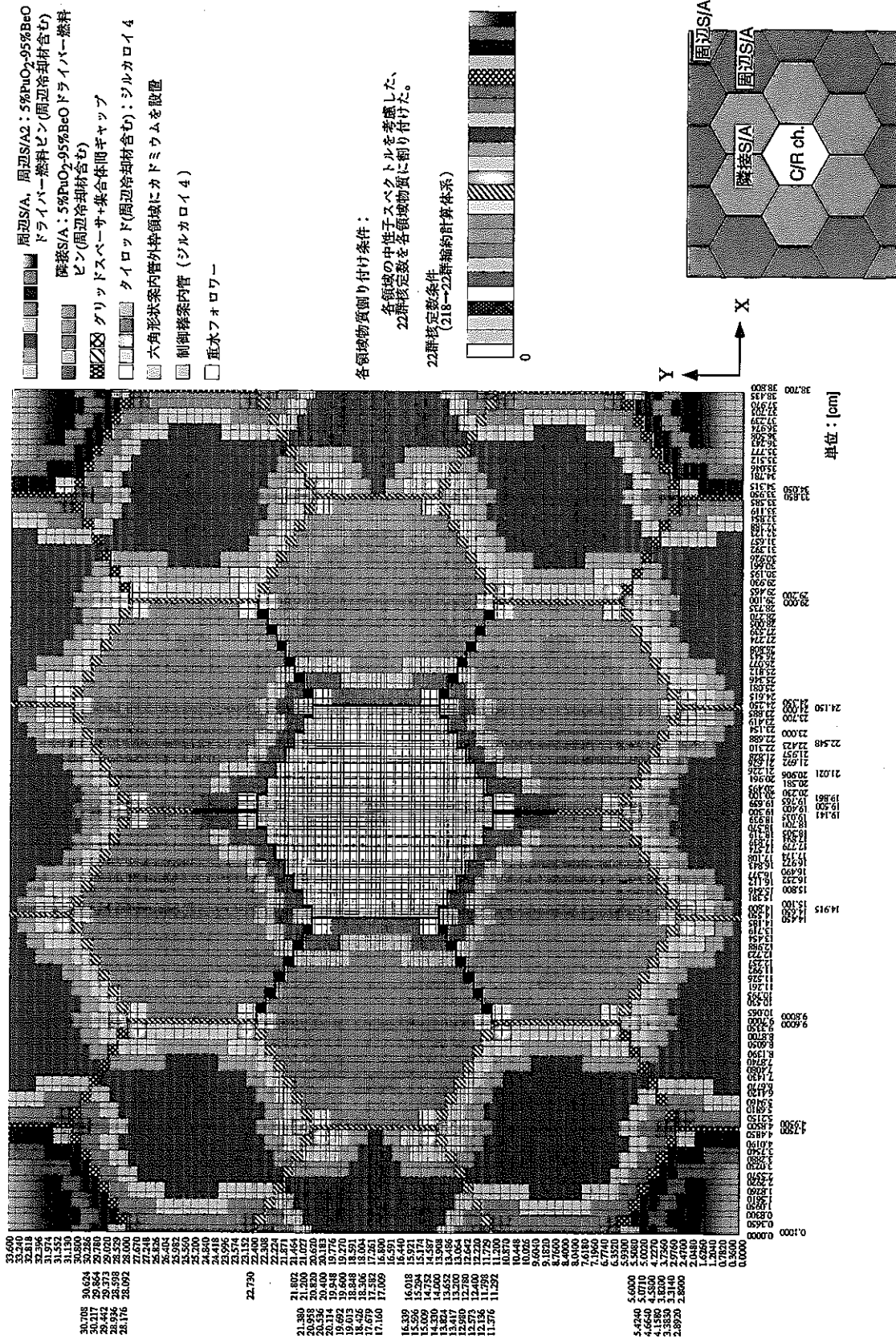


図 5.2.1-6 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (六角形状C/R ch.方策)

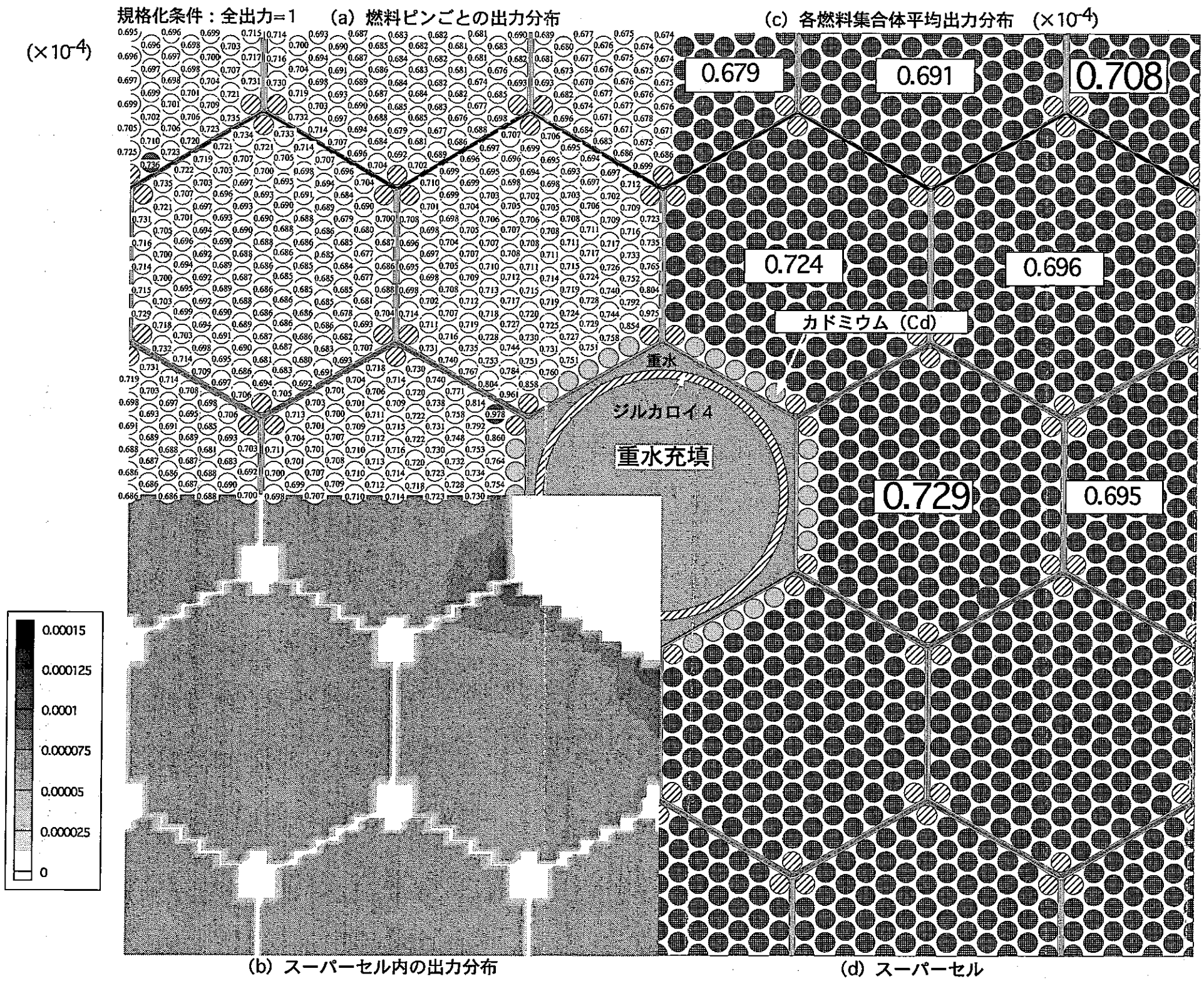
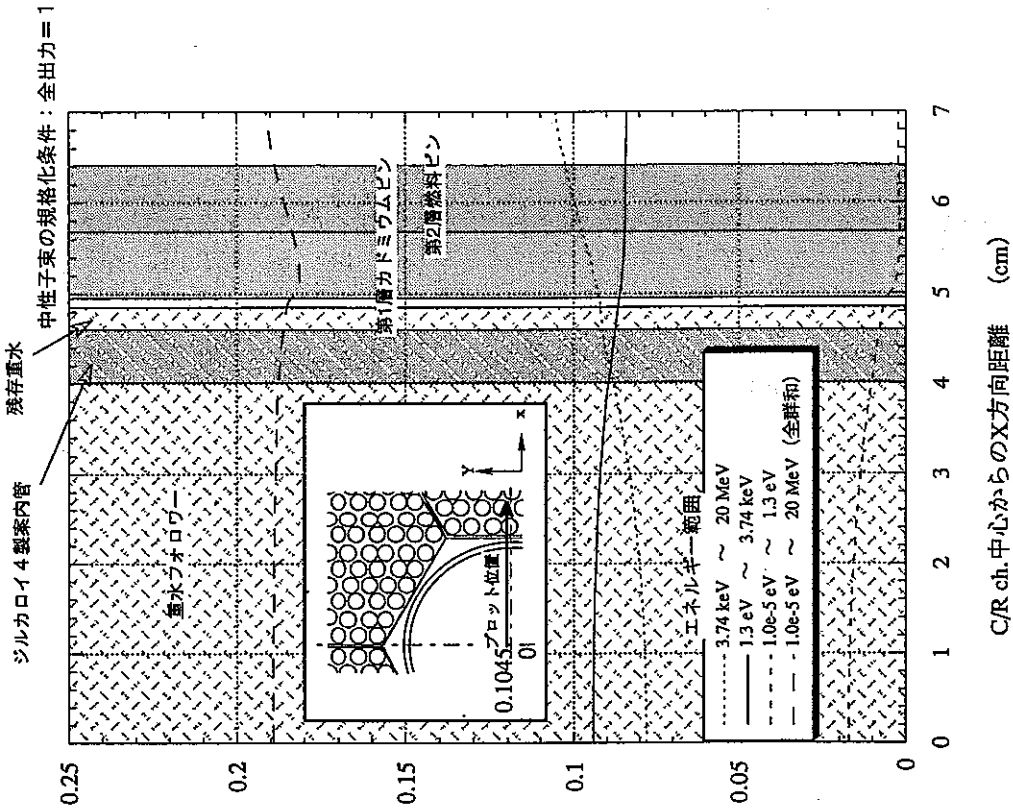
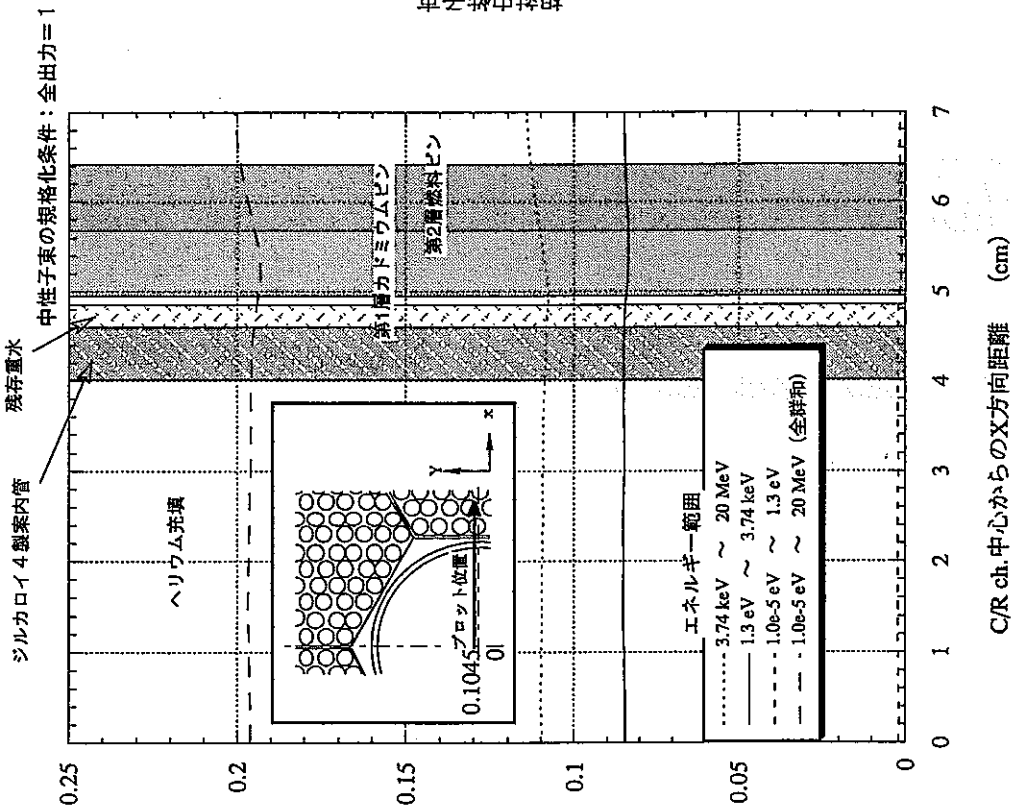


図 5.2.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (除熱型カドミウムピン置換方策：カドミウムピン置換方策に対し、フォロワー材に重水を採用した場合)

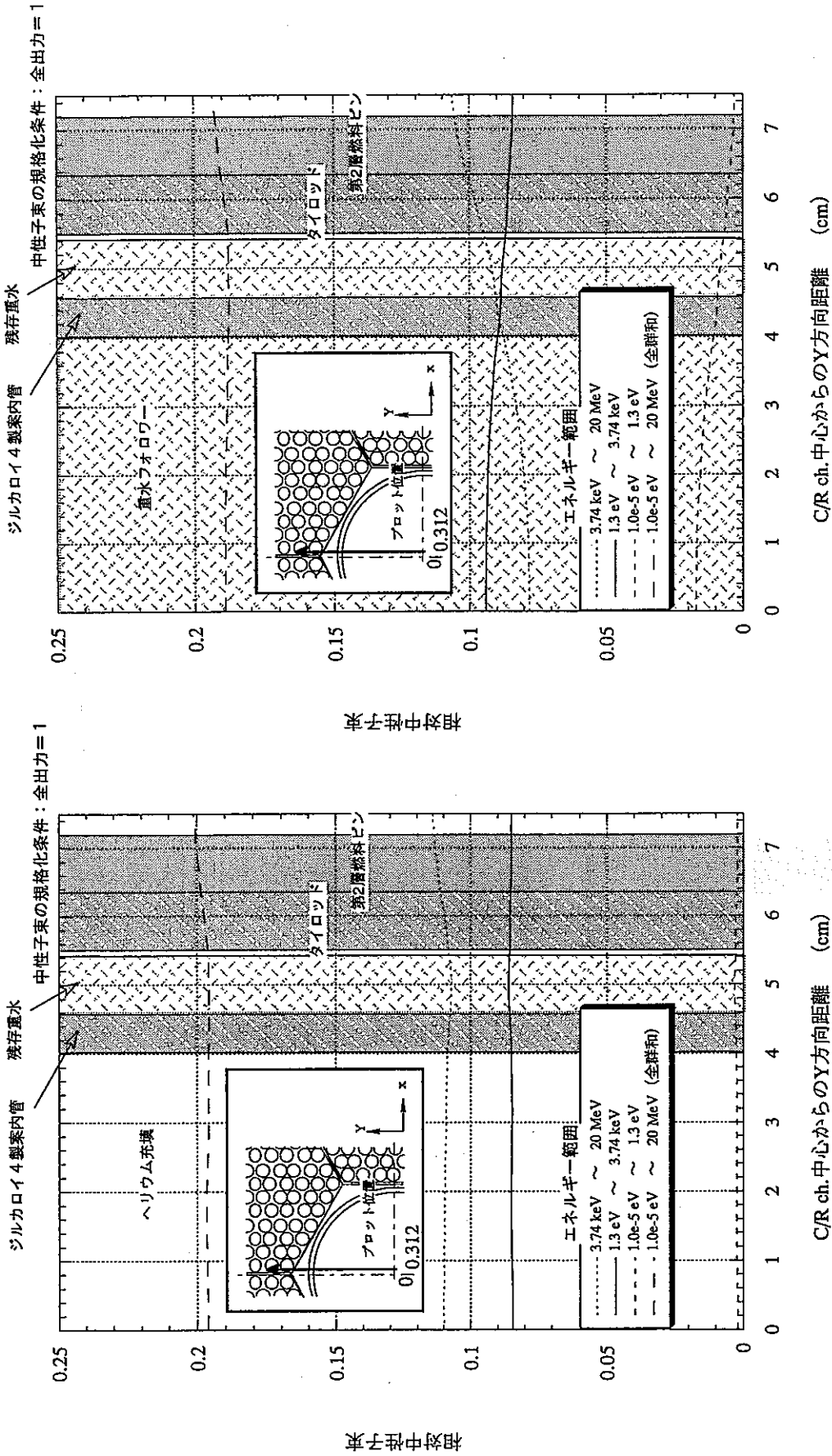


(2) 除熱型カドミウム置換方策 (C/R ch. 中心からX方向)



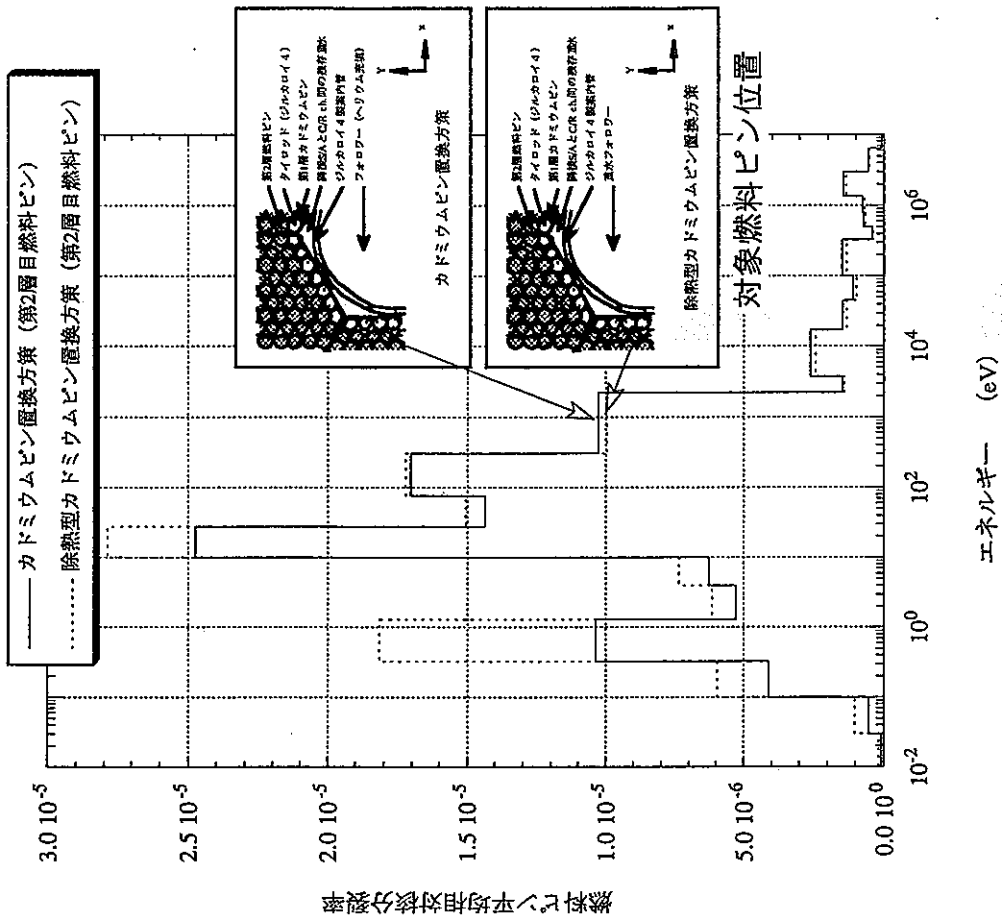
(1) カドミウムピン置換方策 (C/R ch. 中心からX方向)

図5.2.2-2 (a) C/R ch. 中心から第2層燃料ピンまでのX方向相対中性子束分布の比較 (カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

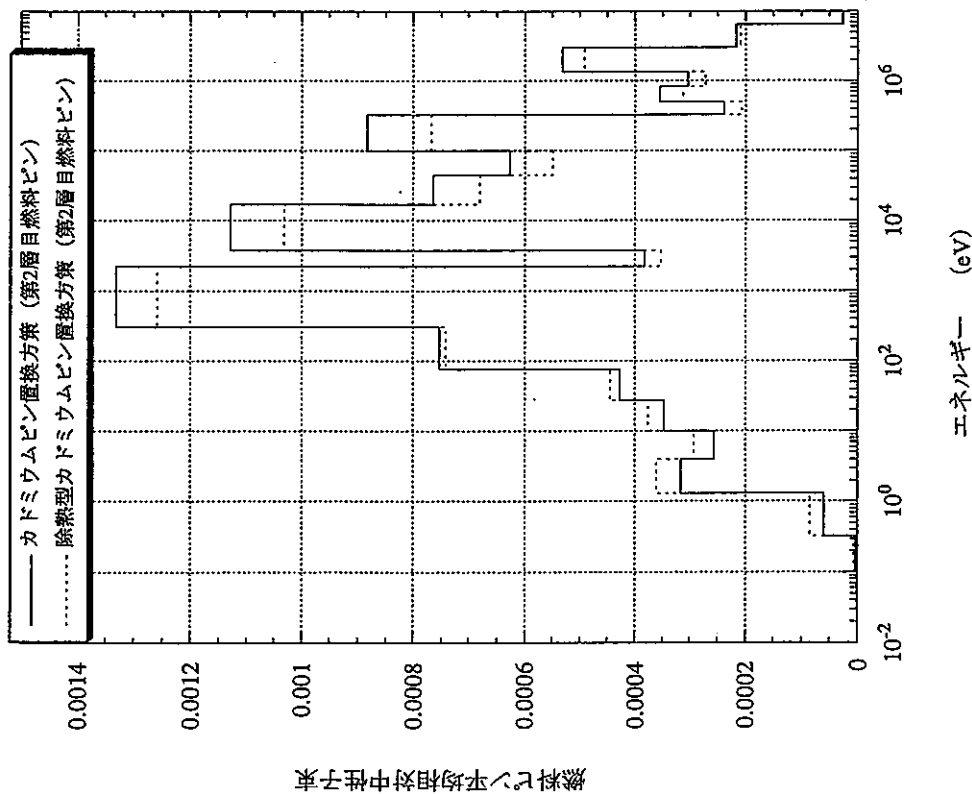


(3) カドミウムピン置換方策 (C/R ch.中心からY方向) (4) 除熱型カドミウムピン置換方策 (C/R ch.中心からY方向)

