

資料センター

分類	第1	03
コード	第2	09
	第3	02 第4
ファイルNo.	708	

本資料は 90年 3月 24日付で登録区分、
変更する。

[技術情報室]

修正中性子源増倍法の適用性検討(2)

報 告 書

平成5年3月

株式会社三菱総合研究所

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。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松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, 319-1184
Japan

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

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする社内資料です。 については、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒919-112
福井県敦賀市白木2丁目1番地
動力炉・核燃料開発事業団
高速増殖炉もんじゅ建設所
技術課



P N C T J 2 2 2 2 9 3 - 0 0 1

修正中性子源増倍法の適用性検討（2）

要 旨

佐藤 理*

窪田 龍太郎*

「もんじゅ」炉心性能試験で実施される制御棒等の反応度価値測定に際し、その測定精度を向上させるため、反応度価値測定試験への修正中性子源増倍法（M S M法）の適用を前年度より検討してきた。本年度は、前年度の課題である、M S M法で検出器応答の比から反応度の比を求めるための補正係数の計算精度の向上及び誤差評価を行い、実機での反応度測定の精度向上に資するために以下の検討を行った。

- (1) 固定中性子源問題の解法の検討
- (2) 中性子束計算方法の精度評価
- (3) M S M法の反応度測定精度の予備検討

固定中性子源問題の解法の検討では、補正係数の精度を更に向上させるため、浅い未臨界系を含め、固定中性子源を含む増倍系での中性子束計算方法（収束性）の検討を実施した。固有値計算で得られた中性子束と随伴中性子束を用いて作成した初期中性子束分布を用いることにより、従来難しいとされていた浅い未臨界系での固定線源問題が解けることがわかった。この方法を前年度行ったM S M法の適用性検討に用いることにより、補正係数の計算精度の向上を得た。たとえば、比較的深い未臨界度（実効増倍率 = 0. 9 6 7 1）の体系では、M S M法により予測した反応度と直接計算値との差異が約 7. 3 % から約 0. 4 % に減少した。

M S M法の補正係数を計算する場合には、計算体系を分割し、各々の中性子輸送計算を接続させる必要があるので、X Y 体系と R θ 体系の接続計算による中性子束計算方法の精度の検討を簡単なモデルで行った。その結果、接続を行った場合と行わない場合の中性子

* 株式会社 三菱総合研究所 安全工学研究センター 安全工学研究部

束計算値の差異は収束誤差（1%）以内であり、接続法自体は十分な精度を持つことが確認された。

M S M法の反応度測定精度の予備検討では、実炉心をモンテカルロ計算で模擬して求めた反応度と検出器応答を用いて、M S M法による反応度予測を行った。深い未臨界系では、中性子源増倍法（S M法）を用いると反応度予測値に-22%～+78%のばらつきが生じていたのが、M S M法を用いることによりモンテカルロ計算の統計誤差に起因する誤差（約10%）程度のばらつきに減少した。

修正中性子源増倍法の適用性検討（2）

目 次

1.	はじめに	1
1. 1	目的	1
1. 2	作業の概要	1
1. 3	修正中性子源増倍法の概要	2
2.	固定中性子源問題の解法の検討	4
2. 1	検討の目的	4
2. 2	初期中性子束分布の計算方法の検討	4
2. 2. 1	前年度の中性子束分布計算方法	4
2. 2. 2	基本モード中性子束と固定線源の有る場合の中性子束との関係	5
2. 2. 3	固有値計算結果を用いた初期中性子束分布の計算	6
2. 3	もんじゅ体系への適用	7
2. 4	M S M 法の適用性検討のための検出器応答の再計算	8
2. 5	燃料装荷時の検出器応答の再計算	9
3.	中性子束計算方法の精度評価	42
3. 1	精度評価の目的	42
3. 2	精度評価の方法	42
3. 3	X Y 体系と R θ 体系での中性子束計算値の比較	43
3. 4	R θ 計算の問題点	43

目 次（続き）

4. MSM法の反応度測定精度の予備検討	63
4. 1 検討の目的	63
4. 2 検討方法	63
4. 2. 1 モンテカルロ法による実機模擬計算	63
4. 2. 2 補正係数計算のための2次元S n 計算	64
4. 3 モンテカルロ法による反応度計算値とMSM法による予測値との比較	65
5. まとめ	86
5. 1 結論	86
5. 2 今後の課題	86
参考文献	88

付録 浅い未臨界系での固定中性子源問題のための初期中性子束分布計算コード

INIFLX 使用説明書

図表リスト

－表－

第2. 1表 改良した固定線源計算法による検出器効率と検出器効率比の計算結果	11
第2. 2表 改良した固定線源計算法による検出器応答と検出器応答比の計算結果	13
第2. 3表 修正中性子源増倍法（M S M法）および中性子源増倍法（S M法）による反応度予測値と反応度計算値との比較	15
第2. 4表(a) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉内N I S : 予備穴（A）用炉内検出器 (58° , $R = 270\text{ cm}$)	19
第2. 4表(b) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉内N I S : U S V穴用炉内検出器 (305° , $R = 305\text{ cm}$)	19
第2. 4表(c) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉外N I S : W R - 1 (46° , $R = 577.9\text{ cm}$)	19
第2. 4表(d) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉外N I S : S R - 1 (67° , $R = 552.5\text{ cm}$)	20
第2. 4表(e) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉外N I S : P R - 1 (77° , $R = 587.7\text{ cm}$)	20
第2. 4表(f) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉外N I S : C C - 1 (156° , $R = 615.5\text{ cm}$)	20
第2. 4表(g) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率 炉外N I S : W R - II (167° , $R = 576.0\text{ cm}$)	21

図表リスト

- 表 (続き) -

第2. 4表(h)	改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率	
	炉外N I S : PR-II (193° , $R = 576.0 \text{ cm}$)	..... 21
第2. 4表(i)	改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率	
	炉外N I S : CC-II (204° , $R = 615.5 \text{ cm}$)	..... 21
第2. 4表(j)	改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率	
	炉外N I S : WR-III (283° , $R = 587.4 \text{ cm}$)	..... 22
第2. 4表(k)	改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率	
	炉外N I S : SR-II (293° , $R = 552.5 \text{ cm}$)	..... 22
第2. 4表(l)	改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の計数率計算値 および逆計数率	
	炉外N I S : PR-III (314° , $R = 573.5 \text{ cm}$)	..... 22
第3. 1表	中心からの距離に対するX Y体系 $R\theta$ 体系で計算した全中性子束の比	45
第4. 1表	「もんじゅ」 M S M法解析に用いた材質の原子個数密度組成	68
第4. 2表	M C N P計算に用いた領域毎の体積比	69
第4. 3表	M C N Pで計算した実効増倍率、検出器応答、検出器効率化、 および実効線源強度化	70
第4. 4表	M C N Pで計算した反応度とS N法、M S M法による予測値との比較	71

図表リスト

— 図 —

第2. 1図 改良した初期値計算法を用いたM S M法および燃料装荷時の検出器応答計算の流れ	23
第2. 2図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case1, Keff=0.99753)	24
第2. 3図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case2, Keff=0.99302)	25
第2. 4図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case3, Keff=0.96710)	26
第2. 5図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case4a, Keff=0.99336)	27
第2. 6図 前年度のM S M法の適用性検討のための炉心配置	28
第2. 7図 炉内および炉外N I S検出器の配置	29
第2. 8図(a) 燃料装荷ケース1 (第1ステップ終了時) の炉心配置	30
第2. 8図(b) 燃料装荷ケース2 (第2ステップ終了時) の炉心配置	31
第2. 8図(c) 燃料装荷ケース3 (第4ステップ終了時) の炉心配置	32
第2. 8図(d) 燃料装荷ケース4 (第8ステップ終了時) の炉心配置	33
第2. 9図(a) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆計数率との関係 (炉内NIS)	34
第2. 9図(b) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆計数率との関係 (炉外NIS、広域検出系)	35
第2. 9図(c) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆計数率との関係 (炉外NIS、線源領域検出系)	36
第2. 9図(d) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆計数率との関係 (炉外NIS、出力領域検出系)	37
第2. 10図(a) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉内NIS)	38
第2. 10図(b) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉外NIS、広域検出系)	39
第2. 10図(c) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉外NIS、線源領域検出系)	40

図表リスト

- 図 (続き) -

第2. 10図(d) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉外NIS、出力領域検出系)	41
第3. 1図 中性子束計算方法の精度評価のための仮想体系	46
第3. 2図(a) XY体系とRθ体系で計算した0°方向(+X)の中性子束分布の比較	47
第3. 2図(b) XY体系とRθ体系で計算した90°方向(+Y)の中性子束分布の比較	48
第3. 2図(c) XY体系とRθ体系で計算した180°方向(-X)の中性子束分布の比較	49
第3. 2図(d) XY体系とRθ体系で計算した270°方向(-Y)の中性子束分布の比較	50
第3. 3図 中心からの距離に対するXY体系とRθ体系で計算した全中性子束の比	51
第3. 4図 等方線源を内面から与えたRθ体系	52
第3. 5図(a) DORTとDOT3. 5により計算した等方線源Rθ体系内面($R = 50\text{ cm}$)でのθ方向高速($E > 100\text{ KeV}$)中性子束分布の比較	53
第3. 5図(b) DORTとDOT3. 5により計算した等方線源Rθ体系内面($R = 225\text{ cm}$)でのθ方向高速($E > 100\text{ KeV}$)中性子束分布の比較	54
第3. 6図(a) DORTとDOT3. 5により計算した等方線源Rθ($R = 50\text{ cm}$)でのθ方向中速($0.414\text{ eV} < E < 100\text{ KeV}$)中性子束分布の比較	55
第3. 6図(b) DORTとDOT3. 5により計算した等方線源Rθ($R = 225\text{ cm}$)でのθ方向中速($0.414\text{ eV} < E < 100\text{ KeV}$)中性子束分布の比較	56

図表リスト

- 図 (続き) -

第3. 7図(a) DORTとDOT 3. 5により計算した等方線源Rθ体系内面 (R = 50 cm)でのθ方向熱中性子(E < 0. 414 eV) 中性子束分布の比較	.....	57
第3. 7図(b) DORTとDOT 3. 5により計算した等方線源Rθ体系内面 (R = 225 cm)でのθ方向熱中性子(E < 0. 414 eV) 中性子束分布の比較	.....	58
第3. 8図 反射境界を用いた360° Rθ体系(1/2モデル)	.....	59
第3. 9図 1/2モデル(反射境界)でDORTにより計算した等方線源Rθ体系 内面(R = 255 cm)でのθ方向高速(E > 100 keV)中性子束 分布	.....	60
第3. 10図 1/2モデル(反射境界)でDORTにより計算した等方線源Rθ体系 内面(R = 255 cm)でのθ方向中速(0. 414 eV < E < 100 keV)中性子束分布	.....	61
第3. 11図 1/2モデル(反射境界)でDORTにより計算した等方線源Rθ体系 内面(R = 255 cm)でのθ方向熱(E < 0. 414 eV)中性子束 分布	.....	62
第4. 1図 MSMの精度検討のための炉心配置(ケース1: 基本配置)	.....	72
第4. 2図 MSMの精度検討のための炉心配置(ケース2: 中心CCR全挿入)	.....	73
第4. 3図 MSMの精度検討のための炉心配置 (ケース3: CCR, FCR全挿入)	.....	74
第4. 4図 MSMの精度検討のための炉心配置 (ケース4a: C2, C6全挿入)	.....	75
第4. 5図 MSMの精度検討のための炉心配置 (ケース4b: C2, C5, C6, C7全挿入)	.....	76

図表リスト

- 図 (続き) -

第4. 6図 MCNPによる「もんじゅ」炉心計算モデル（水平断面図）	77
第4. 7図 MCNPによる「もんじゅ」炉心計算モデル（垂直断面図）	78
第4. 8図 MSM法の精度検討のための補正係数計算の流れ	79
第4. 9図 炉心内中性子束・随伴中性子束計算モデル (2次元XY体系：炉心中心～炉容器)	80
第4. 10図 軸方向バックリング計算モデルおよび領域番号 (2次元RZ体系：炉心中心～炉心槽)	81
第4. 11図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度 (ケース2 : K = 0. 9708)	82
第4. 12図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度 (ケース3 : K = 0. 9393)	83
第4. 13図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度 (ケース4a : K = 0. 9683)	84
第4. 14図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度 (ケース4b : K = 0. 9641)	85

1. はじめに

1. 1 目的

前年度の検討において、もんじゅの炉心性能試験で実施される制御棒反応度係数測定の測定精度を向上させるため、修正中性子源増倍法（以下、MSM法）について中性子輸送計算体系の検討、及び補正係数の作成等を行い、その有効性を確認した。

本年度においては、前年度の課題である補正係数の計算精度の向上及び誤差評価を行い、実機での反応度測定の精度向上に資するための検討を行うことを目的とする。

1. 2 作業の概要

本年度の作業は以下の3項目から成る。

(1) 固定中性子源問題の解法の検討

MSM法の補正係数の精度を更に向上させるため、浅い未臨界系を含め、固定中性子源を含む増倍系での中性子束計算方法（収束性）の検討を実施した。

(2) 中性子束計算方法の精度評価

MSM法の補正係数を計算する場合には、計算体系を分割し、各々の中性子輸送計算を接続させる必要があるので、この接続による計算精度を評価した。

(3) MSM法の反応度測定精度の予備検討

MSM法による反応度予測値を3次元モンテカルロ法で計算された反応度と比較し、計算上のMSM法の精度を評価した。

MSM法の補正係数の計算にはオークリッジ国立研究所で開発された2次元S_n法計算コードDORT[1]を用いた。DORTコードは、今まで広く使われてきたDOT3.5コードを改良したものであり、基本的な解法や使用する断面積ファイルの形式などは同一であるが、差分法や加速法に大きな改良が為されている。中性子実効断面積はJENDL-2に基づく中性子100群定数JSDDJ2[2]をRADHEAT-V3[3]システムで処理したものを用いた。

また(3)項で、実炉心を模擬するために用いる3次元モンテカルロ法計算コードには、連

統エネルギーコード M C N P - V 4 [4]を用いた。M C N P - V 4 はロスアラモス国立研究所で開発されたコードであり、M O R S Eなどの多群コードに較べて、連続エネルギー断面積を用いるために、より高い精度の解析が可能である。また、表現可能な3次元形状の範囲も広く、2次元計算よりも実機の形状を詳細に模擬できる。

1. 3 修正中性子源増倍法の概要

修正中性子源増倍法（M S M法）は、2つの未臨界系での反応度の比を、次式で求める反応度測定法である。

$$\$_2 = \$_1 (\varepsilon_2 S_2 R_1 \beta_{\varepsilon_1}) / (\varepsilon_1 S_1 R_2 \beta_{\varepsilon_2}) \quad \dots \quad (1. 1)$$

ここで、 $\$_1$ と $\$_2$ は基準炉心（体系1）と反応度を求める炉心（体系2）のドル単位の反応度である。それぞれの炉心の実効遅発中性子割合 β_{ε_1} と β_{ε_2} は別途求められるものとして、M S M法により測定される $\Delta k / k$ 単位の反応度は以下のように計算できる。

$$\rho_2^{\text{MSM}} = \rho_1 (\varepsilon_2 S_2 R_1) / (\varepsilon_1 S_1 R_2) \quad \dots \quad (1. 2)$$

すなわち、

$$\rho_2^{\text{MSM}} / \rho_1 = (\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cdot (S_2 / S_1) \cdot (R_1 / R_2) \quad \dots \quad (1. 3)$$

ここで、

ρ_1 : 体系1の反応度 ($\Delta k / k$) (測定値)

ρ_2^{MSM} : M S M法による体系2の反応度予測値 ($\Delta k / k$)

ε_1 : 体系1での検出器の検出効率 (計算値)

ε_2 : 体系2での検出器の検出効率 (計算値)

S_1 : 体系1での実効線源強度

$$= S \frac{\text{固定中性子源の平均インポータンス} (\overline{\phi}, *_1)}{\text{核分裂源の平均インポータンス} (\overline{\phi}, *_1)} \quad (1. 4)$$

S : 全固定中性子源強度 = $\int s dv$

$$\overline{\phi}, *_1 = \int \phi^+ *_1 \cdot s dv / \int s dv \quad (1. 5)$$

$$\overline{\phi}, *_1 = \int \phi^+ *_1 \cdot \nu \Sigma_i \cdot \phi_i dv / \int \nu \Sigma_i \cdot \phi_i dv \quad (1. 6)$$

s : 固定中性子源分布

ϕ_{+1} : インポータンス分布 (計算値)

$\nu \Sigma_t$: (1核分裂当たり中性子発生数) × (巨視的核分裂断面積)

(1. 4), (1. 5) 式の積分は、全炉心に関する積分を表し、中性子エネルギーに関する積分も含む。

S_2 : 体系 2 での実効線源強度

R_1 : 体系 1 での検出器計数率 (測定値)

R_2 : 体系 2 での検出器計数率 (測定値)

(1. 3) ~ (1. 5) 式より、実効線源強度比は次式で求められる。

$$(S_2/S_1) = \frac{\int \nu \Sigma_t \cdot \phi_2 dv}{\int \phi_{+2}^+ \cdot \nu \Sigma_t \cdot \phi_2 dv} \cdot \frac{\int \phi_{+2}^+ \cdot s dv}{\int \phi_{+1}^+ \cdot s dv} \cdot \frac{\int \phi_{+1}^+ \cdot \nu \Sigma_t \cdot \phi_1 dv}{\int \nu \Sigma_t \cdot \phi_1 dv} \quad \dots \quad (1. 7)$$

また、2 体系間の検出効率の比は、 $\Sigma_a(E)$ を検出器のエネルギー E の中性子に対する応答関数として、次式で求められる。

$$(\varepsilon_2/\varepsilon_1) = \frac{\int \Sigma_a(E) \phi_2(E) dE}{\int \nu \Sigma_t \cdot \phi_2 dv} \cdot \frac{\int \nu \Sigma_t \cdot \phi_1 dv}{\int \Sigma_a(E) \phi_1(E) dE} \quad \dots \quad (1. 8)$$

すなわち、実効線源強度比と検出器効率比は、2 つの体系の Forward および Adjoint 計算で得られた中性子束、随伴中性子束の計算値により求まる。

一方、通常の中性子源増倍法 (SM 法) による反応度 ρ_2^{SM} は次式で求められる。

$$\rho_2^{SM} = \rho_1 \cdot R_1 / R_2 \quad \dots \quad (1. 9)$$

MSM 法を用いて、測定された検出器応答の比から反応度を求めるための補正係数 F は ρ_2^{SM} と ρ_2^{MSM} の比となる。 (1. 2) 式と (1. 7) ~ (1. 9) 式から F は次式で計算できる。

$$F = (\varepsilon_2/\varepsilon_1) \cdot (S_2/S_1)$$

$$= \frac{\int \Sigma_a(E) \phi_2(E) dE}{\int \phi_{+2}^+ \cdot \nu \Sigma_t \cdot \phi_2 dv} \cdot \frac{\int \phi_{+2}^+ \cdot s dv}{\int \phi_{+1}^+ \cdot s dv} \cdot \frac{\int \phi_{+1}^+ \cdot \nu \Sigma_t \cdot \phi_1 dv}{\int \Sigma_a(E) \phi_1(E) dE} \quad (1. 10)$$

2. 固定中性子源問題の解法の検討

2. 1 検討の目的

前年度のM S M法の適用性検討のための中性子束分布計算では、固定中性子源を含む増倍系の中性子束計算の収束が得られなかった。前年度の検討では、M S M法による反応度予測値と直接計算による反応度予測値との差異が見られたが、これは固定中性子源の在る系の中性子束分布に、固有値計算で得られた基本モード中性子束分布を代用したためと考えられる。M S M法の補正係数の精度を向上するためには、浅い未臨界系での固定線源計算による中性子束計算方法の検討が必要となる。

そこで、初期中性子束分布を適切に設定することにより、固定線源を含む浅い未臨界系の外部反復計算において、早い収束が得られる方法を考案した。

この方法を用いて、「M S M法の適用性検討(PNC PJ2222 92-001)」[5]で計算した検出器応答および実効中性子源強度、「燃料装荷時の検出器応答計算(PNC PJ2222 92-002)」[6]で計算した検出器応答の再計算を行った。

2. 2 初期中性子束分布の計算方法の検討

2. 2. 1 前年度の中性子束分布計算方法

前年度は、固定中性子源問題の外部反復計算を行わずに、以下の方法で核分裂中性子の寄与 ϕ_i を求めた。

$$\phi_i = \frac{S}{1 - k} \phi_i / \int_r \nu \sum_i \phi_i dr \quad \dots (2. 1)$$

ここで、

ϕ_i : 炉心中での核分裂により生じる中性子束

S : 炉心全体で積分した中性子源強度

k : この炉心の実効増倍率

ϕ_1 : 固有値計算 ($\lambda - m o d e$ 計算) で得られた基本モード中性子束分布

(2. 1) 式は、固定中性子源が存在する場合でも、炉心内外の中性子束分布は、基本モード中性子束分布と大きく変わらないという仮定に基づいている。

2. 2. 2 基本モード中性子束と固定線源の有る場合の中性子束との関係

浅い未臨界系では、固有値計算で得られる基本モードの中性子束と、これに固定中性子源を入れた体系の中性子束の相対的な空間分布は近いものになると考えられる。拡散計算や輸送計算では、基本モード中性子束は核分裂中性子発生数を 1 に規格化した値として得られる。したがって、基本モード中性子束と固定線源の有る場合の中性子束の絶対値の比を求めれば、基本モード中性子束分布にこの比を一律に乘じた中性子束分布を初期値として外部反復計算を行うことにより、早い収束が得られると考えられる。以下では、この比を求める方法について検討する。

簡単のために、以下の拡散方程式のオペレータ M を用いて、摂動論により、反応度と基本モード中性子束および固定線源が有る場合の中性子束分布との関係を導出する。

$$M = D \nabla^2 - \Sigma_s + 1/k \cdot \nu \Sigma_f \quad \dots (2. 2)$$

固定中性子源の無い状態では、以下の中性子バランスおよび随伴方程式が成立する。

$$M \phi' = 0 \quad \dots (2. 3)$$

$$M^* \phi^* = 0 \quad \dots (2. 4)$$

固定中性子源 s が在る状態での未臨界系でのオペレータを $M + \Delta M$ とすると、以下の中性子バランスが成り立つ。

$$(M + \Delta M) \phi + s = 0 \quad \dots (2. 5)$$

(2. 4) 式に ϕ を、(2. 5) 式に ϕ^* を乗じて空間とエネルギーについて積分し、両者の差をとると、

$$\int_x \int_z \phi^* \cdot \Delta M \cdot \phi dE dr + \int_x \int_z \phi^* \cdot s dE dr = 0 \quad \dots (2. 6)$$

ここで、拡散オペレータの直交性から、次式を利用した。

$$\int_x \int_z \phi^* \cdot M \cdot \phi - \phi \cdot M \cdot \phi^* dE dr = 0 \quad \dots (2. 7)$$

摂動による系の変化を巨視的核分裂断面積の変化 ($\delta \Sigma_s$)、巨視的吸収断面積の変化 ($\delta \Sigma_f$) とし、実効増倍率 k の変化分を核分裂当たり中性子発生数 ν の変化分 ($\Delta \nu$) とみな

すと、摂動オペレータ ΔM は次式で表わされる。

$$\Delta M = \nu \delta \Sigma_s + \Delta \nu \Sigma_t - \delta \Sigma_s \quad \dots \quad (2.8)$$

摂動後の実効増倍率を k とすると、摂動による反応度 $\rho = \Delta k / k = \Delta \nu / \nu$ であるから、(2.6) 式より、

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot (\delta \Sigma_s - \nu \delta \Sigma_t) dEdr - \int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot s(r, E) dEdr}{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot \chi(E) \int_{E'} \nu \Sigma_t(r, E') \cdot \phi(r, E') dE' dEdr} \quad \dots \quad (2.9)$$

中性子源が加わったことによる吸収断面積と核分裂断面積の変化は無く、摂動オペレータの吸収項 ($\delta \Sigma_s$) と核分裂項 ($\delta \Sigma_t$) は 0 となるから、反応度は次式で計算できる。

$$\frac{\Delta k}{k} = - \frac{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot s(r, E) dEdr}{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot \chi(E) \int_{E'} \nu \Sigma_t(r, E') \cdot \phi(r, E') dE' dEdr} \quad (2.10)$$

2. 2. 3 固有値計算結果を用いた初期中性子束分布の計算

ある未臨界系 (実効増倍率 = K_{eff}) において、反応度 ρ と固定線源の有る場合の中性子束分布および基本モードの中性子束分布との間には、(2.10) 式より次式の関係が得られる。

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{k-1}{k} = - \frac{\langle \phi^* \cdot s \rangle}{\langle \phi^* \cdot \nu \Sigma_t \cdot \phi \rangle} \\ &= - \frac{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot s(r, E) dEdr}{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot \chi(E) \int_{E'} \nu \Sigma_t(r, E') \phi(r, E') dE' dEdr} \quad (2.11) \end{aligned}$$

ここで、

- r : 位置、
- E : 中性子エネルギー、
- $\phi(r, E)$: 固定線源計算により得られた未臨界系の中性子束分布、
- $\phi^*(r, E)$: 基本モード随伴中性子束分布、

$s(r, E)$: 固定線源強度

$\nu \Sigma_i(r, E)$: 入射エネルギー E の中性子による核分裂中性子発生数、

$\chi(E)$: 核分裂中性子スペクトル。

浅い未臨界系では、固定中性子源の有る場合の中性子束分布は、臨界計算で得られる基本モード中性子束分布に近いから、 f を定数として、以下の近似が成り立つ。

$$\phi(r, E') = f \cdot \phi'(r, E) \quad (2.12)$$

ここで、 $\phi'(r, E)$ は基本モード中性子束分布である。

(2.12) 式を (2.11) 式に代入すると、次式により f の値が求められる。

$$f = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot s(r, E) dEdr}{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot \chi(E) \int_{E'} \nu \Sigma_i(r, E') \phi'(r, E') dE' dEdr} \quad (2.13)$$

したがって、初期中性子束分布として、 $f \cdot \phi'(r, E)$ を用いることにより、浅い未臨界系での固定線源による中性子源分布を短い外部反復数で計算することが可能である。

2.3 もんじゅ体系への適用

前年度の「M S M 法適用性検討」に用いた以下の 4 種類の制御棒配置について、上記の固定線源計算方法を適用してその収束性を調べた。

ケース 1 F C R および C C R を炉心内に 50 cm 挿入した場合 : $k_{eff}=0.99753$

ケース 2 中心 C C R を全挿入した場合 : $k_{eff}=0.99302$

ケース 3 C C R, F C R 1 3 本を全挿入した場合 : $k_{eff}=0.96710$

ケース 4 a C₂ および C₆ を全挿入した場合 : $k_{eff}=0.99336$

ケース 1 は基本配置、ケース 2 は対称に制御棒が挿入された浅い未臨界系、ケース 3 は対称に制御棒が挿入された深い未臨界系、ケース 4 a は非対称に制御棒が挿入された浅い未臨界系である。上記のケースで制御棒の対称性および未臨界度によらず、今回の固定中性子源計算方法による収束性の改善されることが確認できるため、非対称に制御棒が挿入された深い未臨界系（ケース 4 b）については収束性の検討を行わなかった。

中性子束分布の計算の手順を第2. 1図に示す。中性子束計算は2次元輸送計算コードDORTを用いて行った。(2. 11)式から求めた初期中性子束分布を用いた場合と用いない場合(通常の固定中性子源問題)の外部反復回数と核分裂中性子源強度の関係を第2. 2図～第2. 5図に示す。初期中性子束分布を用いない場合は、最も深い未臨界系であるケース3で、外部反復回数127回で収束し、その他のケースでは100回以上の外部反復計算を行っても収束が得られなかった。これに対して、初期中性子束分布を(2. 11)式から求めて使用した場合は、13回～39回の外部反復計算で収束が得られた。

2. 4 MSM法の適用性検討のための検出器応答の再計算

前年度の「MSM法の適用性検討(PNC PJ2222 92-001)」に用いた以下の5種類の制御棒配置について、改良した固定線源計算方法を適用した。炉心配置を第2. 6図に、炉内および炉外NIS検出器の配置を第2. 7図に示す。

ケース1	F C R および C C R を炉心内に 50 cm 挿入した場合	: $k_{eff}=0.99753$
ケース2	中心 C C R を全挿入した場合	: $k_{eff}=0.99302$
ケース3	C C R、F C R 13本を全挿入した場合	: $k_{eff}=0.96710$
ケース4 a	C_2 および C_6 を全挿入した場合	: $k_{eff}=0.99336$
ケース4 b	C_2 、 C_6 、 C_5 、 C_7 を全挿入した場合	: $k_{eff}=0.99026$

固定中性子源を考慮して求めた中性子束分布を用いて、MSM法計算のためのパラメータを計算した。以下の表にこれらのパラメータの計算値を示す。

パラメータ	改良した固定線源問題
	<u>計算法による計算値</u>
検出器効率比	第2. 1表
検出器応答比	第2. 2表
実効線源強度、 補正係数、 反応度予測値	第2. 3表

固定中性子源計算で求めた反応度予測値は基本モード中性子束分布を用いた場合よりも直接計算値と良く一致し、特に、比較的深い未臨界系で固定中性子源を考慮した中性子束分布と基本モード中性子束分布の違いの大きいケース3において改善が顕著であり、従来の方法では直接計算値と比較して7.26%の過大評価であったものが、0.4%の違いで良く一致するようになった。

2. 5 燃料装荷時の検出器応答の再計算

前年度の「燃料装荷時の検出器応答計算(PNC PJ2222 92-002)」では(2.1)式により炉体周り各位置での中性子束を計算し、燃料装荷時の検出器応答計算を行った。燃料装荷ステップは以下の4ケースを考えた。

ケース1	第1ステップ終了時	(内側炉心 84体)
ケース2	第2ステップ終了時	(内側炉心108体、外側炉心16体)
ケース3	第4ステップ終了時	(内側炉心108体、外側炉心52体)
ケース4	第8ステップ終了時	(内側炉心108体、外側炉心62体)

上記4ケースの炉心配置を第2.8図に示す。各ケースについて、改良した固定中性子問題計算法を燃料装荷時の検出器応答計算にも適用した。

パラメータ	改良した固定線源問題 <u>計算法による計算値</u>
検出器応答	第2.4表
装荷燃料体数と 逆計数率の関係	第2.9図
実効増倍率と 逆計数率の関係	第2.10図

第2.4表では核分裂中性子源と外部中性子源からの検出器応答への寄与をそれぞれ示した。改良した固定中性子源計算法では双方の中性子源を合わせた検出器応答が計算され

る。このために、別途、初期中性子束分布を0とした外部反復を行わない計算によって、外部中性子源による検出器応答を計算し、外部反復を行った計算による検出器応答との差から核分裂中性子源の寄与を求めた。

第2.1表 改良した固定線源計算法による検出器応答と検出器応答比の計算結果 (1/2)
 (ケース2、3とケース1との比)

検出器	ケース1		ケース2		ケース3	
	検出器応答 R1 cps	検出器応答 R2 cps	検出器応答比 (R2/R1)	検出器応答 R2 cps	検出器応答比 (R2/R1)	
	1E24 B-10 atoms	1E24 B-10 atoms		1E24 B-10 atoms		
炉内NIS (1)	1.89E+07	8.88E+06	0.4691	4.33E+06	0.2286	
	1.06E+07	4.87E+06	0.4610	2.28E+06	0.2156	
炉外NIS (1)	2.08E+04	9.09E+03	0.4380	3.86E+03	0.1861	
	2.78E+04	1.44E+04	0.5181	8.23E+03	0.2963	
	2.41E+04	1.32E+04	0.5471	8.08E+03	0.3357	
	1.26E+04	4.83E+03	0.3846	1.40E+03	0.1115	
	1.66E+04	6.08E+03	0.3665	1.43E+03	0.0863	
	1.57E+04	5.73E+03	0.3650	1.33E+03	0.0846	
	1.40E+04	5.25E+03	0.3759	1.39E+03	0.0995	
	2.48E+04	1.37E+04	0.5509	8.40E+03	0.3389	
	2.70E+04	1.41E+04	0.5199	8.02E+03	0.2966	
	1.97E+04	8.56E+03	0.4349	3.55E+03	0.1802	

炉内NIS (1) : 予備穴 (A) 用炉内検出器 58°, R = 270 cm

(2) : USV穴用炉内検出器 305°, R = 305 cm

炉外NIS (1) : WR-I 46°, R = 577.9 cm

(2) : SR-I 67°, R = 552.5 cm

(3) : PR-I 77°, R = 587.7 cm

(4) : CC-I(PR-IV) 156°, R = 615.5 cm

(5) : WR-II 167°, R = 576.0 cm

(6) : PR-II 193°, R = 576.0 cm

(7) : CC-II(PR-V) 204°, R = 615.5 cm

(8) : WR-III 283°, R = 587.4 cm

(9) : SR-II 293°, R = 552.5 cm

(10) : PR-III 314°, R = 578.5 cm

第2.1表 改良した固定線源計算法による検出器応答と検出器応答比の計算結果 (2/2)
(ケース4a、4bとケース1との比)