図5.2.2-2 (b) C/R ch.中心から第2層燃料ピンまでのY方向相対中性子束分布の比較
(カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

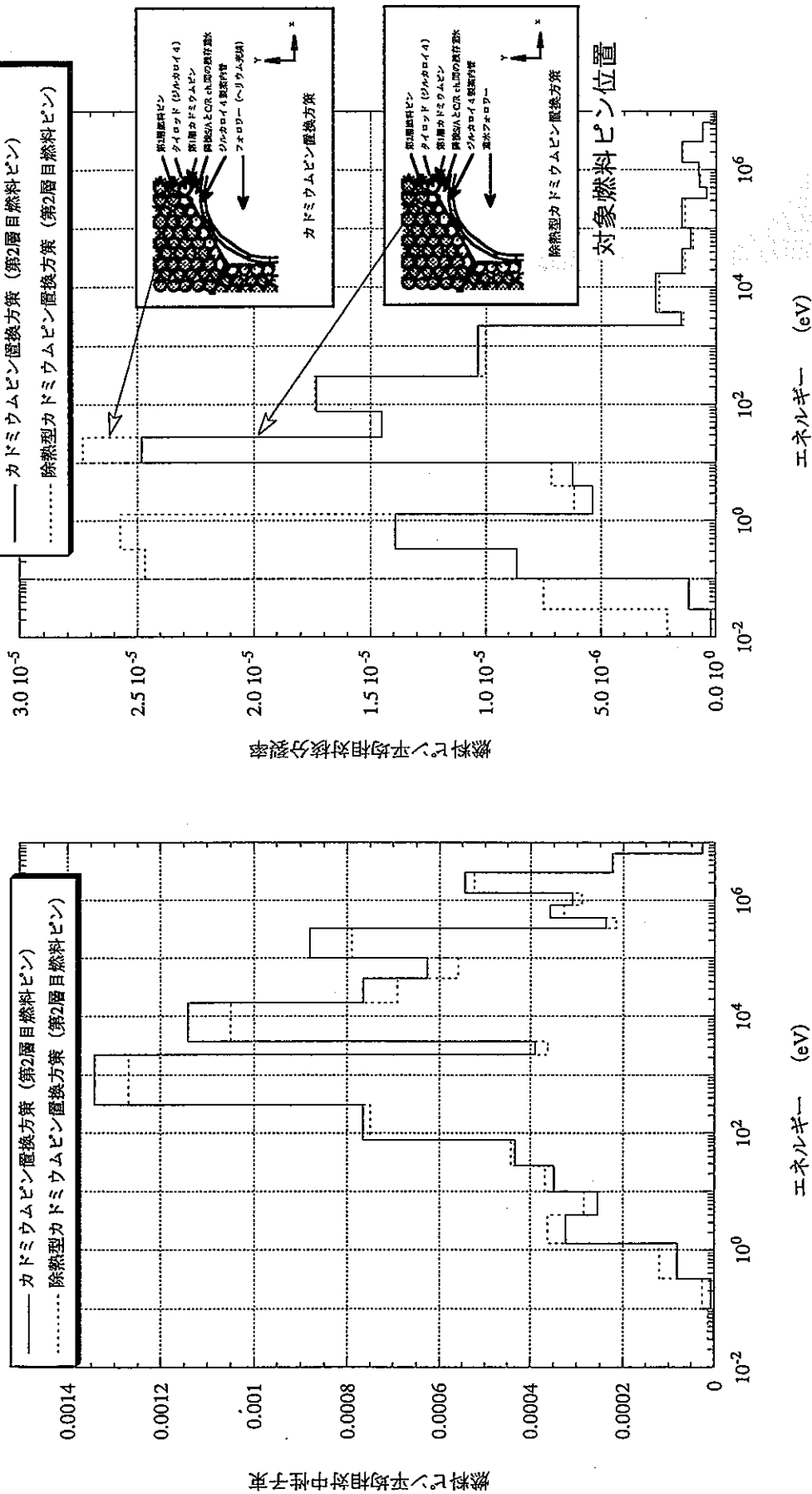


(2) 燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch.中心からX方向位置)
 中性子束の規格化条件：全出力=1



(1) 燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch.中心からX方向位置)

図5.2.2-3 第2層燃料ピンのうちC/R ch.中心からX方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)



(1) 燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch. 中心からY方向位置)

(2) 燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch. 中心からY方向位置)

中性子束の規格化条件：全出力=1

図5.2.2-4 第2層燃料ピンのうちC/R ch. 中心からY方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (カドミウムピン置換方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)

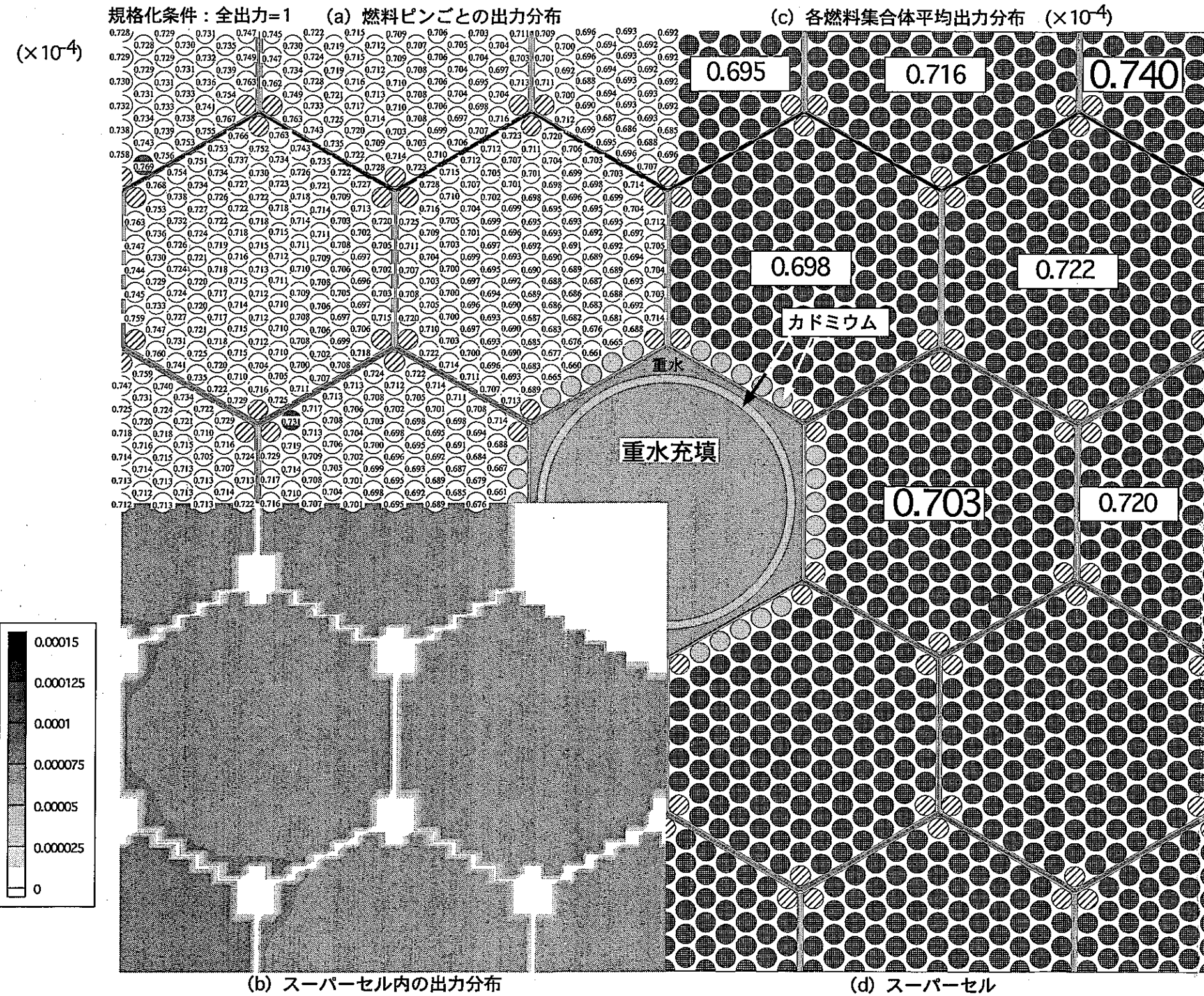
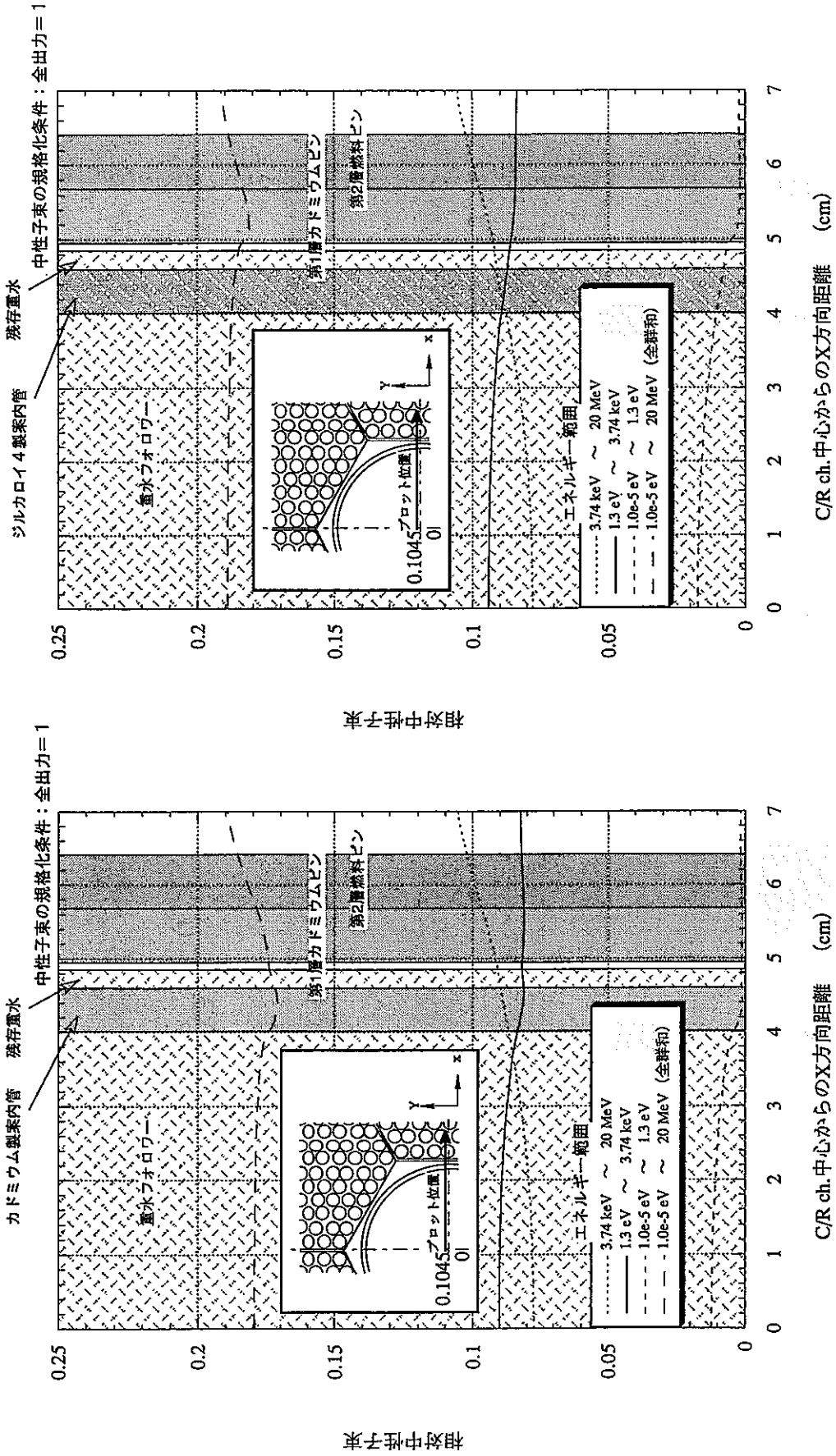
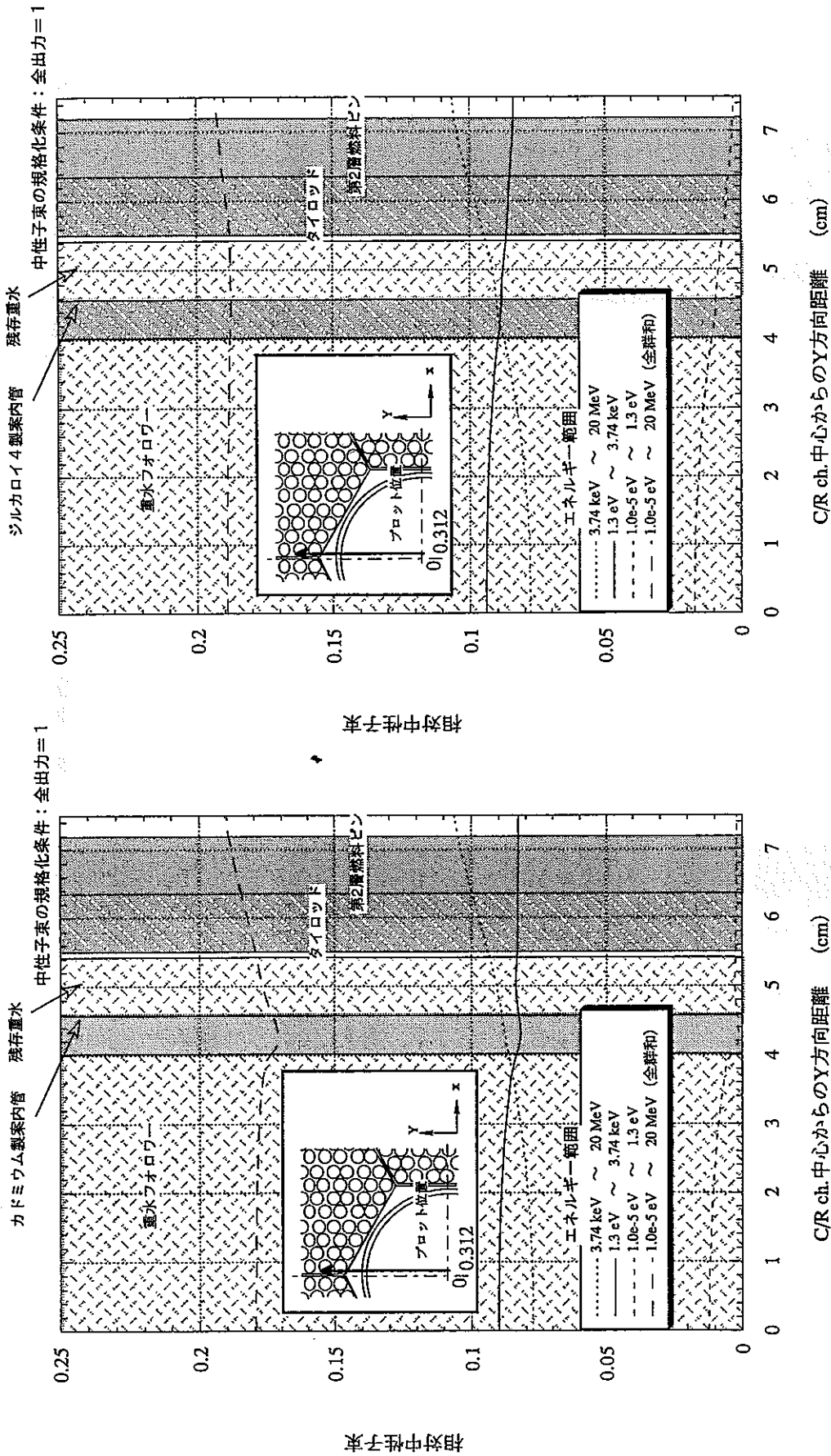


図 5.2.2-5 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (カドミウム案内管方策：除熱型カドミウムピン置換方策に対し、カドミウム製案内管とした場合)



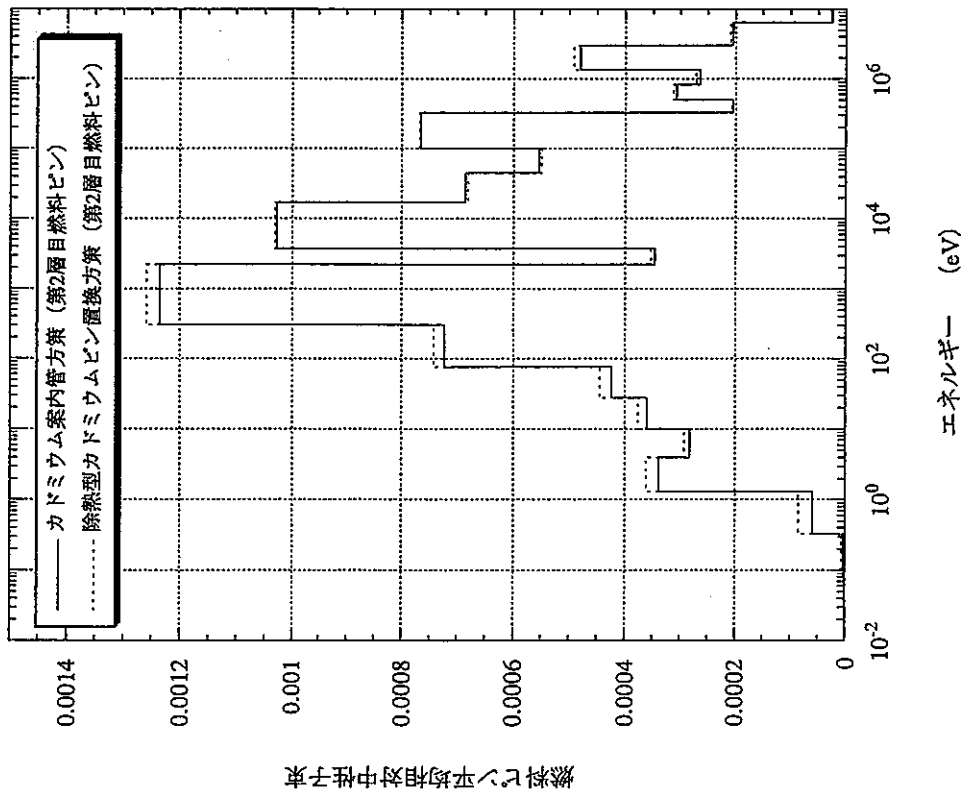
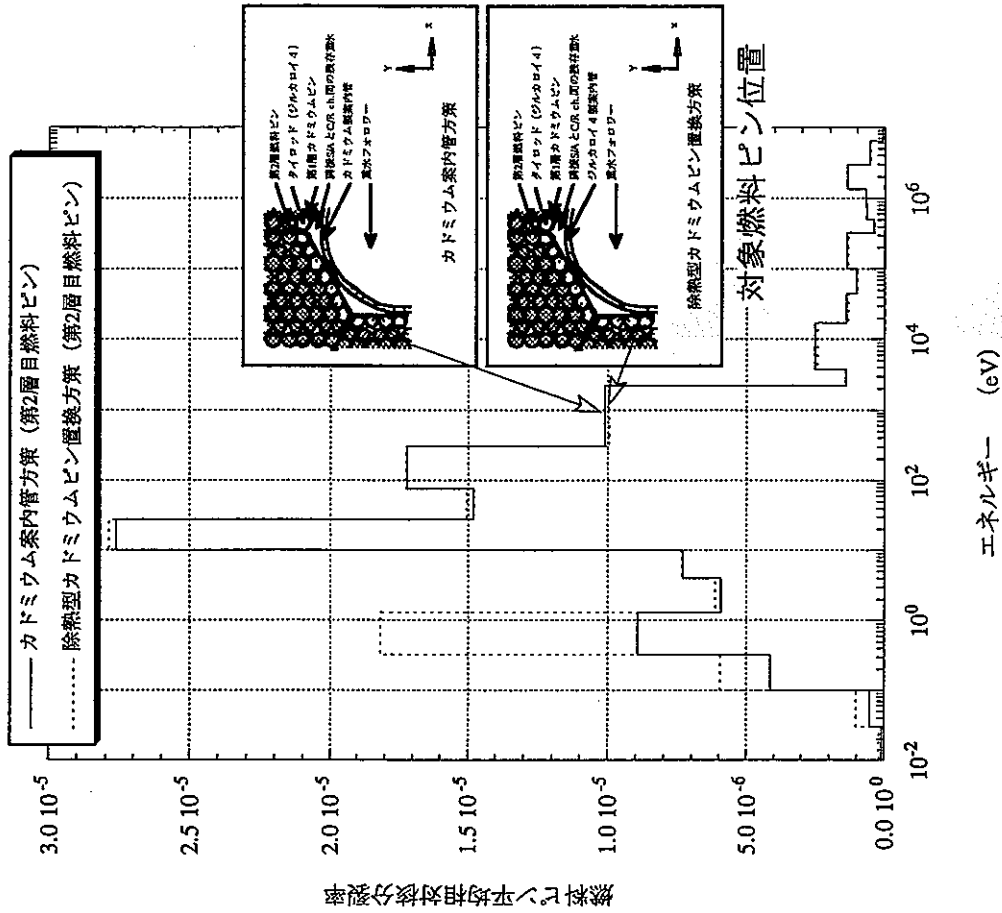
(1) カドミウム案内管方策 (C/R ch. 中心からX方向) (2) 除熱型カドミウムピン置換方策 (C/R ch. 中心からX方向)

図5.2.2-6 (a) C/R ch. 中心から第2層燃料ピンまでのX方向相対中性子束分布の比較 (カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)



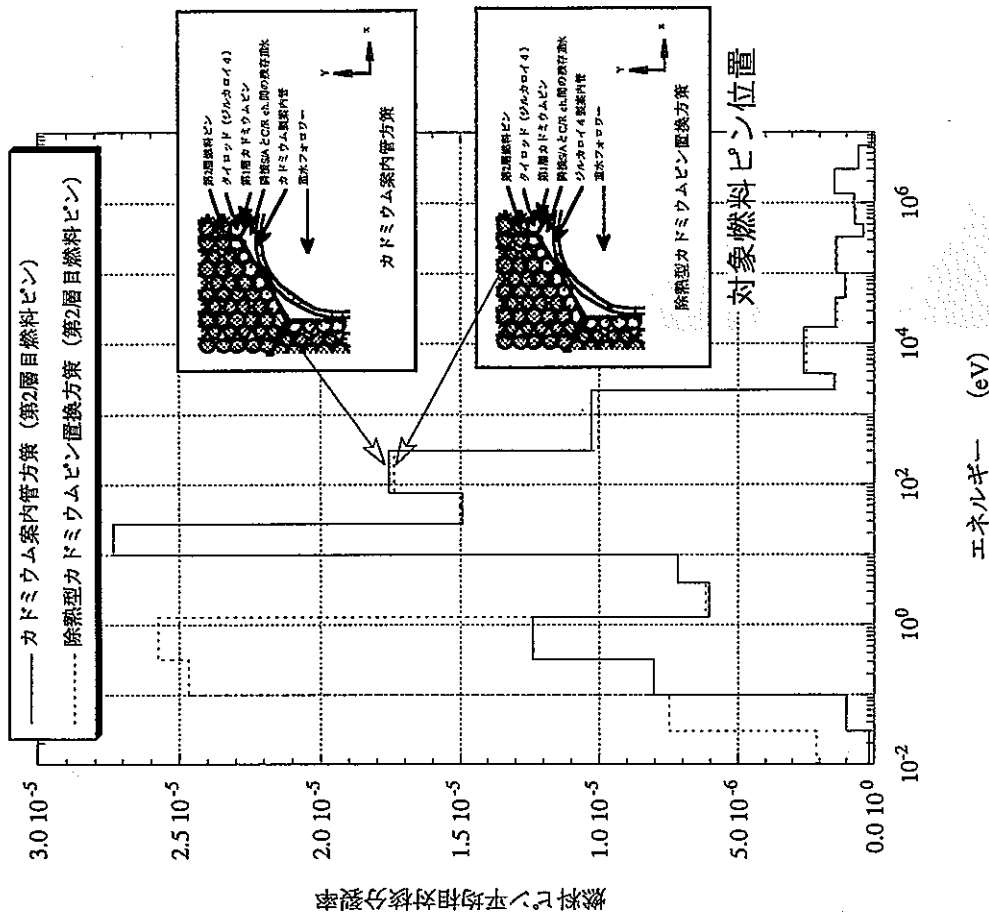
(1) カドミウム敷設内管方策 (C/R ch. 中心からY方向) (2) 除熱型カドミウムピン置換方策 (C/R ch. 中心からY方向)

図5.2.2-6 (b) C/R ch. 中心から第2層燃料ピンまでのY方向相対中性子束分布の比較 (カドミウム敷設内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)



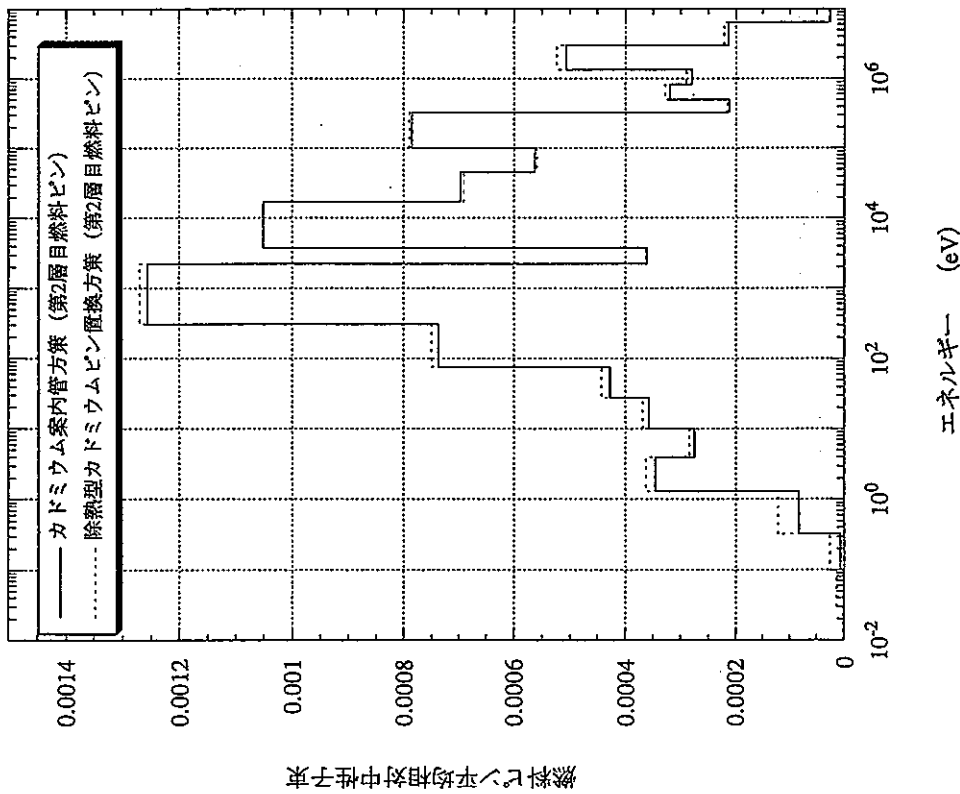
- (1) 燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch.中心からX方向位置)
 - (2) 燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch.中心からX方向位置)
- 中性子束の規格化条件：全出力=1

図5.2.2-7 第2層燃料ピンのうちC/R ch.中心からX方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウムピン置換方策)



(2) 燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch. 中心からY方向位置)

中性子束の規格化条件：全出力=1



(1) 燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch. 中心からY方向位置)

図5.2.2-8 第2層燃料ピンのうちC/R ch.中心からY方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (カドミウム案内管方策 vs 除熱型カドミウム案内管方策)

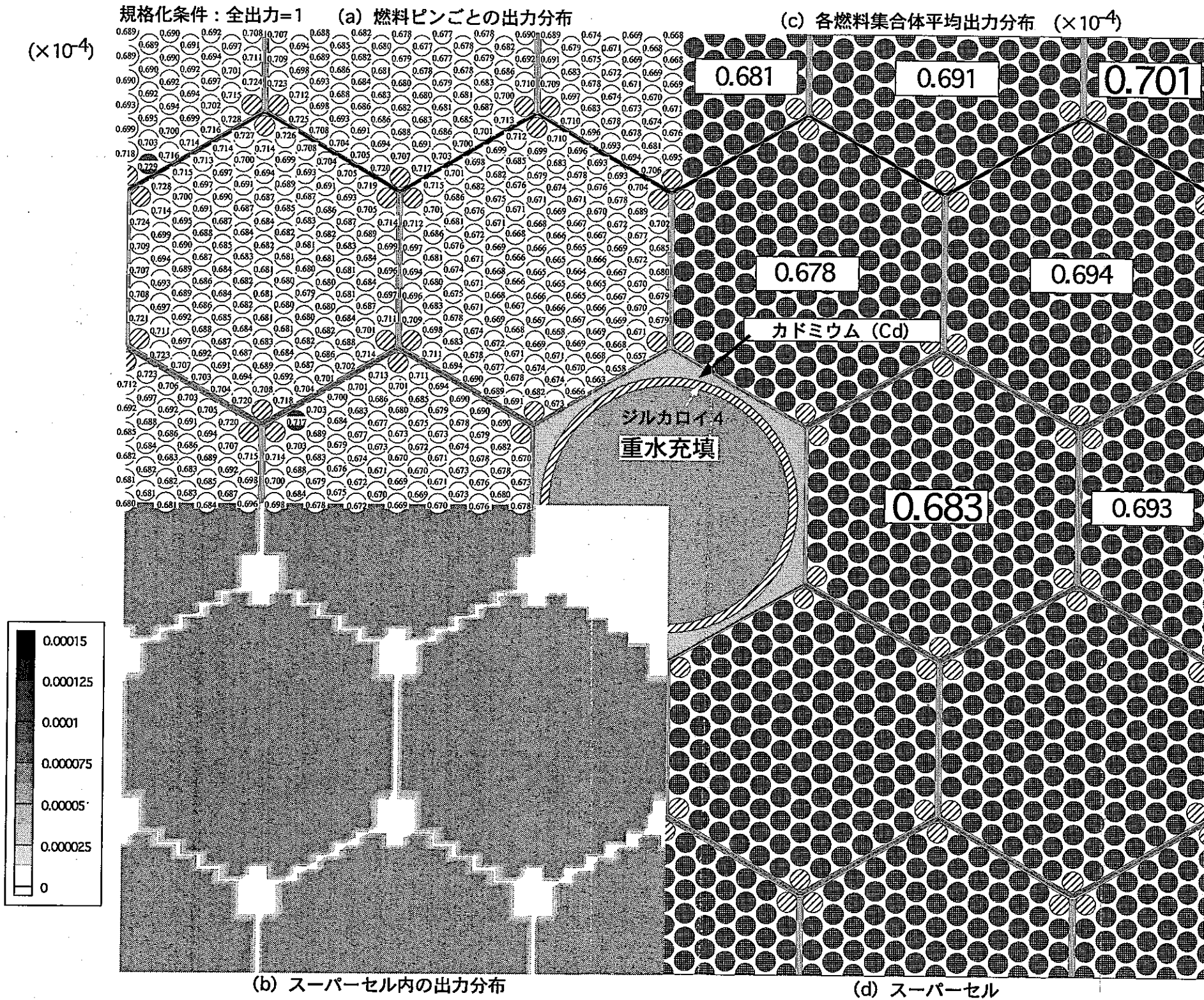
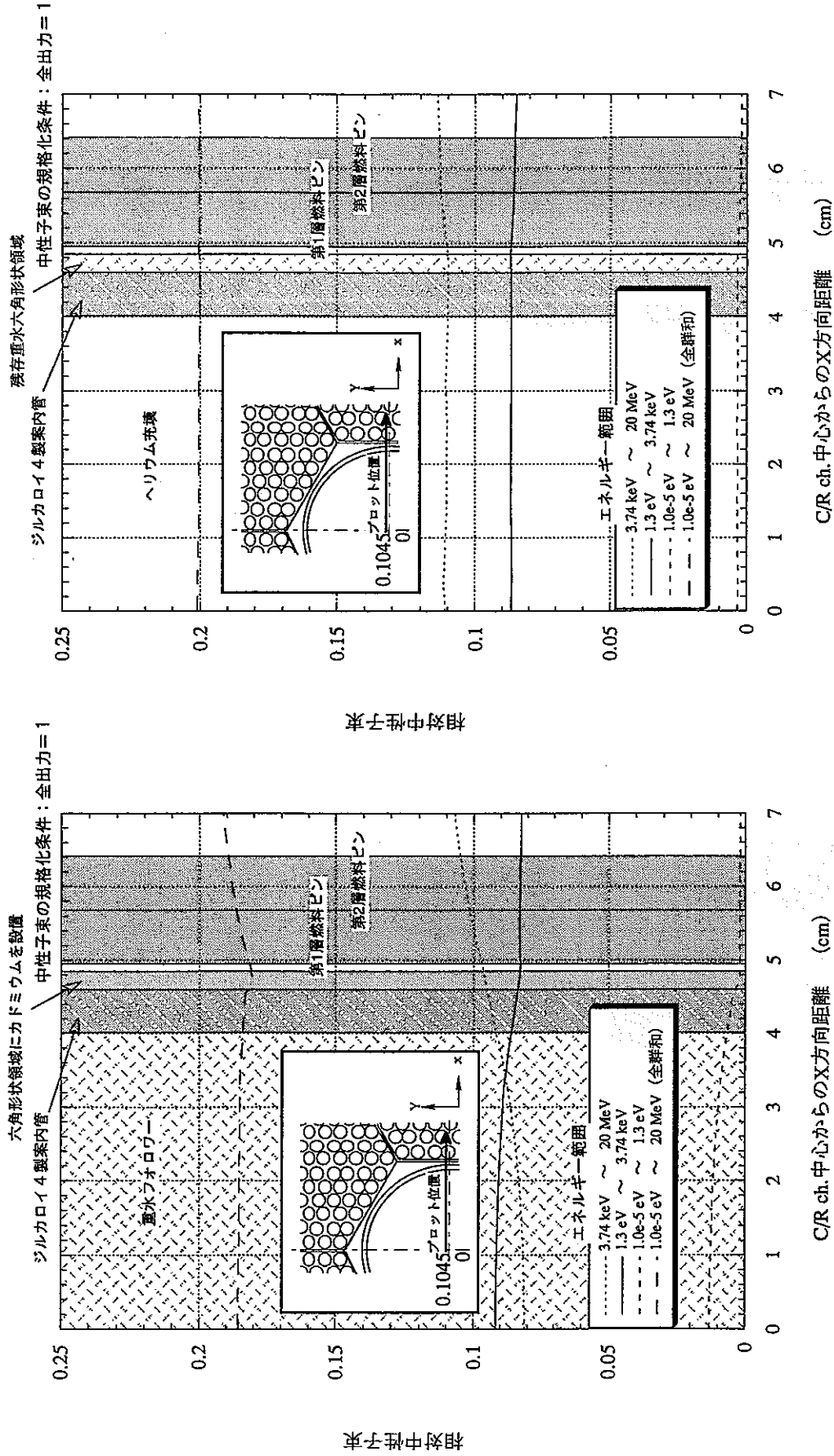


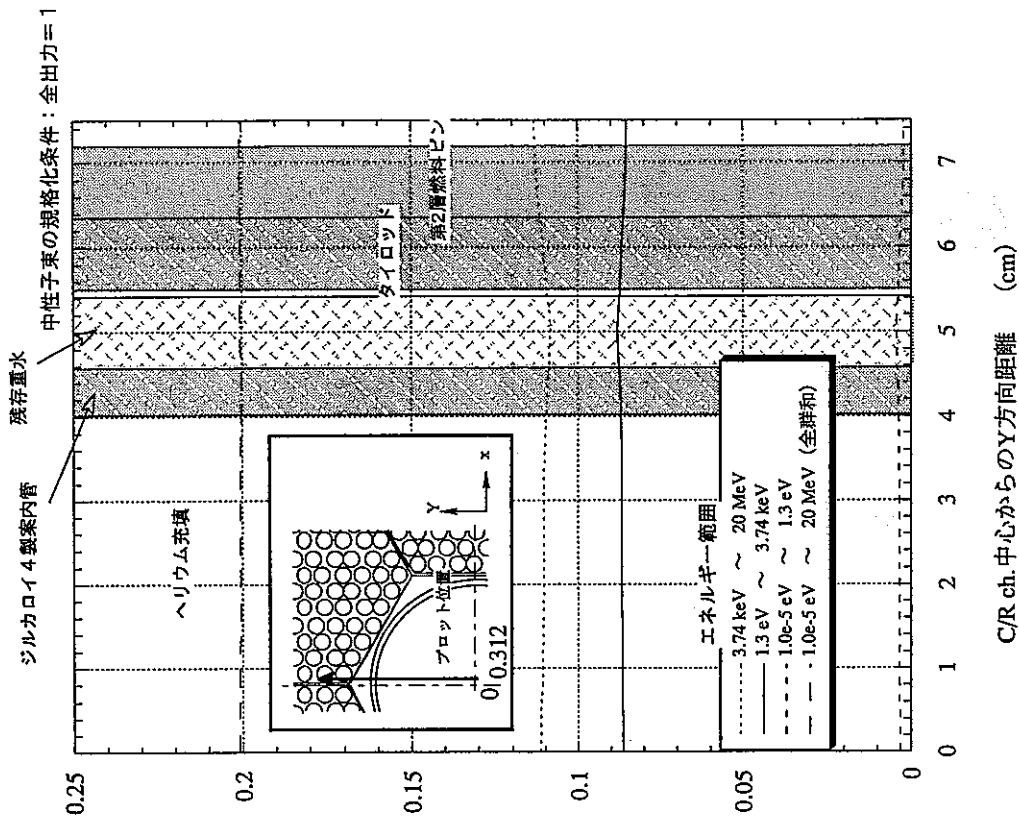
図 5.2.2-9 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (六角形状C/R ch.方策：C/R ch.-隣接S/A間にカドミウム設置、カドミウムピン→燃料ピンとした場合)



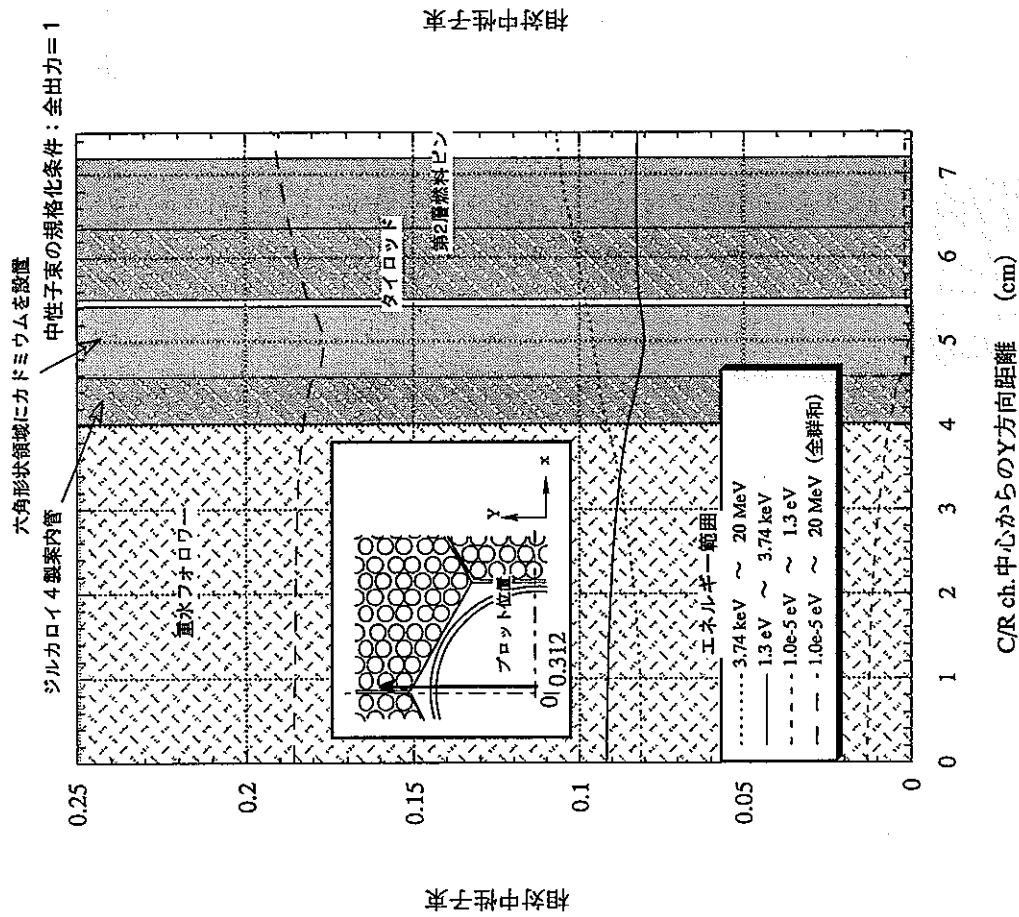
(1) 六角形状C/R ch.方策 (C/R ch. 中心からX方向)

(2) 標準ケース (C/R ch. 中心からX方向)

図5.2.2-10 (a) C/R ch. 中心から第2層燃料ピンまでのX方向相対中子束分布の比較 (六角形状C/R ch.方策 vs 標準ケース)