検出器	ケース1		ケース4a		ケース4b	
	検出器応答 R1 cps	1E24 B-10 atoms	検出器応答 R2 cps	1E24 B-10 atoms	検出器応答 R2 cps	1E24 B-10 atoms
				(R2/R1)		(R2/R1)
炉内NIS (1)	1.89E+07	8.94E+06	0.4723	6.81E+06	0.3595	
(2)	1.06E+07	5.15E+06	0.4880	4.05E+06	0.3832	
炉外NIS (1)	2.08E+04	9.26E+03	0.4462	6.79E+03	0.3273	
(2)	2.78E+04	1.44E+04	0.5180	1.16E+04	0.4169	
(3)	2.41E+04	1.31E+04	0.5440	1.08E+04	0.4499	
(4)	1.26E+04	4.83E+03	0.3852	3.28E+03	0.2611	
(5)	1.66E+04	6.16E+03	0.3719	4.03E+03	0.2434	
(6)	1.57E+04	5.98E+03	0.3805	3.97E+03	0.2529	
(7)	1.40E+04	5.50E+03	0.3938	3.76E+03	0.2693	
(8)	2.48E+04	1.42E+04	0.5725	1.20E+04	0.4840	
(9)	2.70E+04	1.47E+04	0.5434	1.21E+04	0.4492	
(10)	1.97E+04	9.10E+03	0.4625	6.93E+03	0.3522	

炉内NIS (1) : 予備穴 (A) 用炉内検出器 58°, R = 270 cm
(2) : USV穴用炉内検出器 305°, R = 305 cm
炉外NIS (1) : WR-I 46°, R = 577.9 cm
(2) : SR-I 67°, R = 552.5 cm
(3) : PR-I 77°, R = 587.7 cm
(4) : CC-I(PR-IV) 156°, R = 615.5 cm
(5) : WR-II 167°, R = 576.0 cm
(6) : PR-II 193°, R = 576.0 cm
(7) : CC-II(PR-V) 204°, R = 615.5 cm
(8) : WR-III 283°, R = 587.4 cm
(9) : SR-II 293°, R = 552.5 cm
(10) : PR-III 314°, R = 578.5 cm

第2.2表 改良した固定線源計算法による検出器効率と検出器効率比の計算結果 (1/2)
 (ケース2、3とケース1との比)

検出器	ケース1		ケース2		ケース3	
	検出器効率 ϵ 1 cps / fission	1E24 B-10 atoms	検出器効率 ϵ 2 cps / fission	1E24 B-10 atoms	検出器効率比 $(\epsilon_1 / \epsilon_2)$	検出器効率 ϵ 2 cps / fission
				$(\epsilon_1 / \epsilon_2)$	1E24 B-10 atoms	$(\epsilon_1 / \epsilon_2)$
炉内NIS (1)	1.05E-04	1.36E-04	0.7760	2.96E-04	0.3560	
	5.87E-05	7.44E-05	0.7897	1.56E-04	0.3775	
炉外NIS (1)	1.15E-07	1.39E-07	0.8312	2.64E-07	0.4373	
	1.54E-07	2.20E-07	0.7027	5.62E-07	0.2747	
	1.34E-07	2.01E-07	0.6654	5.52E-07	0.2424	
	6.98E-08	7.38E-08	0.9464	9.57E-08	0.7297	
	9.22E-08	9.28E-08	0.9932	9.78E-08	0.9430	
	8.74E-08	8.76E-08	0.9974	9.09E-08	0.9617	
	7.77E-08	8.02E-08	0.9686	9.50E-08	0.8182	
	1.38E-07	2.09E-07	0.6608	5.74E-07	0.2402	
	1.50E-07	2.15E-07	0.7002	5.48E-07	0.2744	
	1.10E-07	1.31E-07	0.8372	2.43E-07	0.4515	

炉内NIS (1) : 予備穴 (A) 用炉内検出器 58° , $R = 270\text{ cm}$

(2) : USV穴用炉内検出器 305° , $R = 305\text{ cm}$

炉外NIS (1) : WR-I 46° , $R = 577.9\text{ cm}$

(2) : SR-I 67° , $R = 552.5\text{ cm}$

(3) : PR-I 77° , $R = 587.7\text{ cm}$

(4) : CC-I (PR-IV) 156° , $R = 615.5\text{ cm}$

(5) : WR-II 167° , $R = 576.0\text{ cm}$

(6) : PR-II 193° , $R = 576.0\text{ cm}$

(7) : CC-II (PR-V) 204° , $R = 615.5\text{ cm}$

(8) : WR-III 283° , $R = 587.4\text{ cm}$

(9) : SR-II 293° , $R = 552.5\text{ cm}$

(10) : PR-III 314° , $R = 578.5\text{ cm}$

第2.2表 改良した固定線源計算法による検出器効率と検出器効率比の計算結果 (2/2)
 (ケース4a、4bとケース1との比)

検出器	ケース1		ケース4a		ケース4b	
	検出器応答 R1 cps	検出器応答 R2 cps	検出器応答比 (R2/R1)	検出器応答 R2 cps	検出器応答比 (R2/R1)	
	1E24 B-10 atoms	1E24 B-10 atoms	(R2/R1)	1E24 B-10 atoms	(R2/R1)	
炉内NIS (1)	1.05E-04	1.30E-04	0.8086	1.48E-04	0.7112	
	5.87E-05	7.50E-05	0.7827	8.80E-05	0.6672	
炉外NIS (1)	1.15E-07	1.35E-07	0.8560	1.48E-07	0.7812	
	1.54E-07	2.10E-07	0.7373	2.52E-07	0.6132	
	1.34E-07	1.91E-07	0.7020	2.36E-07	0.5683	
	6.98E-08	7.04E-08	0.9915	7.13E-08	0.9792	
	9.22E-08	8.98E-08	1.0270	8.78E-08	1.0503	
	8.74E-08	8.71E-08	1.0037	8.64E-08	1.0109	
	7.77E-08	8.01E-08	0.9698	8.19E-08	0.9494	
	1.38E-07	2.07E-07	0.6671	2.61E-07	0.5282	
	1.50E-07	2.14E-07	0.7029	2.64E-07	0.5692	
	1.10E-07	1.33E-07	0.8258	1.51E-07	0.7260	

炉内NIS (1) : 予備穴 (A) 用炉内検出器 58°、R = 270 cm
 (2) : USV穴用炉内検出器 305°、R = 305 cm
 炉外NIS (1) : WR-I 46°、R = 577.9 cm
 (2) : SR-I 67°、R = 552.5 cm
 (3) : PR-I 77°、R = 587.7 cm
 (4) : CC-I(PR-IV) 156°、R = 615.5 cm
 (5) : WR-II 167°、R = 576.0 cm
 (6) : PR-II 193°、R = 576.0 cm
 (7) : CC-II(PR-V) 204°、R = 615.5 cm
 (8) : WR-III 283°、R = 587.4 cm
 (9) : SR-II 293°、R = 552.5 cm
 (10) : PR-III 314°、R = 578.5 cm

第2.3表 修正中性子源増倍法（MSM法）および中性子源増倍法（SM法）による反応度予測値と反応度計算値との比較 (1/4)

ケース	制御棒状態	直接計算値		実効線源 強度比 S_1/S_2	検出器の 位置	改良した固定線源計算法を用いた場合				λ -mode計算				
		実効増倍率 計算値	反応度 計算値 ρ_c $\% \Delta k/k$			SM法 反応度予測値		補正係数 (ϵ_1/ϵ_2) \times (S_1/S_2)	MSM法 反応度予測値		MSM法 反応度予測値			
						直接計算 反応度 ρ_e $\% \Delta k/k$	との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c		直接計算 反応度 ρ_e $\% \Delta k/k$	との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c	直接計算 反応度 ρ_e $\% \Delta k/k$	との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c		
1	基本配置	0.9975	0.248	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
2	浅い未臨界度 対称制御棒配置	0.9930	0.703	0.9674	炉内NIS (1) (2) 炉外NIS (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)	0.5276 0.5369 0.5651 0.4778 0.4524 0.6435 0.6753 0.6781 0.6585 0.4493 0.4761 0.5692	-24.89% -23.57% -19.56% -31.99% -35.60% -8.40% -3.88% -3.47% -6.26% -36.04% -32.23% -18.98%	0.7508 0.7640 0.8041 0.6798 0.6437 0.9156 0.9608 0.9649 0.9370 0.6393 0.6774 0.8099	0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028 0.7028	0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04% 0.04%	0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201 0.7201	2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50% 2.50%		
2 ケース1 +中心CCR全挿入														

炉内NIS(1)： 予備穴 (A) 用炉内検出器 58° 、R=270 cm

(2)： USV穴用炉内検出器 305° 、R=305 cm

炉外NIS(1)： WR-II 46° 、R=577.9 cm

(2)： SR-I 67° 、R=552.5 cm

(3)： PR-I 77° 、R=587.7 cm

(4)： CC-I (PR-IV) 156° 、R=615.5 cm

炉外NIS(5)： WR-II 167° 、R=576.0 cm

(6)： PR-II 193° 、R=576.0 cm

(7)： CC-II(PR-V) 204° 、R=615.5 cm

(8)： WR-III 283° 、R=587.4 cm

(9)： SR-II 293° 、R=552.5 cm

(10)： PR-III 314° 、R=578.5 cm

第2.3表 修正中性子源増倍法(MSM法)および中性子源増倍法(SM法)による反応度予測値と反応度計算値との比較(2/4)

ケース	制御棒状態	直接計算値		実効線源強度比 S1/S2	検出器の位置	改良した固定線源計算法を用いた場合				λ -mode計算				
		実効増倍率 計算値	反応度 計算値 ρ_c			SM法 反応度予測値		補正係数 (ϵ_1/ϵ_2) × (S1/S2)	MSM法 反応度予測値		MSM法 反応度予測値			
						直接計算 反応度 との差異 ρ_e $\% \Delta k/k$	$\rho_e - \rho_c$		直接計算 反応度 との差異 ρ_e $\% \Delta k/k$	$\rho_e - \rho_c$	直接計算 反応度 との差異 ρ_e $\% \Delta k/k$	$\rho_e - \rho_c$		
1	基本配置	0.9975	0.248	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
3	深い未臨界度 対称制御棒配置 CCR:全挿入 FCR:全挿入 BCR:全引抜き	0.9671	3.402	0.8905	炉内NIS (1) (2) 炉外NIS (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)	1.0825	-68.18%	0.3170	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						1.1480	-66.25%	0.3362	3.4150	0.39%	3.6487	7.26%		
						1.3298	-60.91%	0.3894	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						0.8355	-75.44%	0.2446	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						0.7372	-78.33%	0.2159	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						2.2191	-34.77%	0.6498	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						2.8677	-15.70%	0.8397	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						2.9247	-14.02%	0.8564	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						2.4881	-26.86%	0.7285	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						0.7303	-78.53%	0.2139	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						0.8344	-75.47%	0.2443	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		
						1.3732	-59.63%	0.4021	3.4152	0.39%	3.6487	7.26%		

炉内NIS(1): 予備穴(A)用炉内検出器 58°、R=270cm

(2): USV穴用炉内検出器 305°、R=305cm

炉外NIS(1): WR-I 46°、R=577.9cm

(2): SR-I 67°、R=552.5cm

(3): PR-I 77°、R=587.7cm

(4): CC-I(PR-IV) 156°、R=615.5cm

炉外NIS(5): WR-II 167°、R=576.0cm

(6): PR-II 193°、R=576.0cm

(7): CC-II(PR-V) 204°、R=615.5cm

(8): WR-III 283°、R=587.4cm

(9): SR-II 293°、R=552.5cm

(10): PR-III 314°、R=578.5cm

第2.3表 修正中性子源増倍法(MSM法)および中性子源増倍法(SM法)による反応度予測値と反応度計算値との比較(3/4)

ケース	制御棒状態	直接計算値		実効線源 強度比 S_1/S_2	検出器の 位置	改良した固定線源計算法を用いた場合				λ -mode計算					
		実効増倍率 計算値	反応度 計算値 ρ_c $\% \Delta k/k$			SM法 反応度予測値		補正係数 (ϵ_1/ϵ_2) \times (S_1/S_2)	MSM法 反応度予測値		MSM法 反応度予測値				
						直接計算			直接計算		直接計算				
						反応度 ρ_e	反応度 $\rho_e - \rho_c$		反応度 ρ_e	反応度 $\rho_e - \rho_c$	反応度 ρ_e	反応度 $\rho_e - \rho_c$			
1	基本配置	0.9975	0.248	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
4 a	浅い未臨界度 非対称制御棒配置 ケース1 +C2, C6全挿入	0.9936	0.643	1.0019	炉内NIS (1) (2) 炉外NIS (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)	0.5241 0.5072 0.5548 0.4778 0.4550 0.6426 0.6656 0.6505 0.6285 0.4324 0.4555 0.5352	-18.45% -21.07% -13.67% -25.64% -29.20% 0.00% 3.58% 1.22% -2.19% -32.72% -29.11% -16.71%	0.8101 0.7841 0.8576 0.7387 0.7033 0.9934 1.0289 1.0055 0.9716 0.6684 0.7042 0.8274	0.8101 0.7841 0.8576 0.7387 0.7033 0.9934 1.0289 1.0055 0.9716 0.6684 0.7042 0.8274	0.6469 0.6468 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469 0.6469	0.67% 0.66% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67% 0.67%	0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482 0.6482	0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87% 0.87%		

炉内NIS(1)：予備穴(A)用炉内検出器 58° 、 $R = 270\text{ cm}$ (2)：USV穴用炉内検出器 305° 、 $R = 305\text{ cm}$ 炉外NIS(1)：WR-I 46° 、 $R = 577.9\text{ cm}$ (2)：SR-I 67° 、 $R = 552.5\text{ cm}$ (3)：PR-I 77° 、 $R = 587.7\text{ cm}$ (4)：CC-I(PR-IV) 156° 、 $R = 615.5\text{ cm}$ 炉外NIS(5)：WR-II 167° 、 $R = 576.0\text{ cm}$ (6)：PR-II 193° 、 $R = 576.0\text{ cm}$ (7)：CC-II(PR-V) 204° 、 $R = 615.5\text{ cm}$ (8)：WR-III 283° 、 $R = 587.4\text{ cm}$ (9)：SR-II 293° 、 $R = 552.5\text{ cm}$ (10)：PR-III 314° 、 $R = 578.5\text{ cm}$

第2.3表 修正中性子源増倍法(MSM法)および中性子源増倍法(SM法)による反応度予測値と反応度計算値との比較(4/4)

ケース	制御棒状態	直接計算値		実効線源強度比 S_1/S_2	検出器の位置	改良した固定線源計算法を用いた場合				λ -mode計算				
		実効増倍率 計算値	反応度 計算値 ρ_c $\% \Delta k/k$			SM法		MSM法		MSM法				
						反応度 計算値 ρ_e $\% \Delta k/k$	直接計算 との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c	補正係数 (ϵ_1/ϵ_2) \times (S_1/S_2)	反応度 計算値 ρ_e $\% \Delta k/k$	直接計算 との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c	反応度 計算値 ρ_e $\% \Delta k/k$	直接計算 との差異 $\rho_e - \rho_c$ ρ_c		
1	基本配置	0.9975	0.248	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
4 b	深い未臨界度 非対称制御棒配置 + C5, C7全挿入	0.9903	0.984	0.9876	炉内NIS (1) (2) 炉外NIS (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8) (9) (10)	0.6885 0.6459 0.7563 0.5937 0.5501 0.9480 1.0168 0.9787 0.9191 0.5114 0.5510 0.7028	-30.00% -34.33% -23.11% -39.64% -44.07% -3.62% 3.38% -0.50% -6.55% -48.01% -43.98% -28.54%	0.7024 0.6589 0.7715 0.6056 0.5612 0.9671 1.0373 0.9984 0.9376 0.5217 0.5621 0.7170	0.9803 0.9802 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803 0.9803	-0.33% -0.34% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33% -0.33%	0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796 0.9796	-0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40% -0.40%		

炉内NIS(1)：予備穴(A)用炉内検出器 58° 、 $R = 270\text{ cm}$ (2)：USV穴用炉内検出器 305° 、 $R = 305\text{ cm}$ 炉外NIS(1)：WR-I 46° 、 $R = 577.9\text{ cm}$ (2)：SR-I 67° 、 $R = 552.5\text{ cm}$ (3)：PR-I 77° 、 $R = 587.7\text{ cm}$ (4)：CC-I(PR-IV) 156° 、 $R = 615.5\text{ cm}$ 炉外NIS(5)：WR-II 167° 、 $R = 576.0\text{ cm}$ (6)：PR-II 193° 、 $R = 576.0\text{ cm}$ (7)：CC-II(PR-V) 204° 、 $R = 615.5\text{ cm}$ (8)：WR-III 283° 、 $R = 587.4\text{ cm}$ (9)：SR-II 293° 、 $R = 552.5\text{ cm}$ (10)：PR-III 314° 、 $R = 578.5\text{ cm}$

第2.4表-(a) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率

炉内N I S : 予備穴(A)用炉内検出器(58° 、 $R = 270\text{ cm}$)

ケース	燃料装荷体数	実効増倍率	計数率 (cps/1E24 B-10 atoms)			
			核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	6.78400E+04	1.55150E+05	2.2299E+05	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	2.15090E+05	1.41970E+05	3.5706E+05	6.2452E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.67132E+06	1.40480E+05	1.8118E+06	1.2308E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.30439E+06	1.38310E+05	5.4427E+06	4.0970E-02

第2.4表-(b) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率

炉内N I S : USV穴用炉内検出器(305° 、 $R = 305\text{ cm}$)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atoms)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	3.65130E+04	8.58870E+04	1.2240E+05	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	1.18418E+05	7.78320E+04	1.9625E+05	6.2369E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	9.59585E+05	7.74150E+04	1.0370E+06	1.1803E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	3.06163E+06	7.62710E+04	3.1379E+06	3.9007E-02

第2.4表-(c) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率

炉外N I S : WR-1(46° 、 $R = 577.9\text{ cm}$)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atoms)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	6.23700E+01	1.64920E+02	2.2729E+02	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	1.74920E+02	1.47980E+02	3.2290E+02	7.0390E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.46339E+03	1.48310E+02	1.6117E+03	1.4103E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	4.71672E+03	1.45880E+02	4.8626E+03	4.6742E-02

第2.4表-(d) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: SR-1(67°、R=552.5cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atoms)			
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	1.87320E+02	6.10720E+02	7.9804E+02
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.43400E+02	5.48940E+02	8.9234E+02
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.89132E+03	5.50080E+02	2.4414E+03
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.67923E+03	5.41570E+02	6.2208E+03

第2.4表-(e) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: PR-1(77°、R=587.7cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atoms)			
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	2.56260E+02	8.54740E+02	1.1110E+03
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	4.01460E+02	7.68840E+02	1.1703E+03
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.73050E+03	7.70500E+02	2.5010E+03
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	4.91532E+03	7.58880E+02	5.6742E+03

第2.4表-(f) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: CC-1(156°、R=615.5cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)			
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	2.15700E+02	7.60020E+02	9.7572E+02
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.20260E+02	6.84340E+02	1.0046E+03
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.43674E+03	6.82060E+02	2.1188E+03
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	4.26842E+03	6.72780E+02	4.9412E+03

第2.4表-(g) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: WR-II(167°, R=576.0 cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	1.82660E+02	6.64480E+02	8.4714E+02	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.01690E+02	5.98160E+02	8.9985E+02	9.4142E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.69971E+03	5.95490E+02	2.2952E+03	3.6909E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.40193E+03	5.87470E+02	5.9894E+03	1.4144E-01

第2.4表-(h) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: PR-II(193°, R=576.0 cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	1.76380E+02	6.45260E+02	8.2164E+02	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	2.89890E+02	5.81100E+02	8.7099E+02	9.4334E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.61568E+03	5.79020E+02	2.1947E+03	3.7437E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.11825E+03	5.71150E+02	5.6894E+03	1.4442E-01

第2.4表-(i) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外NIS: CC-II(204°, R=615.5 cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	2.28420E+02	8.10380E+02	1.0388E+03	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.43560E+02	7.29740E+02	1.0733E+03	9.6786E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.57731E+03	7.27290E+02	2.3046E+03	4.5075E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	4.70376E+03	7.17440E+02	5.4212E+03	1.9162E-01

第2.4表-(j) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率
炉外N I S : WR-III(283°、R=587.4 cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	2.50650E+02	8.34850E+02	1.0855E+03	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.98780E+02	7.50420E+02	1.1492E+03	9.4457E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.75888E+03	7.51620E+02	2.5105E+03	4.3238E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.02986E+03	7.40340E+02	5.7702E+03	1.8812E-01

第2.4表-(k) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率

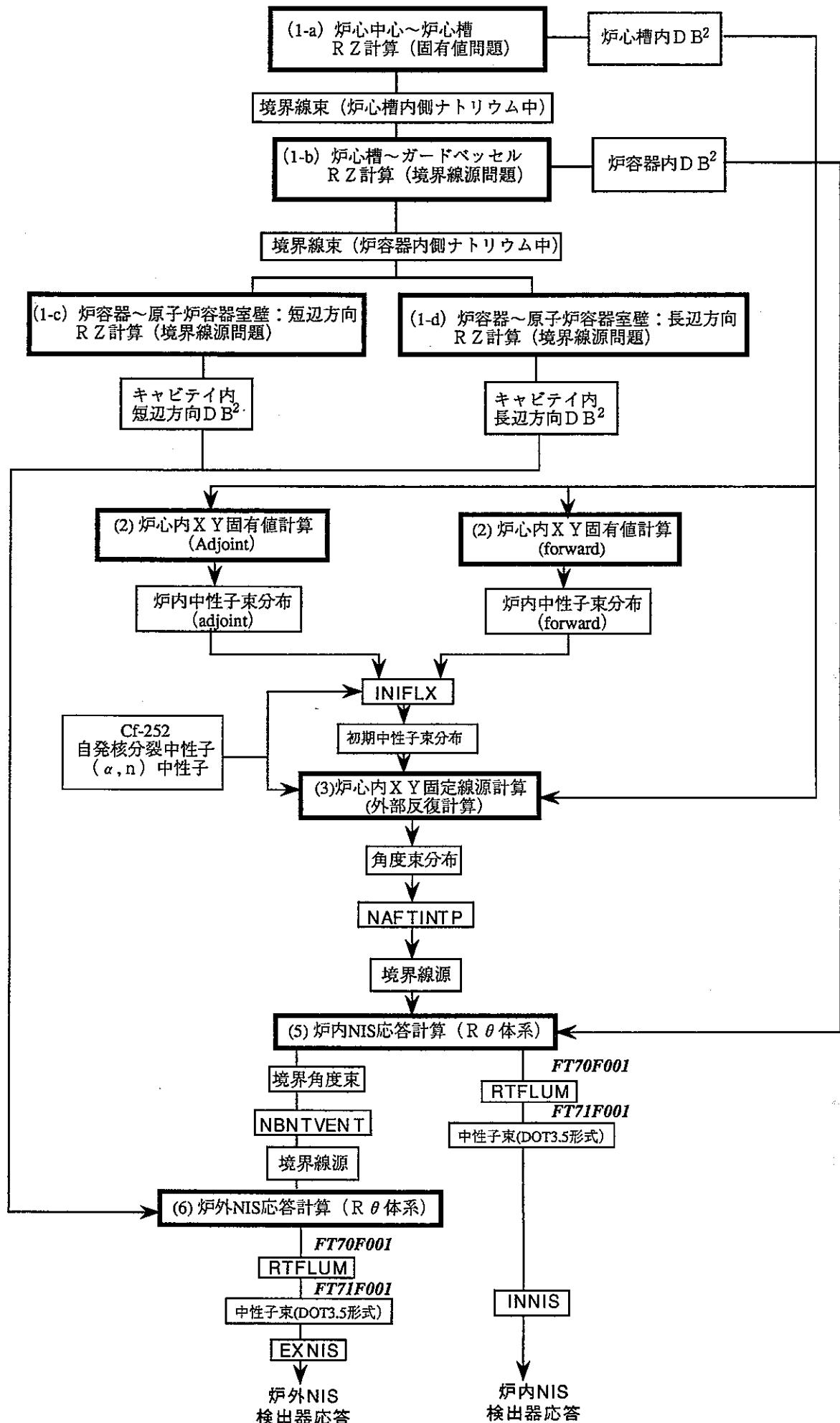
炉外N I S : SR-II(293°、R=552.5 cm)

ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	1.73160E+02	5.65480E+02	7.3864E+02	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	3.24550E+02	5.08110E+02	8.3266E+02	8.8708E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.82781E+03	5.09290E+02	2.3371E+03	3.1605E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	5.51994E+03	5.01360E+02	6.0213E+03	1.2267E-01

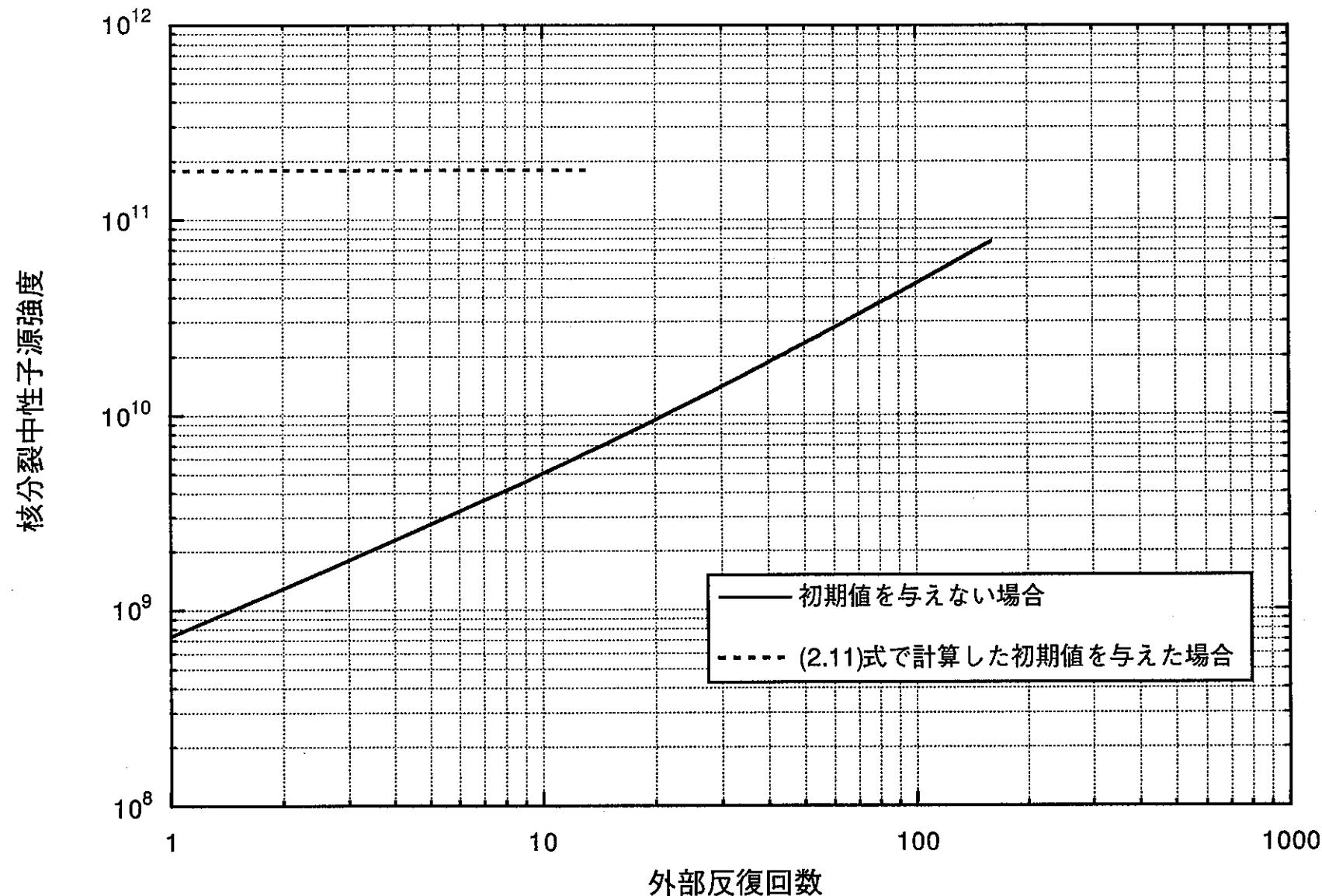
第2.4表-(l) 改良した固定線源計算法を用いて計算した各検出器の
計数率計算値および逆計数率

炉外N I S : PR-III(314°、R=573.5 cm)

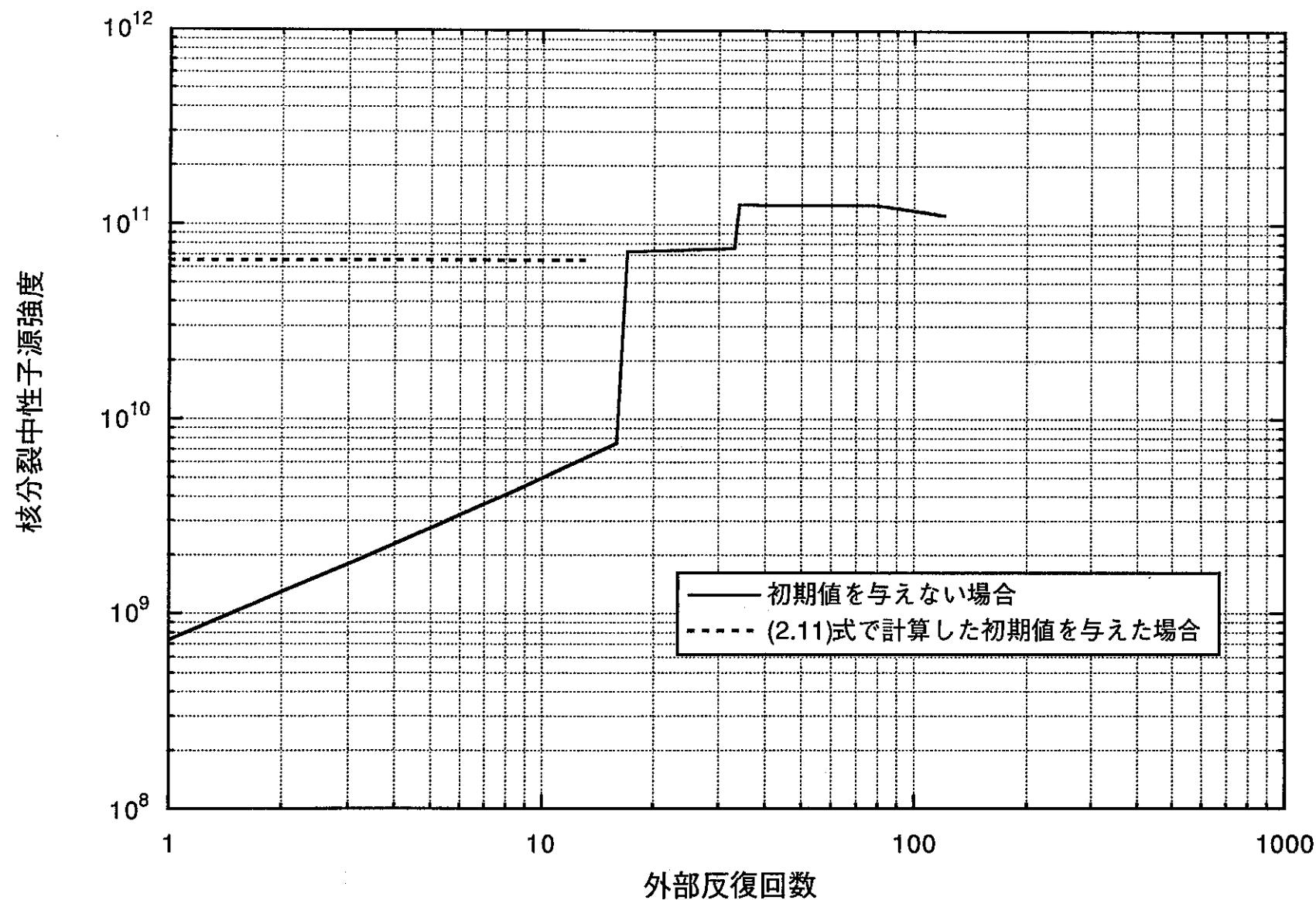
ケース	燃料装荷体数	計数率 (cps/1E24 B-10 atom)				
		実効増倍率	核分裂線源	外部中性子源	全計数率 (A _{ij})	逆計数率 (A _{oj} /A _{ij})
ケース1 (STEP 1)	内側炉心 84体	0.880	5.38400E+01	1.41280E+02	1.9512E+02	—
ケース2 (STEP 2)	内側炉心 108体 外側炉心 16体	0.934	1.58880E+02	1.26790E+02	2.8567E+02	6.8303E-01
ケース3 (STEP 4)	内側炉心 108体 外側炉心 52体	0.980	1.36591E+03	1.27290E+02	1.4932E+03	1.3067E-01
ケース4 (STEP 8)	内側炉心 108体 外側炉心 62体	0.992	4.42392E+03	1.25180E+02	4.5491E+03	4.2892E-02



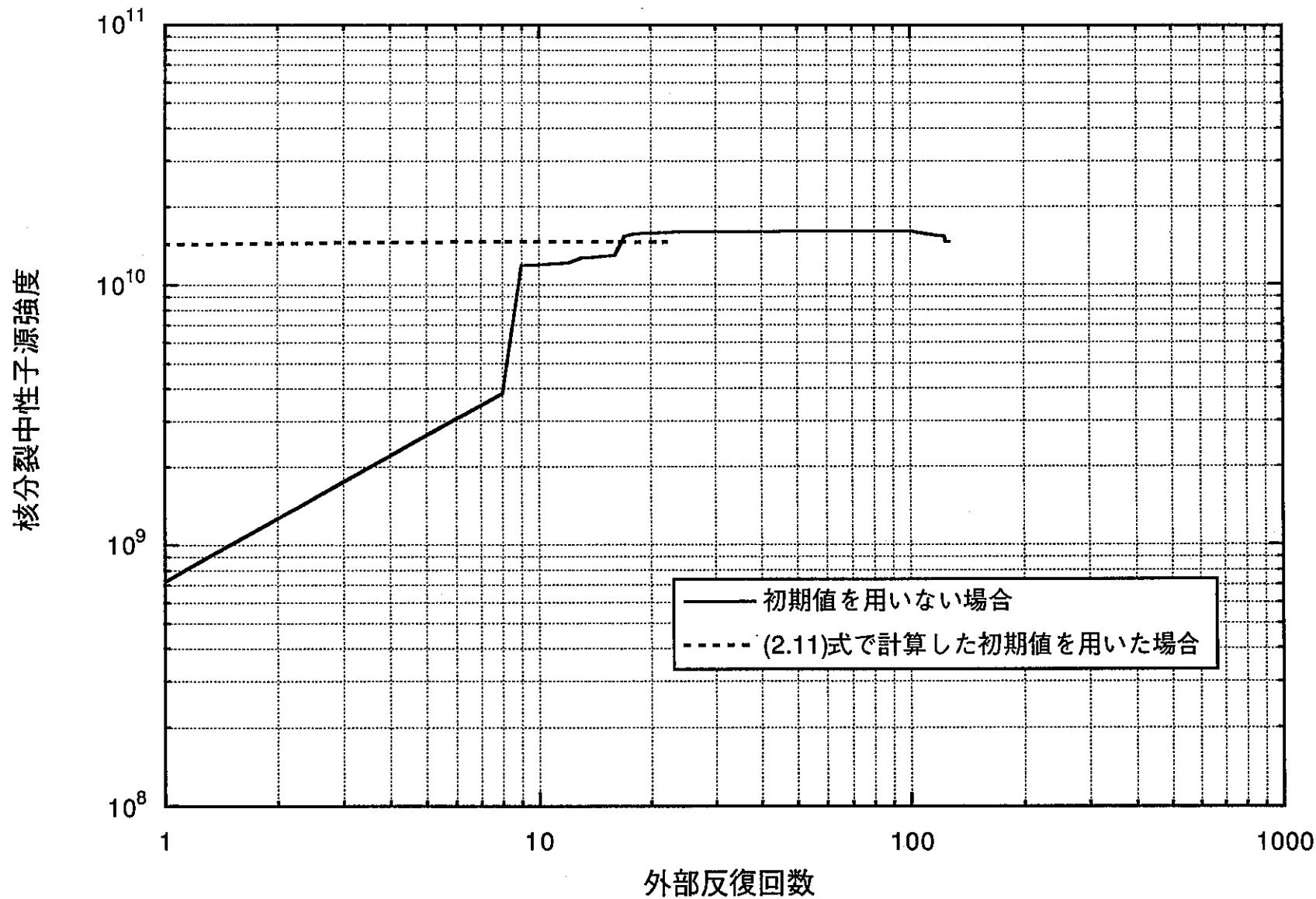
第2.1図 改良した初期値計算法を用いたMSM法および燃料装荷時の検出器応答計算の流れ



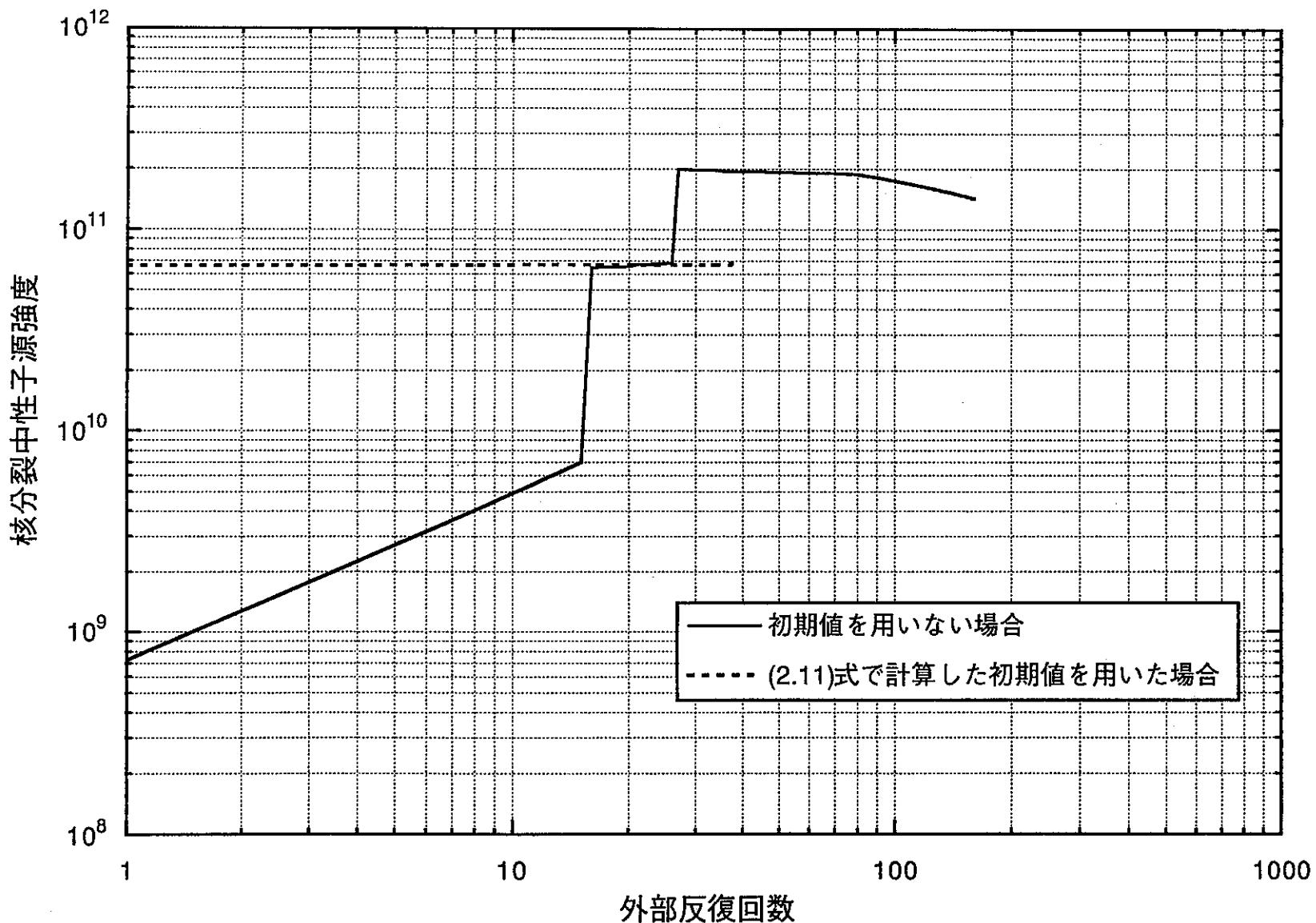
第2.2図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case 1 , $K_{eff}=0.99753$)



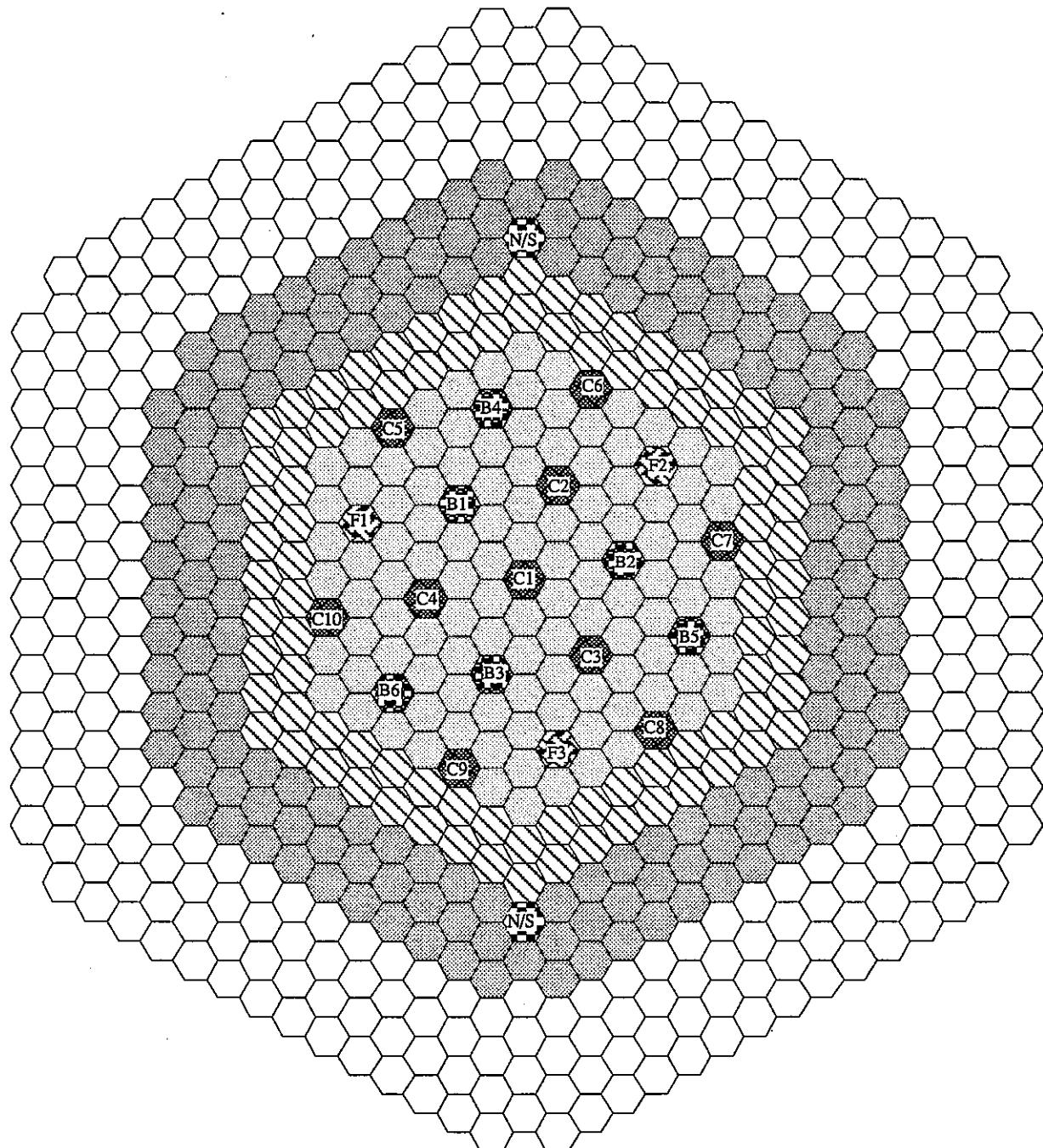
第2．3図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case 2 , Keff=0.99302)



第2.4図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case 3 , Keff=0.96710)



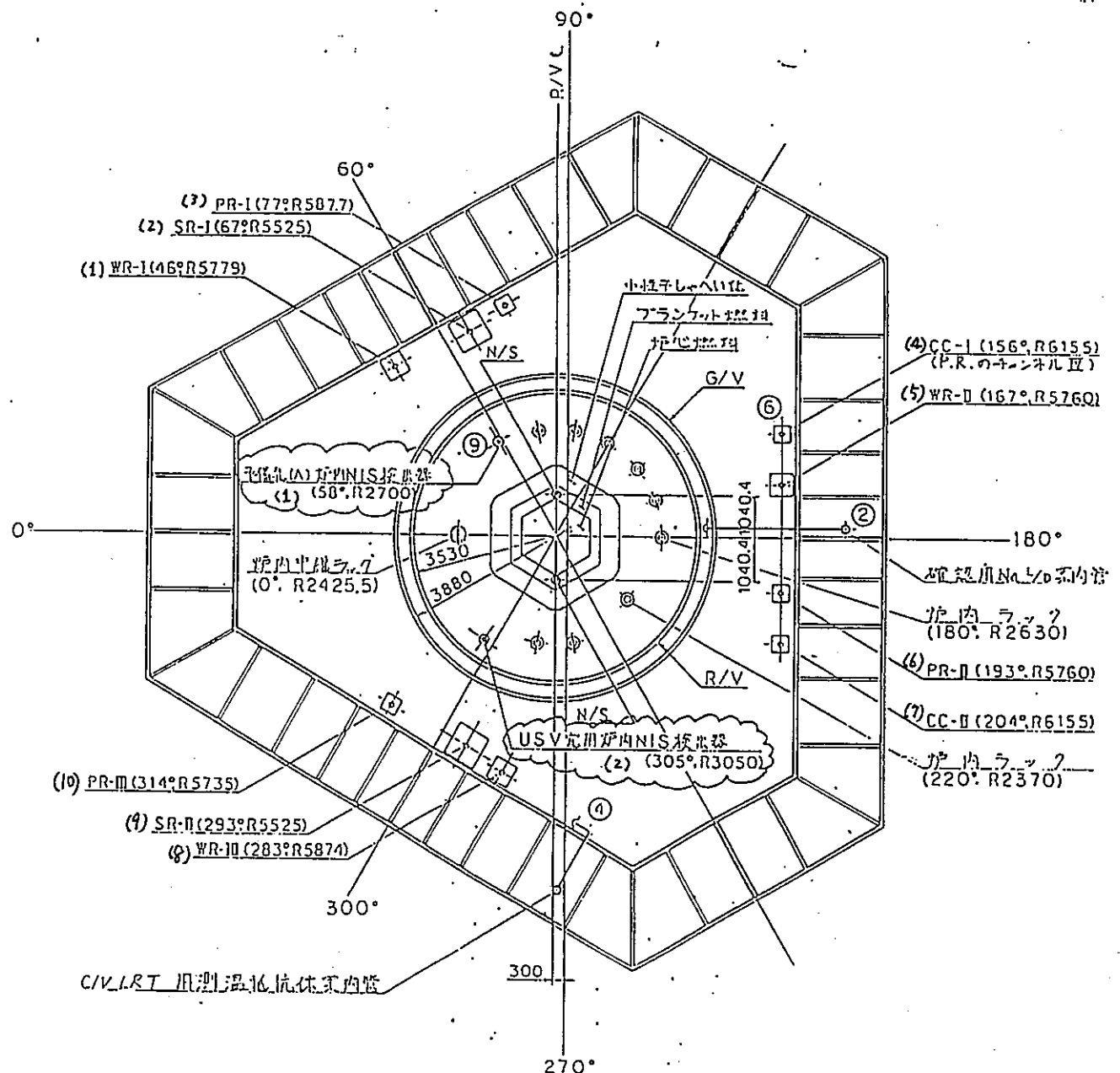
第2. 5図 外部反復回数と核分裂中性子源強度との関係 (Case 4 a, $K_{eff}=0.99336$)



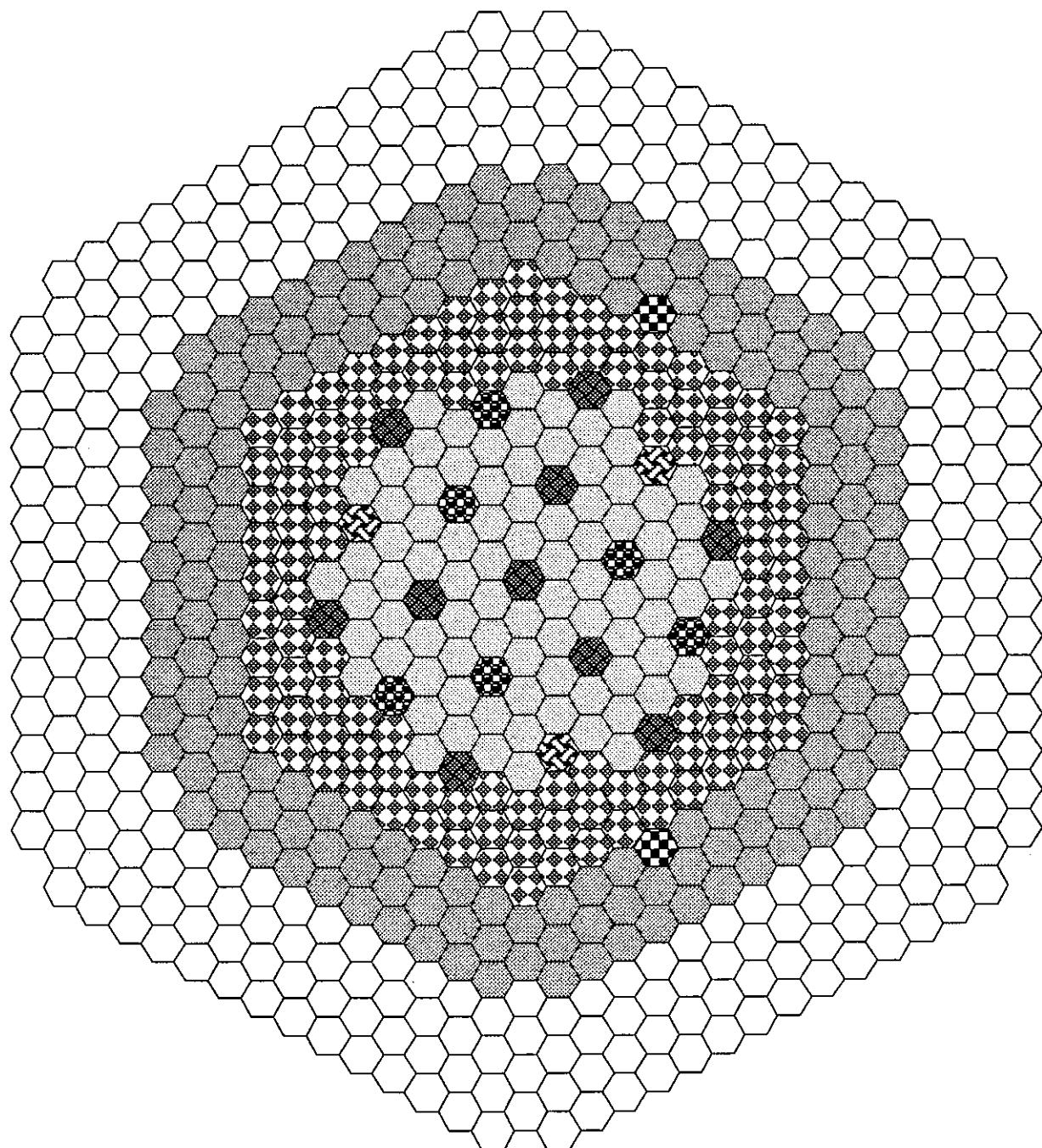
炉心構成要素		記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108	
	外側炉心	▨	90	
ブランケット燃料集合体		▨	172	
制御棒集合体	微調整棒	▨▨	3	50cm
	粗調整棒	▨▨▨	10	50cm
	後備炉停止棒	▨▨▨▨	6	全引抜

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨▨▨	2
中性子しゃへい体	○○○	316
サーベイランス集合体	○○○○	8

第2.6図 前年度のMSM法の適用性検討のための炉心配置



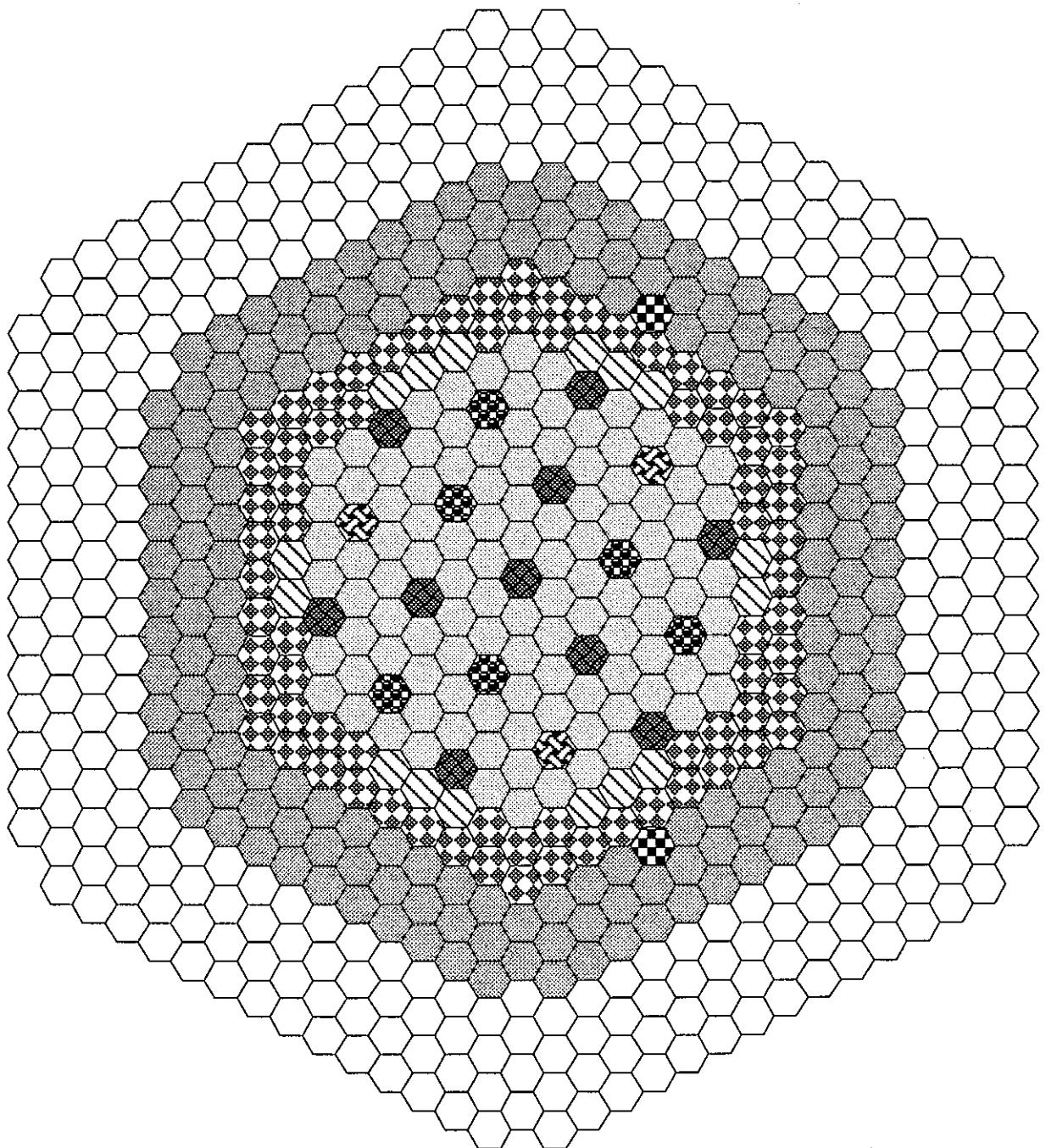
第2.7図 炉内および炉外NIS検出器の配置



炉心構成要素		記号	本数
炉心燃料集合体	内側炉心	○	84
	外側炉心	△	0
プランケット燃料集合体		■	172
制御棒集合体	微調整棒	◆	3
	粗調整棒	●	10
	後備炉停止棒	▲	6

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	◆	2
中性子しゃへい体	○	316
	△	8
サーベイランス集合体		
模擬燃料集合体	■	114

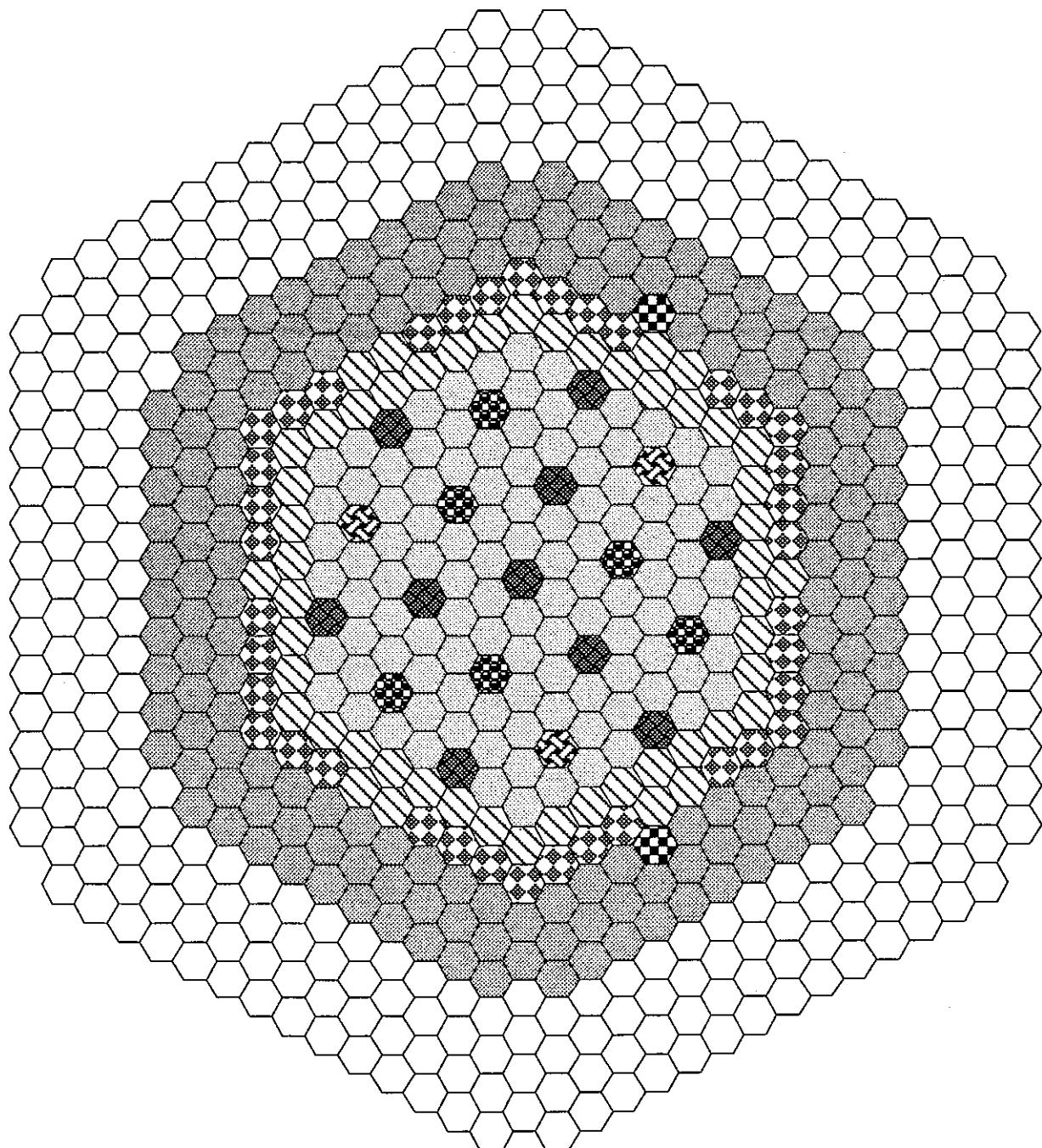
第2.8図 (a) 燃料装荷ケース1 (第1ステップ終了時) の炉心配置



炉心構成要素	記号	本数
炉心燃料集合体	内側炉心	108
	外側炉心	16
プランケット燃料集合体	◆	172
制御棒集合体	微調整棒	3
	粗調整棒	10
	後備炉停止棒	◆◆

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	◆◆	2
	○	316
サーベイランス集合体	○	8
模擬燃料集合体	◆◆◆	74

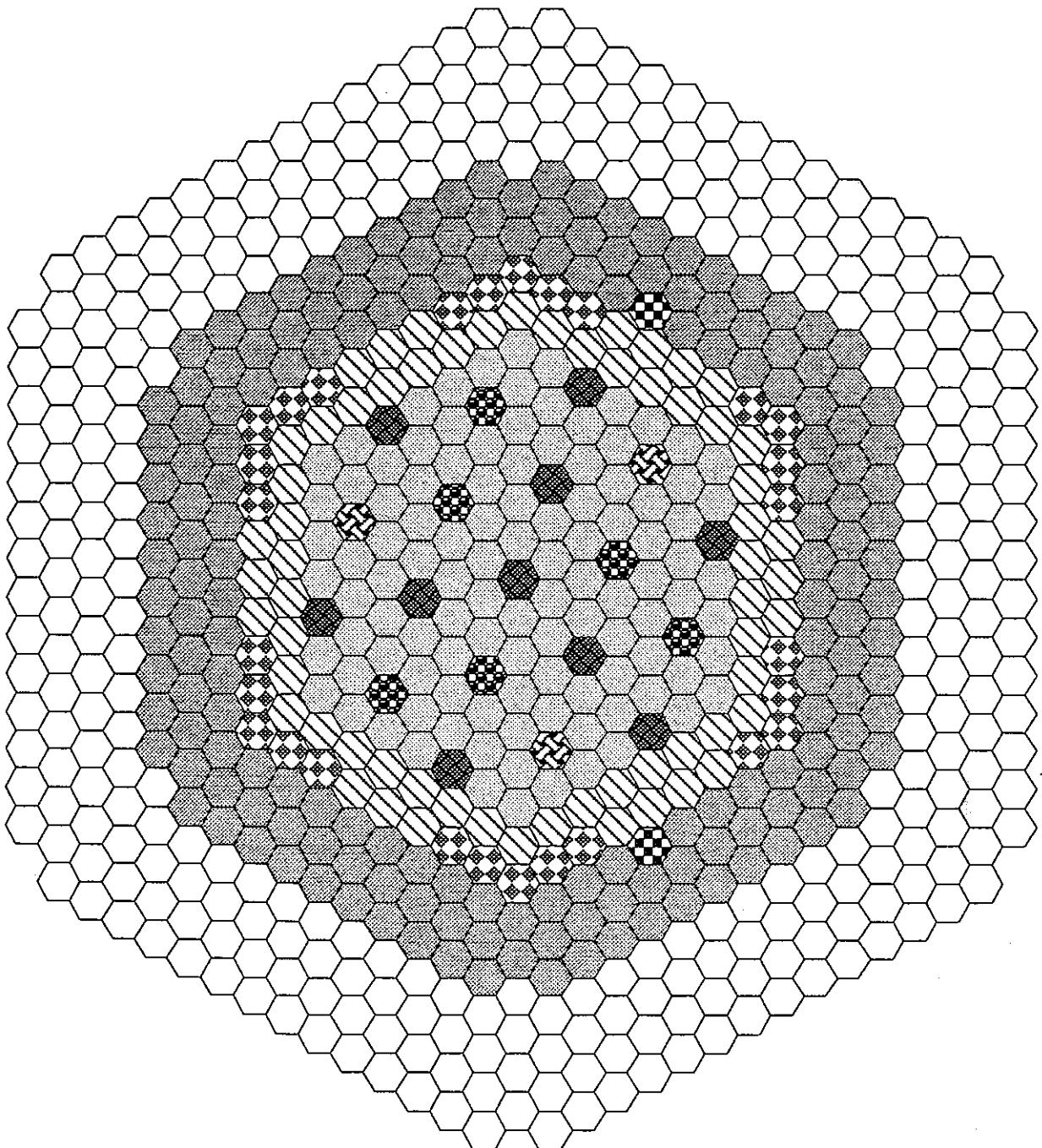
第2.8図 (b) 燃料装荷ケース2 (第2ステップ終了時) の炉心配置



炉心構成要素		記号	本数
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108
	外側炉心	▨	52
プランケット燃料集合体		■	172
制御棒集合体	微調整棒	▨▨	3
	粗調整棒	●●	10
	後備炉停止棒	▨▨	6

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨▨	2
中性子しゃへい体	○	316
	○	8
サーベイランス集合体	○○	
模擬燃料集合体	■■	38