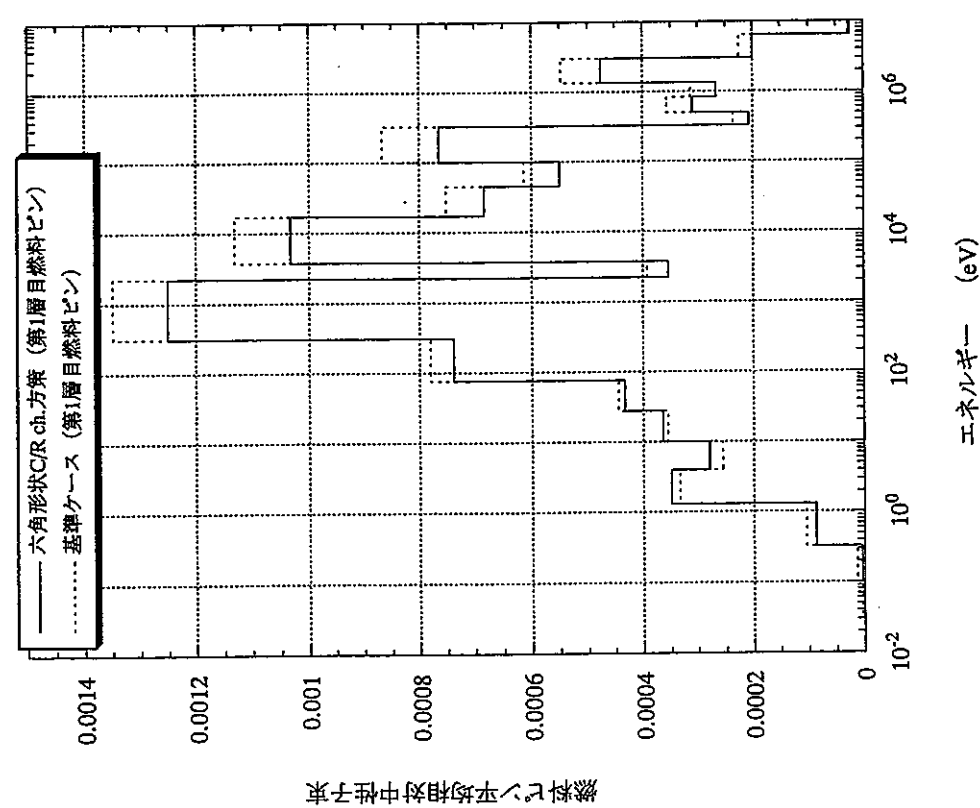
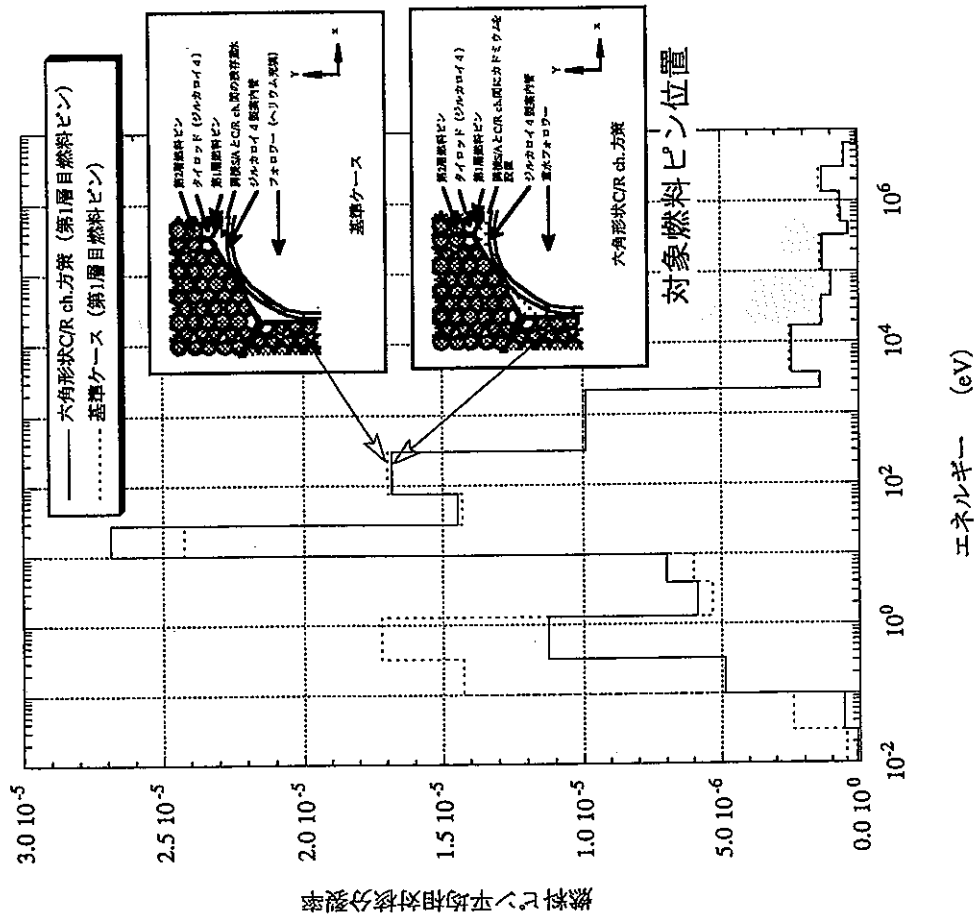


(3) 六角形状C/R ch.方策 (C/R ch.中心からY方向)



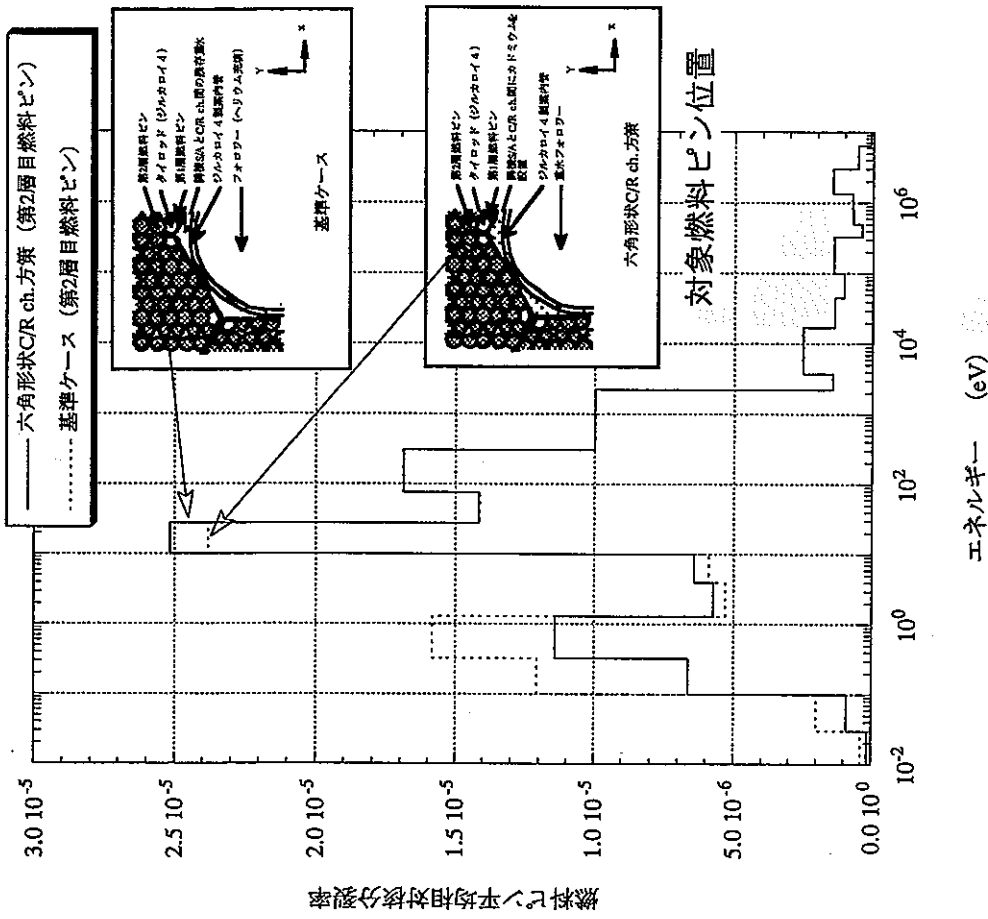
(4) 六角形状C/R ch.方策 (C/R ch.中心からY方向)

図5.2.2-10 (b) C/R ch.中心から第2層燃料ピンまでのY方向相対中性子束分布の比較 (六角形状C/R ch.方策 vs 基準ケース)



(1)燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch.中心からX方向位置)
 (2)燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch.中心からX方向位置)
 中性子束の規格化条件：全出力=1

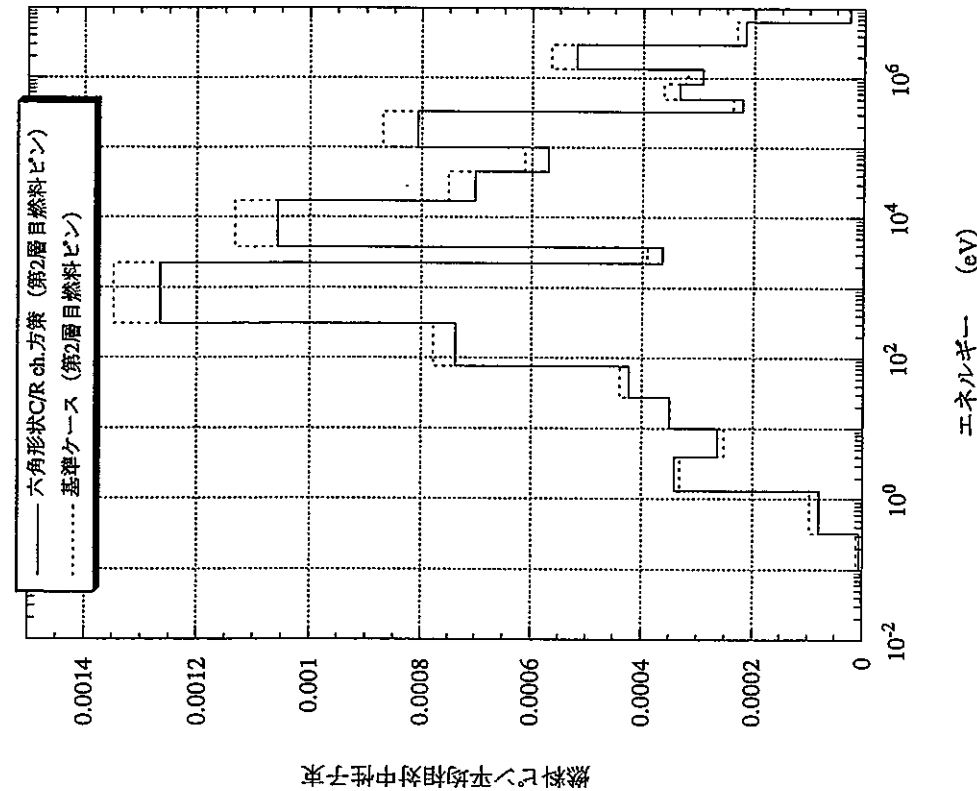
図5.2.2-11 第1層燃料ピンのうちC/R ch.中心からX方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (六角形状C/R ch.方策 vs 標準ケース)



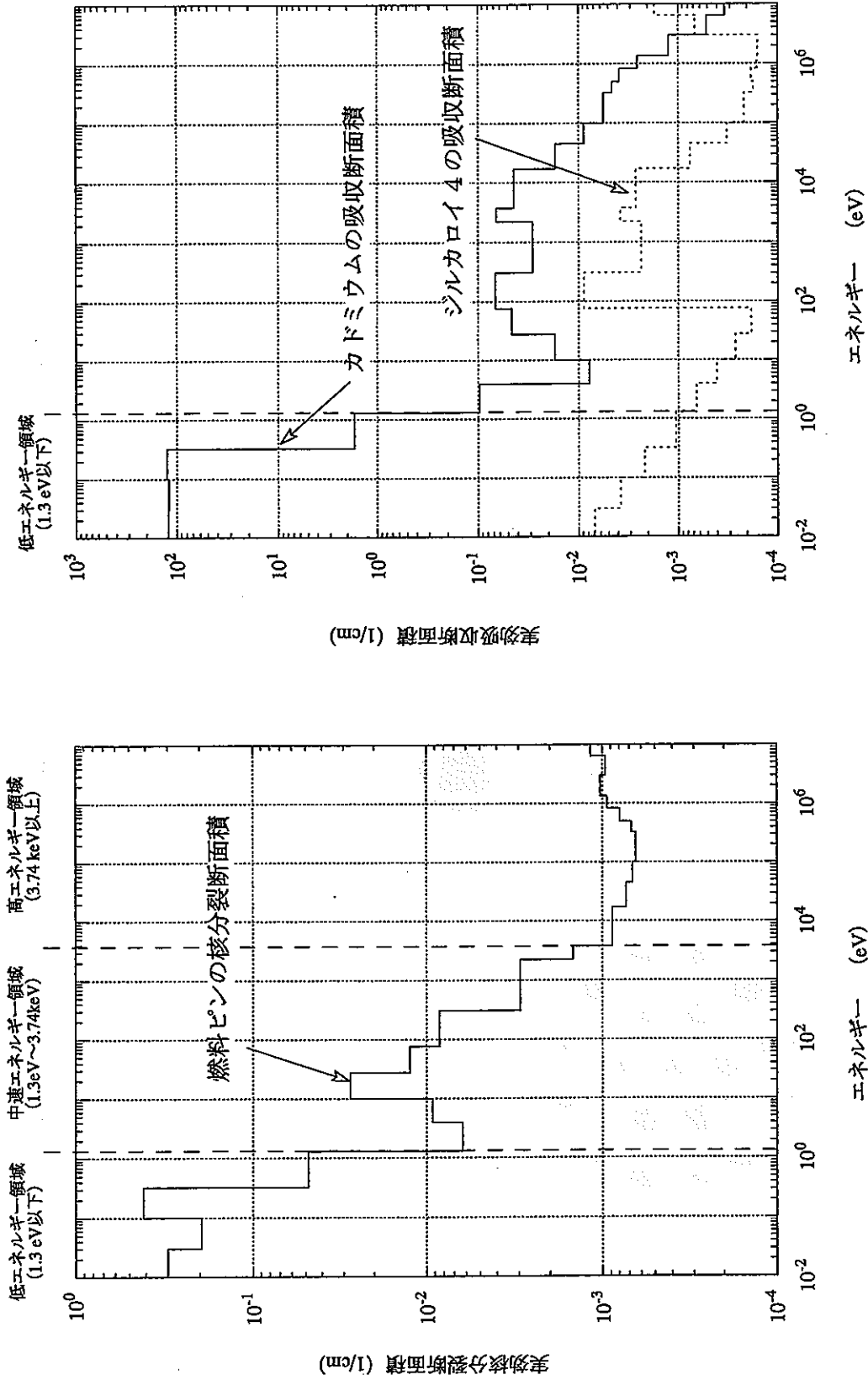
(2) 燃料ピン平均相対核分裂率エネルギー分布 (C/R ch.中心からY方向位置)

中性子束の規格化条件：全出力=1

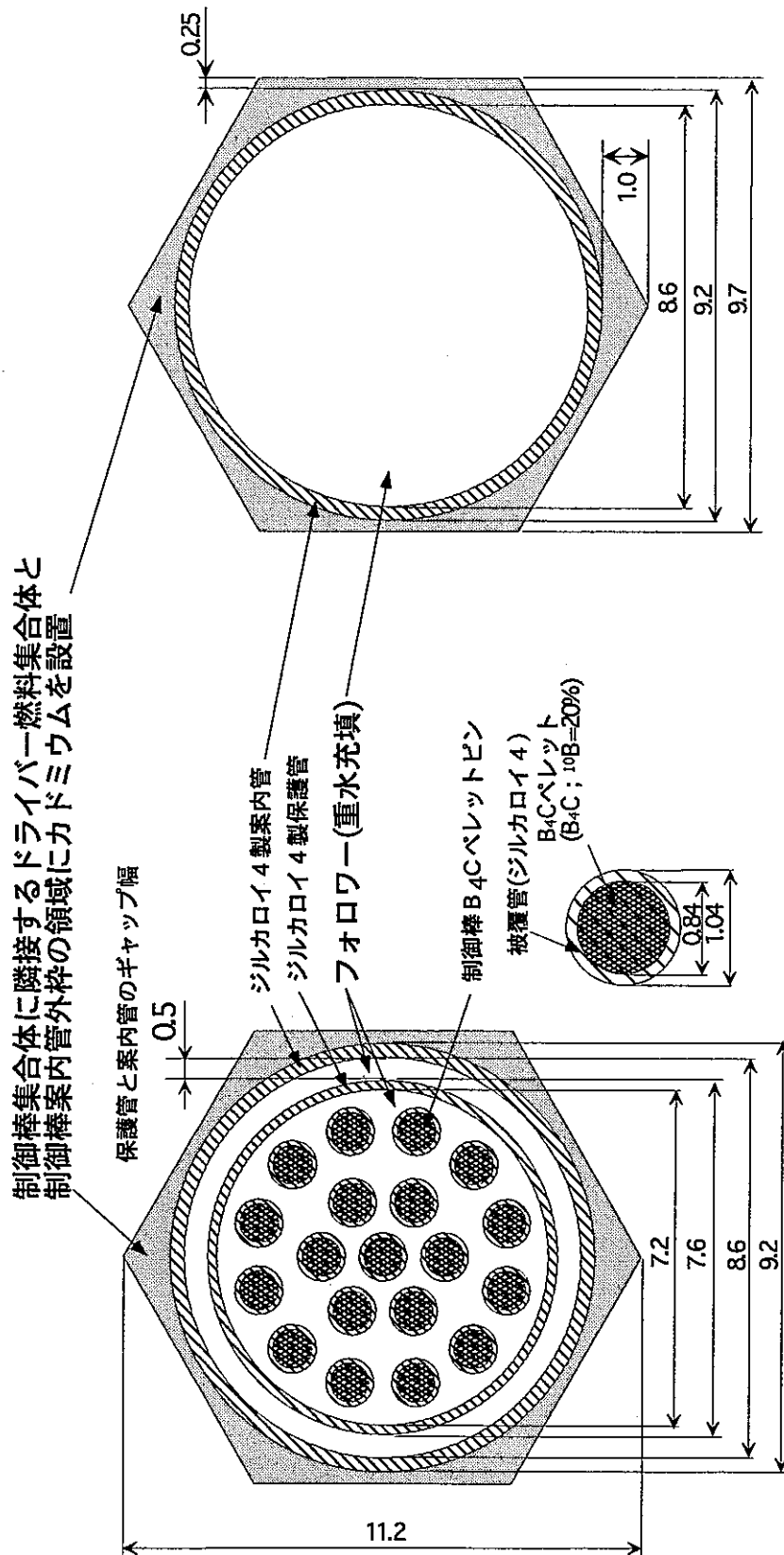
図5.2.2-12 第2層燃料ピンのうちC/R ch.中心からY方向位置での燃料ピン平均中性子スペクトル分布及び核分裂率エネルギー分布の比較 (六角形状C/R ch.方策 vs 基準ケース)



(1) 燃料ピン平均相対中性子スペクトル (C/R ch.中心からY方向位置)



(1) 燃料ピンの核分裂断面積
 (2) カドミウム, ジルカロイ4の吸収断面積
 図5.2.2-13 燃料ピンの核分裂断面積及びカドミウム, ジルカロイ4の吸収断面積



(a) 制御棒挿入状態

(b) 制御棒引き抜き状態

単位 : cm

図 6.2-1 六角形状 C/R ch. 方策を適用した制御棒集合体の水平断面図

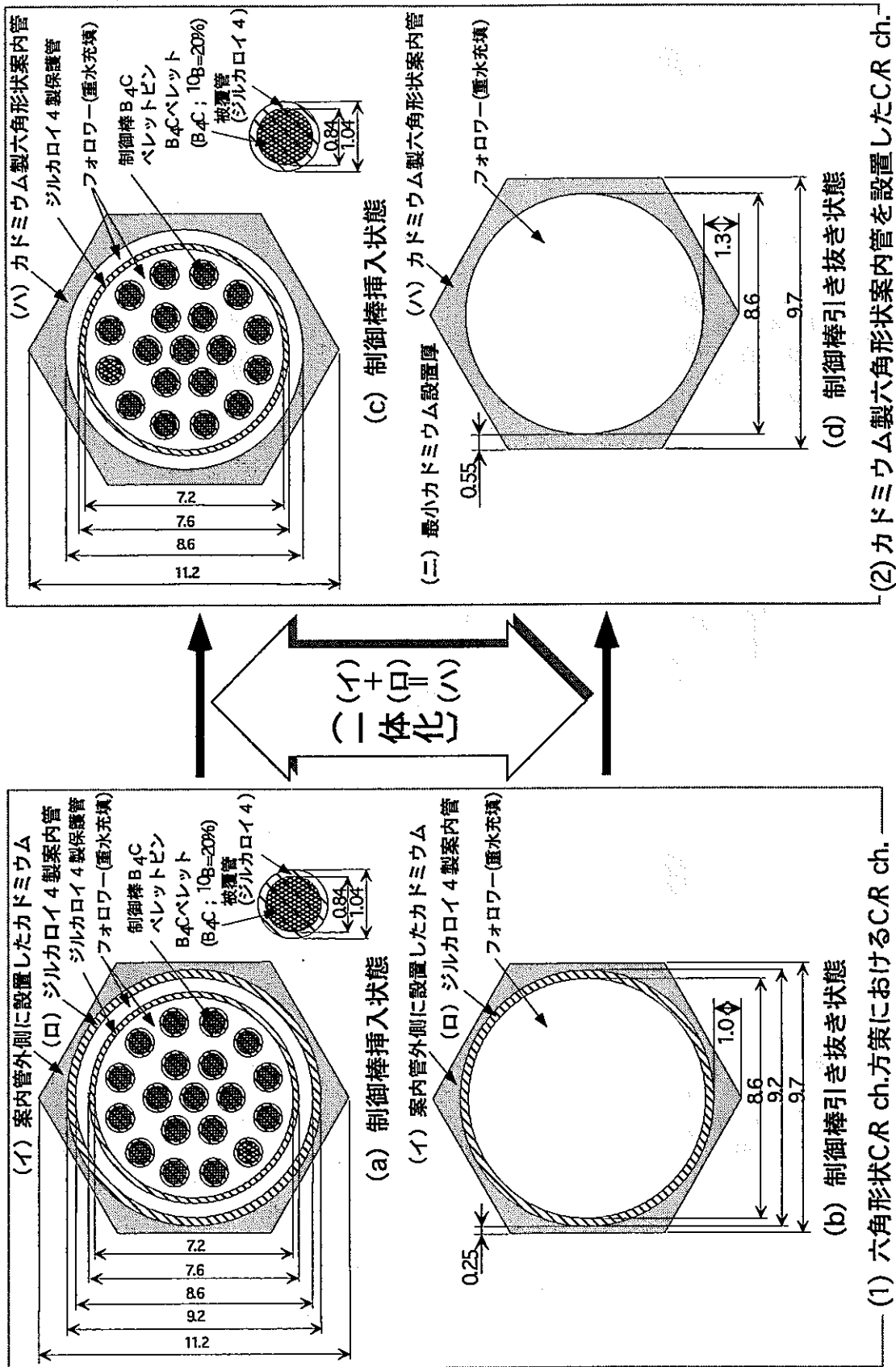
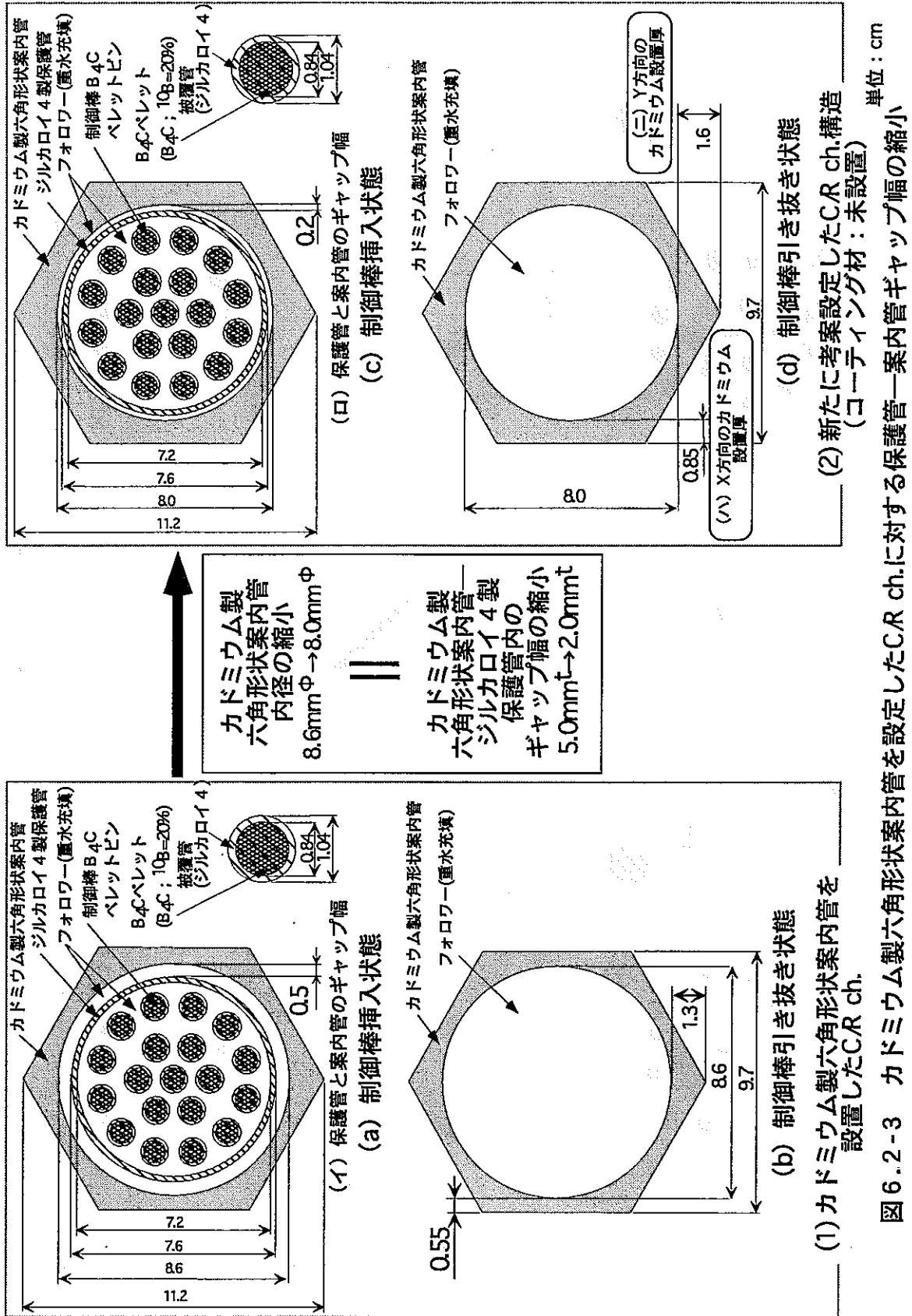


図 6.2-2 カドミウム部と制御棒案内管との一体化



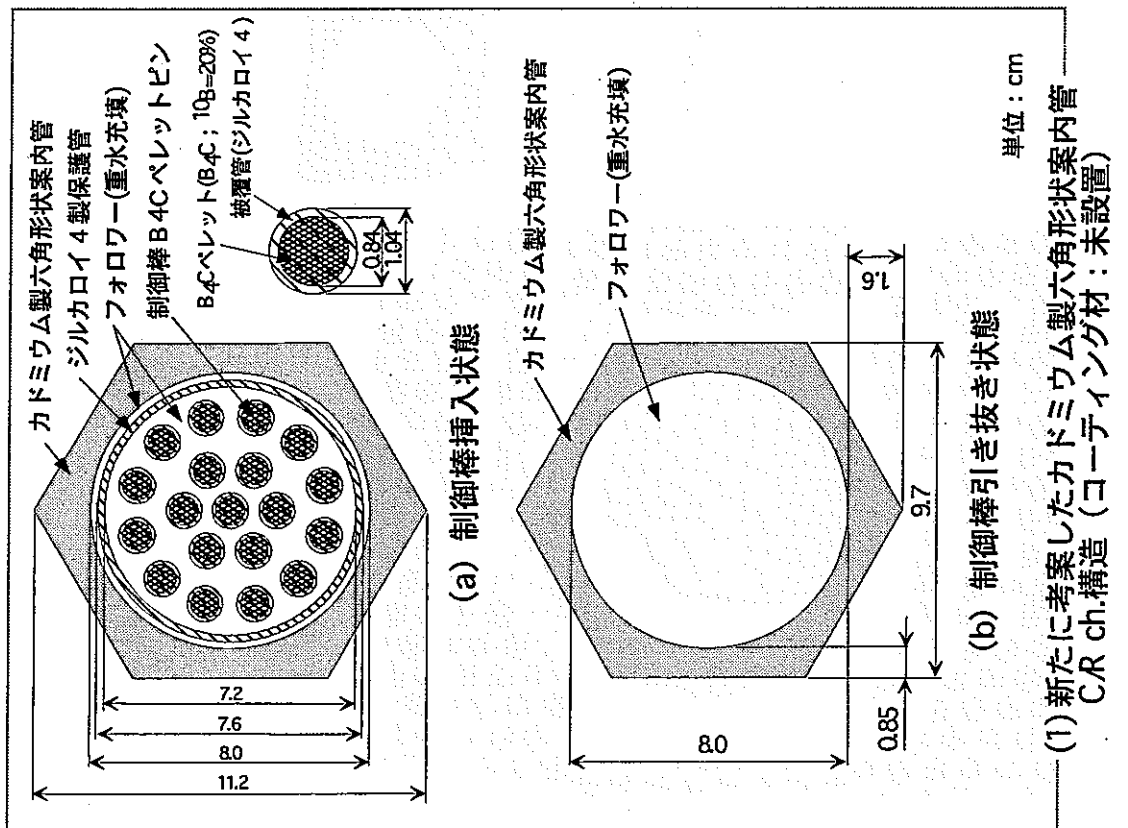
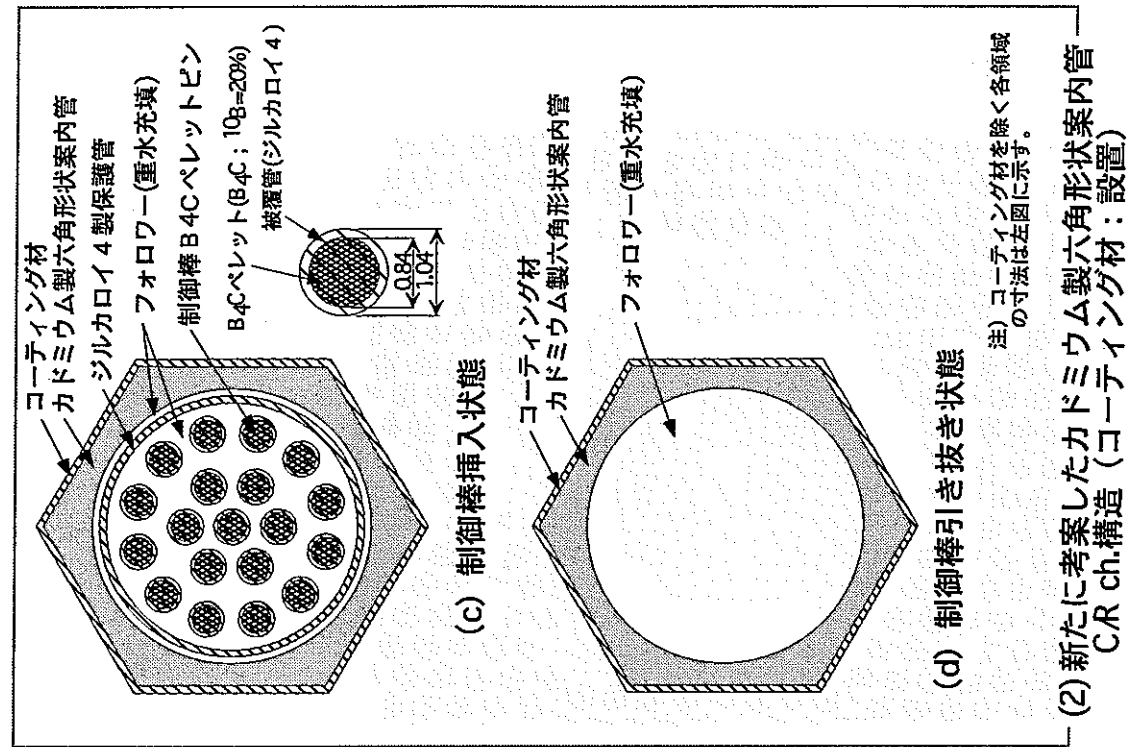
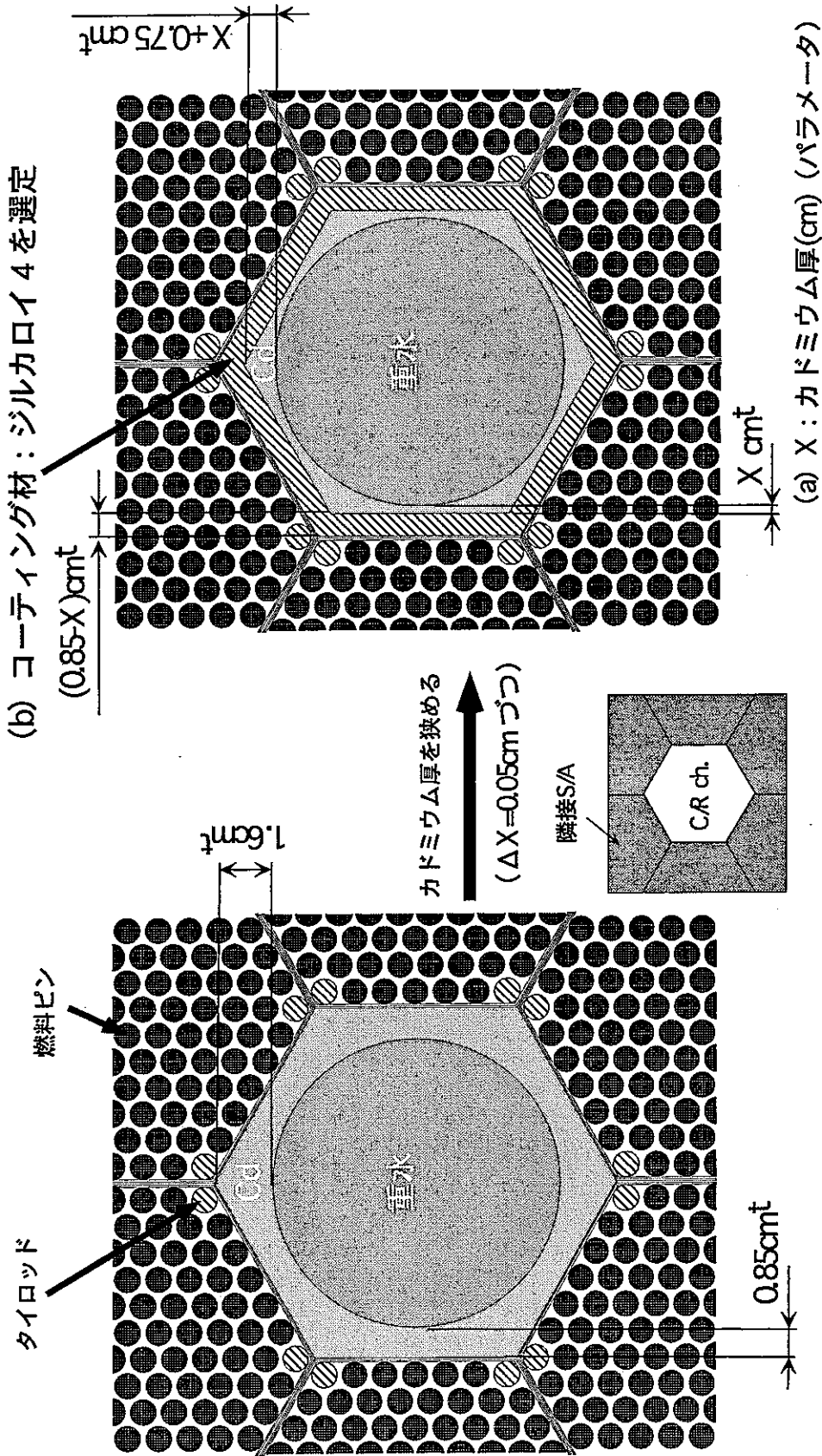


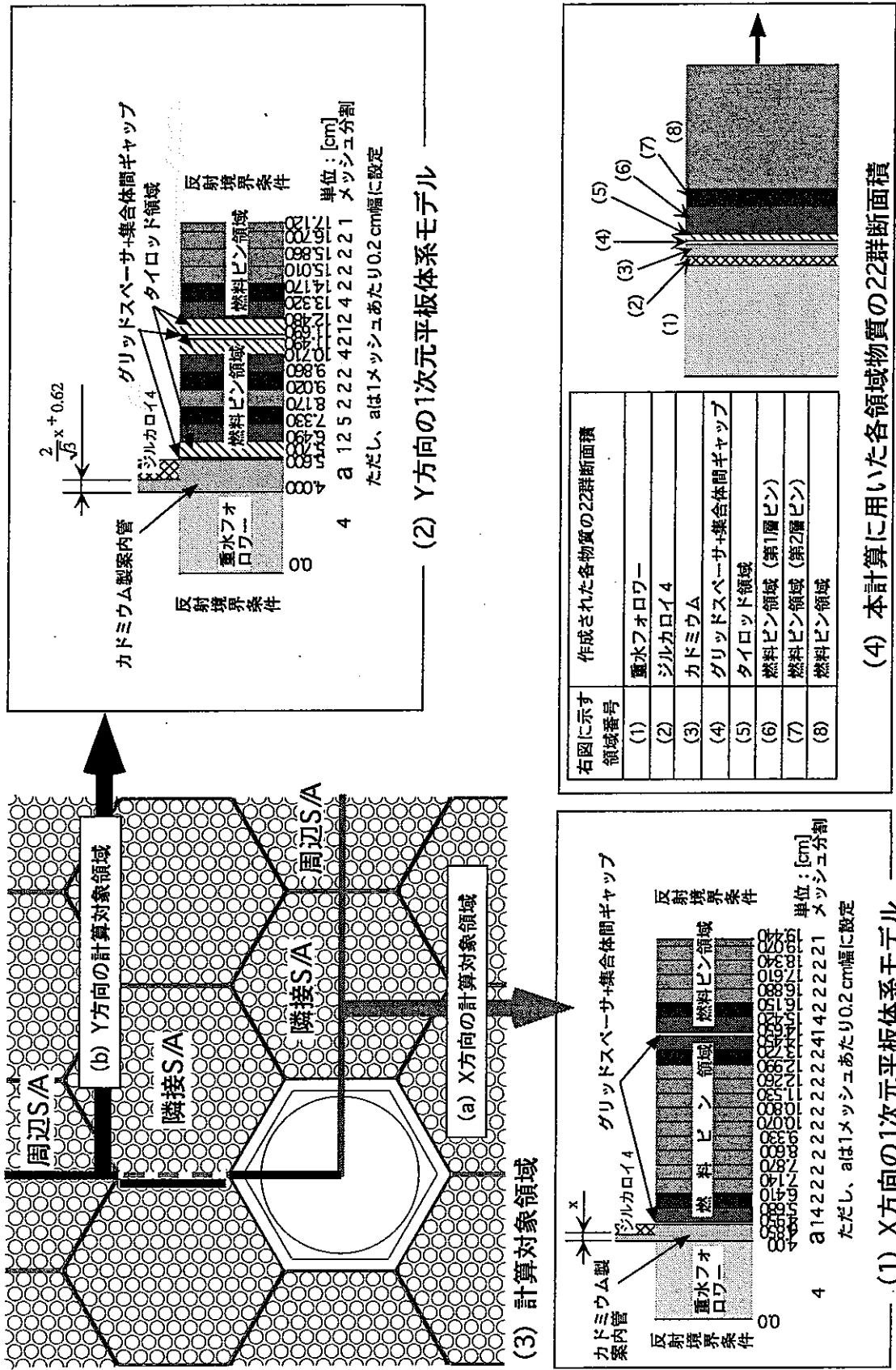
図 6.2-4 カドミウム製六角形状案内管方を適用した制御棒集合体の水平断面図



(1) 最大許容カドミウム厚設定状態

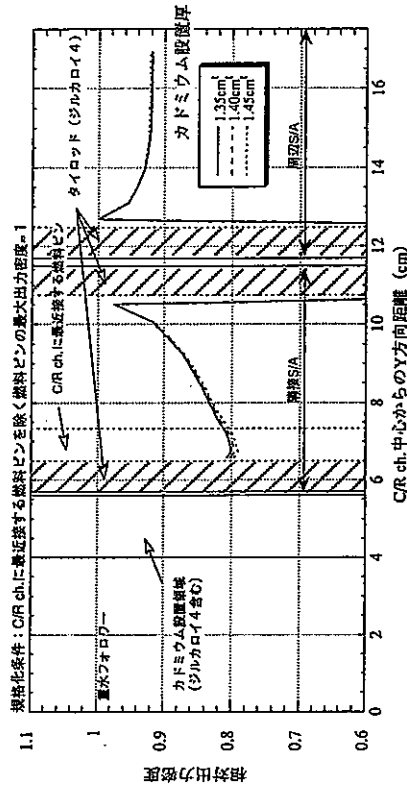
(2) カドミウム厚パラメータ設定状態

図 6.3.1-1 計算対象制御棒集合体及びカドミウム厚パラメータ計算方法

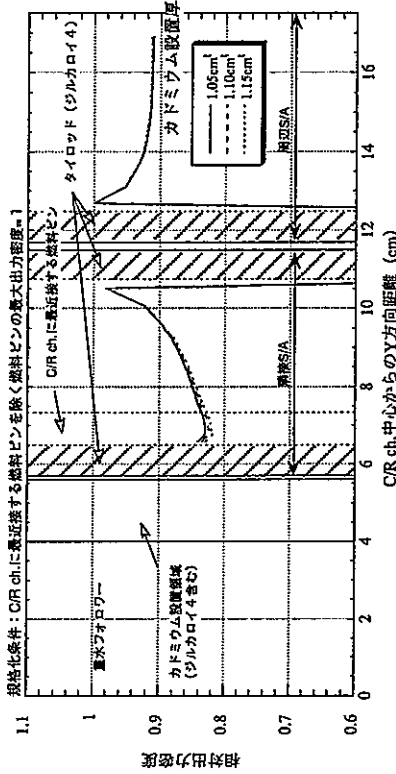


右図に示す領域番号	作成された各物質の22群断面面積
(1)	重水フオロワー
(2)	ジルカロイ4
(3)	カドミウム
(4)	グリッドスペース+集集体間ギャップ
(5)	タイロッド領域
(6)	燃料ピン領域 (第1層ピン)
(7)	燃料ピン領域 (第2層ピン)
(8)	燃料ピン領域