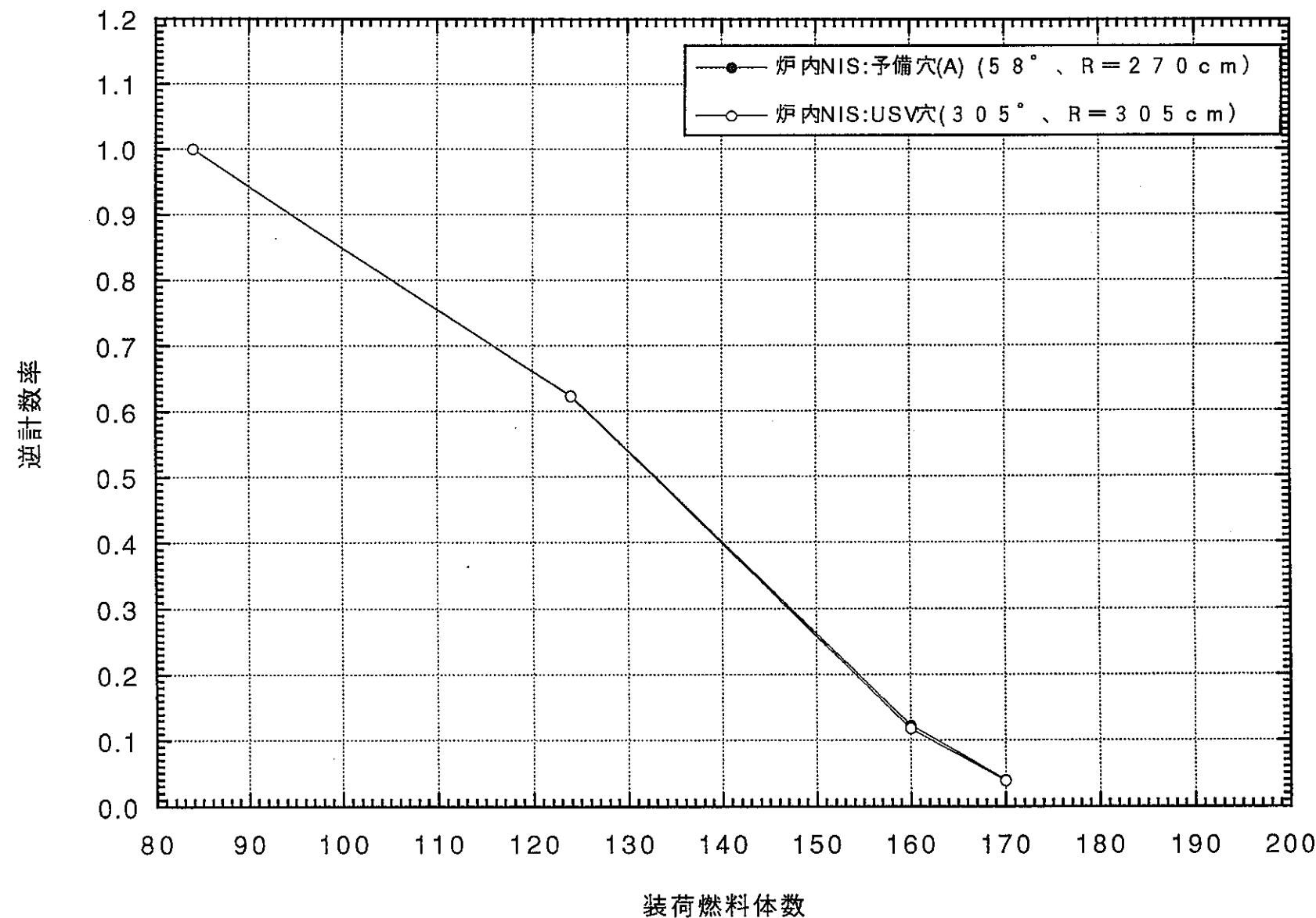
第2.8図 (c) 燃料装荷ケース3 (第4ステップ終了時) の炉心配置



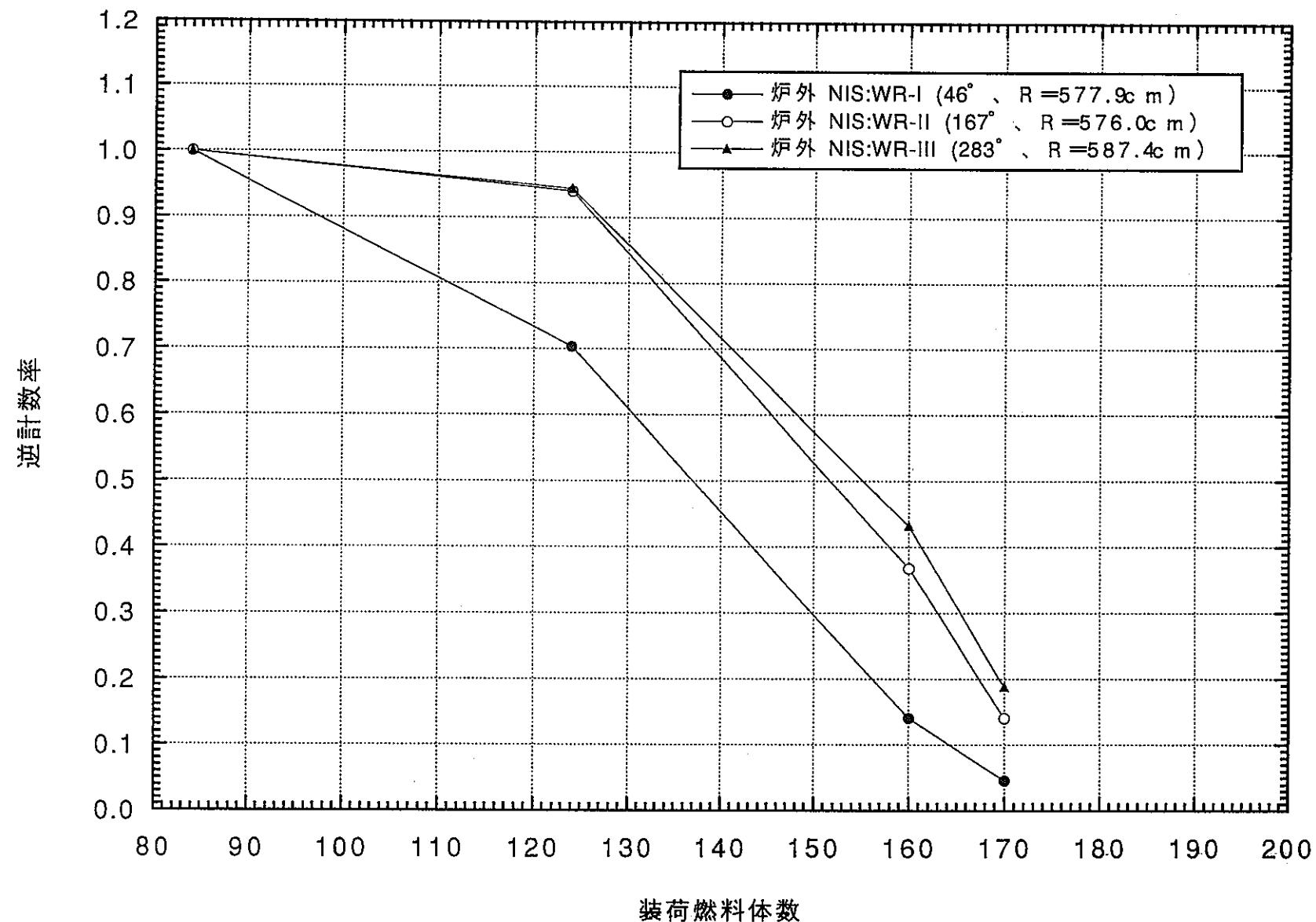
炉心構成要素		記号	本数
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108
	外側炉心	▨	62
ブランケット燃料集合体		▨	172
制御棒集合体	微調整棒	▨	3
	粗調整棒	●	10
	後備炉停止棒	▨	6

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	○	8
模擬燃料集合体	▨	28

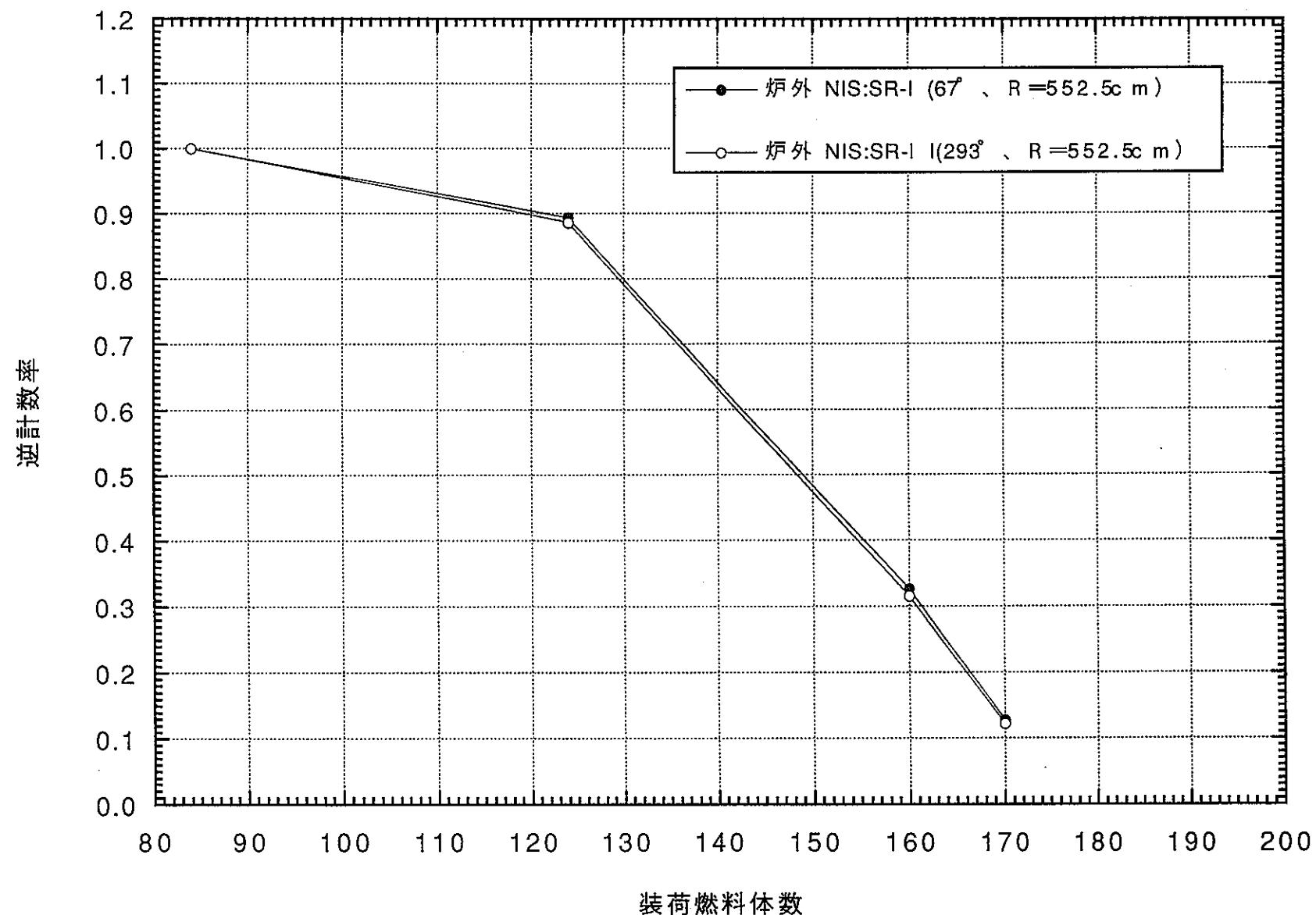
第2.8図 (d) 燃料装荷ケース4 (第8ステップ終了時) の炉心配置



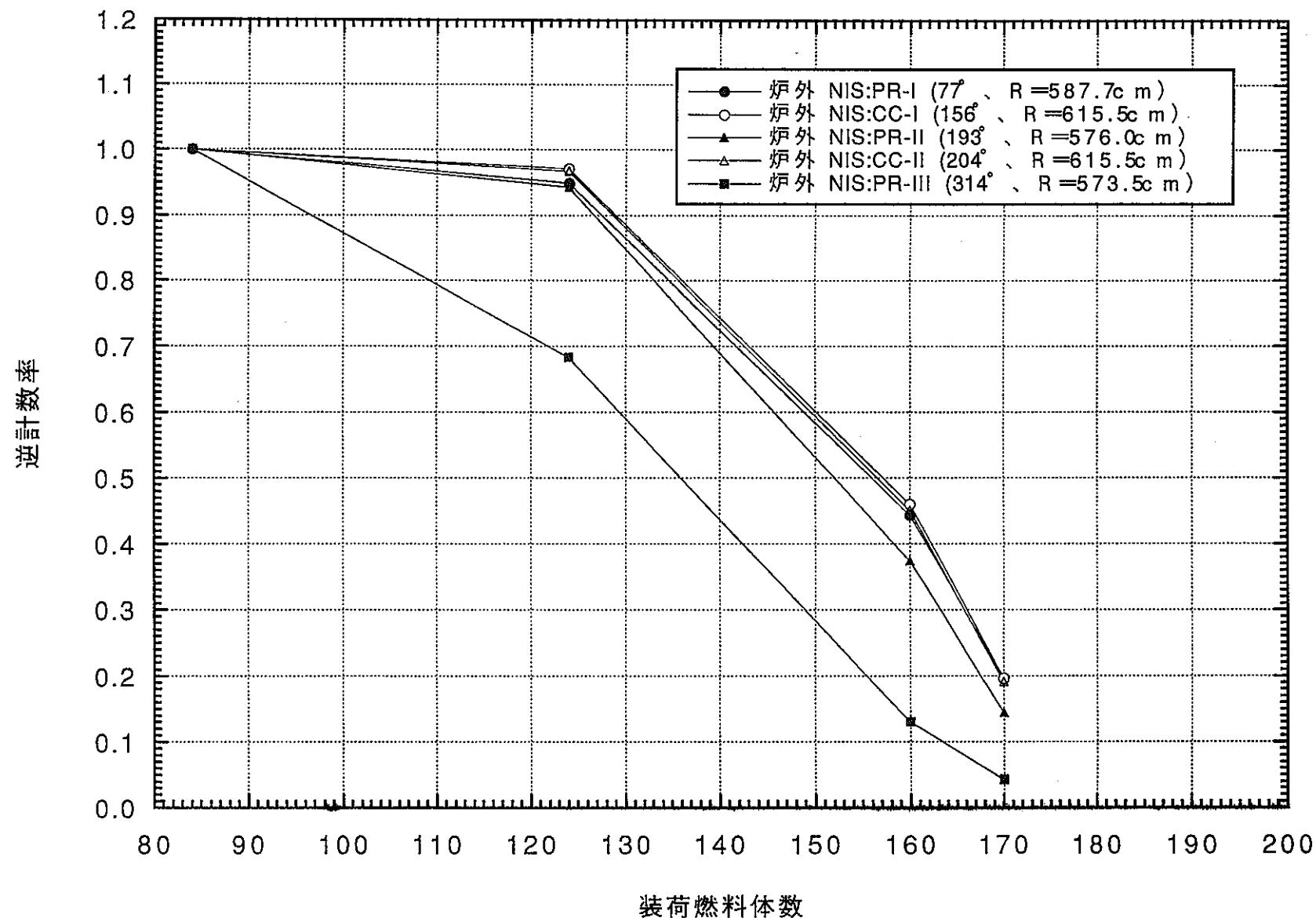
第2.9図 (a) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆计数率との関係 (炉内NIS)



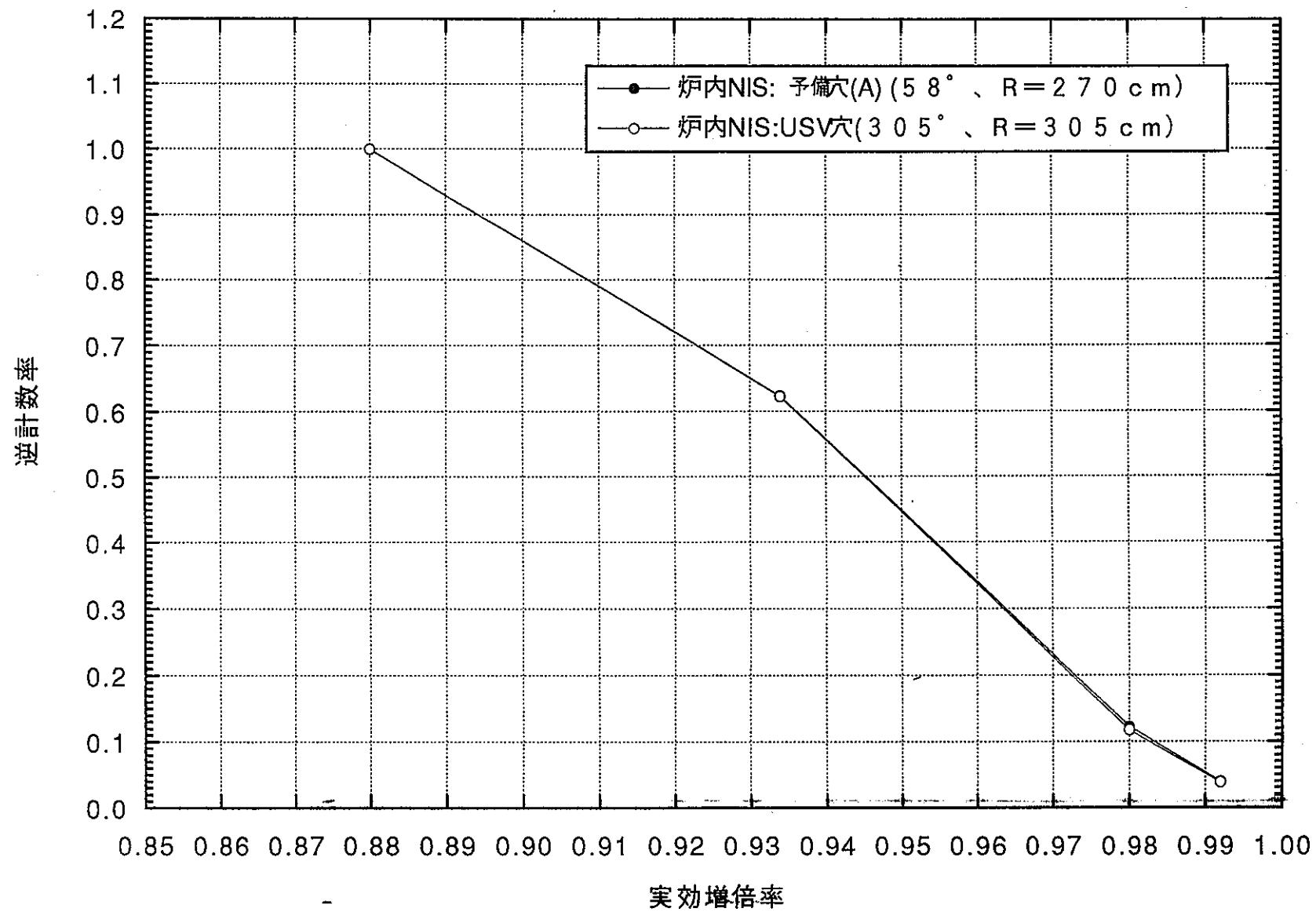
第2.9図 (b) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆计数率との関係 (炉外NIS、広域検出系)



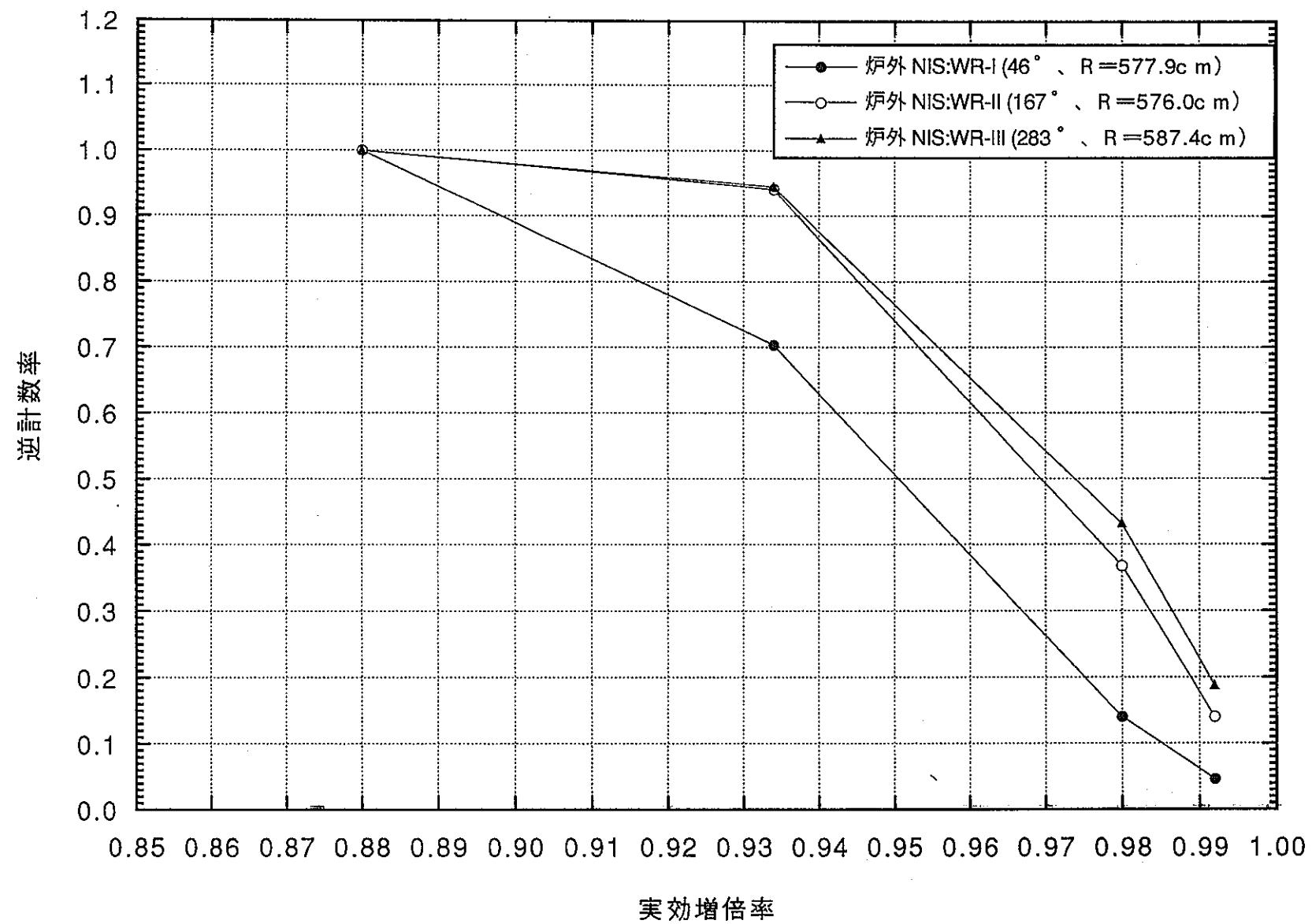
第2. 9図 (c) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆计数率との関係（炉外NIS、線源領域検出系）



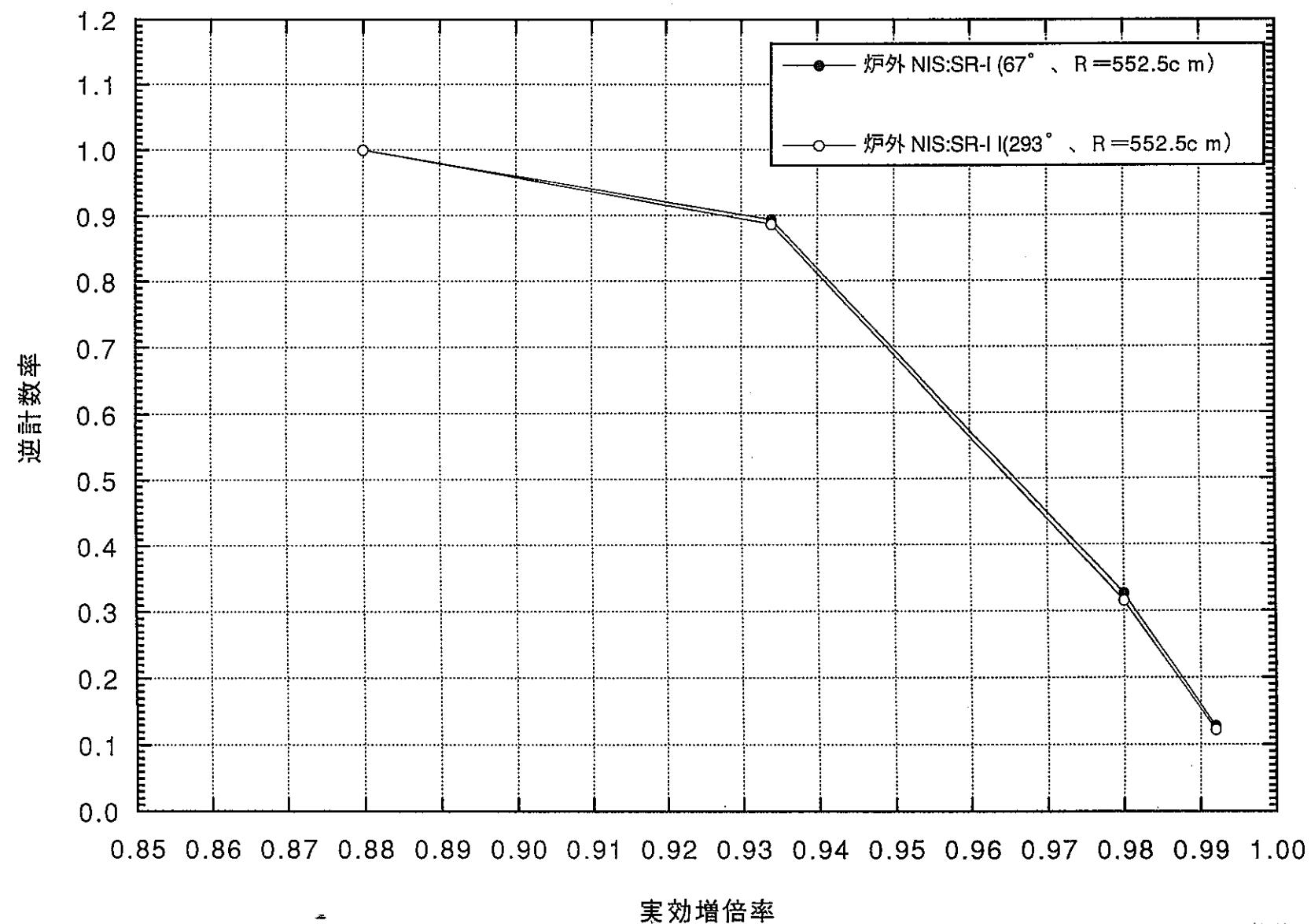
第2.9図 (d) 「もんじゅ」燃料装荷時の燃料装荷体数と逆计数率との関係 (炉外NIS、出力領域検出系)



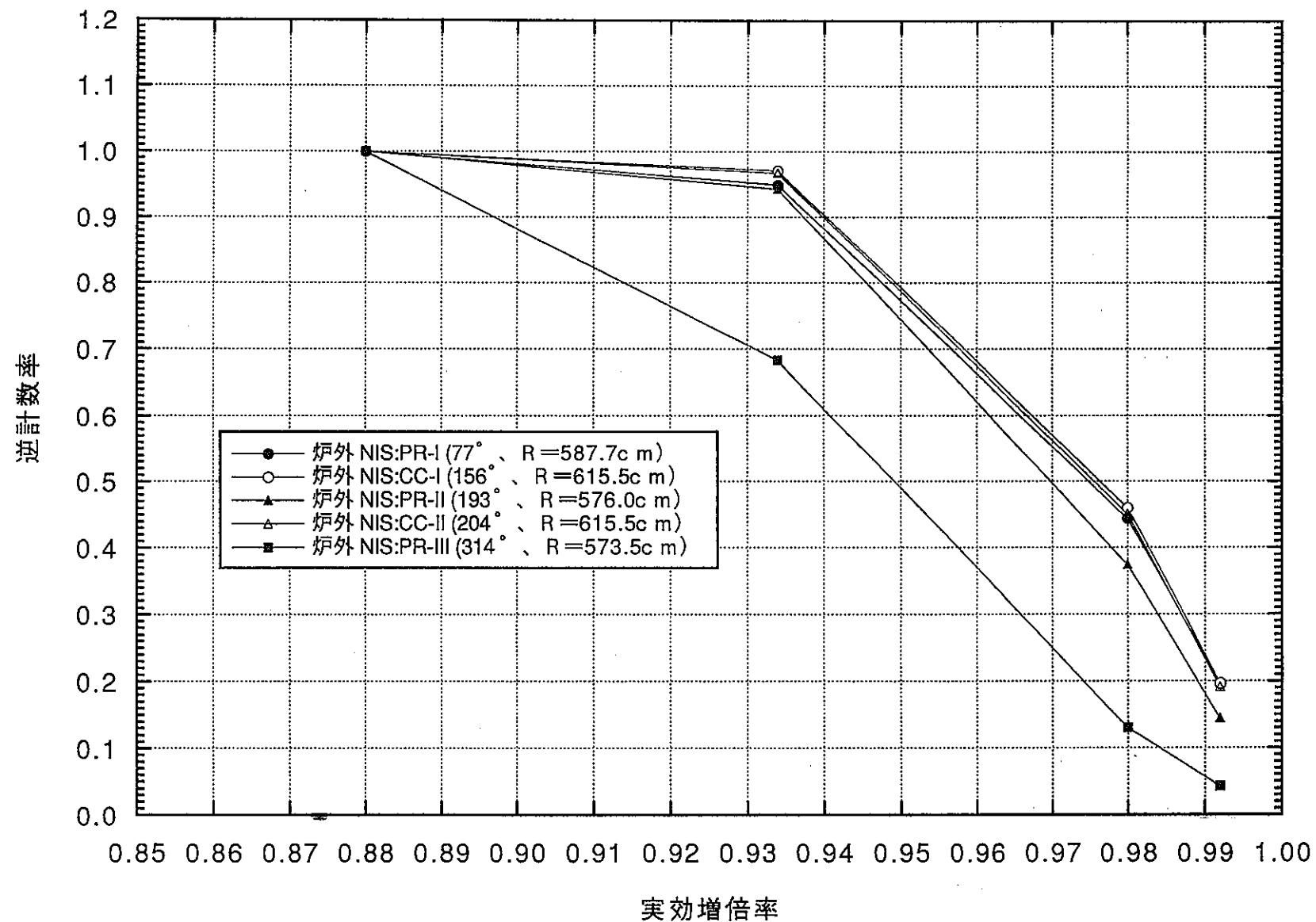
第2. 10図 (a) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉内NIS)



第2. 10図 (b) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉外NIS, 広域検出系)



第2. 10図 (c) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係（炉外NIS, 線源領域検出系）



第2. 10図 (d) 「もんじゅ」燃料装荷時の実効増倍率と逆計数率との関係 (炉外NIS, 出力領域検出系)

3. 中性子束計算方法の精度評価

3. 1 精度評価の目的

「もんじゅ」では、炉内NISが設置される炉心槽～炉容器間はほぼ軸対称な構造を持っている。また炉外NISが設置されるキャビティはほぼ三角形に近い形状を持っている。したがって、2次元計算では、NIS検出器を含む領域はRθ形状で近似することとなる。これに対して炉心部は六角格子形状であり、2次元Sn計算の際にXY、RZ、もしくはRθ形状しか取り扱えないDORTコードでは、XY形状で近似することとなる。

したがって、MSM法の補正係数を計算する場合には、炉心部とNIS検出器を含む部分とを異なる形状モデル(XYとRθ)でモデル化することとなり、計算体系を分割し、各々の中性子輸送計算を接続させる必要がある。この接続計算の精度を単純な体系について評価した。

3. 2 精度評価の方法

MSM法の適用性検討では、炉心部をXY体系で、炉心槽からキャビティまでをRθ体系でモデル化し、NAFTINTPプログラム[5]により境界角度束を内外挿して両体系を接続した。この接続方法の精度評価を行うために、XY体系での計算とXYからRθ体系へ接続した計算を行い、境界の影響を受けない範囲で両体系中での中性子束分布およびスペクトルを比較した。

第3. 1図に示すように強吸収体(5cm×5cm、CCRのB,C部)を偏心して大きな(800cm×800cm)ナトリウム中に置いたXY体系計算モデルを用いて、偏った中性子束分布を示す体系について精度評価を行った。中性子源は20cm×20cmの正方形とした。これに接続するRθ体系は、内径100cm・外径800cmのアニュラーフィルムとして、この内面で接続を行った。 θ 方向は $0 \sim 360^\circ$ の完全円周とし、 0° (360°)境界面を周期境界とした。炉心で発生した核分裂中性子がナトリウム中で減速される状況を模擬するため、中性子源のスペクトルはPu-239の核分裂スペクトルを用いた。 0° (+X)、 90° (+Y)、 180° (-X)、および 270° (-Y)方向の中性子束分布をXY体系とXY-Rθ接続体系で計算することにより、接続方法の

精度評価を行った。

3. 3 XY体系とRθ体系での中性子束計算値の比較

0° (+X)、90° (+Y)、180° (-X)、および270° (-Y) 方向について、XY体系およびRθ体系で計算した高速中性子束 ($E > 100 \text{ keV}$)、中速中性子束 ($100 \text{ keV} > E > 0.414 \text{ eV}$) および熱中性子束 ($0.414 \text{ eV} > E$) の空間分布を比較して第3. 2図に示す。また、各方向についてXY体系とRθ体系計算で得られた全中性子束の比を第3. 1表および第3. 3図に示す。

0° 方向を除き、中心から 350 cm 以内では XY 体系と Rθ 体系で計算した全中性子束は 2% 以内で一致している。外側境界の形が矩形と円形との違いがあるため、中心から 360 cm 以上の距離では約 3% 程度の差が生じている。中性子束の収束精度 (1%) とこの差異は同程度であり、0° 方向を除けば、中性子束の接続は十分な精度を持っているといえる。

0° 方向では、中心からの距離が離れるにしたがい、XY 体系と Rθ 体系の計算値の差異が大きくなり、外端では約 50% 程度 XY 体系による計算値の方が大きくなっている。