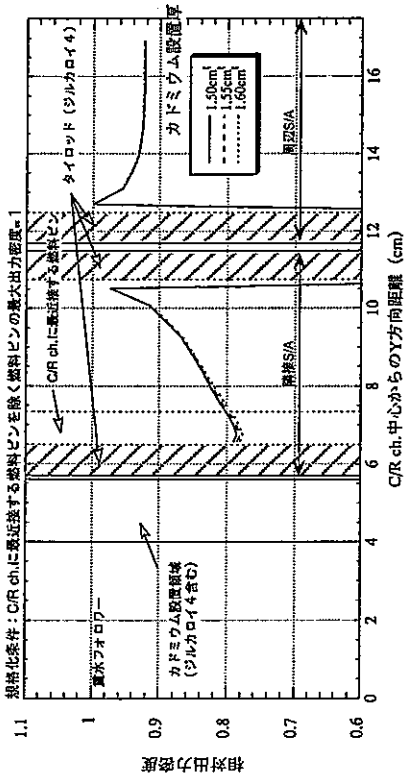
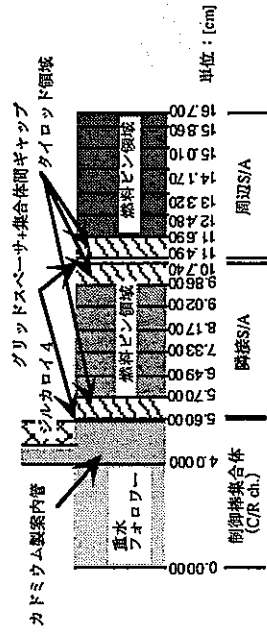
図 6.3.1-2 X,Y各方向での1次元平板モデル及び計算体系



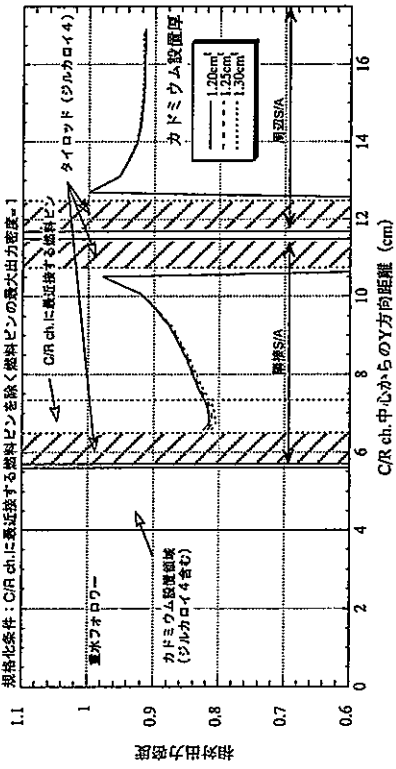
(2) カドミウム設置厚を1.35, 1.40, 1.45cm²とした時の相対出力密度分布



(4) カドミウム設置厚を1.05, 1.10, 1.15cm²とした時の相対出力密度分布



(1) カドミウム設置厚を1.50, 1.55, 1.60cm²とした時の相対出力密度分布



(3) カドミウム設置厚を1.20, 1.25, 1.30cm²とした時の相対出力密度分布

図6.3.2-2 カドミウム厚をパラメータとした時のY方向における相対出力密度分布の比較

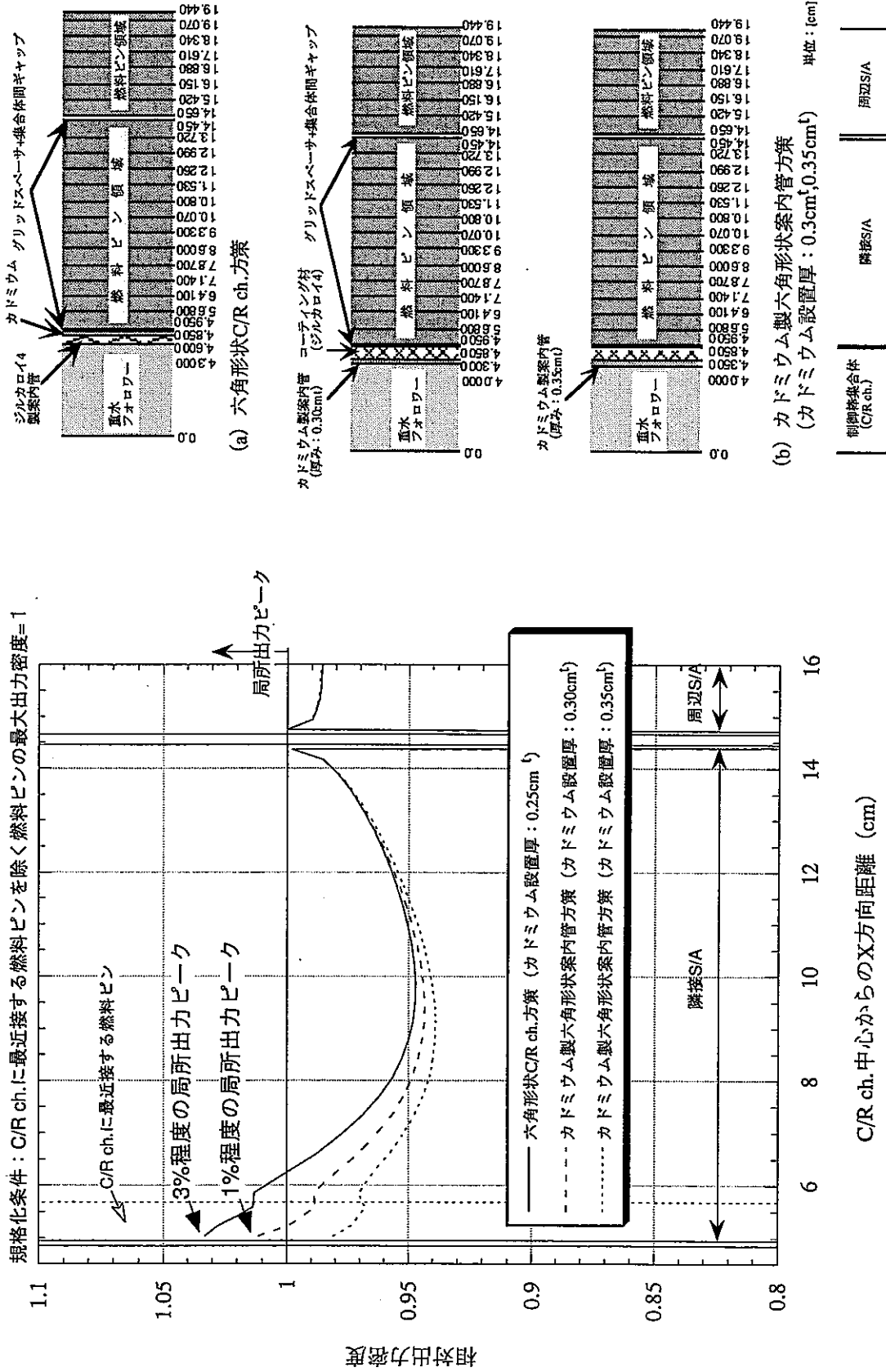


図6.3.2-3 六角形状C/R ch.方策とカドミウム製六角形状案内管方策のX方向における相対出力密度分布の比較

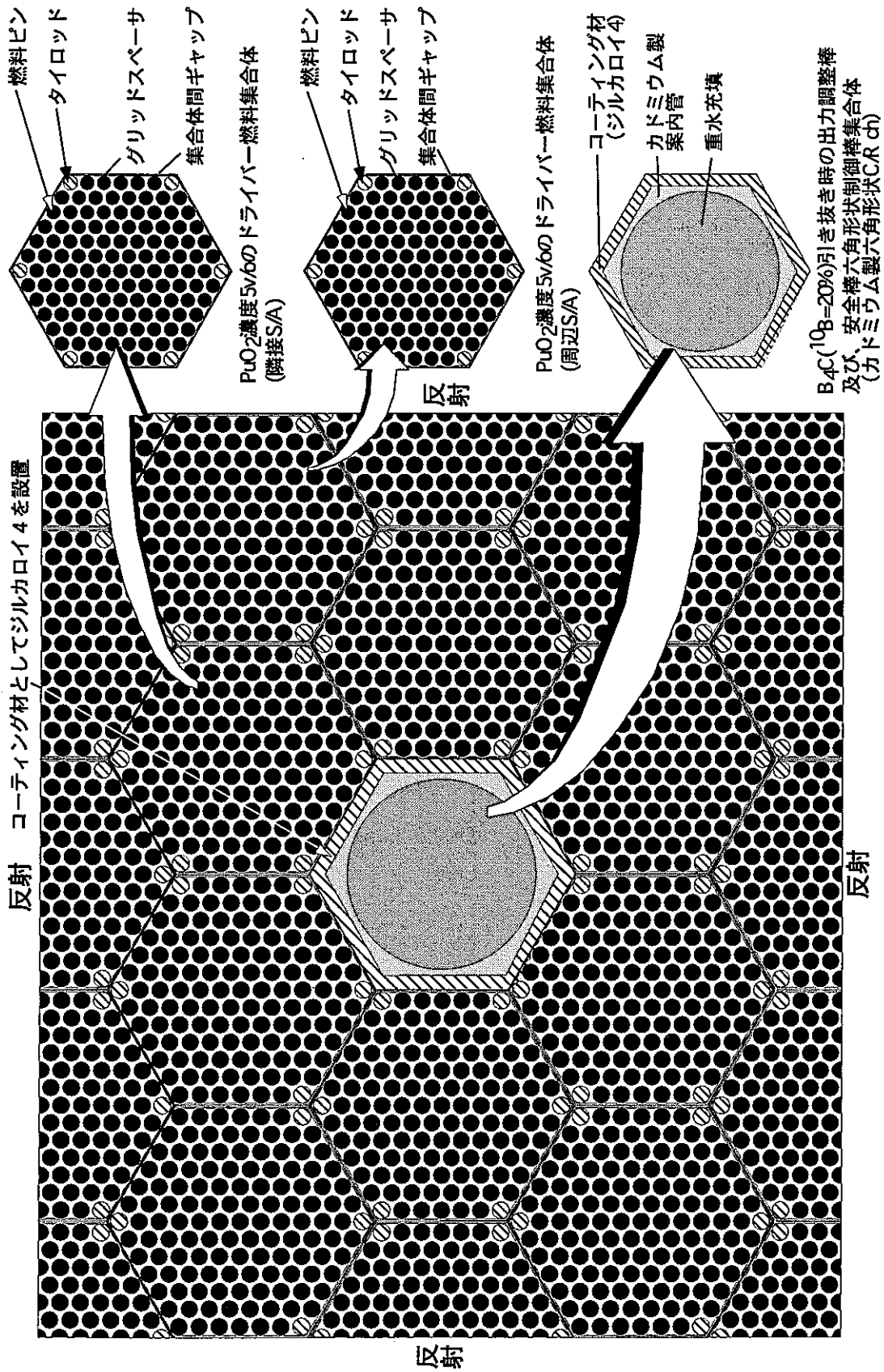


図 6.4.1-1 制御棒引き抜き時の2次元XY幾何形状及び計算条件図
(カドミウム製六角形状案内管方案)

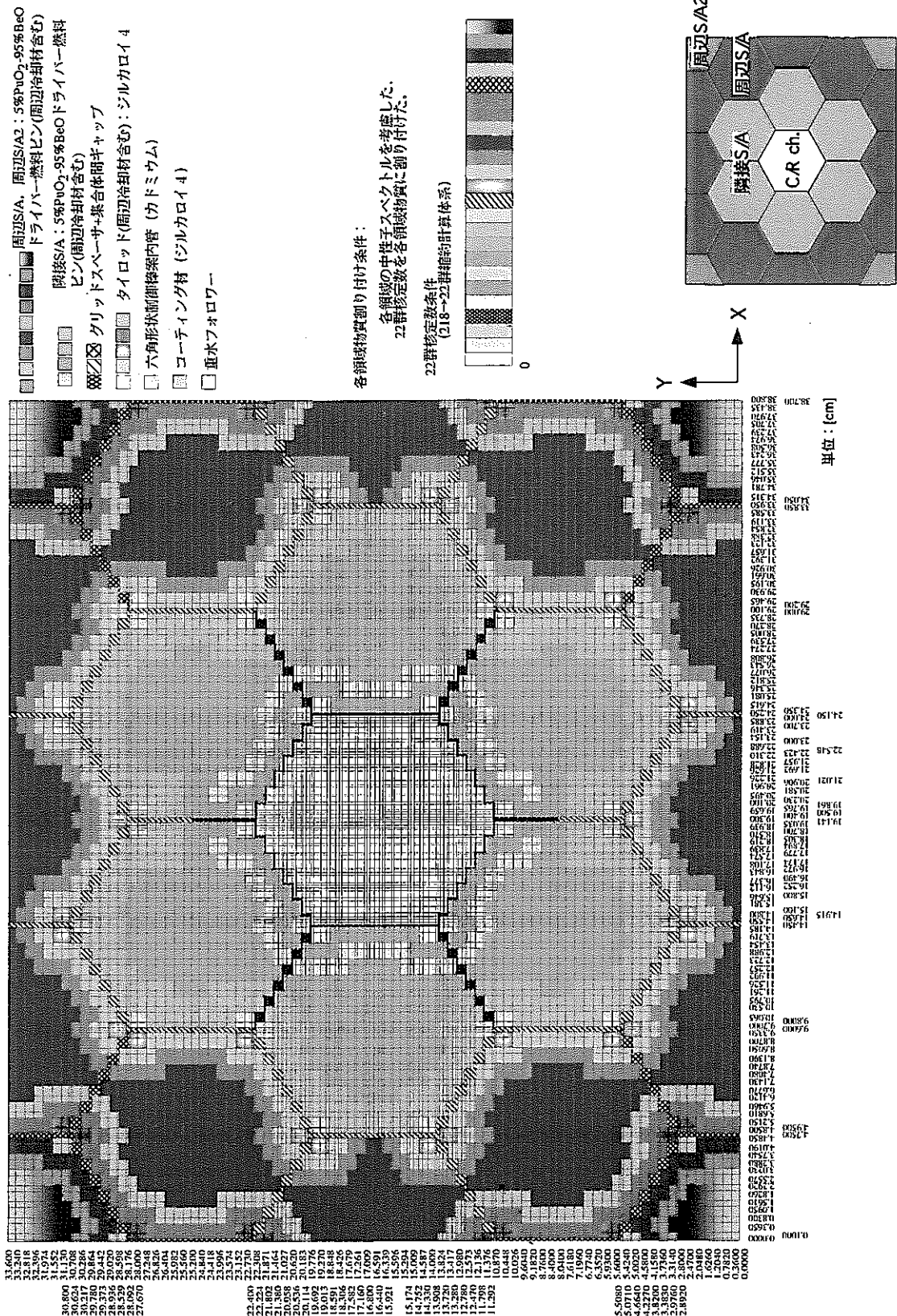


図 6.4.1-2 制御棒引き抜き時の2次元XY計算体系及び計算条件 (カドミウム製六角形状態案内管方策)

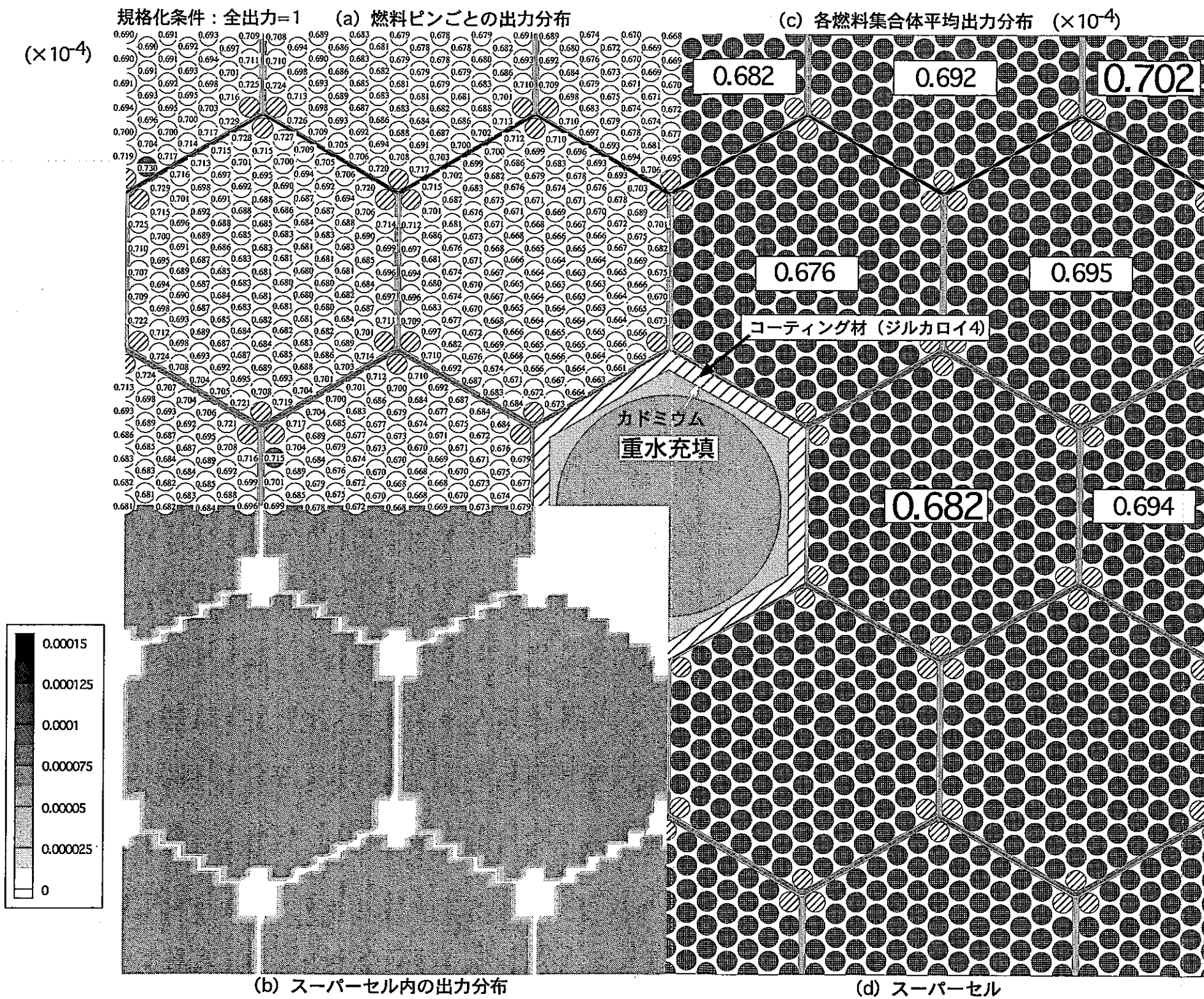


図 6.4.2-1 制御棒引き抜き時の相対出力分布 (カドミウム製六角形状案内管方策：X方向におけるカドミウム厚 0.3cm^t 、コーティング材の厚み 0.55cm^t とした場合)

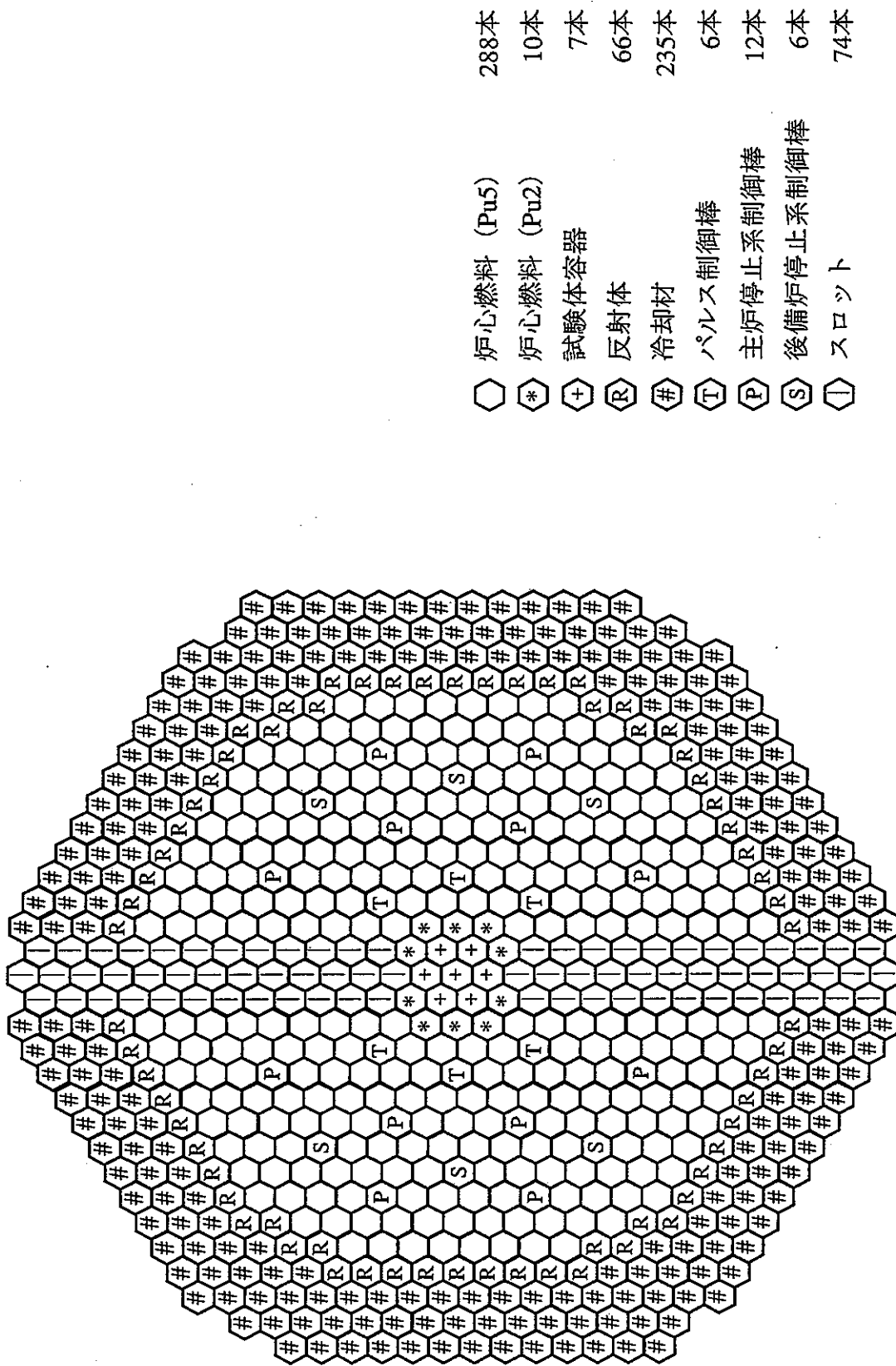
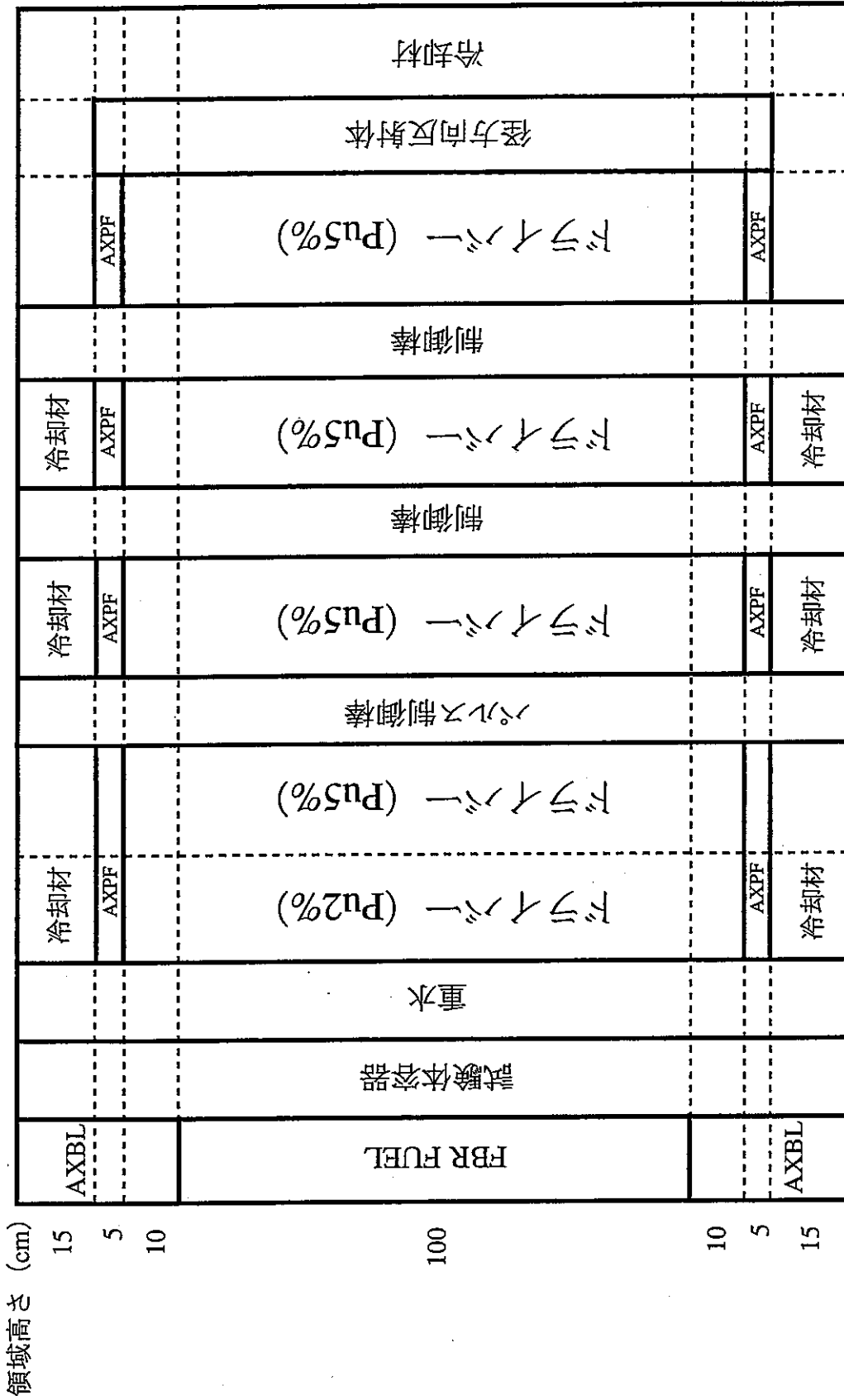


図6.4.2-2 制御棒反応度価値解析に用いた炉心体系水平断面図



AXBL：軸ブランクセット，AXRF：軸反射体

図6.4.2-3 制御棒反応度価値解析に用いた炉心体系縦断面図（円柱形状）

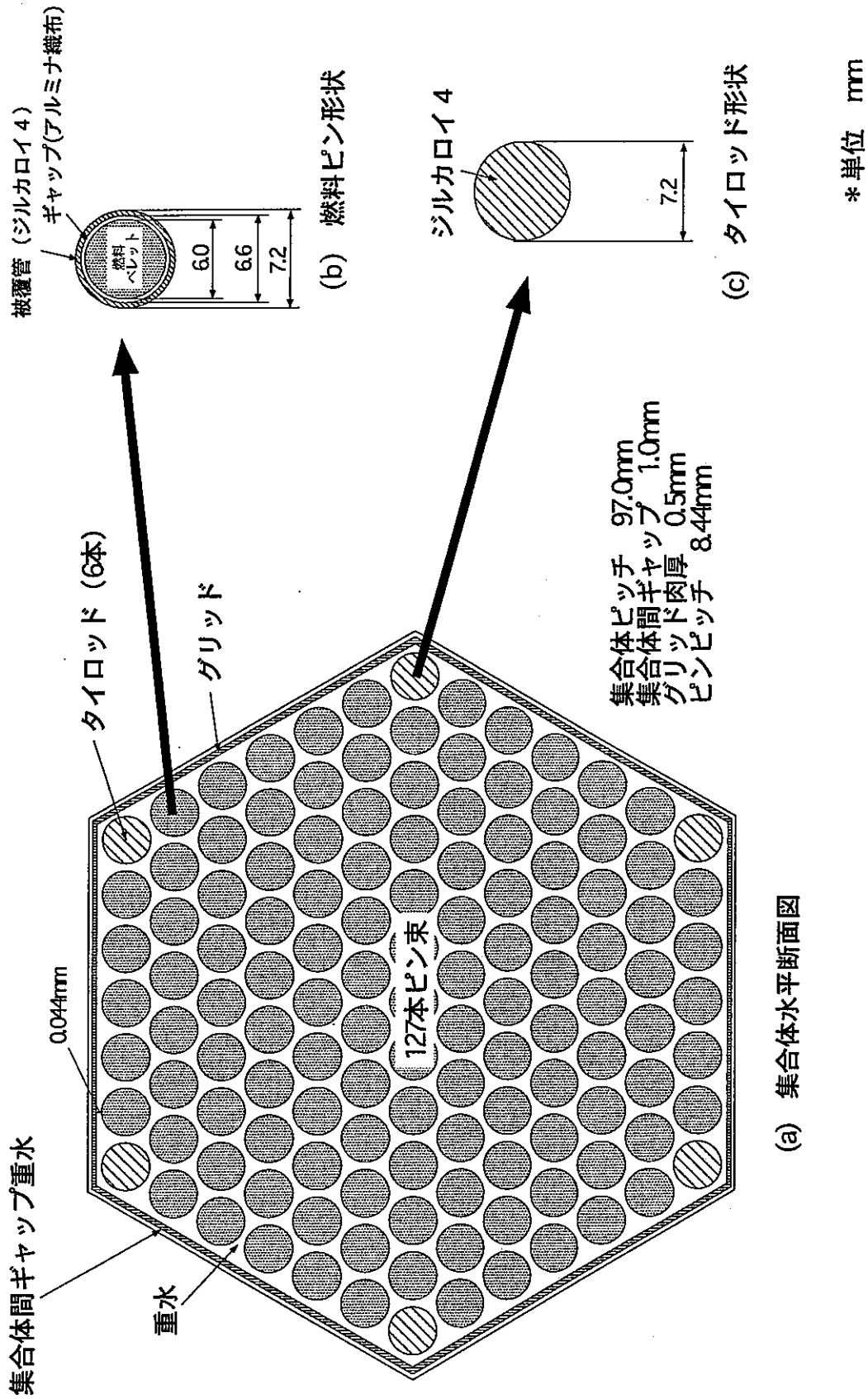
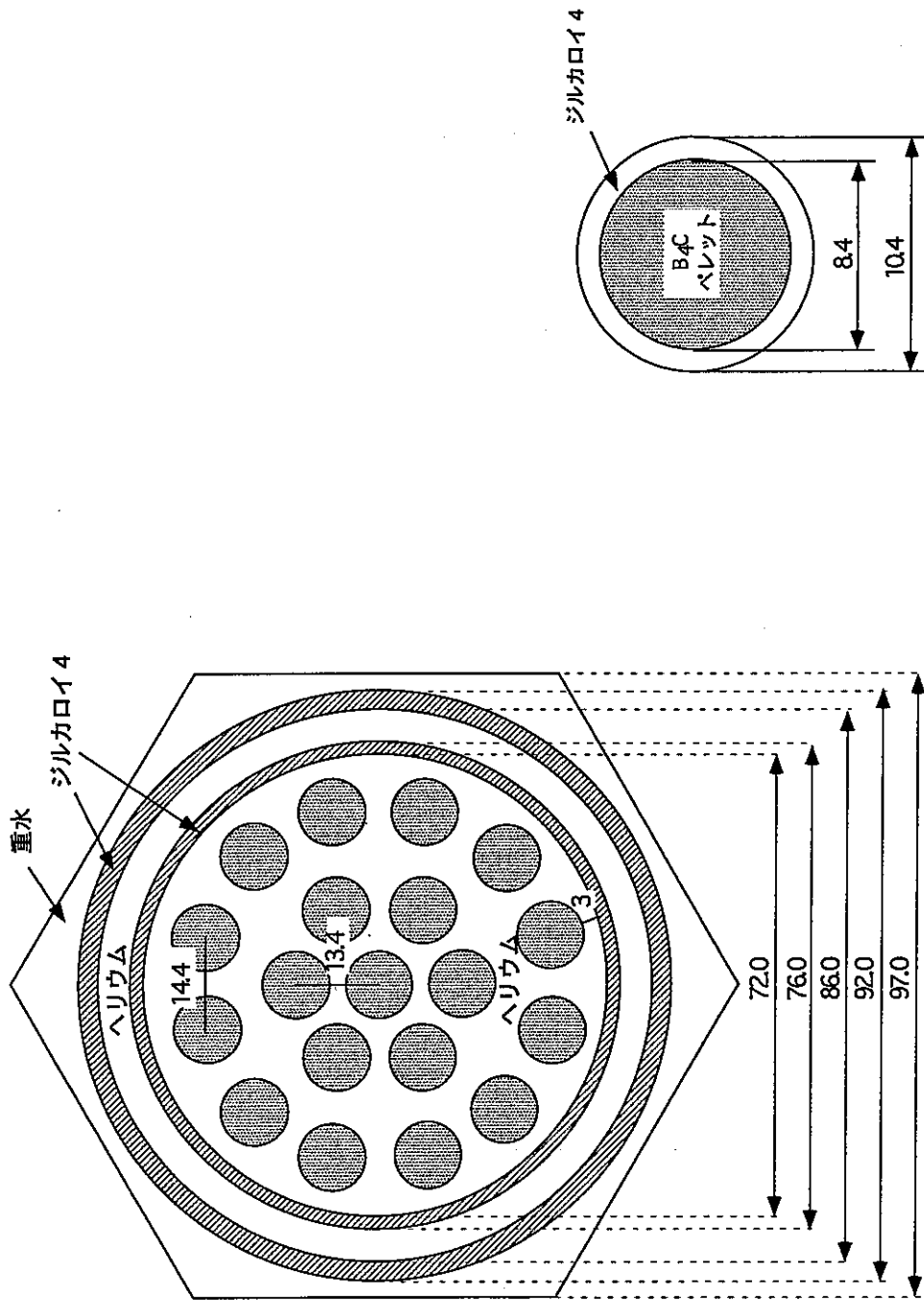