3. 4 Rθ 計算の問題点

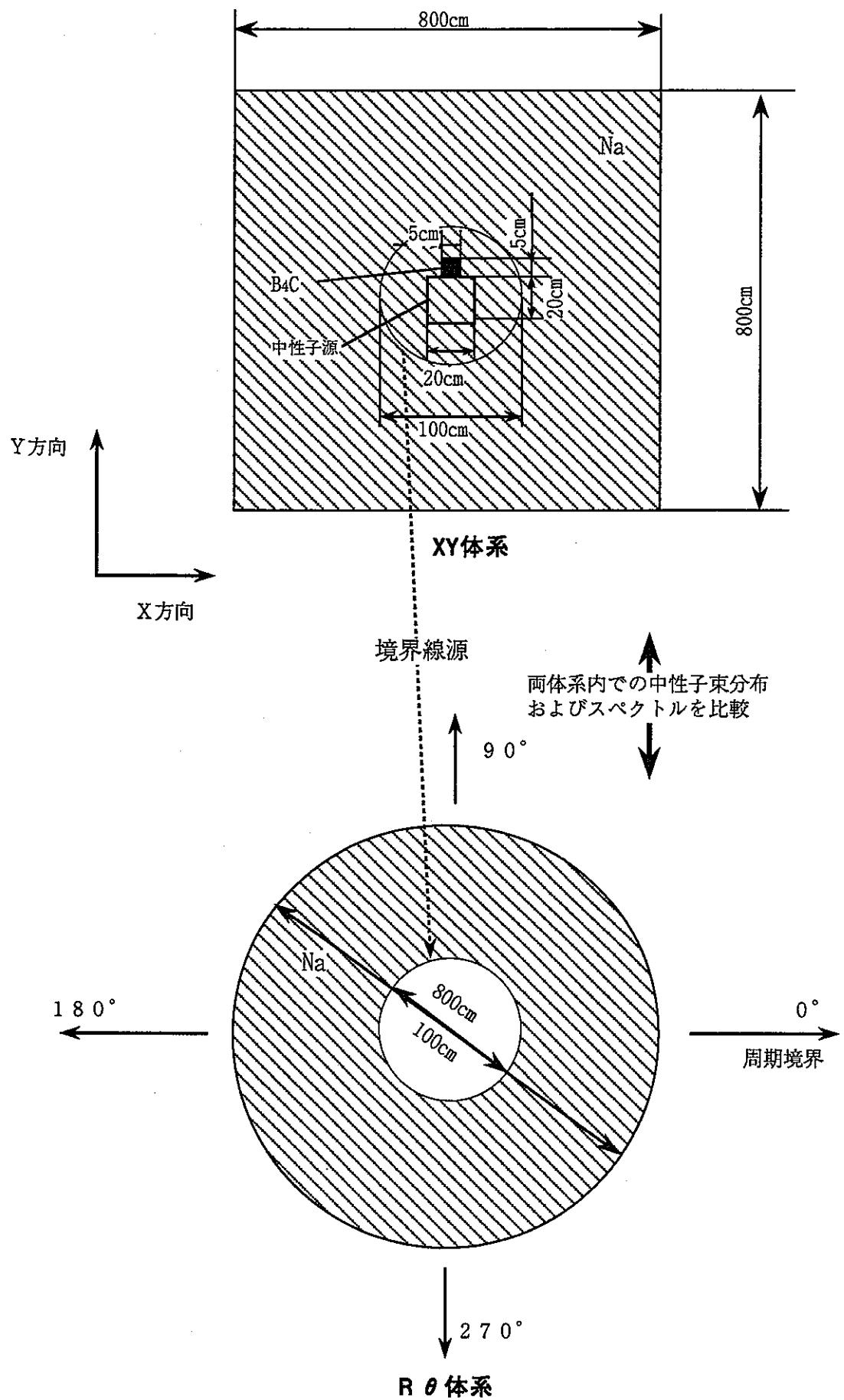
0° 方向の差異が接続計算によるものか、DORT の Rθ 計算オプションによるものかを確認するために、第3. 4 図に示す $0^\circ \sim 360^\circ$ (周期境界) の中空の Rθ 体系の内面に均一な境界中性子束 (スペクトルは Pu-239 の核分裂中性子スペクトル) を与えて、θ 方向の中性子束分布計算値を調べた。計算は DORT コードと DOT 3. 5 コードの双方を用いて行った。得られた高速、中速、および熱中性子束の θ 方向分布を第3. 6 図～第3. 7 図に示す。本来、θ 方向の中性子束分布は平坦になるはずであるが、DORT の計算結果では、 0° (360°) 付近で外側 (b) での中性子束が減少している。これに対して、DOT 3. 5 では逆に大きくなっている。これは、DORT、DOT 3. 5 とともに、Rθ モデルの周期境界条件にプログラム上の問題があることを示唆している。これを確認するために、第3. 8 図に示す 0° から 180° の半円周モデル (θ 方向の境界条件は鏡面反射) で同一の体系を模擬した計算を行った。この結果、第3. 9 図から第3. 11 図に示すように θ 方向の中性子束分布は全く平坦となり、0° 方向の XY 体系と Rθ

体系で計算した中性子束の不一致の原因がDORTの周期境界条件の問題にあることが明らかとなった。

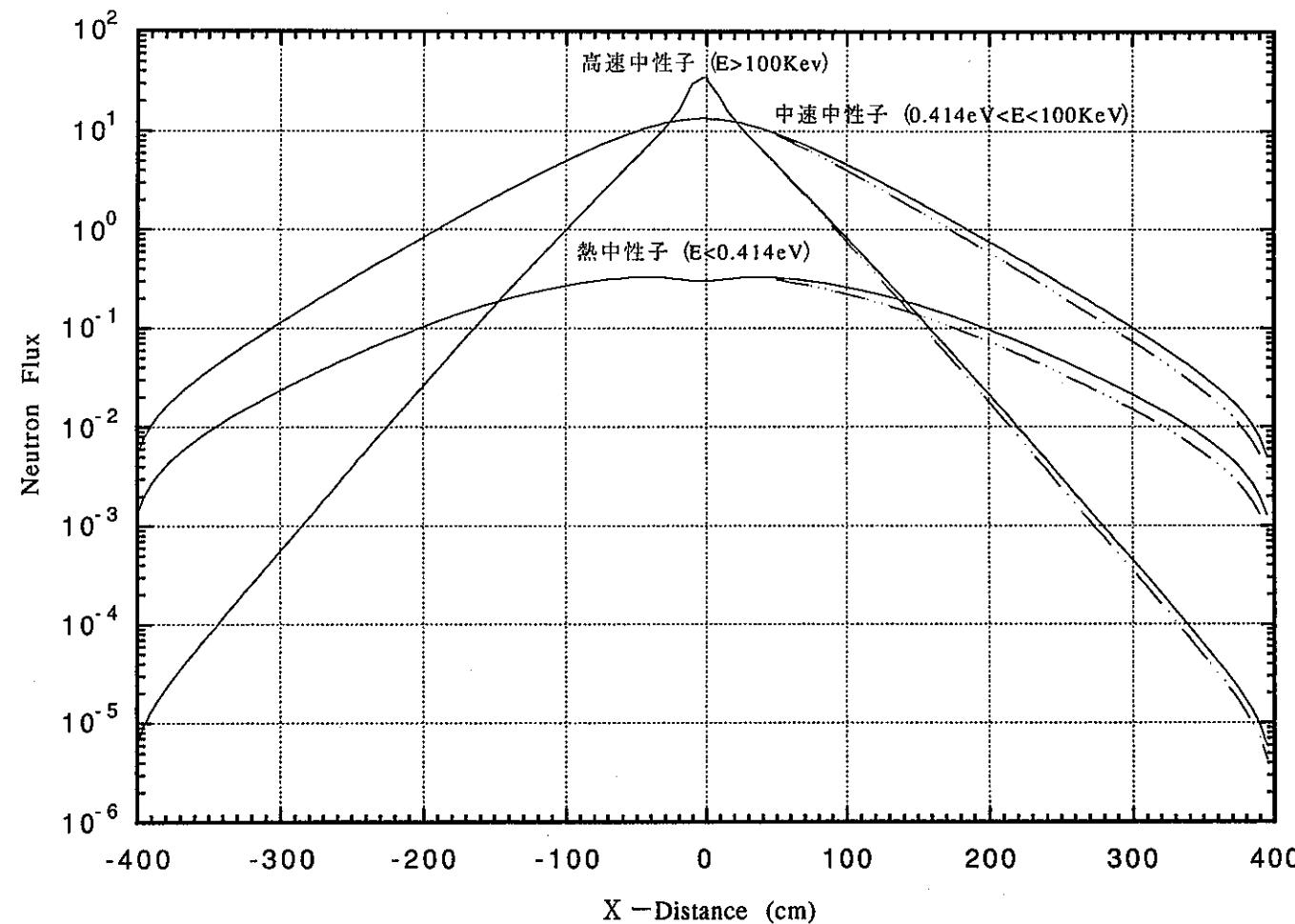
炉内・炉外NIS検出器の応答計算を行うためには $360^\circ R\theta$ モデルによる計算は不可欠であり、DORTコードのコーディング内容調査を行って、この問題点を解決する必要がある。

第3.1表 中心からの距離に対するXY体系 R θ 体系で計算した全中性子束の比

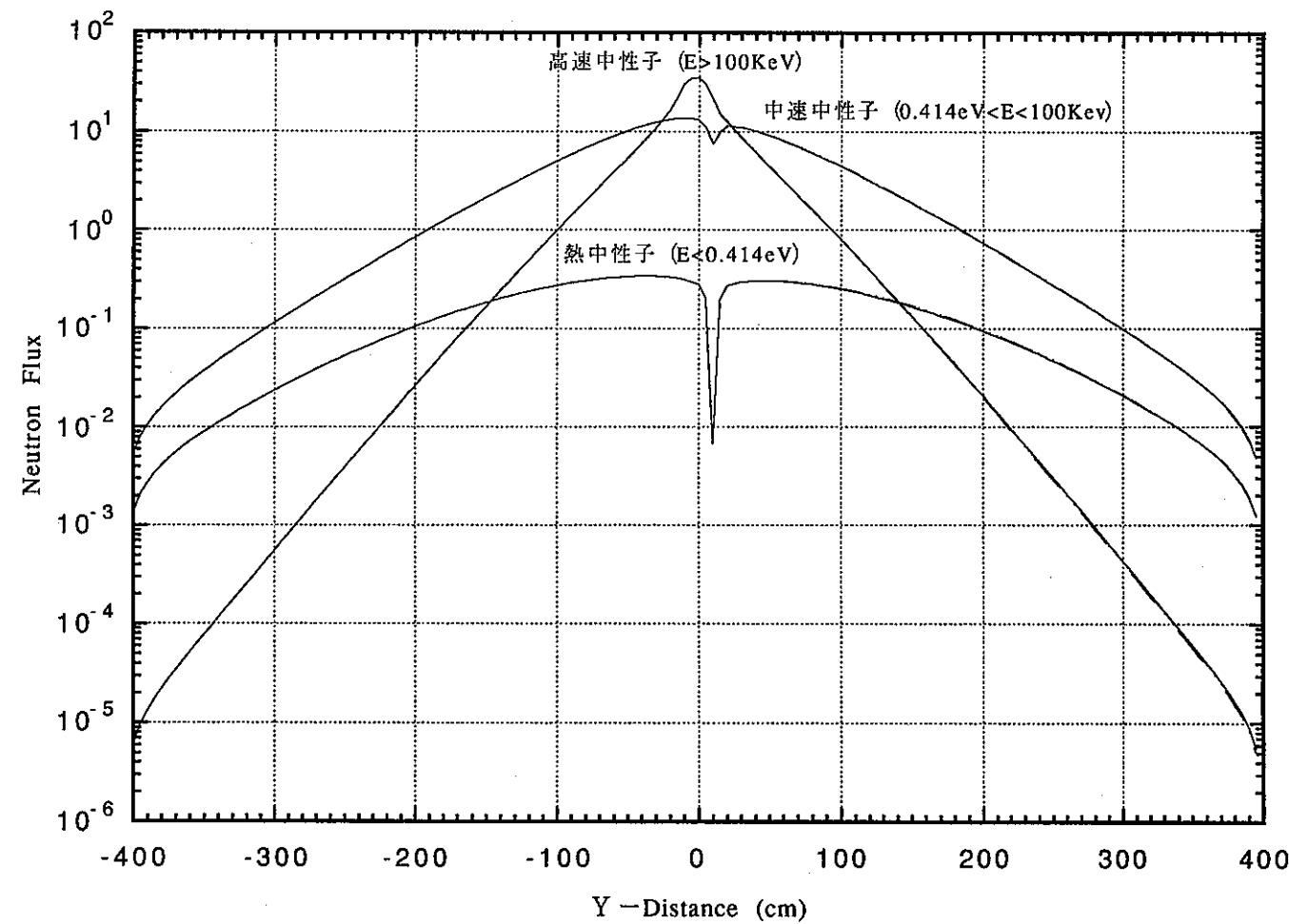
中心からの 距離 (cm)	XY計算とR θ 計算による全中性子束の比			
	方位角			
	0°	90°	180°	270°
50	1.018E+00	9.973E-01	9.937E-01	9.948E-01
60	1.051E+00	9.942E-01	9.938E-01	9.958E-01
70	1.078E+00	9.938E-01	9.926E-01	9.952E-01
80	1.102E+00	9.914E-01	9.907E-01	9.939E-01
90	1.124E+00	9.915E-01	9.888E-01	9.924E-01
100	1.144E+00	9.896E-01	9.879E-01	9.919E-01
110	1.163E+00	9.888E-01	9.869E-01	9.912E-01
120	1.179E+00	9.888E-01	9.851E-01	9.897E-01
130	1.196E+00	9.874E-01	9.850E-01	9.898E-01
140	1.212E+00	9.866E-01	9.844E-01	9.896E-01
150	1.226E+00	9.861E-01	9.842E-01	9.895E-01
160	1.240E+00	9.856E-01	9.841E-01	9.894E-01
170	1.253E+00	9.854E-01	9.838E-01	9.893E-01
180	1.266E+00	9.857E-01	9.836E-01	9.889E-01
190	1.278E+00	9.853E-01	9.833E-01	9.887E-01
200	1.290E+00	9.851E-01	9.834E-01	9.887E-01
210	1.301E+00	9.857E-01	9.835E-01	9.888E-01
220	1.312E+00	9.865E-01	9.837E-01	9.889E-01
230	1.322E+00	9.869E-01	9.839E-01	9.889E-01
240	1.332E+00	9.867E-01	9.844E-01	9.892E-01
250	1.342E+00	9.865E-01	9.853E-01	9.896E-01
260	1.352E+00	9.871E-01	9.859E-01	9.900E-01
270	1.361E+00	9.882E-01	9.859E-01	9.902E-01
280	1.369E+00	9.896E-01	9.860E-01	9.902E-01
290	1.378E+00	9.902E-01	9.869E-01	9.908E-01
300	1.386E+00	9.909E-01	9.879E-01	9.917E-01
310	1.395E+00	9.918E-01	9.892E-01	9.927E-01
320	1.403E+00	9.933E-01	9.911E-01	9.943E-01
330	1.413E+00	9.950E-01	9.934E-01	9.966E-01
340	1.423E+00	9.974E-01	9.964E-01	9.995E-01
350	1.433E+00	1.001E+00	1.001E+00	1.003E+00
360	1.444E+00	1.006E+00	1.006E+00	1.008E+00
370	1.456E+00	1.013E+00	1.012E+00	1.013E+00
380	1.469E+00	1.022E+00	1.020E+00	1.021E+00
390	1.486E+00	1.034E+00	1.031E+00	1.032E+00



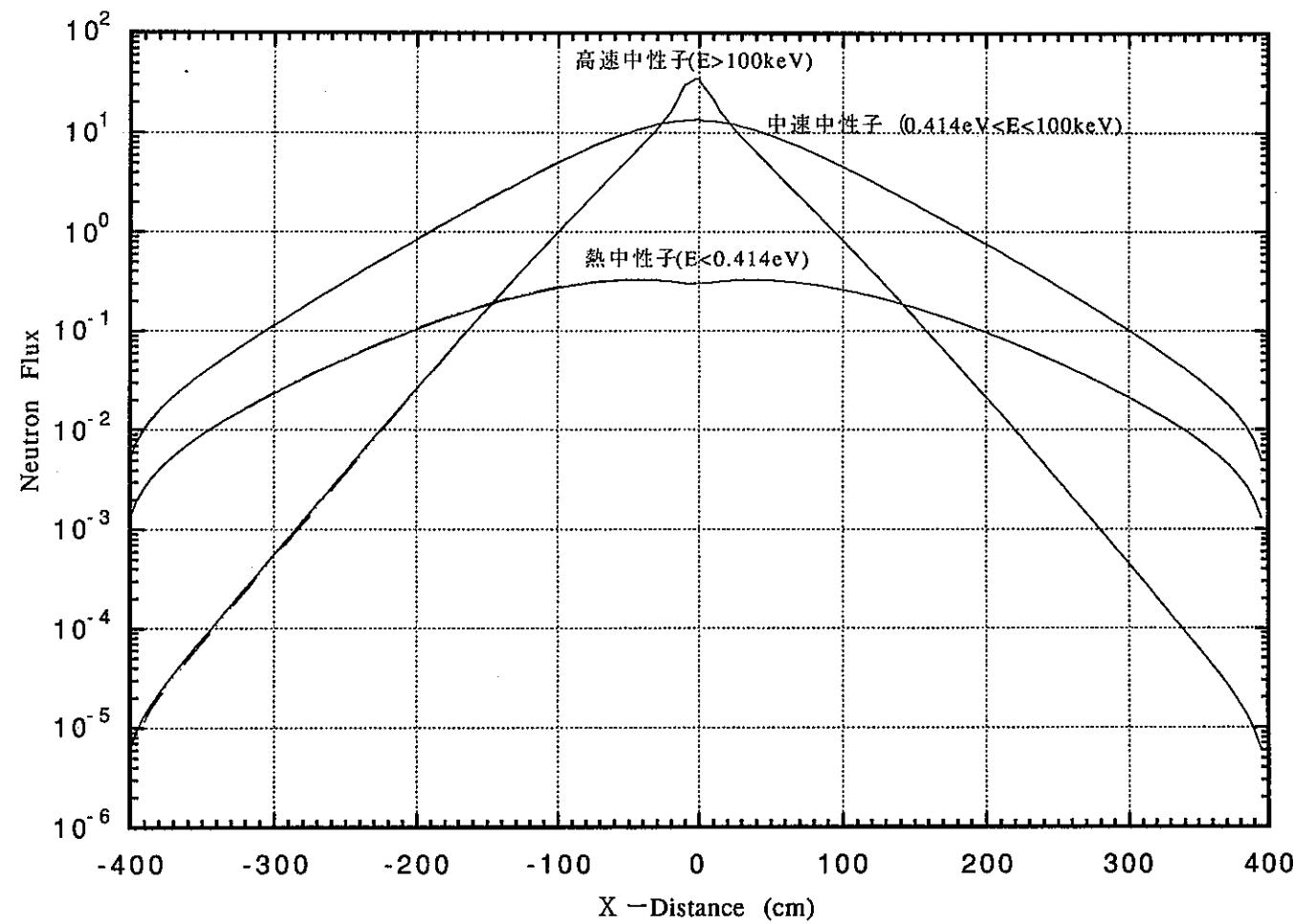
第3.1図 中性子束計算方法の精度評価のための仮想体系



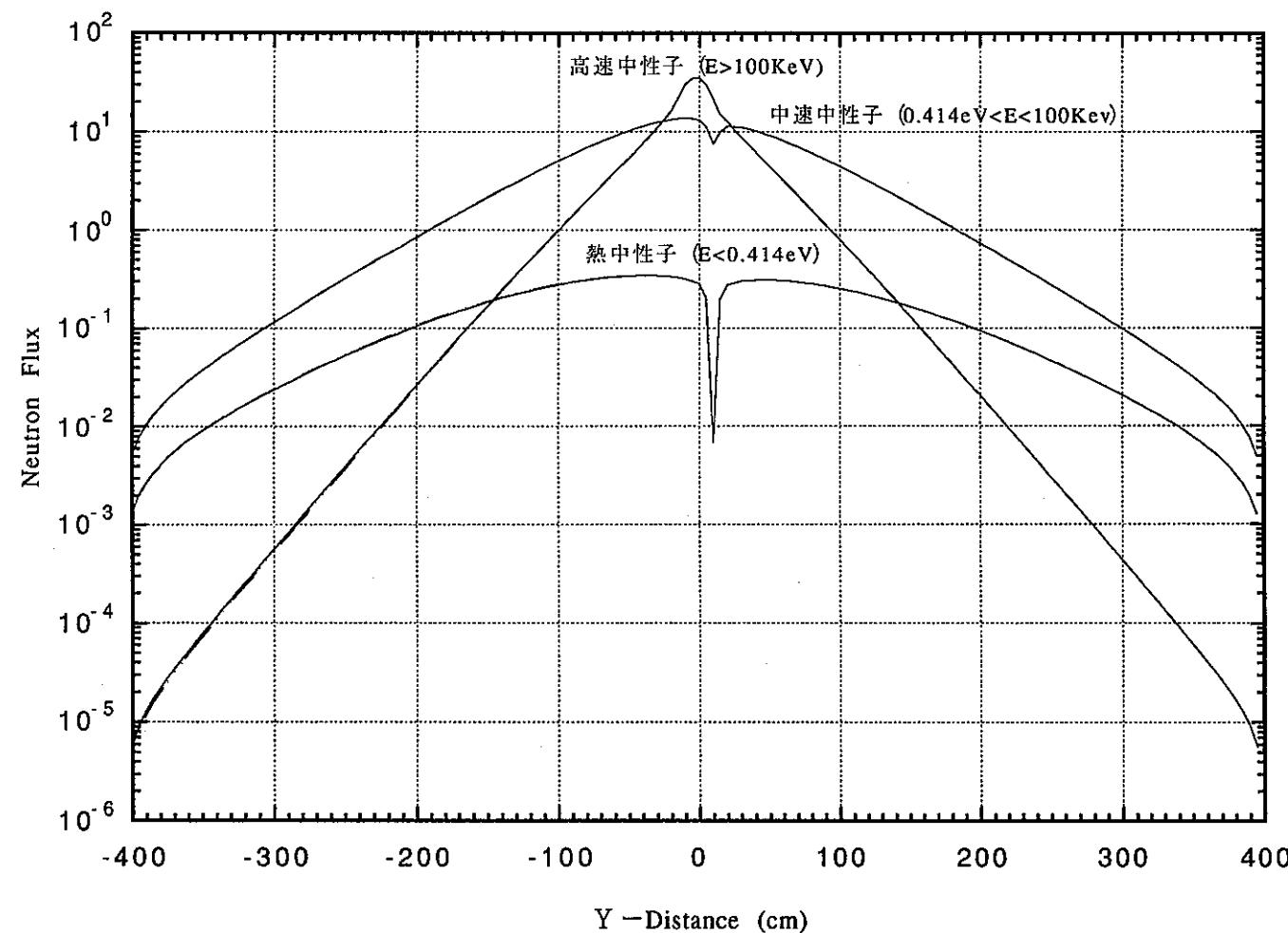
第 3.2 図 (a) XY 体系と $R\theta$ 体系で計算した 0° 方向 (+X) の中性子束分布の比較
(実線は XY モデル、破線は $R\theta$ モデル)



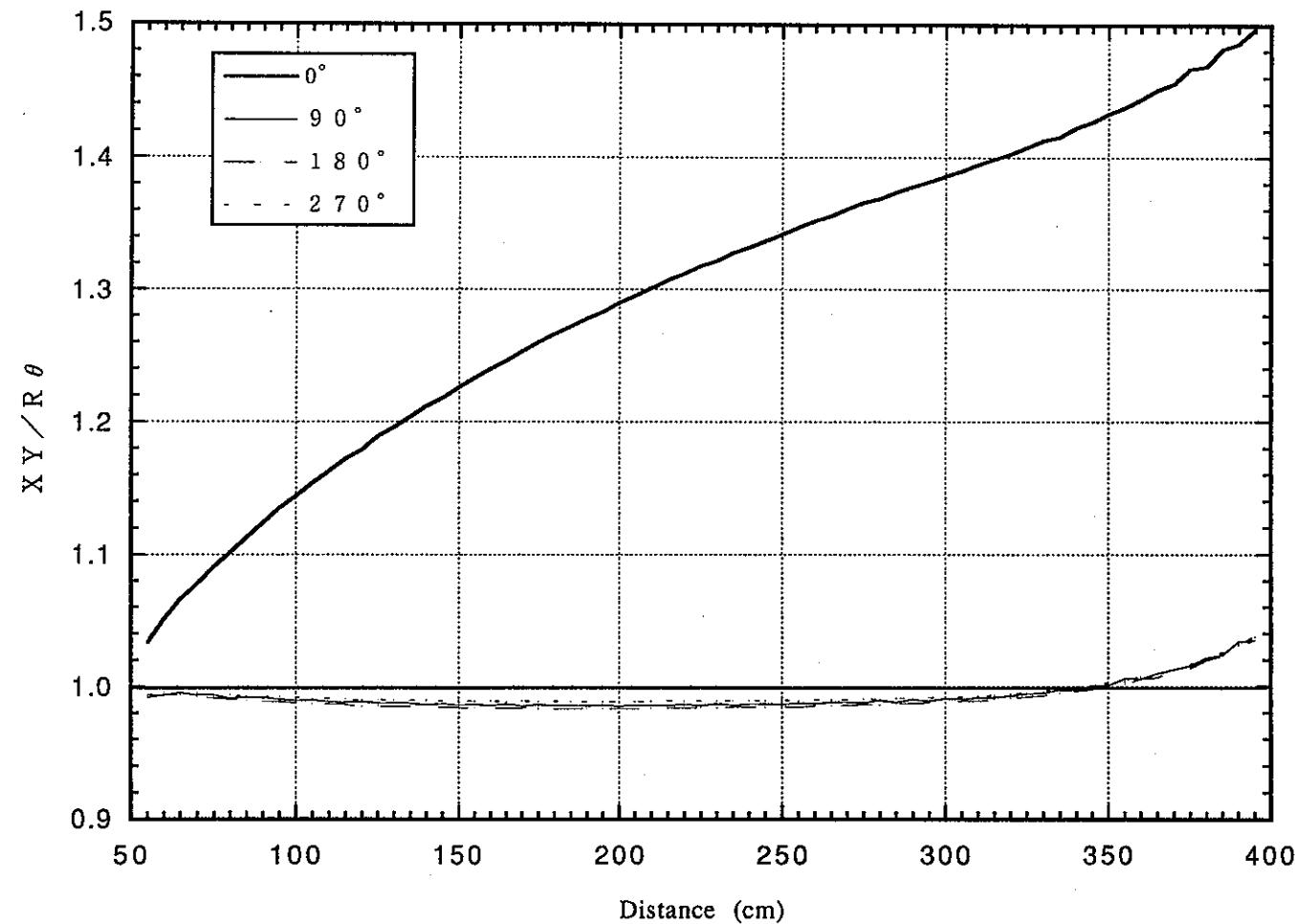
第 3.2 図 (b) XY 体系と $R\theta$ 体系で計算した 90° 方向 (+Y) の中性子束分布の比較
(実線は XY モデル、破線は $R\theta$ モデル)



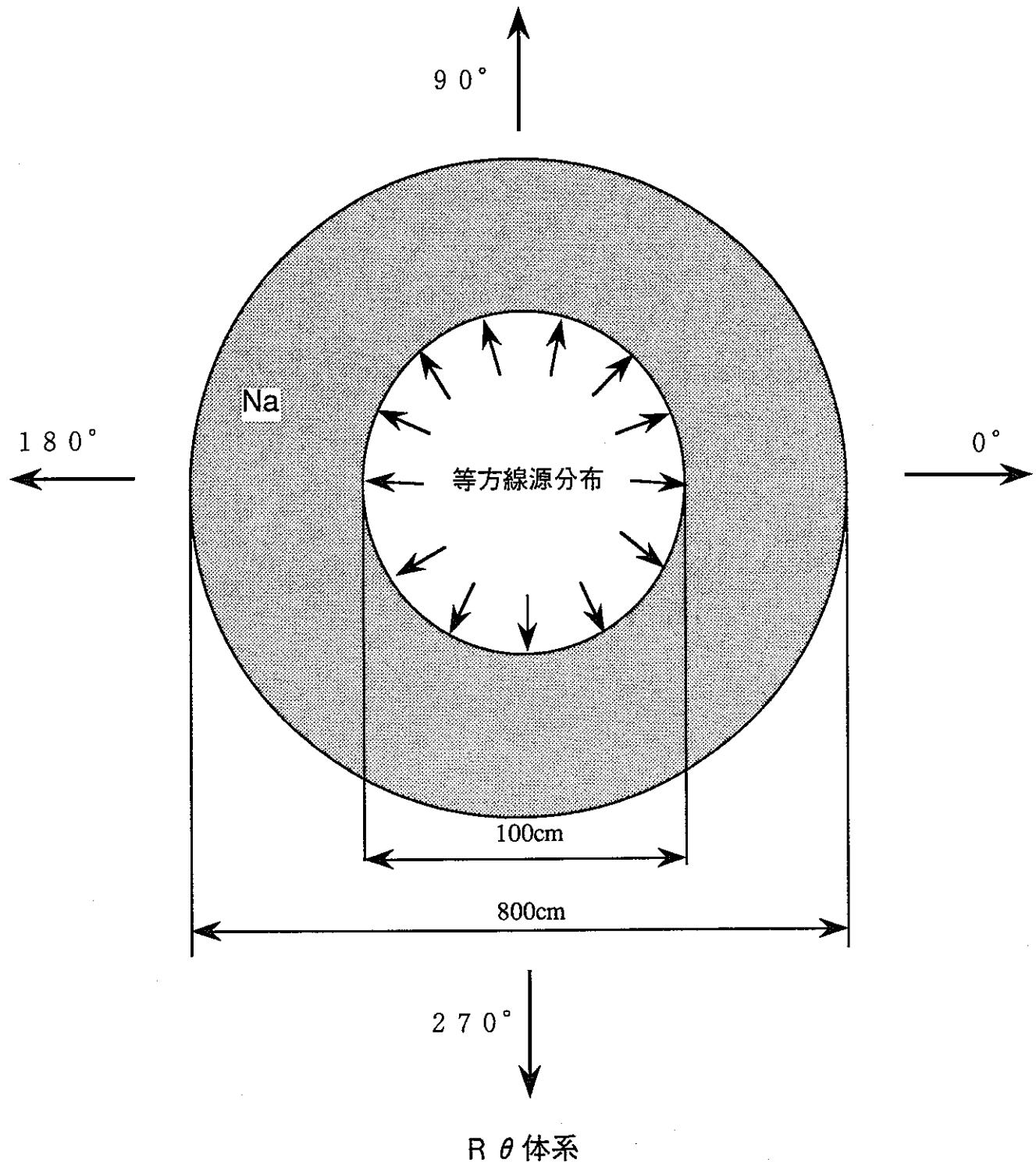
第 3.2 図 (c) XY 体系と $R\theta$ 体系で計算した 180° 方向 ($-X$) の中性子束分布の比較
(実線は $x\ y$ モデル、破線は $R\theta$ モデル)



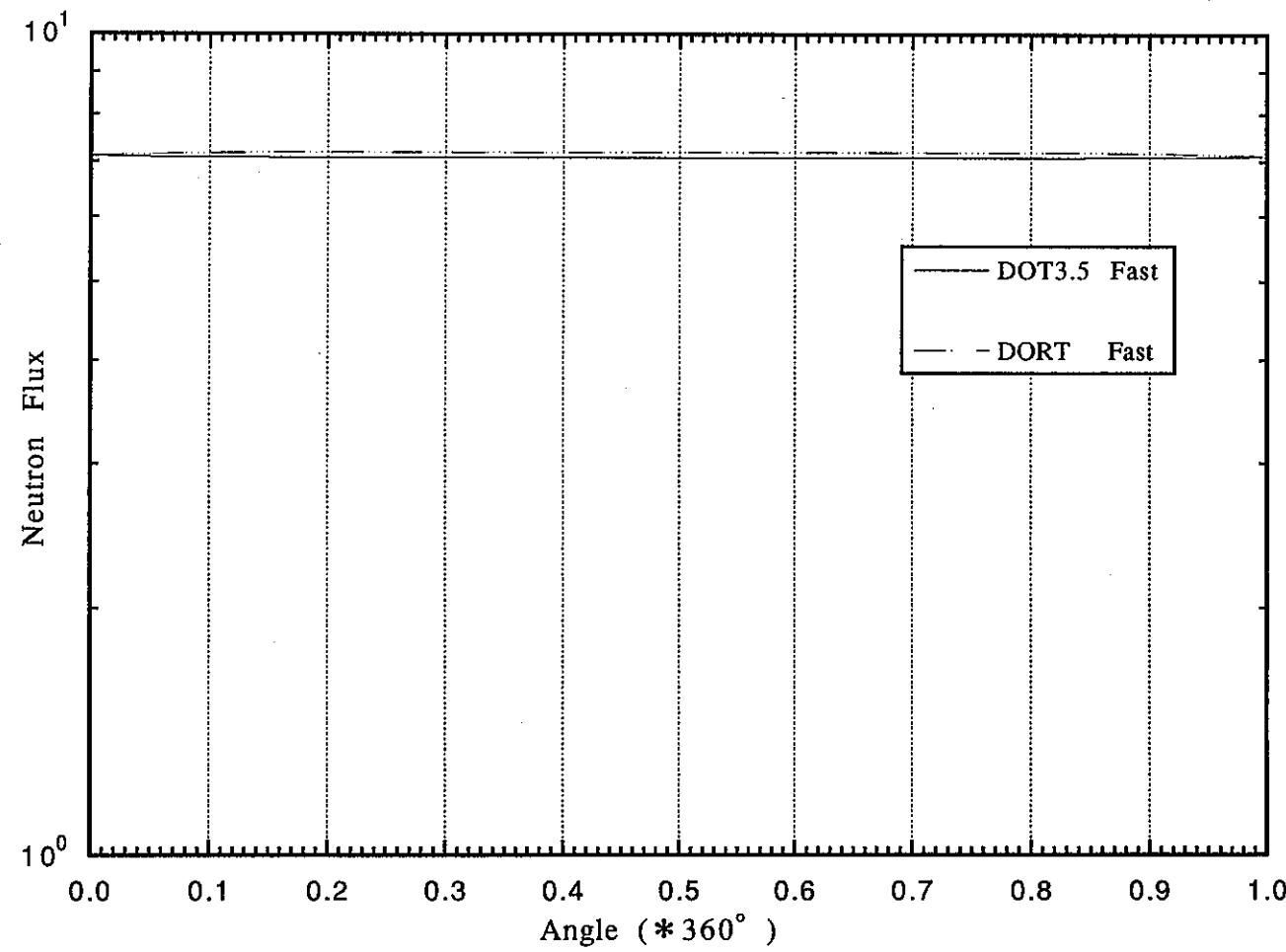
第 3.2 図 (d) XY 体系と $R\theta$ 体系で計算した 270° 方向 ($-Y$) の中性子束分布の比較
(実線は $x\ y$ モデル、破線は $R\theta$ モデル)



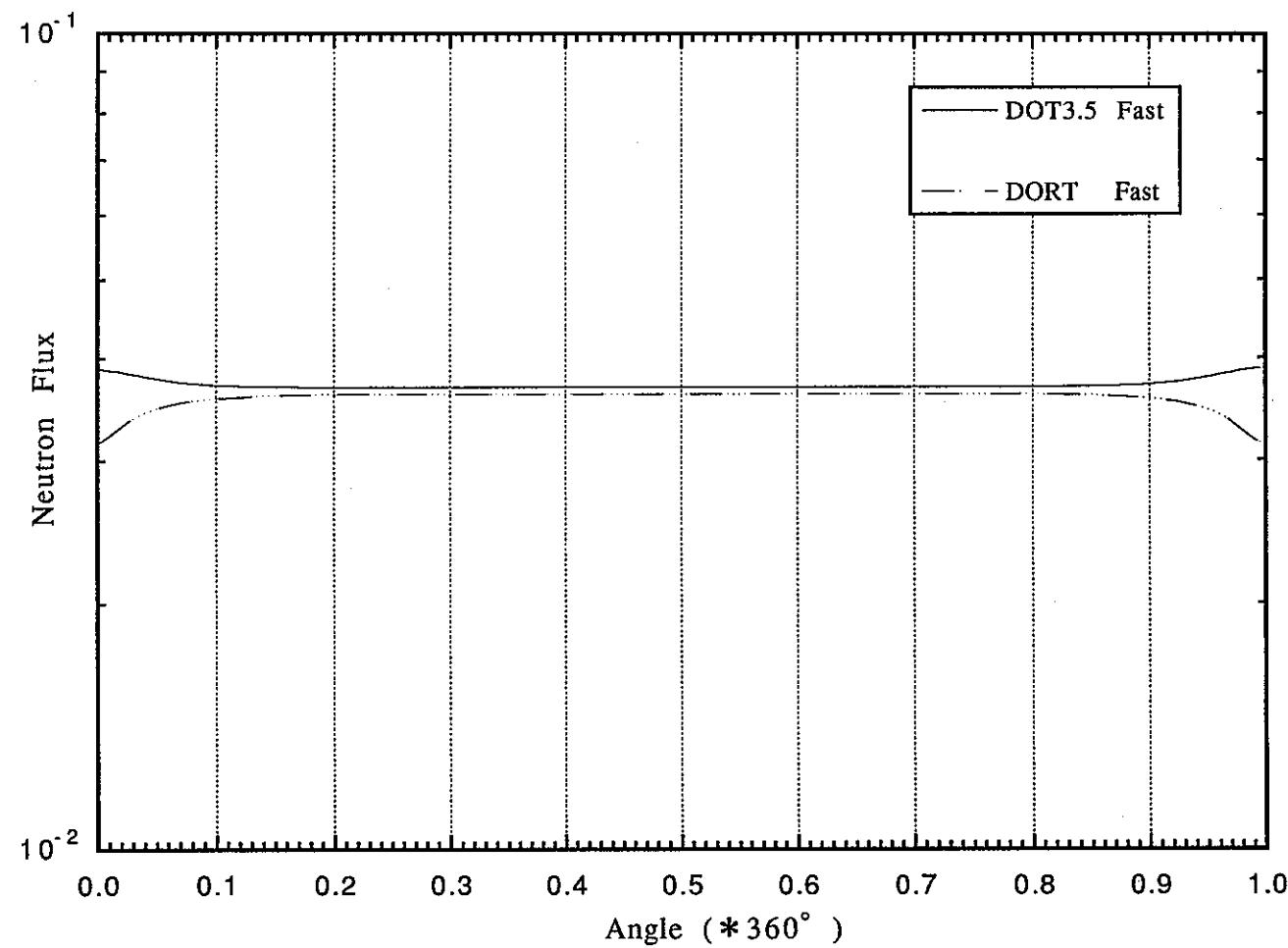
第3.3図 中心からの距離に対するXY体系とR θ 体系で計算した全中性子束の比



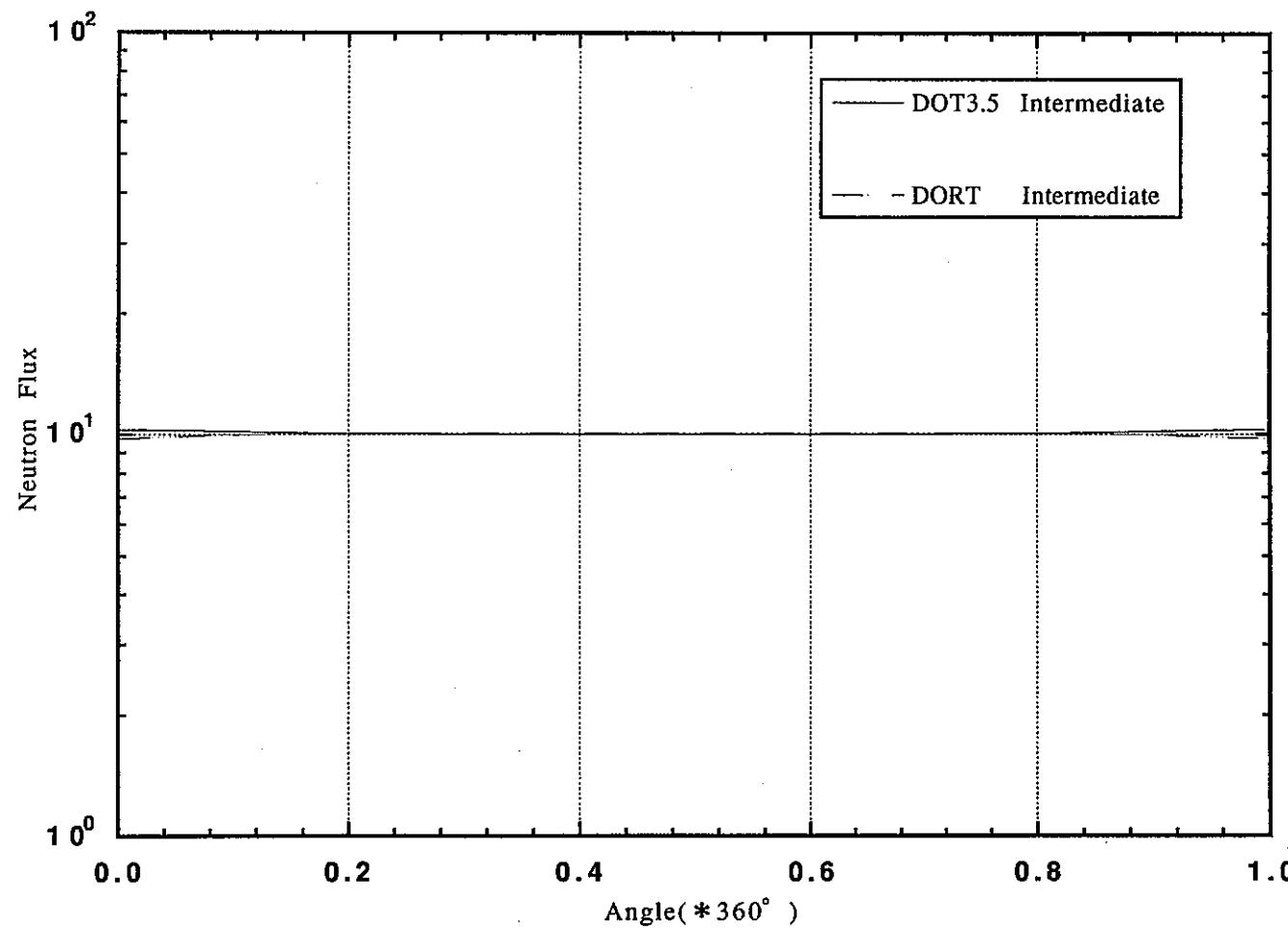
第3.4図 等方線源を内面から与えた $R\theta$ 体系



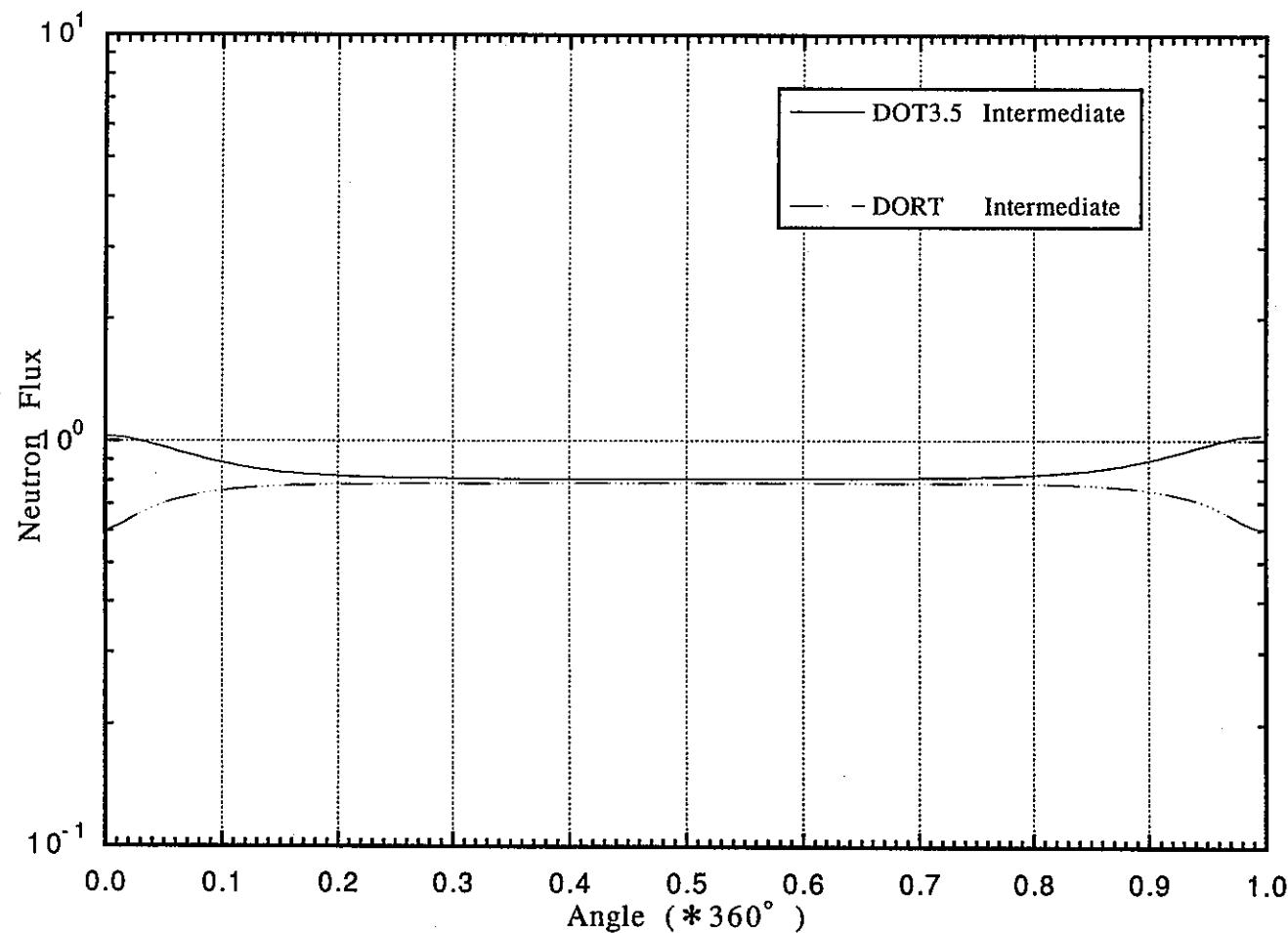
第 3.5 図(a) DORTとDOT3.5により計算した等方線源R θ 体系内面 ($R = 50 \text{ cm}$) での θ 方向高速 ($E > 100\text{KeV}$) 中性子束分布の比較



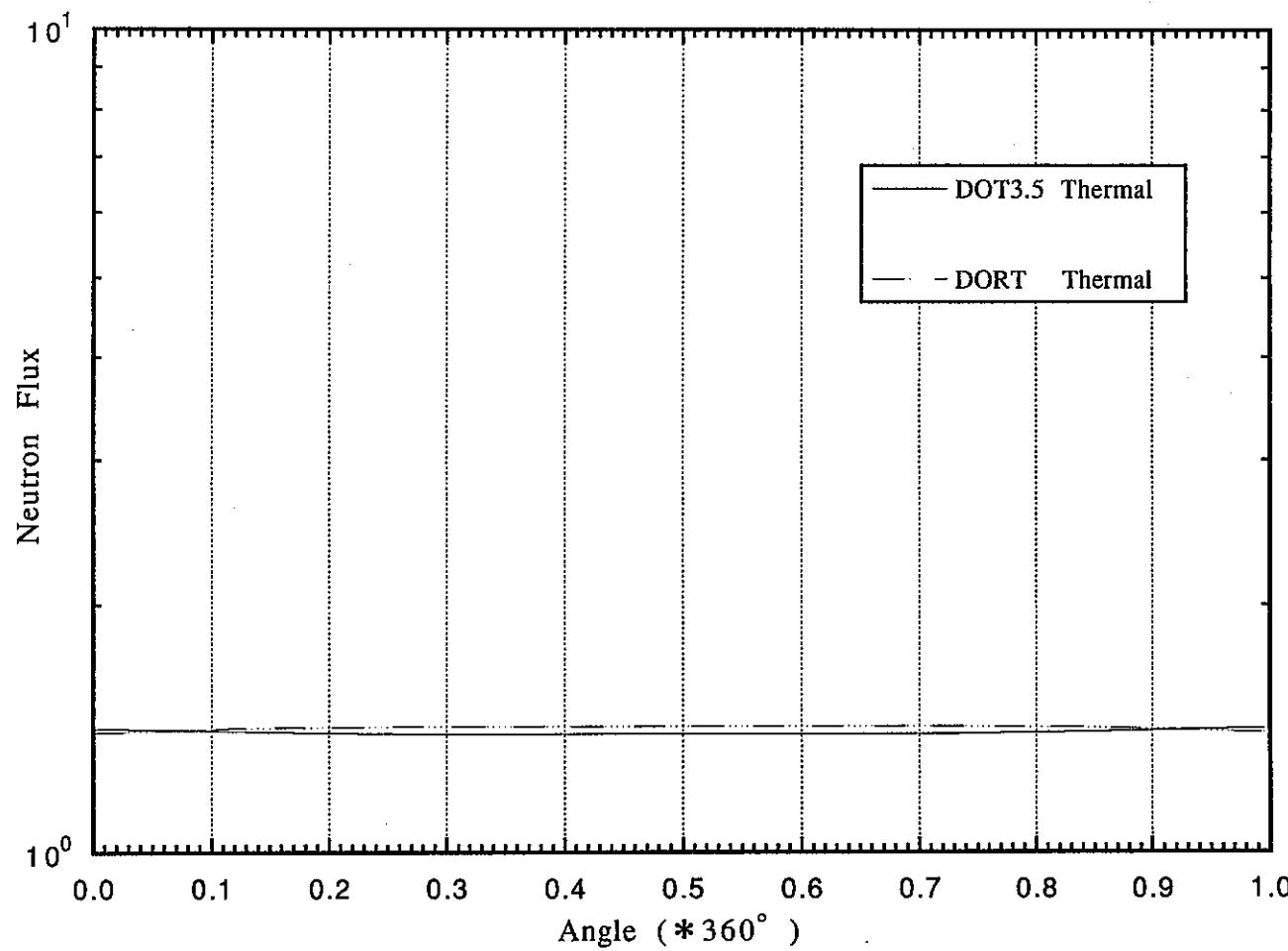
第 3.5 図(b) DORT と DOT3.5 により計算した等方線源 $R = 225\text{ cm}$ 体系内面での
 θ 方向高速 ($E > 100\text{ KeV}$) 中性子束分布の比較



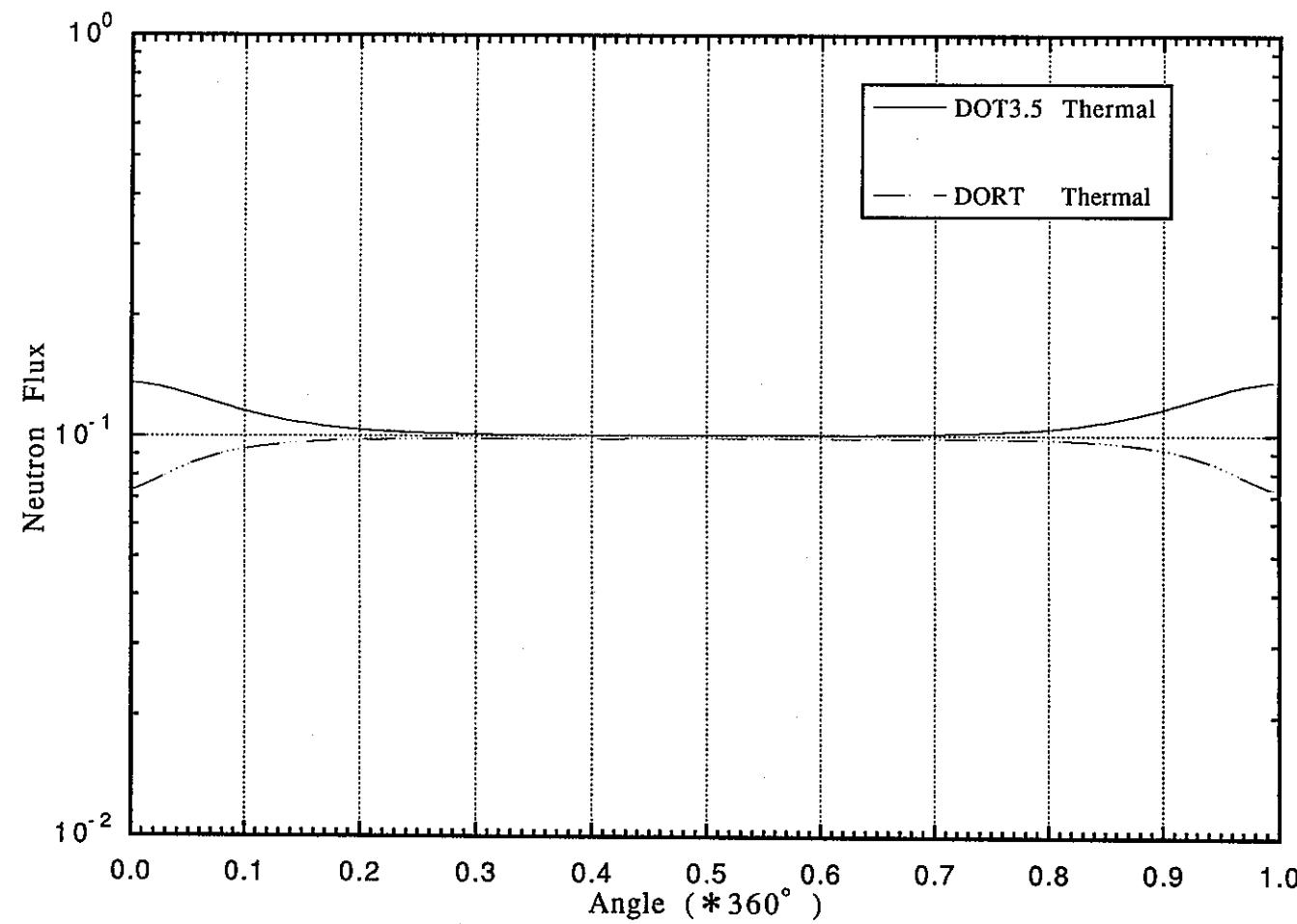
第3.6図(a) DORTとDOT3.5により計算した等方線源R_θ(R=50cm)での
θ方向中速(0.414eV < E < 100KeV) 中性子束分布の比較



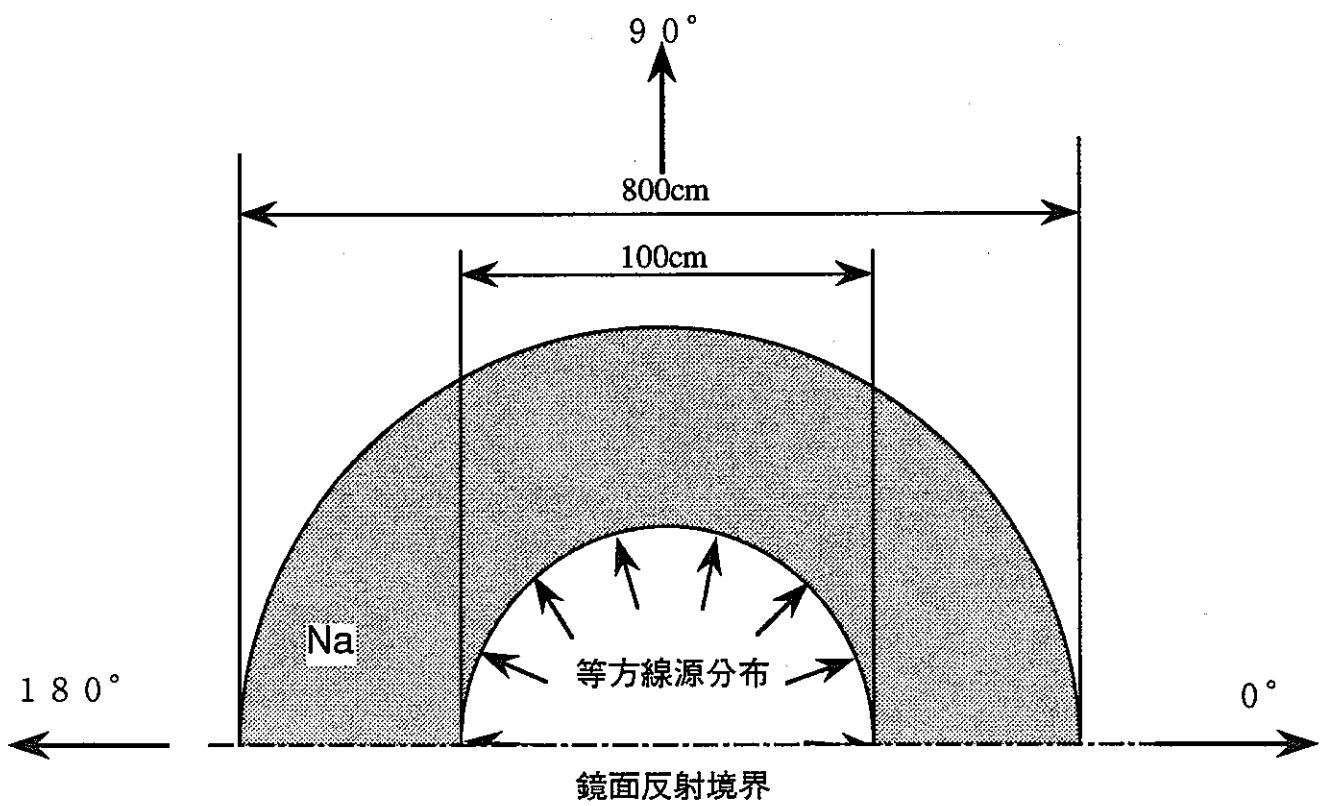
第 3.6 図(b) DORT と DOT3.5 により計算した等方線源 R_θ 体系内面 ($R = 225 \text{ cm}$) での
 θ 方向中速 ($0.414 \text{ eV} < E < 100 \text{ KeV}$) 中性子束分布の比較



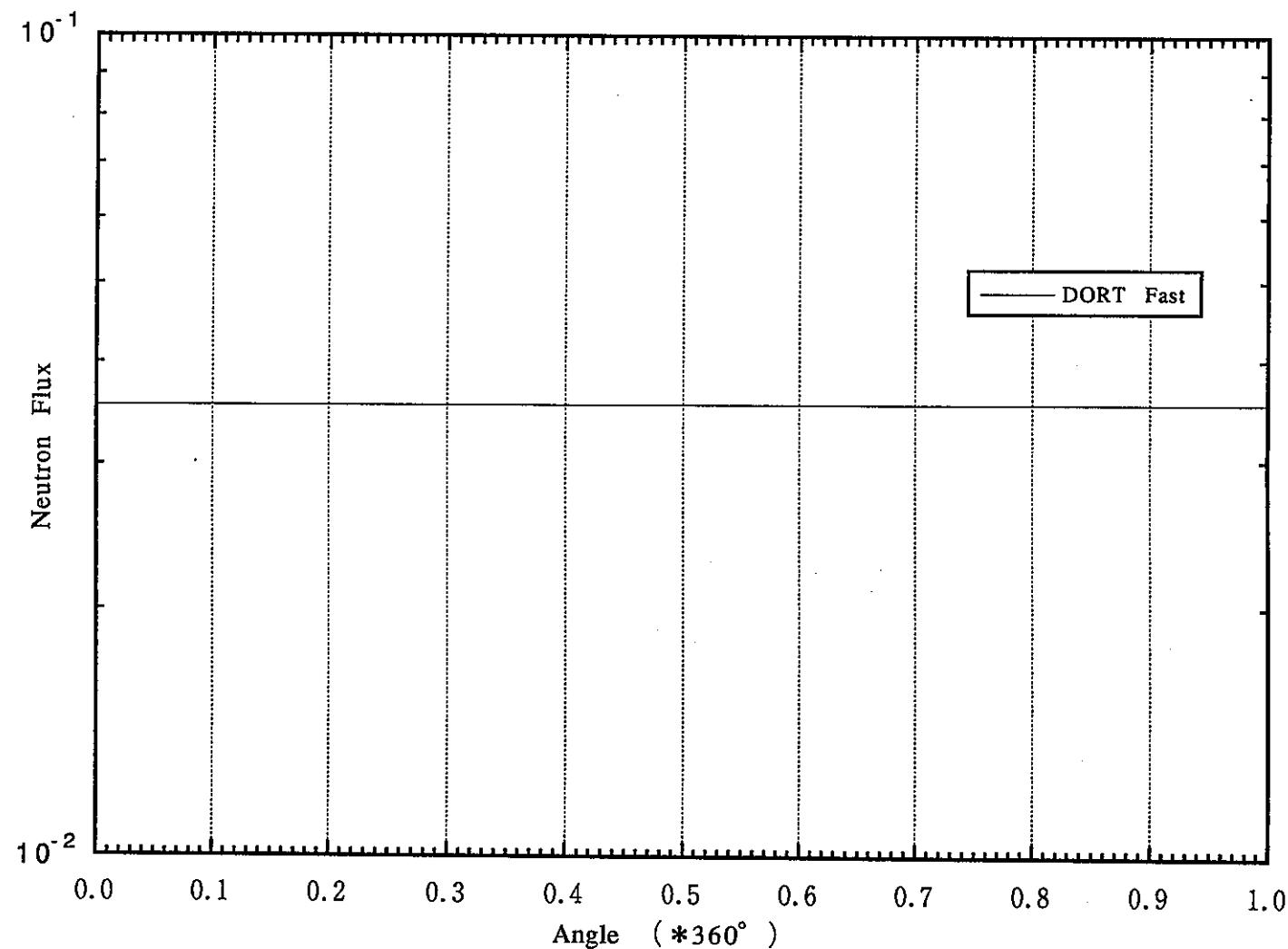
第 3.7 図(a) DORT と DOT3.5 により計算した等方線源 $R \theta$ 体系内面 ($R = 50 \text{ cm}$) での θ 方向熱中性子 ($E < 0.414 \text{ eV}$) 中性子束分布の比較



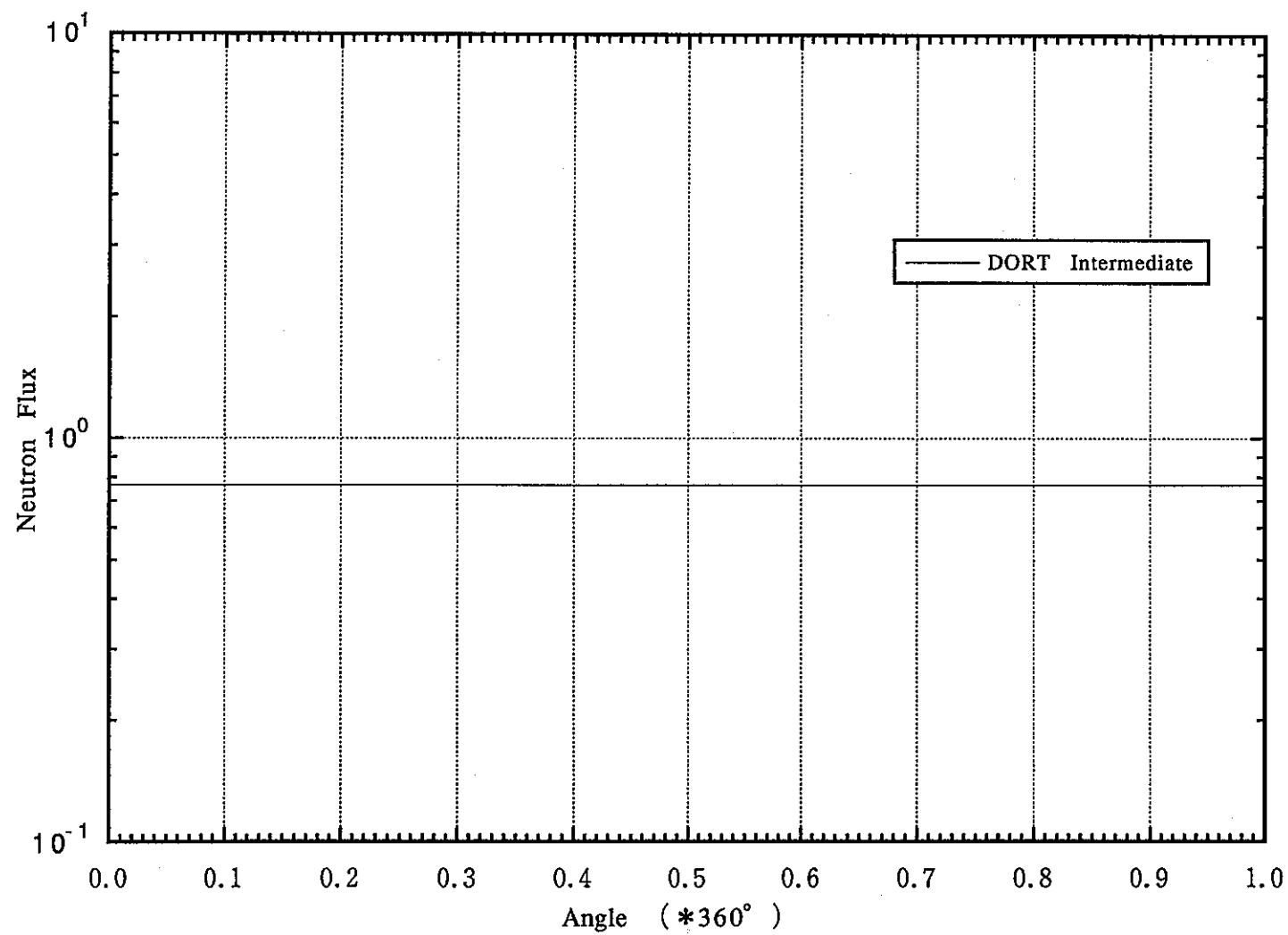
第 3.7 図(b) DORT と DOT3.5 により計算した等方線源 $R \theta$ 体系内面 ($R = 225\text{ cm}$) での θ 方向熱中性子 ($E < 0.414\text{ eV}$) 中性子束分布の比較



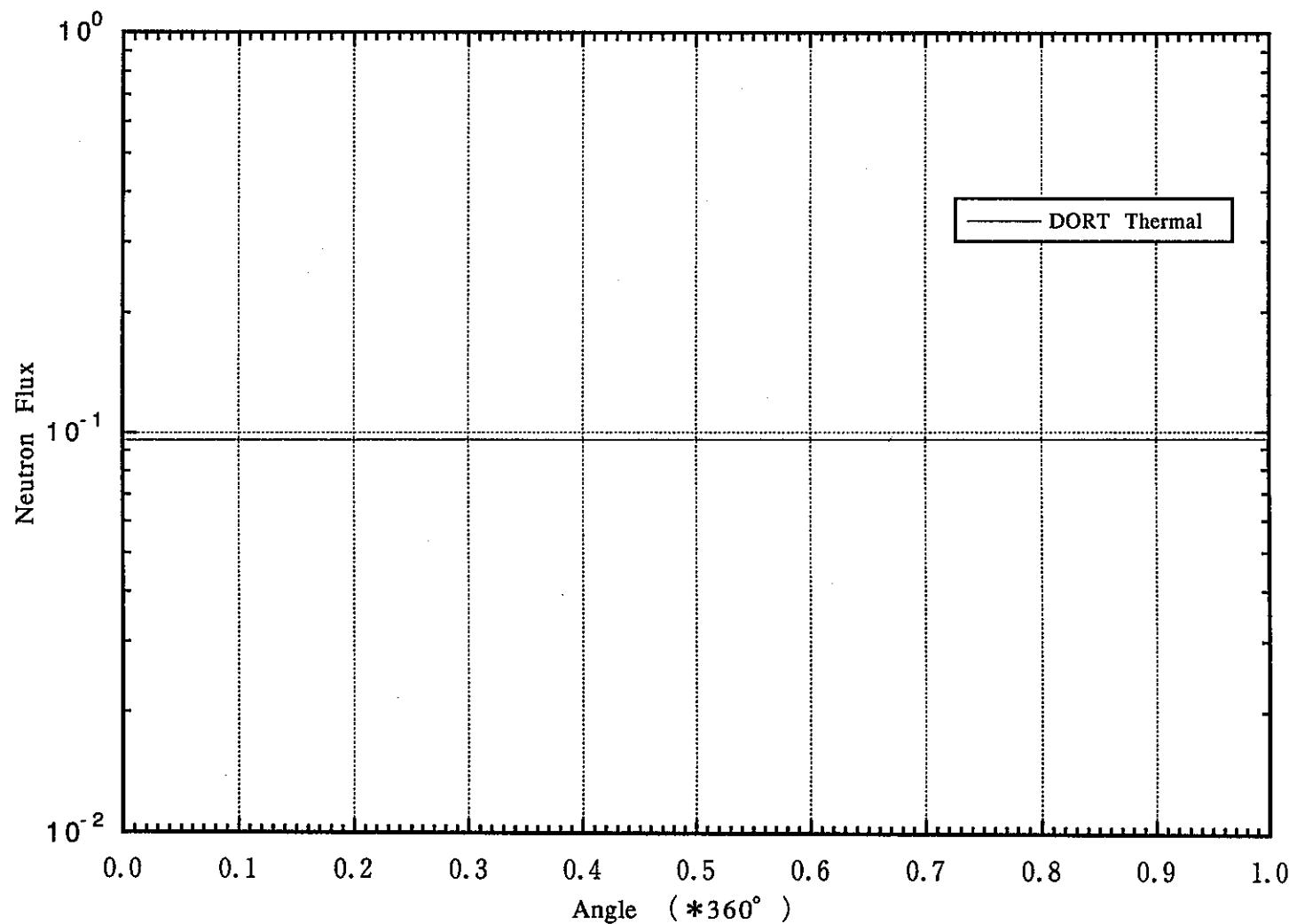
第3.8図 反射境界を用いた360°Rθ体系
(1/2モデル)