図 6.4.2-4 制御棒反応度値解析に用いたドライバ燃料ピン及び集合体形状



(a) 集合体水平断面図

(b) ピン形状

単位 : mm

図 6.4.2-5 制御棒反応度価値解析に用いた主・後備炉停止系制御棒集合体の水平断面図

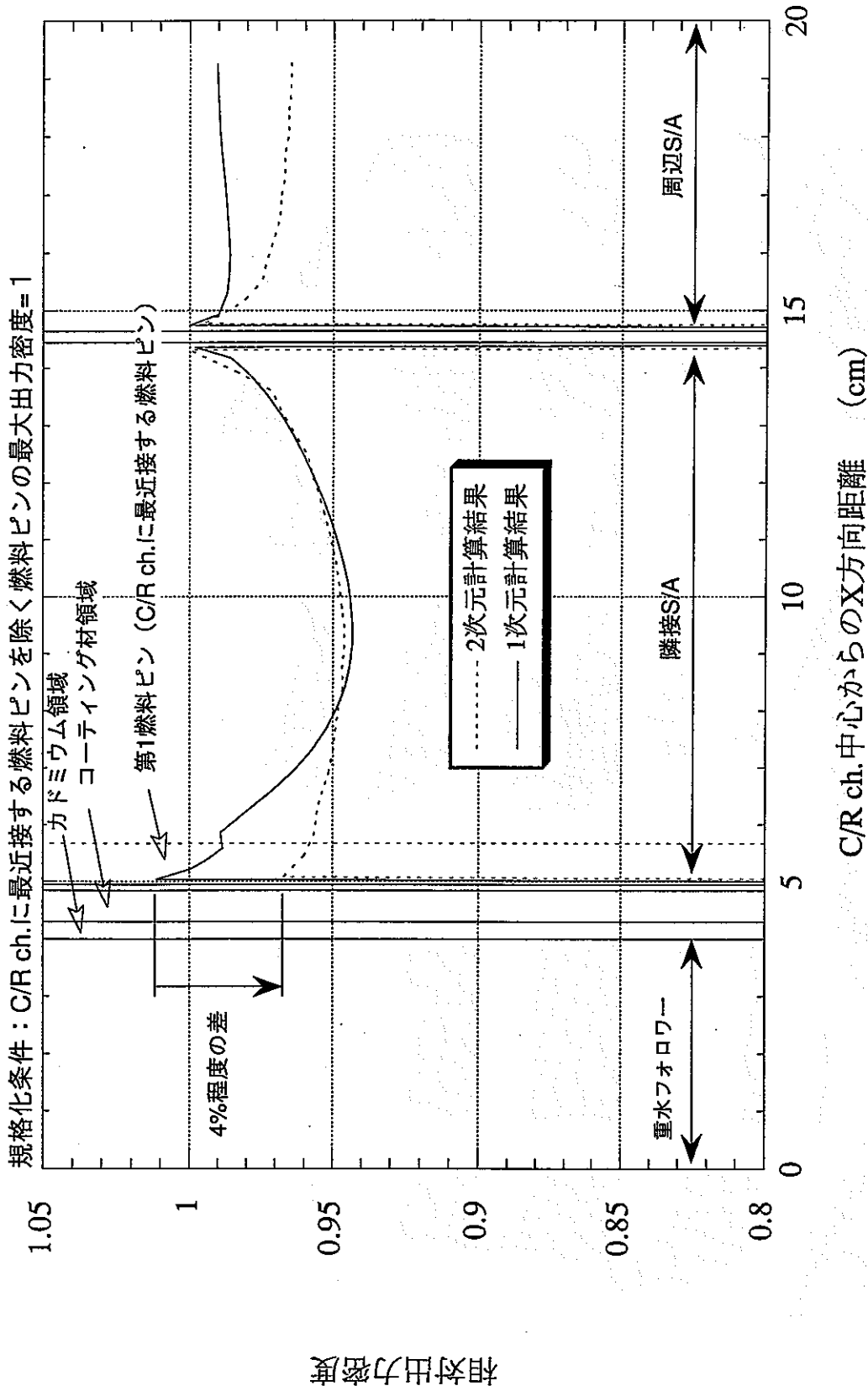


図6.4.2-6 カドミウム厚を0.3cm^tとした時のX方向における
1次元及び2次元計算による相対出力密度分布の比較

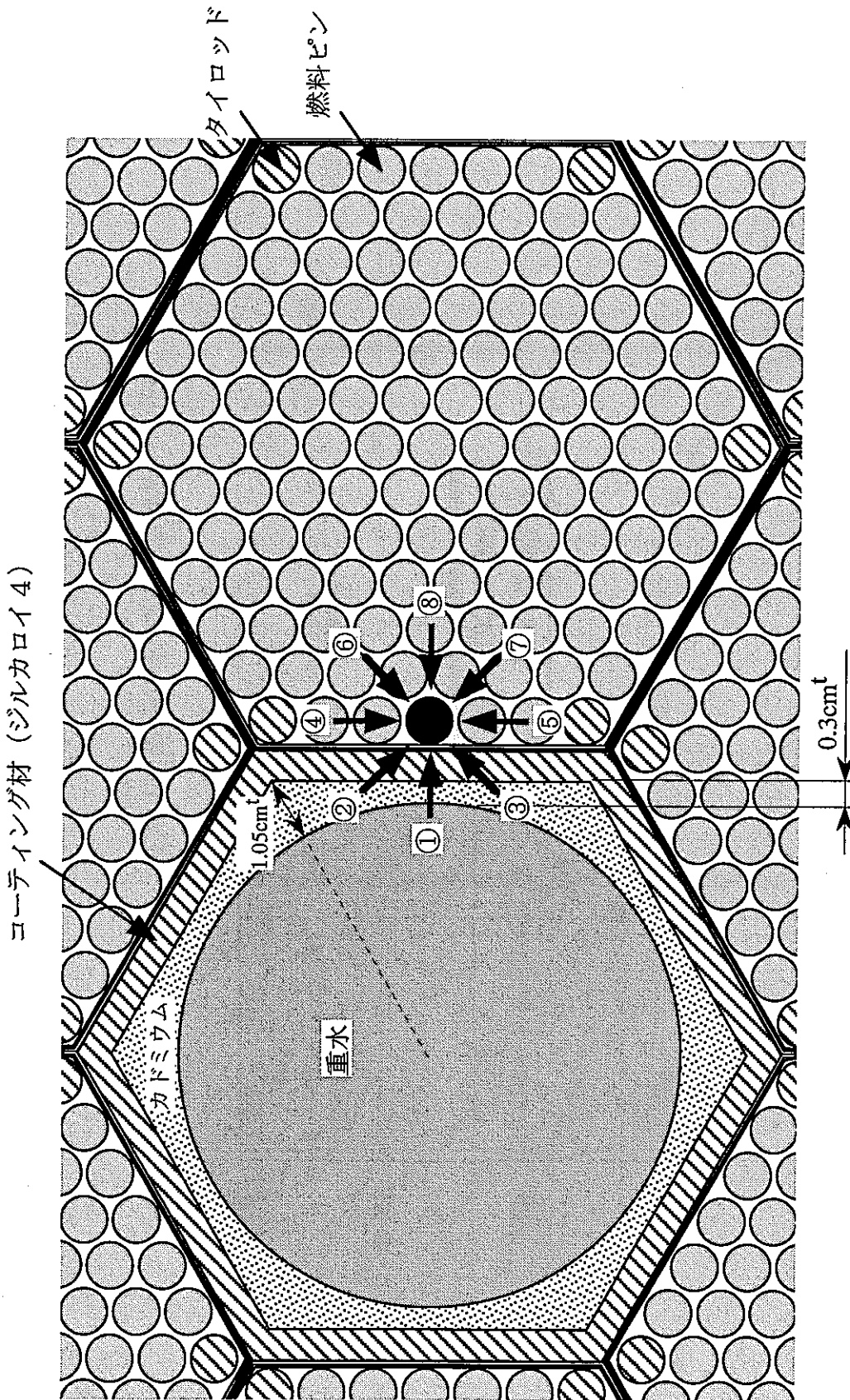


図6.4.2-7 燃料ピンの出力密度に対する流入中性子の寄与

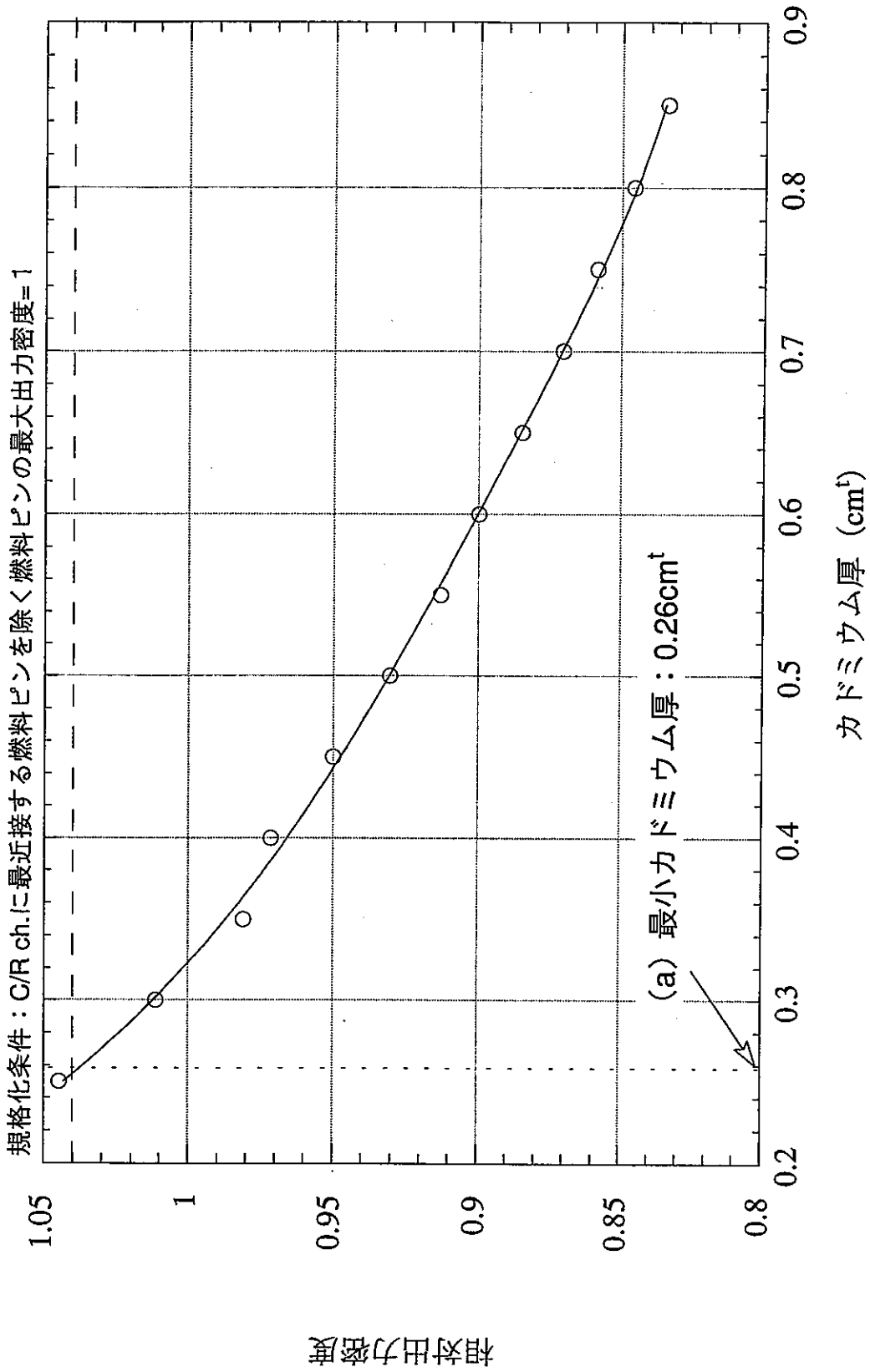


図6.4.2-8 カドミウム厚と第1燃料ピンにおける出力密度との関係

付録1 B₄C 制御棒チャンネルの発熱密度

1. 概要

制御棒構造の具体化においては、制御棒チャンネルの除熱性確保に十分配慮することが必要である。

そこで、現行の SERAPH 設計研究において、原子炉起動や出力調整・ランプ状反応度印加用として検討を進めている B₄C 制御棒チャンネルの発熱密度を算出することとした。

2. 計算式及び条件

B₄C 制御棒チャンネル内の発熱は ¹⁰B の (n, α) 反応に基づく。エネルギー E の入射中性子と ¹⁰B との (n, α) 反応 1 回当たりに生じる発熱量は 2.78+E[MeV]であることが知られている⁽¹⁾。したがって、B₄C 制御棒チャンネル内の発熱密度 Q[W/cm³]は、1MeV=1.6×10⁻¹³J を考慮し、次式で与えられる。

$$Q = \sum_g \Sigma_a^g(\mathbf{r}) \phi^g(\mathbf{r}) (2.78 + E_{ave}^g) \cdot 1.6 \times 10^{-13} \quad \mathbf{r} \in B_4C \quad (1)$$

ここで、

$\Sigma_a^g(\mathbf{r})$: 位置 \mathbf{r} における g 群マクロ吸収断面積

$\phi^g(\mathbf{r})$: 位置 \mathbf{r} における g 群中性子束

E_{ave}^g : g 群の平均エネルギー

である。

ところで、(1)式中の $\Sigma_a^g(\mathbf{r}) \phi^g(\mathbf{r})$ において、ここでは簡易的な評価を行うため、 $\Sigma_a^g(\mathbf{r})$ については B₄C ペレットの吸収断面積 ($\Sigma_a^g(B_4C)$ と記す) を、 $\phi^g(\mathbf{r})$ についてはドライバー炉心平均中性子束 ($\phi^g(\text{driver})$ と記す) を

それぞれ用いることとすると、(1)式は、

$$Q = \sum_g \Sigma_a^g (B_4C) \phi^g (\text{driver}) (2.78 + E_{ave}^g) \cdot 1.6 \times 10^{-13} \quad (2)$$

と表される。ただし、 E_{ave}^g については、ここでは g 群の上限エネルギー値と下限エネルギー値の加算平均で表すこととした。

(2)式で表される発熱密度 Q を算出するのに用いた計算条件は以下の通りである。

- ・ ^{10}B 濃度 : 19.8w/o (天然ボロン)
- ・ ドライバー炉心平均中性子束 $\phi^g(\text{driver})$: $1.0 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{sec}$

なお、 B_4C ペレットのマクロ吸収断面積 $\Sigma_a^g (B_4C)$ 、及びドライバー炉心平均中性子束 $\phi^g(\text{driver})$ のエネルギー分布はともに SCALE コードシステムにより作成された 218 群のデータを使用した。

3. 計算結果及び考察

(2)式を用いて算出した Q の値は 339.2W/cm^3 となった。これは、現行 SERAPH 炉心のドライバー燃料の発熱密度 ($250 \sim 350 \text{W/cm}^3$ 程度) と同程度であり、制御棒チャンネルの除熱性に対するインパクトの観点からは発熱量として有意な値である。

代表的な大型高速炉における制御棒要素発熱密度が $\sim 100 \text{W/cm}^3$ 程度であることを考慮すれば、ここで得られた発熱密度はその 3 倍程度以上に相当する。

この要因は次のように考えられる。

B_4C ペレット内における中性子吸収反応率 R は次式で表される。

$$R = \sum_g \sum_a^g \phi^g \quad (3)$$

表記上簡単のため、式(3)の空間位置を表す変数は省略した。ただし、実際の B_4C ペレット内における中性子束分布は B_4C ペレット表面から中心に向かって歪むため、(3)式の右辺で表された反応率は B_4C ペレット内で空間依存性を示す（表面から中心に向かうにつれ反応率は下がる）。すなわち、 B_4C ペレット内での中性子束を平坦と仮定した場合に比べ反応率は実効的に下がることになる。この中性子束の歪みが反応率に及ぼす効果を Σ_a^g の中で考慮することとした。

(1)式の右辺を反応率が保存されるように 1 群に縮約した吸収断面積で表すと、次のようになる。

$$R = \langle \Sigma_a \rangle \sum_g \phi^g \equiv \langle \Sigma_a \rangle \langle \phi \rangle \quad (4)$$

ここに、 $\langle \Sigma_a \rangle$ は 1 群に縮約されたマクロ吸収断面積である。また、 ϕ^g のエネルギー群和を $\langle \phi \rangle$ と表記した。

ここで、(4)式の右辺の $\langle \Sigma_a \rangle$ 及び $\langle \phi \rangle$ について、SERAPH 炉心と代表的な高速炉とで以下のように比較してみる。

まず $\langle \Sigma_a \rangle$ について考える。 B_4C ペレットの吸収断面積は、図 A1.3-1 に示すように広いエネルギー範囲にわたり $1/v$ 法則にしたがった特性を有している。これを図 A1.3-2 に示す SERAPH ドライバー炉心領域の中性子スペクトル、及び高速炉の中性子スペクトル（SERAPH 炉心の解析で用いている FBR19 本ピン新燃料のスペクトルを代用）の各々で 1 群に縮約した結果、それぞれ 0.761cm^{-1} 、 0.054cm^{-1} となった。したがって、 ^{10}B の濃度が同じであれば、SERAPH のド

ライバー炉心環境下では高速炉の炉心環境下に比べ、 $\langle \Sigma_a \rangle$ は 15 倍程度となる。ところが、通常の高速炉の炉心設計では、主系統制御棒を例にとると ^{10}B の濃度は天然ボロン濃度の 1~2 倍程度とされている。 B_4C ペレット内での実効的な反応率、(3)式で言えば右辺の Σ_a^{eff} 、(4)式で言えば右辺の $\langle \Sigma_a \rangle$ は、吸収体内での中性子束の空間歪みに起因して ^{10}B の濃度そのものには比例せず、その平方根に比例するという高速炉の特性⁽²⁾を考慮すると、SERAPH の $\langle \Sigma_a \rangle$ を 15 とした場合、高速炉のそれは 1~1.4 程度となる。

次に、 $\langle \phi \rangle$ については、SERAPH では $\sim 1 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{sec}$ 程度であり、高速炉では通常 $3 \sim 4 \times 10^{15} \text{n/cm}^2 \text{sec}$ 程度とされている。

以上のことから、(4)式で表される吸収反応率を SERAPH と高速炉で比較すると下表のようになる（数値はいずれも相対値）。

	SERAPH	高速炉
$\langle \Sigma_a \rangle$	15	1~1.4
$\langle \phi \rangle$	1	3~4
R	15	3~5.6

すなわち、SERAPH は高速炉に比べ、 B_4C ペレット内での吸収反応率は 2.7~5 倍程度になるものと考えられる。

B_4C ペレット内での発熱密度は吸収反応率にほぼ比例するため、発熱密度についても SERAPH は高速炉の 2.7~5 倍程度になるものと考えられる。

付録 1 の参考文献

- (1) プライス, “放射線計測”, コロナ社 (1996).
- (2) J. L. Rowlands, “Physics of Fast Reactor Control Rods,” Progress in Nuclear Energy, Vol. 16, No. 3, pp. 287-321 (1985).

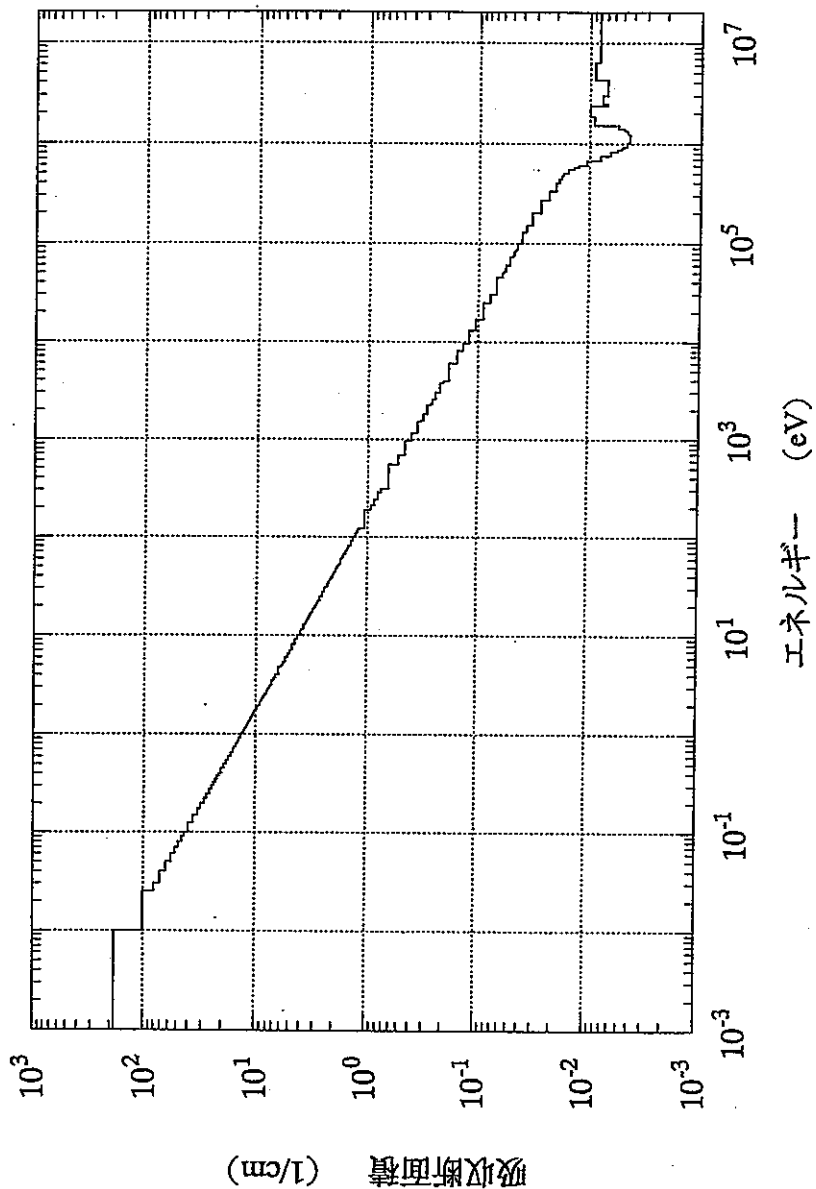


図 A1.3-1 B₄Cペレットのマクロ吸収断面積 (¹⁰B濃度 : 19.8w/o)

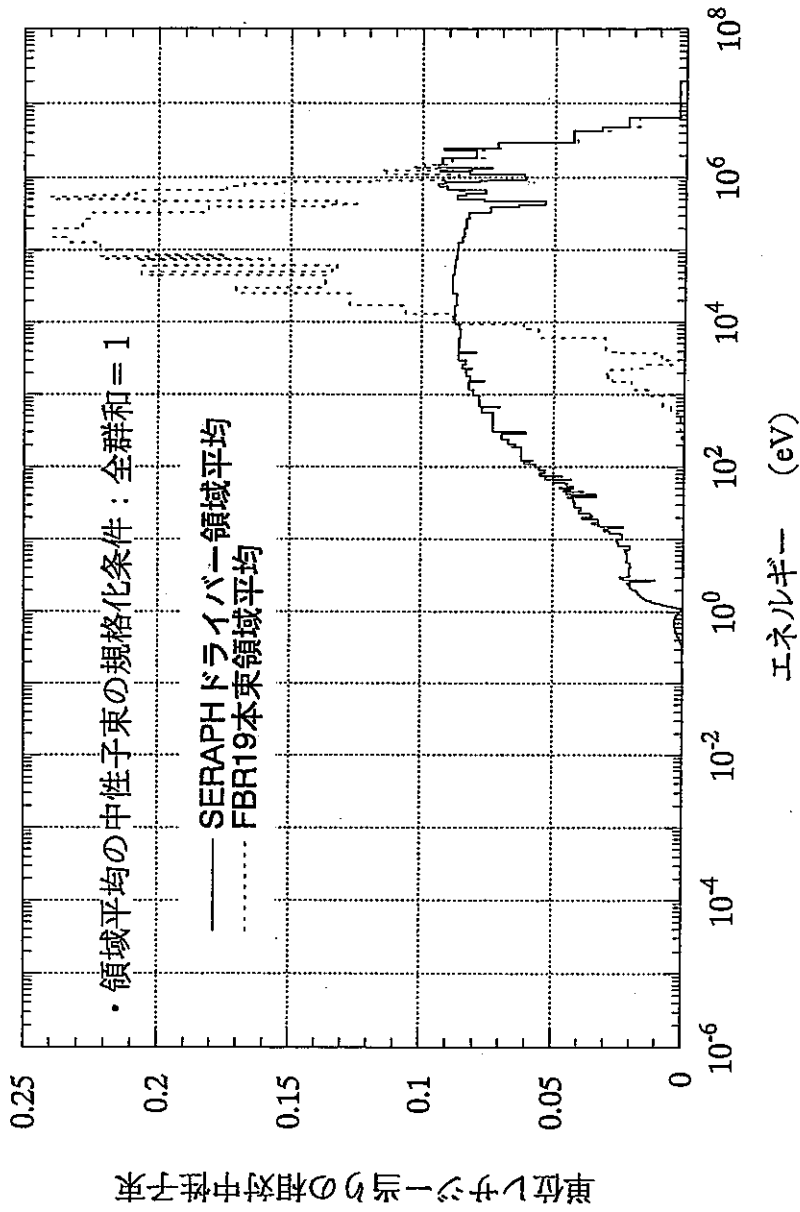


図 A1.3-2 SERAPH ドライバ炉領域と代表的な高速炉の炉心領域における、領域平均
中性子スペクトル分布の比較

付録2 TWOTRAN-II コードの加速法の修正について

- カドミウムピン置換方策の制御棒引き抜き状態において発生した 未収束の回避対策 -

TWOTRAN-II コードを用いた2次元XY体系スーパーセル計算をカドミウムピン置換方策の制御棒引き抜き状態のケースに対して行ったところ、内側及び外側反復計算の収束性を速めるために採用されている粗メッシュリバランス法(加速法)の計算サブルーチン TEST にて未収束が生じた。

このルーチンは、1回の外側反復計算ごとに体系全体の粗メッシュのリバランス固有値を求める反復計算を行うものである。現行 TWOTRAN-II では、最初の2回の外側反復計算までに対しこのリバランス反復計算が行われる。

ところで、ソースプログラムを調べたところ、リバランス反復計算に関して以下のことがわかった。

- (1) リバランス反復回数に対する打ち切り制限を入力で与えることができず、コード内でも途中で反復を打ち切る処理が考慮されていない^(注)。
- (2) 内側反復、外側反復、リバランス反復の各々に対する収束判定条件を与える変数 EPSI, EPSO, EPS には、ユーザーが変数 EPSX に対して入力で与える値がコード内でそのまま自動的にセットされる。すなわち、内側反復、外側反復と異なる収束判定条件をリバランス反復に対し入力で与えることができない。

上記(1)のため、リバランス反復は収束判定条件を満足しない限り何回でも繰り返されることとなり、最悪の場合未収束に陥る。本研究で検討したカドミウムピン置換方策の制御棒引き抜き状態のケースは、まさにこの未収束に陥る

典型例であったといえる。

リバランス反復計算において未収束を回避するには、

- (A) リバランス反復回数の打ち切り制限を入力で与える、あるいはコード内にデフォルト値を設定するといったコードの改修を行う。
- (B) リバランス反復の収束判定条件を内側反復、外側反復に比べて緩やかにするようコードを改修する。

といった方法が考えられるが、ここでは (B) の方法について検討した。具体的には、リバランス反復計算の収束判定条件のみが 1 桁緩められるよう (EPS×10.0 を EPSX のみにセット)、現行 TWOTRAN- II コードを改修した。

改修した TWOTRAN- II コードをカドミウムピン置換方策の制御棒引き抜き状態を対象とした 2 次元 XY 計算に適用したところ、既に図 4.3.2-1 に示した出力密度分布の計算結果に見るように収束解が得られた。したがって、ここで行った改修は、カドミウムに代表される強い中性子吸収材と燃料ピンが接近した領域を含むような体系に対しても計算の収束性改善に有効に機能するといえる。

さらに、ここで行った改修が得られた収束解の精度に影響を与えないことを確認するため、4 章で検討したチタンピン置換方策の制御棒引き抜き状態を表す XY 体系に対し、改修した TWOTRAN- II コードを適用し、改修前のコードを用いて得られた結果と比較することにより収束解への影響を調べた。

その結果、現行の TWOTRAN- II コード (改修前の TWOTRAN- II) で求められた実効増倍率並びに各メッシュでの出力分布に対し、差異がない (入力を与えられた実効増倍率、中性子束の収束判定条件内では差異がない) ことを確

認した。

以上により、ここで行ったリバランス反復計算に対する収束判定条件の緩和方策は、収束解の精度には影響を与えず、かつ強い中性子吸収材の存在により収束しにくいと考えられる体系に対して収束性の改善に有効であることが確認された。

(注) TWOTRAN-II コードの開発当初において、数々の知見を踏まえるとリバランス固有値の計算はたとえ収束判定条件が厳しくても何回かの反復の後に必ず収束するはずだから、通常の内側反復や外側反復で用いる反復回数制限をリバランス反復にはわざわざ設ける必要はない、との判断がなされていたためではないかと思われる。