第3.9図 $1/2$ モデル（反射境界）で DORT により計算した等方線源 $R \theta$ 体系内面
($R = 255\text{ cm}$) での θ 方向高速 ($E > 100\text{ KeV}$) 中性子束分布



第3.10図 $1/2$ モデル(反射境界)で DORT により計算した等方線源 $R\theta$ 体系内面
($R = 225 \text{ cm}$) での θ 方向中速 ($0.414 \text{ eV} < E < 100 \text{ KeV}$) 中性子束分布



第3.1.1図 $1/2$ モデル（反射境界）で DORT により計算した等方線源 $R \theta$ 体系内面
($R = 225 \text{ cm}$) での θ 方向熱中性子 ($E < 0.414 \text{ eV}$) 中性子束分布

4. MSM法の反応度測定精度の予備検討

4. 1 検討の目的

実機の反応度測定にMSM法を適用する際には、検出器応答(R_1 および R_2)および基準体系の反応度(ρ_1)には実測値が用いられ、補正係数は2次元計算により得られた中性子束および随伴中性子束から求められる。MSM法の適用性検討では、検出器応答および基準体系の反応度にも補正係数を求めた際に使用した2次元計算での計算値を用いていた。本来、MSM法の利点の1つは補正係数の計算に用いる中性子束計算精度に大きな影響を受けない点にあるが、検出器応答および反応度も同一の計算方法で求めた前述の検討方法では、中性子束の計算精度が及ぼす影響を評価できない。

そこで、中性子束計算方法とは独立な方法で「もんじゅ」炉心の反応度および検出器応答を計算し、これを実測値と見なしてMSM法による反応度予測値と比較し、MSM法の反応度測定精度を予備的に検討した。

4. 2 検討方法

4. 2. 1 モンテカルロ法による実機模擬計算

反応度および検出器応答の計算には、実機の形状をより正確に模擬するために、3次元モンテカルロ法を用いた。対象とする炉心構成は、前年度のMSM法の検討に用いたものと同一として、以下の5種類の制御棒状態について計算を行った。

ケース1 (基本配置)	第4. 1図
ケース2 中心CCRを全挿入した場合	第4. 2図
ケース3 CCR、FCR13本を全挿入した場合	第4. 3図
ケース4a C ₂ 、C ₆ を全挿入した場合	第4. 4図
ケース4b C ₂ 、C ₆ 、C ₈ およびC ₇ を全挿入した場合	第4. 5図

検出器は、第4. 1図～第4. 5図に示したように、ブランケットの最外周の6つの集合体および内側炉心および外側炉心の制御棒近傍の2つ集合体内の平均全中性子束を検出

しているものとした。

3次元モンテカルロ計算コードは連続エネルギーコード M C N P - V 4 を用い、第4. 6図（水平方向断面図）および第4. 7図（垂直方向断面図）に示すモデルで計算を行った。計算範囲は半径方向は炉心槽まで、垂直方向は上部・下部の反射体までとした。集合体は均質化して取扱い、内側炉心、外側炉心、および径方向プランケット集合体に、2次元計算と同じ均質化組成（第4. 1表）を用いた。また、軸方向の各領域中の材質の体積割合も2次元計算と同じ、第4. 2表に示す値を用いた。

反応度を求めるための実効増倍率計算と、検出器応答を求めるための固定線源計算をケース毎に行った。固定線源計算の中性子源は、2ヶ所の外部中性子源（C f - 2 5 2 2. 6 m g、高さ7. 5 cm）のみとし、燃料の自発核分裂と (α, n) 中性子源は無視した。M C N P では核分裂性物質を含む系での固定線源計算において核分裂中性子の発生も自動的に考慮する。

モンテカルロ計算のヒストリー数は以下の通りとした。

実効増倍率計算 1 0 0 0 ヒストリー × 2 0 5 バッチ（初期5バッチをスキップ）

固定線源計算 2 5, 0 0 0 ヒストリー

実効増倍率計算の結果得られた実効増倍率を、D O R T によるX Y 体系での実効増倍率計算値（基本配置での実効増倍率がM C N P で計算した実効増倍率に一致するようにバッククリングを調整）と比較して第4. 3表に示す。M C N P による実効増倍率計算値は約2% $\Delta k / k$ 程度、D O R T による計算値を下回る。

4. 2. 2 補正係数計算のための2次元S n 計算

第4. 8図に補正係数Fを計算により求めるための手順を示す。中性子束分布は、R Z またはX Y 体系2次元モデルを用いた輸送計算法により計算した。一連の計算は、以下の2次元輸送計算から成る。

（1） 軸方向バッククリング計算

炉心内中性子束計算で用いる軸方向の漏れ（D B²）を2次元R Z 計算により求め る。

(2) 炉心内の中性子束計算

炉心部のX Y体系に関する固有値計算(λ -mode計算:浅い未臨界系)により、炉内の基本モード中性子束分布を求める。計算された基本配置の実効増倍率がM C N Pの計算値と等しくなるように、バックリングを調整する。この調整されたバックリングは基本配置以外のケースおよび以下のX Y計算にも用いられる。

(3) 炉心内の随伴中性子束計算

炉心部のX Y体系に関するAdjoint固有値計算により、炉内の基本モード随伴中性子束分布を求める。

(4) 固定中性子源計算

(2) および(3)で計算した炉心内の中性子束および随伴中性子束から(2.1.1)式により、固定中性子源の有る場合の中性子束分布の初期値を求めるコードINIFLX(本作業で開発)を用いて、初期中性子束分布を求める。これを初期値とした固定線源計算を行い、炉心内中性子束分布を計算する。

(5) 補正係数の計算

実効線源強度比(S_2/S_1)、検出器効率比($\varepsilon_2/\varepsilon_1$)を(3)で計算した随伴中性子束分布および(4)で計算した中性子束分布から、INNISコード(本作業で開発)を用いて求め、補正係数 $F = (\varepsilon_2/\varepsilon_1) \cdot (S_2/S_1)$ を計算する。

(1)の計算に用いたR Z計算モデルを第4. 9図に、(2)～(4)の計算に用いたX Y計算モデルを第4. 10図に示す。

4. 3 モンテカルロ法による反応度計算値とMSM法による予測値との比較

以下の式により、ケース2～4bの反応度のMSM法による予測値を求め、M C N Pによる計算値と比較した。

$$\rho_{ij}^{MSM} = \rho_i \times F_{ij} \cdot (R_{ij}/R_{i1}) \quad (4. 1)$$

ここで、iは検出器番号(i=1, 6)、jはケースを表し(j=2, 3, 4a, 4b)、 ρ_{ij}^{MSM} はケースjの反応度の検出器iによるMSM法予測値、 F_{ij} は検出器i、ケースjの補正係数を表す。また、 ρ_i は基本配置(ケース1)の反応度(M C N Pによる計算値=DORTによる計算値)を表す。

(4. 1) 式で求めた M S M 法による反応度予測値を M C N P による計算値および S M 法による反応度予測値と比較して第 4. 4 表に示す。また、検出器位置毎の各反応度および反応度予測値を、各ケースについて第 4. 11 図～第 4. 14 図に示す。M C N P による反応度計算値の誤差 ($\delta \rho_{ij}$) は、各ケースの実効増倍率計算値 (k_{ij}) の統計誤差 (δk_{ij}) から次式により誤差伝播を考慮して求めたものである。

$$(\delta \rho_{ij})^2 = (\delta k_{ij} / k_{ij})^2 \quad (4. 2)$$

また M S M 法による反応度予測値の誤差 ($\delta \rho_{ij}^{MSM}$) は、各ケース M C N P による検出器応答計算値 (R_{ij}) の統計誤差 (δR_{ij}) および基本配置の反応度の統計誤差 ($\delta \rho_1$) から、誤差伝播則により次式で求めた。

$$\begin{aligned} (\delta \rho_{ij}^{MSM})^2 &= F_{ij}^2 \cdot \{ (\delta R_{ij} / R_{ij})^2 + (\delta R_{ij} \cdot R_{ij} / R_{ij})^2 \\ &\quad + (\delta \rho_1 \cdot R_{ij} / R_{ij})^2 \} \end{aligned} \quad (4. 3)$$

M S M 法による反応度予測値の平均値は、各検出器による予測値の平均値を表し、その誤差は各検出器間での予測値のばらつき（標準偏差）を表す。

8 個の検出器についての平均値で見ると、全ケースとも M S M 法による反応度予測値は最大 10 % 程度の過小評価となっている。ただし、S M 法に較べると、最も深い未臨界系であるケース 3 (第 4. 12 図) では、M S M 法を用いることにより、検出器間のばらつきが -22 % ~ +79 % から約 10 % (モンテカルロ計算の統計誤差による反応度予測値の誤差と同程度) に減っている。ケース 4 a (第 4. 13 図) では、全挿入された制御棒に近い検出器 (6 および 8) での予測精度が悪く、このために、S M 法よりも平均の予測精度は悪くなっているが、検出器間でのばらつきは小さくなっている。ケース 4 a を除いて、M C N P による反応度計算値との差異は、M C N P の検出器応答の統計誤差に起因する反応度予測値の誤差の 2 倍 (2σ : 95 % 信頼区間の片側の幅) 以内となっている。

M S M 法で反応度を 10 % 程度過小評価している原因として、M C N P による実効増倍率計算値が D O R T による値よりも 2 % 程度も小さいことが考えられる。すなわち、この実効増倍率の違いをバックリングにより調整したものの、炉内中性子束分布およびスペクトルが M C N P と D O R T による計算で大きく異なっていることが考えられ、これが反応

度の予測精度を悪化させたと考えられる。この点を検証するために、M C N P と D O R T による反応度が比較的良く合うような単純な系で、M S M 法による反応度予測精度を検討することが望まれる。

第4. 1表 「もんじゅ」 MSM法解析に用いた 材質の原子個数密度組成

核種	内側炉心	外側炉心	径方向 プランケット	軸方向 プランケット	B 4 C	S U S 3 1 6	S U S 3 0 4	イコブ718	ナトリウム (200°C)	セラミック ファイバ	窒素ガス
U-235	1.11592E-05	1.00831E-05	2.06151E-05	1.53979E-05							
U-238	5.49811E-03	4.96791E-03	1.01570E-02	7.58652E-03							
Pu-239	9.10972E-04	1.25562E-03									
Pu-240	3.42612E-04	4.72231E-04									
Pu-241	1.08575E-04	1.49652E-04									
Pu-242	5.56229E-05	7.66664E-05									
N											2.365E-02
O	1.37282E-02	1.37692E-02	2.03552E-02	1.52038E-02						6.5859E-03	
Na	9.43968E-03	9.43968E-03	8.01610E-03	9.43968E-03					2.3650E-02	1.3603E-05	
Cr	3.87492E-03	3.87492E-03	3.08236E-03	3.87492E-03		1.5712E-02	1.7296E-02	1.7054E-02			
Fe	1.39021E-02	1.39021E-02	1.10586E-02	1.39021E-02		5.6362E-02	5.9752E-02	1.6964E-02		2.0297E-06	
Ni	2.72617E-03	2.72617E-03	2.16857E-03	2.72617E-03		1.1052E-02	7.2572E-03	4.1741E-02			
Mn	3.23595E-04	3.23595E-04	2.57408E-04	3.23595E-04		1.3121E-03	1.2924E-03				
Mo	3.08833E-04	3.08833E-04	2.45665E-04	3.08833E-04		1.2552E-03**		1.5080E-03			
Pu-238	1.71985E-05	2.37051E-05									
Am-241 *	2.43808E-05	3.36047E-05									
B-11					6.1404E-02						
B-10					4.8154E-02						
C					2.5630E-02						
Al									2.1416E-03		
Si									1.6803E-03		
Ta *								1.3154E-03			

* Am-241 およびTaは、JSD-J2中に含まれないために無視した。

** 正しくは1.2522E-3atom/barn/cm

第4. 2表 M C N P 計算に用いた領域毎の体積比
(D O R T による R Z 計算と同一)

領域番号	領域名	組成 (Vol. %)	1次元* 縮約領域
1, 80	内側炉心 (1)	内側炉心 (100)	2
2, 82	内側炉心 (2)		4
3, 84	内側炉心 (3)		6
4, 85	外側炉心	外側炉心 (100)	7
5, 86	径方向プランケット	径プランケット(100)	8
6	軸プランケット(1)	軸プランケット(100)	2
7	軸プランケット(2)		4
8	軸プランケット(3)		6
9	ガスプレナム (1)	SUS 316 (26.91)	9
10	ガスプレナム (2)	Na (37.64)	9
11	ガスプレナム (3)		9
12, 16	ガスプレナム (4)	SUS 316 (21.77) Na (39.62)	9
13, 87	中性子遮蔽体 (1)	SUS 304 (68.3)	9
14, 88	中性子遮蔽体 (2)	SUS 316 (9.7)	10
15, 89	中性子遮蔽体 (3)	Na (22.0)	11
17	下部端栓部 (1)	SUS 304 (42.94)	9
18	下部端栓部 (2)	Na (57.06)	9
19	下部端栓部 (3)		9
20	下部端栓部 (4)	SUS 316 (51.61) Na (48.39)	9
21	下部空隙部(1)	SUS 316 (17.89)	9
22	下部空隙部(2)	Na (82.11)	9
23	下部空隙部(3)		9
24	下部空隙部(4)	SUS 316 (12.75) Na (87.25)	9
25	下部軸遮蔽 (1)	SUS 316 (68.06)	10
26	下部軸遮蔽 (2)	Na (31.94)	10
27	下部軸遮蔽 (3)		10
28	下部軸遮蔽 (4)	SUS 316 (66.85) Na (33.15)	10
29	中性子遮蔽下部	SUS 304 (79.6) SUS 316 (0.8) Na (19.6)	10
30, 92, 94	ナトリウム (1)	Na (100)	12
31	押え板	SUS 304 (100)	13
32, 91, 93	熱しゃへい板	SUS 304 (100)	13
33, 95	炉心槽	SUS 304 (100)	17

* D O R T 計算に用いた 21 群定数の縮約領域

第4.3表 MCNPで計算した実効増倍率、検出器応答、検出器効率比、および実効線源強度比

ケース	実効増倍率		検出器応答(全中性子束)		検出器効率比 (ϵ_1/ϵ_2)	実効線源強度比 (S1/S2)
	MCNP	DORT	検出器**	MCNP計算値		
1	$0.9769 \pm 0.11\%$	$0.9769 *$	1	$1.543E+05 \pm 7.71\%$	-	-
			2	$1.685E+05 \pm 6.45\%$		
			3	$5.212E+05 \pm 2.84\%$		
			4	$1.187E+06 \pm 5.05\%$		
			5	$1.333E+06 \pm 5.98\%$		
			6	$5.162E+05 \pm 2.79\%$		
			7	$1.685E+05 \pm 6.58\%$		
			8	$1.340E+05 \pm 7.33\%$		
2	$0.9708 \pm 0.11\%$	0.9723	1	$1.288E+05 \pm 7.75\%$	1.021	0.969
			2	$1.528E+05 \pm 6.77\%$	0.991	
			3	$5.093E+05 \pm 2.83\%$	0.896	
			4	$1.076E+06 \pm 4.83\%$	0.957	
			5	$1.157E+06 \pm 5.89\%$	0.997	
			6	$5.116E+05 \pm 2.85\%$	0.896	
			7	$1.529E+05 \pm 6.44\%$	0.998	
			8	$1.223E+05 \pm 7.59\%$	1.024	
3	$0.9393 \pm 0.11\%$	0.9460	1	$5.166E+04 \pm 8.29\%$	1.231	0.890
			2	$7.752E+04 \pm 6.11\%$	0.996	
			3	$4.239E+05 \pm 2.52\%$	0.568	
			4	$6.866E+05 \pm 4.25\%$	0.814	
			5	$5.700E+05 \pm 5.41\%$	1.040	
			6	$4.213E+05 \pm 2.46\%$	0.564	
			7	$7.405E+04 \pm 6.23\%$	1.061	
			8	$4.735E+04 \pm 8.42\%$	1.293	
4 a	$0.9683 \pm 0.11\%$	0.9729	1	$1.104E+05 \pm 7.37\%$	0.833	1.001
			2	$1.374E+05 \pm 6.45\%$	1.038	
			3	$4.829E+05 \pm 2.68\%$	0.717	
			4	$1.023E+06 \pm 4.78\%$	0.850	
			5	$1.086E+06 \pm 5.69\%$	0.941	
			6	$4.771E+05 \pm 2.70\%$	1.147	
			7	$1.387E+05 \pm 7.07\%$	0.977	
			8	$1.066E+05 \pm 7.99\%$	1.297	
4 b	$0.9641 \pm 0.11\%$	0.9695	1	$8.768E+04 \pm 7.70\%$	0.990	0.985
			2	$1.037E+05 \pm 6.06\%$	1.063	
			3	$4.634E+05 \pm 2.59\%$	0.809	
			4	$8.904E+05 \pm 4.35\%$	0.882	
			5	$9.109E+05 \pm 5.27\%$	0.932	
			6	$4.449E+05 \pm 2.46\%$	0.851	
			7	$1.108E+05 \pm 6.83\%$	0.968	
			8	$7.264E+04 \pm 7.76\%$	1.142	

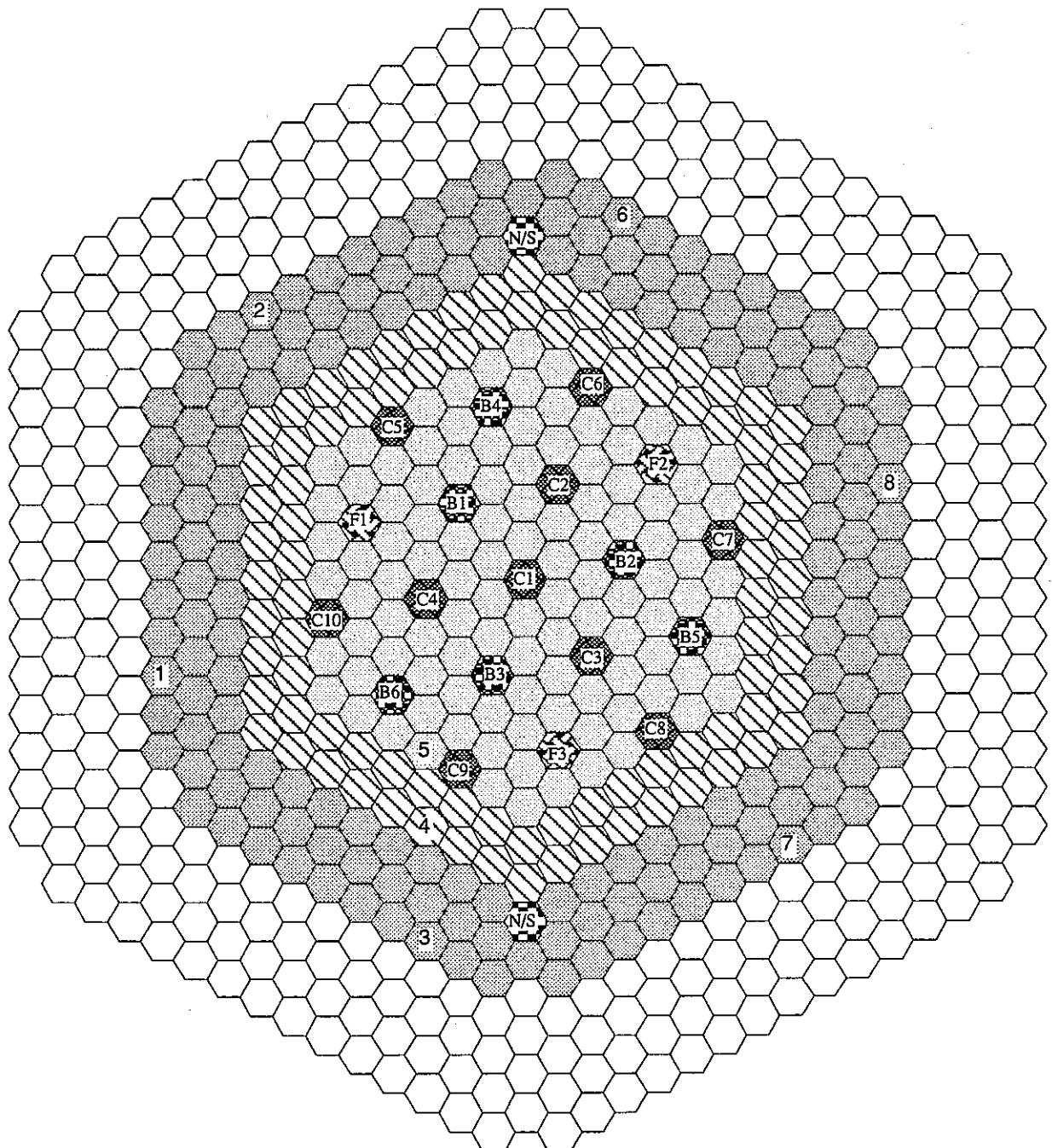
*: バックリング調整によりMCNPの計算値に合わせた。

**: 第4.1図参照

第4.4表 MCNPで計算した反応度とSM法、MSM法による予測値との比較

ケース	MCNP 反応度 直接計算値 ρ $\% \Delta k/k$	* 検出器 位置	SM法 反応度予測値		MSM法 反応度予測値		
			ρ_{SM} $\% \Delta k/k$	直接 計算値 との比 ρ_{SM}/ρ	補正係数 (ϵ_1/ϵ_2) × (S_1/S_2)	ρ_{MSM} $\% \Delta k/k$	直接 計算値 との比 ρ_{MSM}/ρ
			—	—	—	—	—
1	2.362 ± 0.001	—	—	—	—	—	—
2	3.013 ± 0.001	1	2.894	0.961	0.989	2.861 ± 0.313	0.950
		2	2.825	0.938	0.960	2.713 ± 0.254	0.900
		3	3.208	1.065	0.868	2.785 ± 0.112	0.924
		4	3.032	1.006	0.927	2.811 ± 0.196	0.933
		5	2.921	0.970	0.965	2.820 ± 0.237	0.936
		6	3.165	1.050	0.868	2.746 ± 0.110	0.911
		7	2.788	0.925	0.966	2.693 ± 0.248	0.894
		8	2.631	0.873	0.992	2.610 ± 0.275	0.866
		平均	2.933	0.973	—	2.755 ± 0.081	0.914
3	6.466 ± 0.001	1	5.877	0.909	1.096	6.438 ± 0.729	0.996
		2	6.539	1.011	0.886	5.794 ± 0.515	0.896
		3	11.367	1.758	0.505	5.746 ± 0.218	0.889
		4	7.777	1.203	0.725	5.635 ± 0.372	0.871
		5	6.450	0.997	0.925	5.969 ± 0.481	0.923
		6	11.505	1.779	0.502	5.770 ± 0.215	0.892
		7	6.027	0.932	0.944	5.691 ± 0.516	0.880
		8	5.056	0.782	1.150	5.815 ± 0.649	0.899
		平均	7.575	1.171	—	5.857 ± 0.254	0.906
4 a	3.276 ± 0.001	1	4.745	1.448	0.834	3.957 ± 0.422	1.208
		2	2.680	0.818	1.040	2.786 ± 0.254	0.850
		3	4.953	1.512	0.717	3.554 ± 0.139	1.085
		4	3.779	1.154	0.851	3.218 ± 0.224	0.982
		5	3.267	0.997	0.942	3.078 ± 0.254	0.940
		6	1.937	0.591	1.149	2.225 ± 0.086	0.679
		7	2.995	0.914	0.979	2.931 ± 0.283	0.895
		8	1.761	0.538	1.298	2.287 ± 0.248	0.698
		平均	3.265	0.997	—	3.004 ± 0.590	0.917
4 b	3.722 ± 0.001	1	4.367	1.173	0.976	4.260 ± 0.464	1.145
		2	3.502	0.941	1.047	3.666 ± 0.324	0.985
		3	4.187	1.125	0.797	3.336 ± 0.128	0.896
		4	4.167	1.120	0.869	3.622 ± 0.241	0.973
		5	4.106	1.103	0.918	3.767 ± 0.300	1.012
		6	3.900	1.048	0.838	3.269 ± 0.122	0.878
		7	3.949	1.061	0.953	3.765 ± 0.357	1.012
		8	3.444	0.925	1.125	3.875 ± 0.414	1.041
		平均	3.953	1.062	—	3.695 ± 0.311	0.993

*: 第4.1図参照

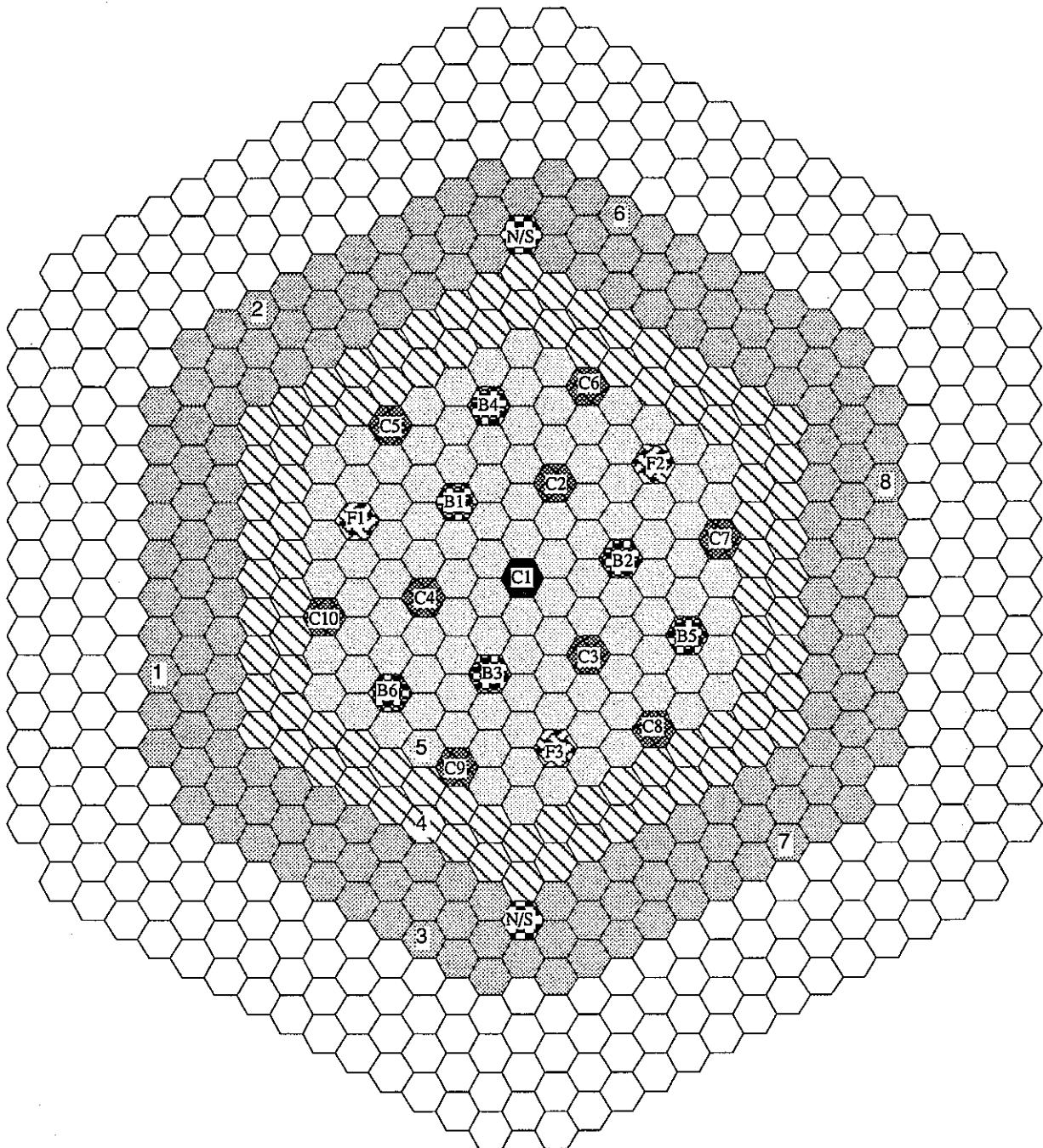


番号（1～8）は検出器を表わす。

炉心構成要素		記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	○	108	
	外側炉心	△	90	
プランケット燃料集合体		○	172	
制御棒集合体	微調整棒	□	3	50cm
	粗調整棒	▨	10	50cm
	後備炉停止棒	▨□	6	全引抜
		●	0	全挿入

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨□	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	○	8

第4.1図 MSMの精度検討のための炉心配置（ケース1：基本配置）

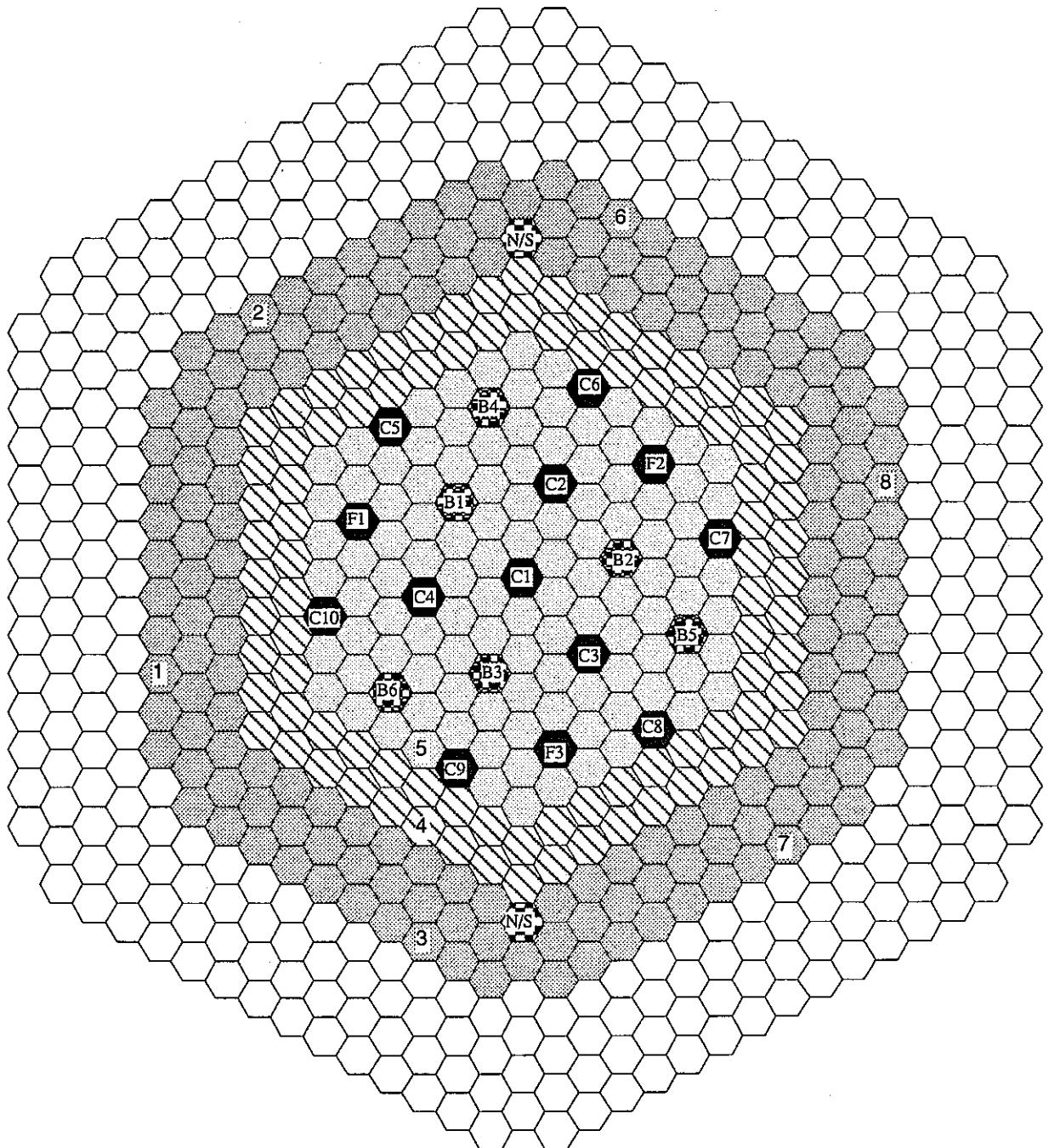


番号（1～8）は検出器を表わす。

炉心構成要素		記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108	
	外側炉心	▨	90	
プランケット燃料集合体		▨	172	
制御棒集合体	微調整棒	▨▨	3	50cm
	粗調整棒	▨▨▨	9	50cm
	後備炉停止棒	▨▨▨▨	6	全引抜
	C1	●	1	全挿入

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨▨	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	○○	8

第4.2図 MSMの精度検討のための炉心配置（ケース2：中心CCR全挿入）

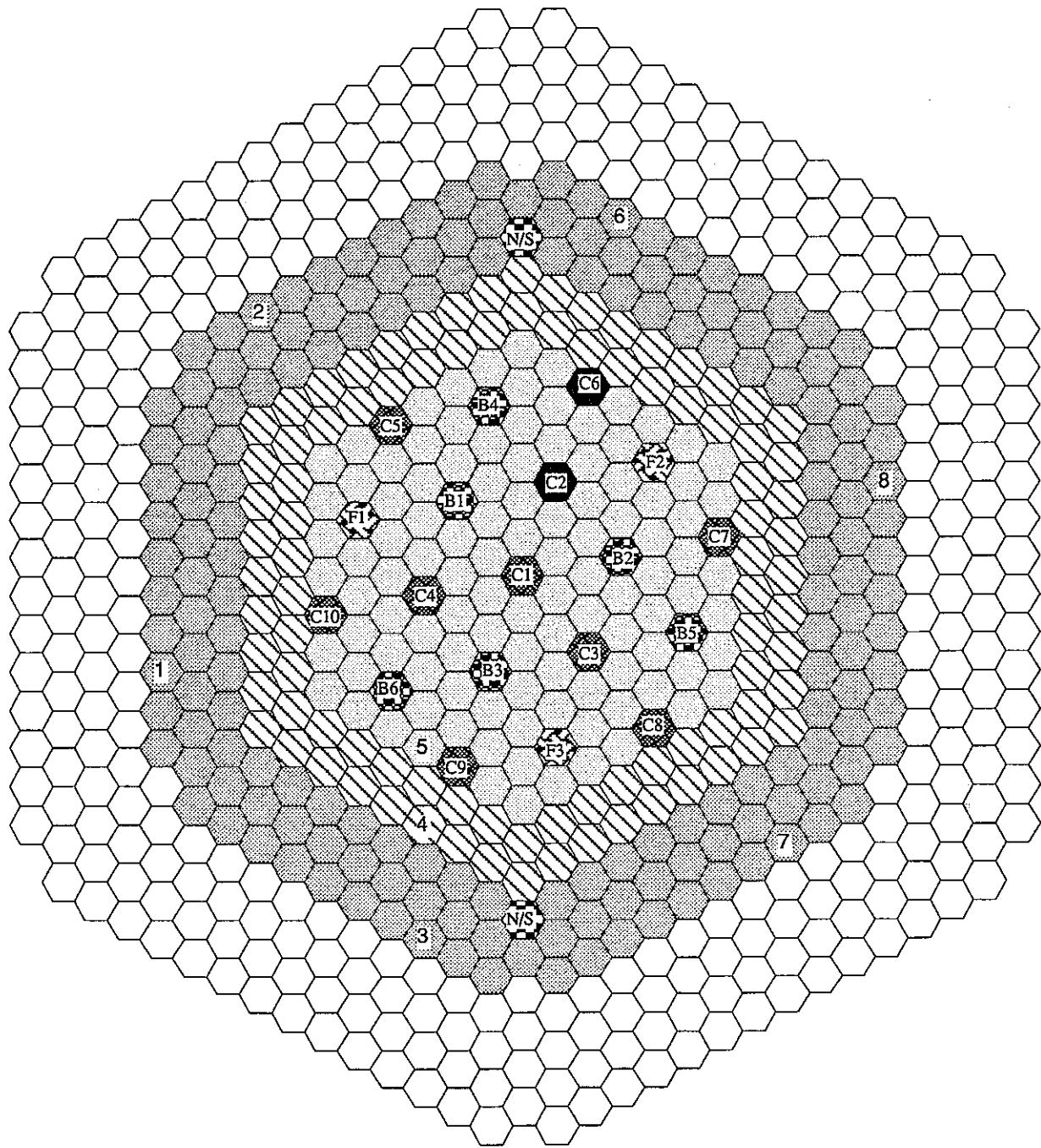


番号（1～8）は検出器を表わす。

炉心構成要素		記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108	
	外側炉心	▨	90	
ブランケット燃料集合体		▨	172	
制御棒集合体	微調整棒	●	3	全挿入
	粗調整棒	●	10	全挿入
	後備炉停止棒	▨	6	全引抜

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	○	8

第4.3図 MSMの精度検討のための炉心配置（ケース3：CCR,FCR全挿入）

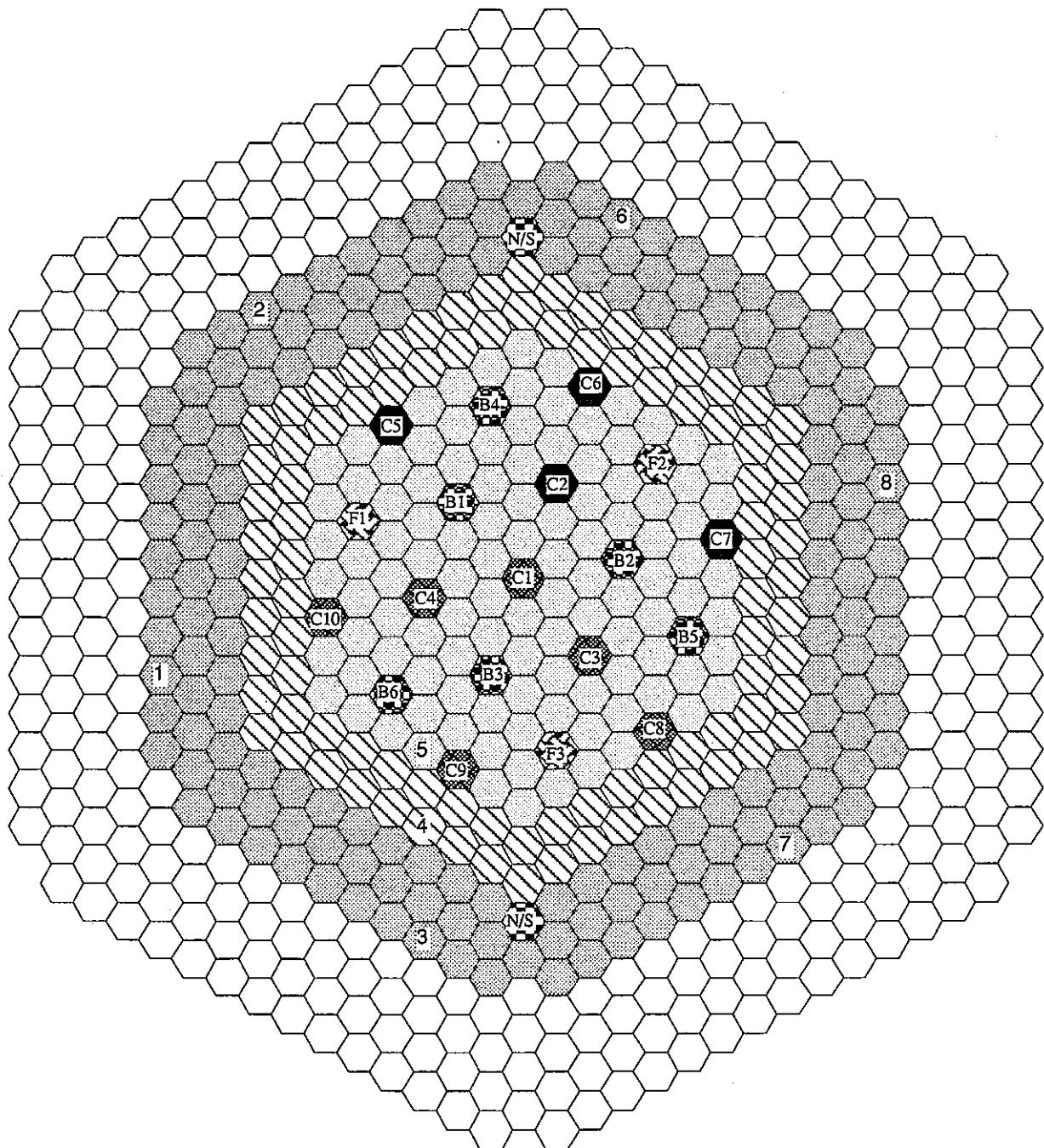


番号（1～8）は検出器を表わす。

炉心構成要素	記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	108	
	外側炉心	90	
ブランケット燃料集合体	○	172	
	△	3	50cm
	□	8	50cm
	◆	6	全引抜
C2,C6	■	2	全挿入

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	◆	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	□	8

第4.4図 MSMの精度検討のための炉心配置（ケース4a：C2, C6全挿入）

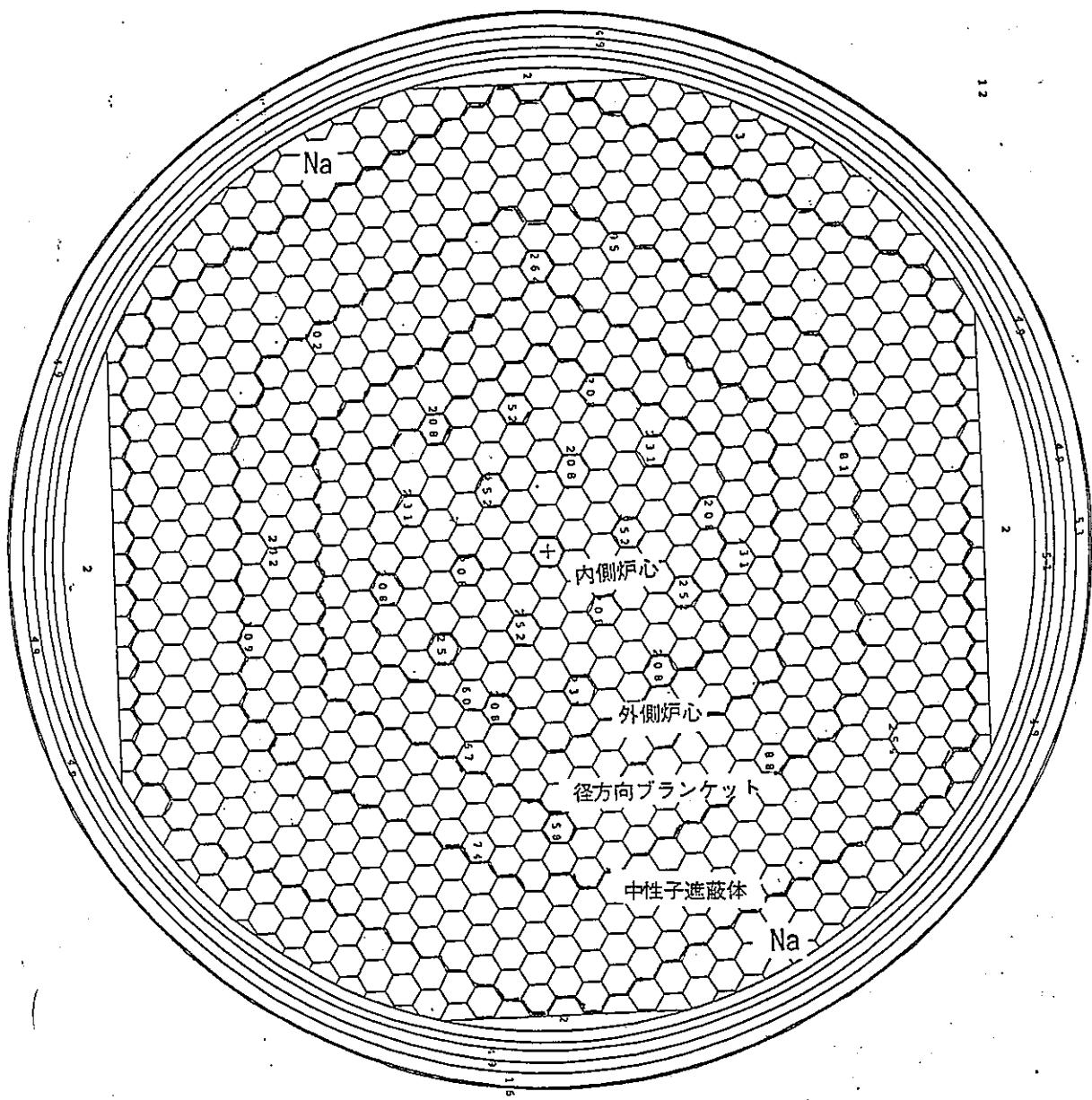


番号（1～8）は検出器を表わす。

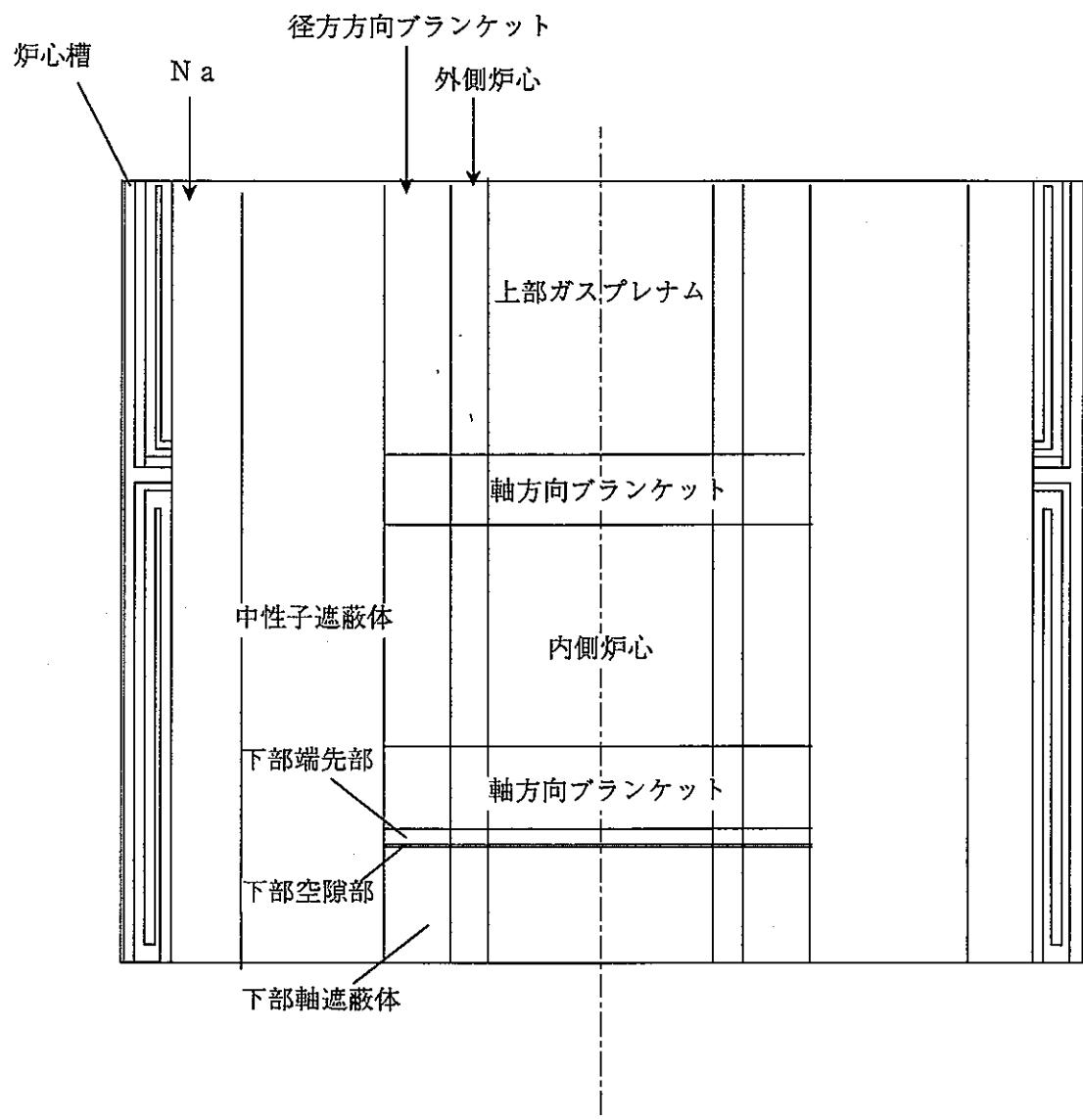
炉心構成要素		記号	本数	制御棒 炉心挿入長
炉心燃料集合体	内側炉心	●	108	
	外側炉心	▨	90	
プランケット燃料集合体		▨	172	
制御棒集合体	微調整棒	▨	3	50cm
	粗調整棒	▨	6	50cm
	後備炉停止棒	▨	6	全引抜
	C2,C5,C6,C7	●	4	全挿入

炉心構成要素	記号	本数
中性子源集合体	▨	2
中性子しゃへい体	○	316
サーベイランス集合体	●	8

第4.5図 MSMの精度検討のための炉心配置（ケース4b：C2,C5,C6,C7全挿入）

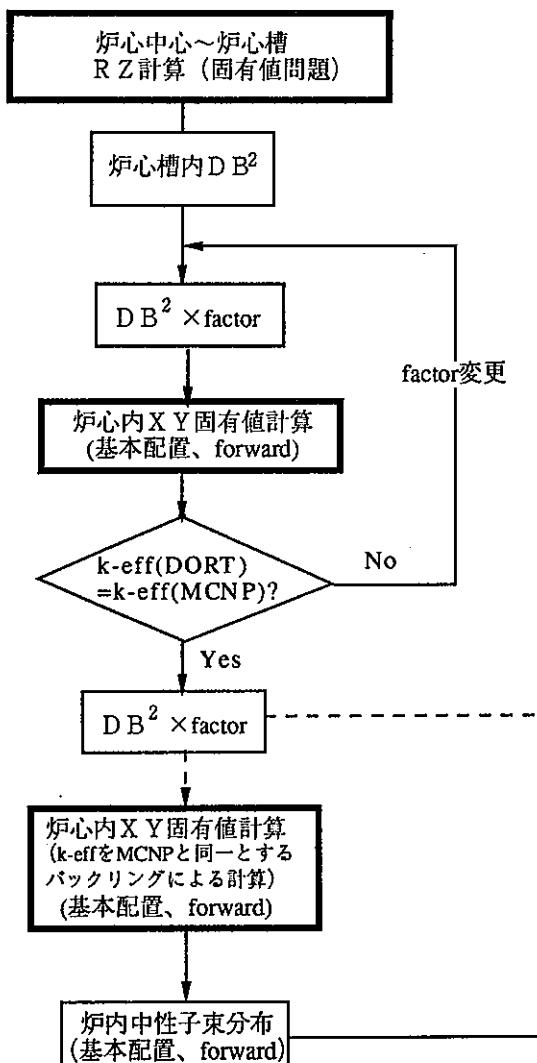


第4. 6図 MCNPによる「もんじゅ」炉心計算モデル（水平断面図）

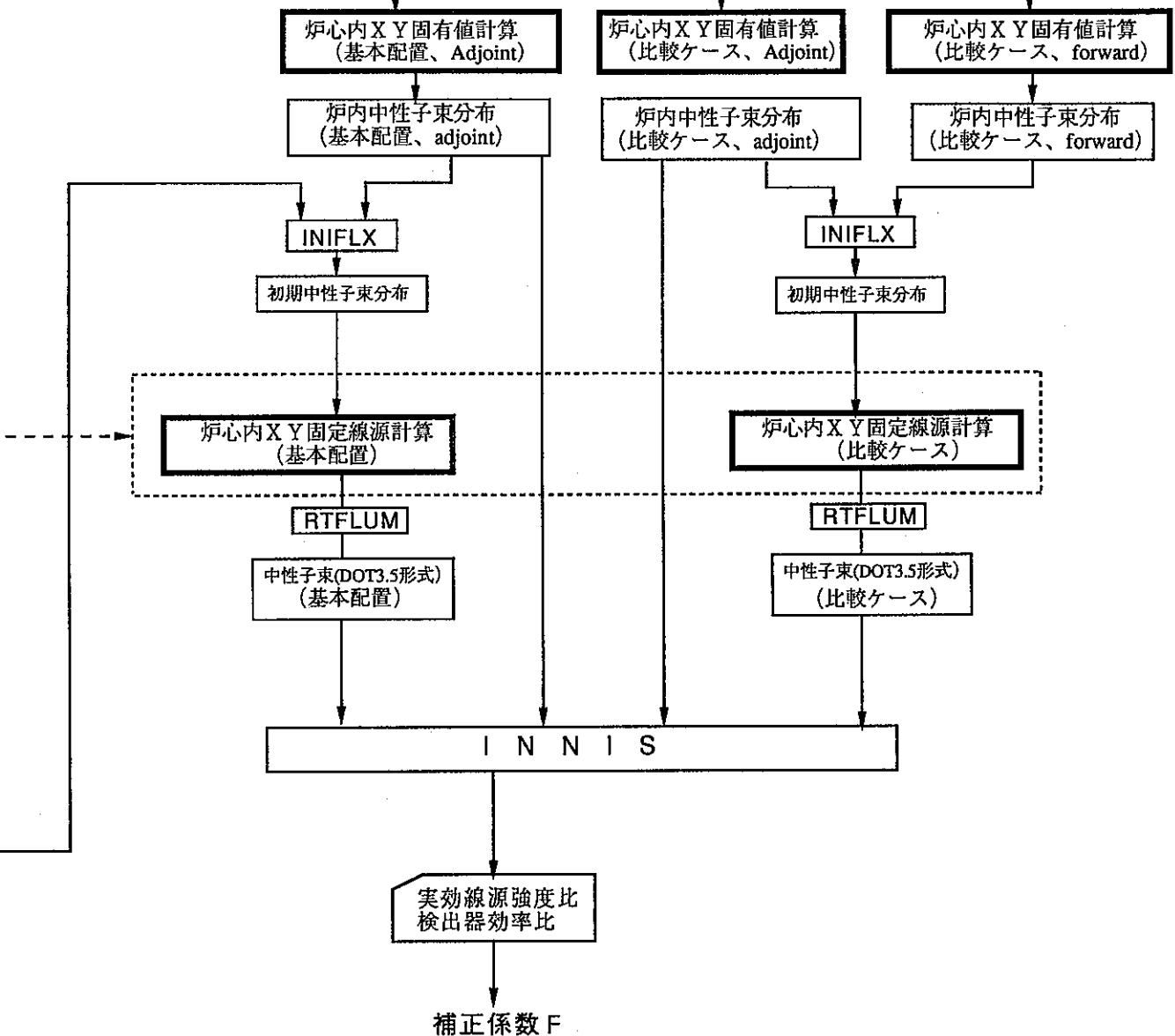


第4.7図 MCNPによる「もんじゅ」炉心計算モデル（垂直断面図）

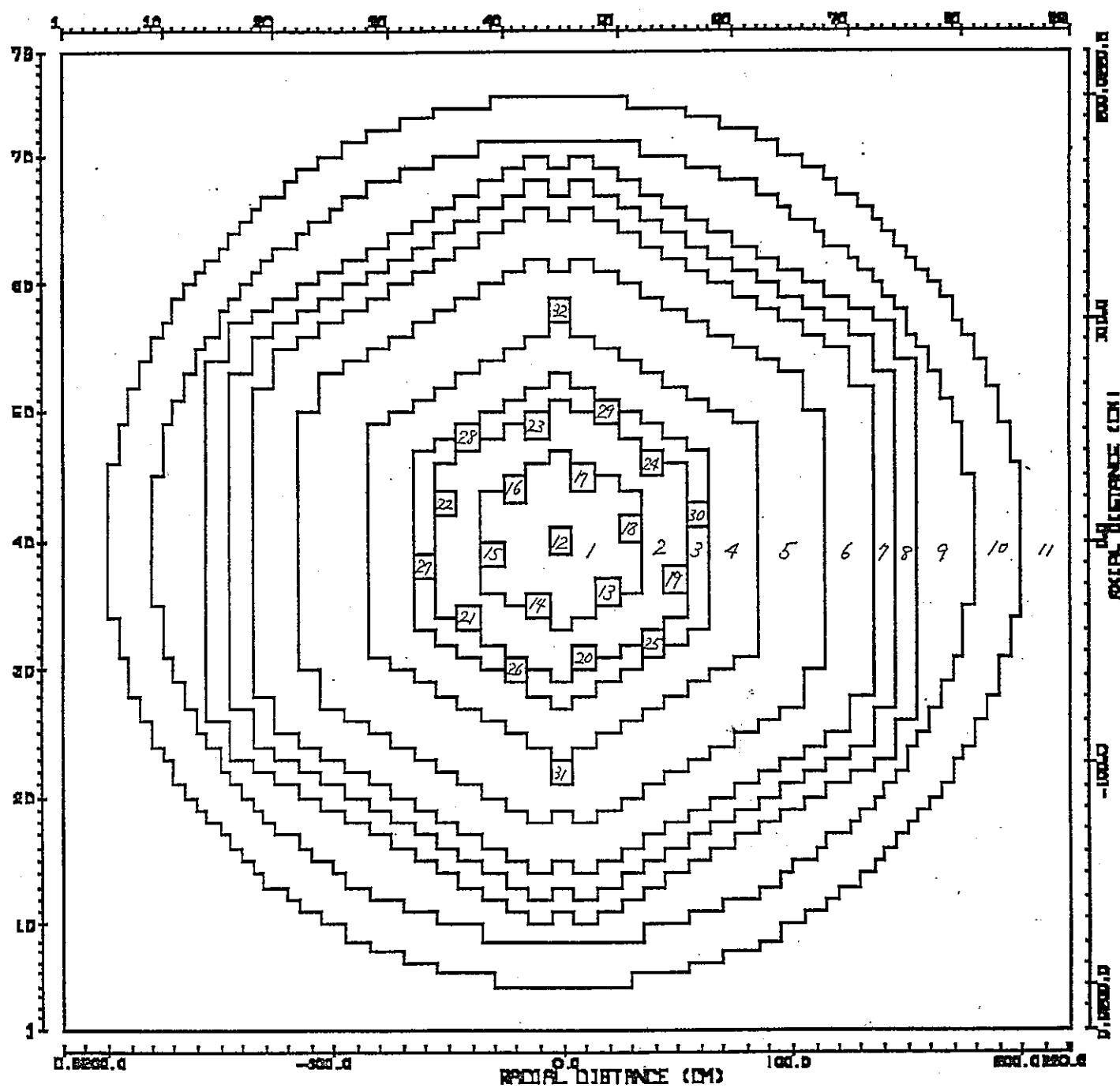
(基本配置のk-effが等しくなるバックリングの計算)



(基本配置での中性子束分布計算)

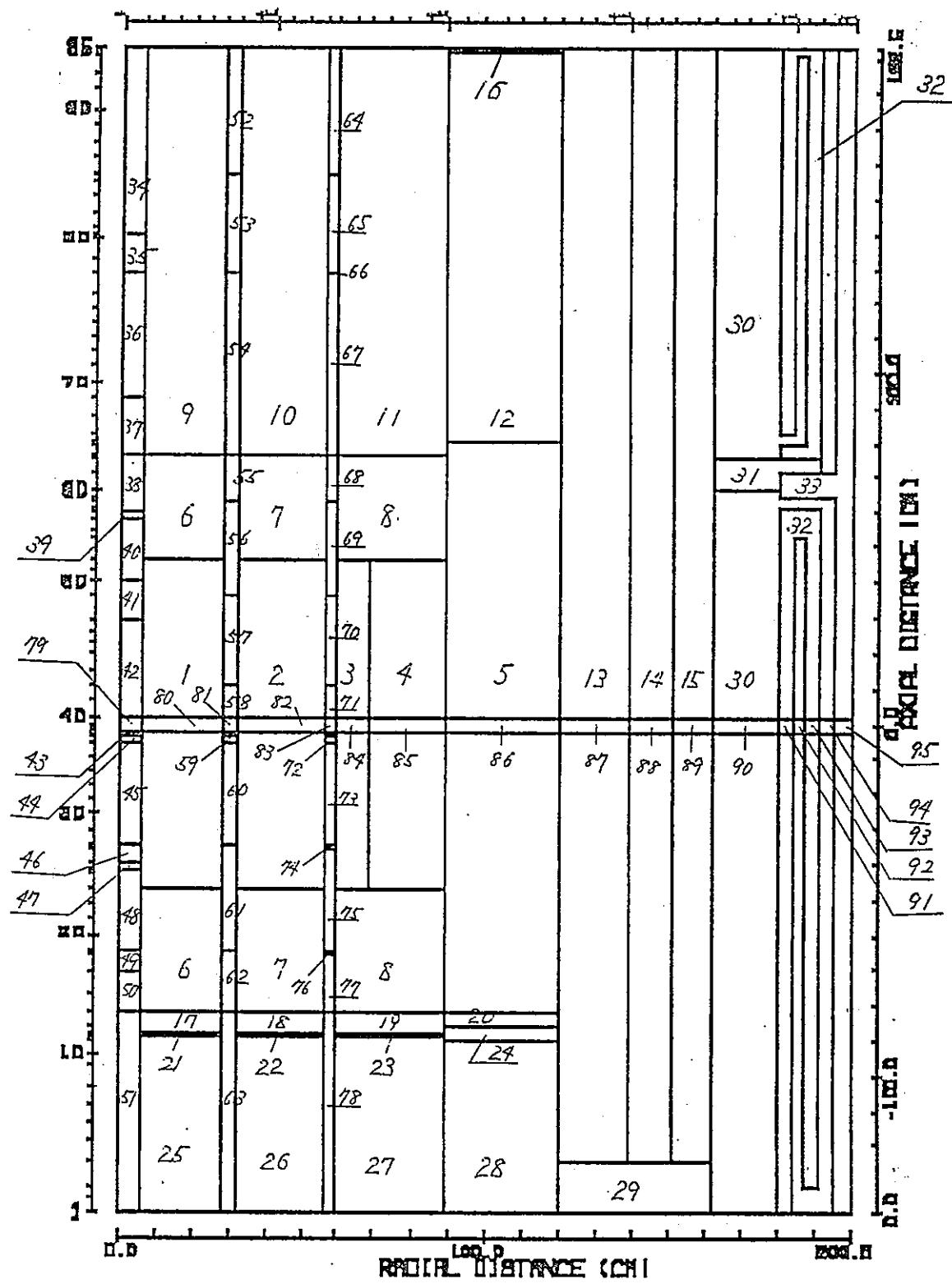


第4.8図 MSM法の精度検討のための補正係数計算の流れ



第4.9図 炉心内中性子束・随伴中性子束計算モデル

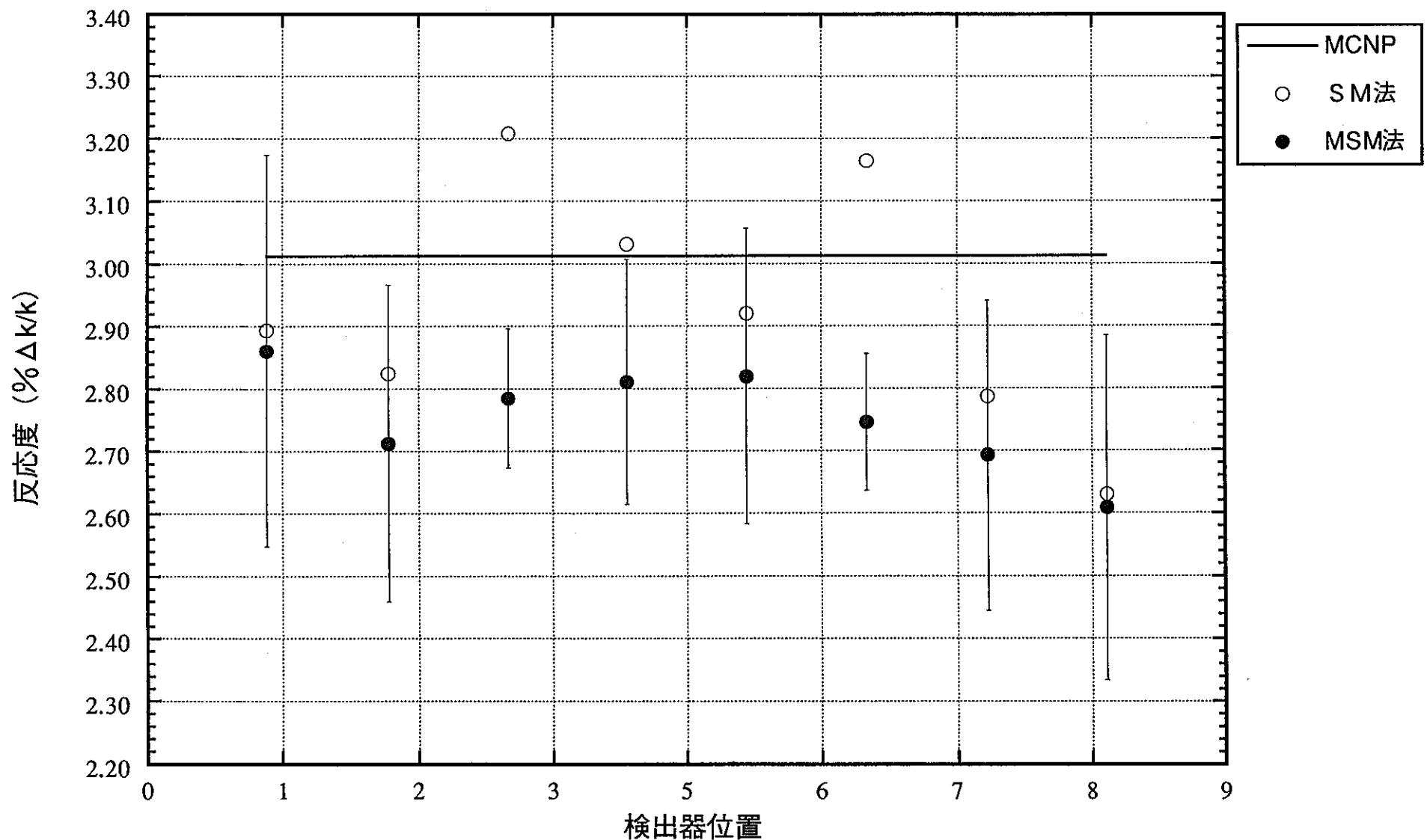
(2次元XY体系：炉心中心～炉容器)



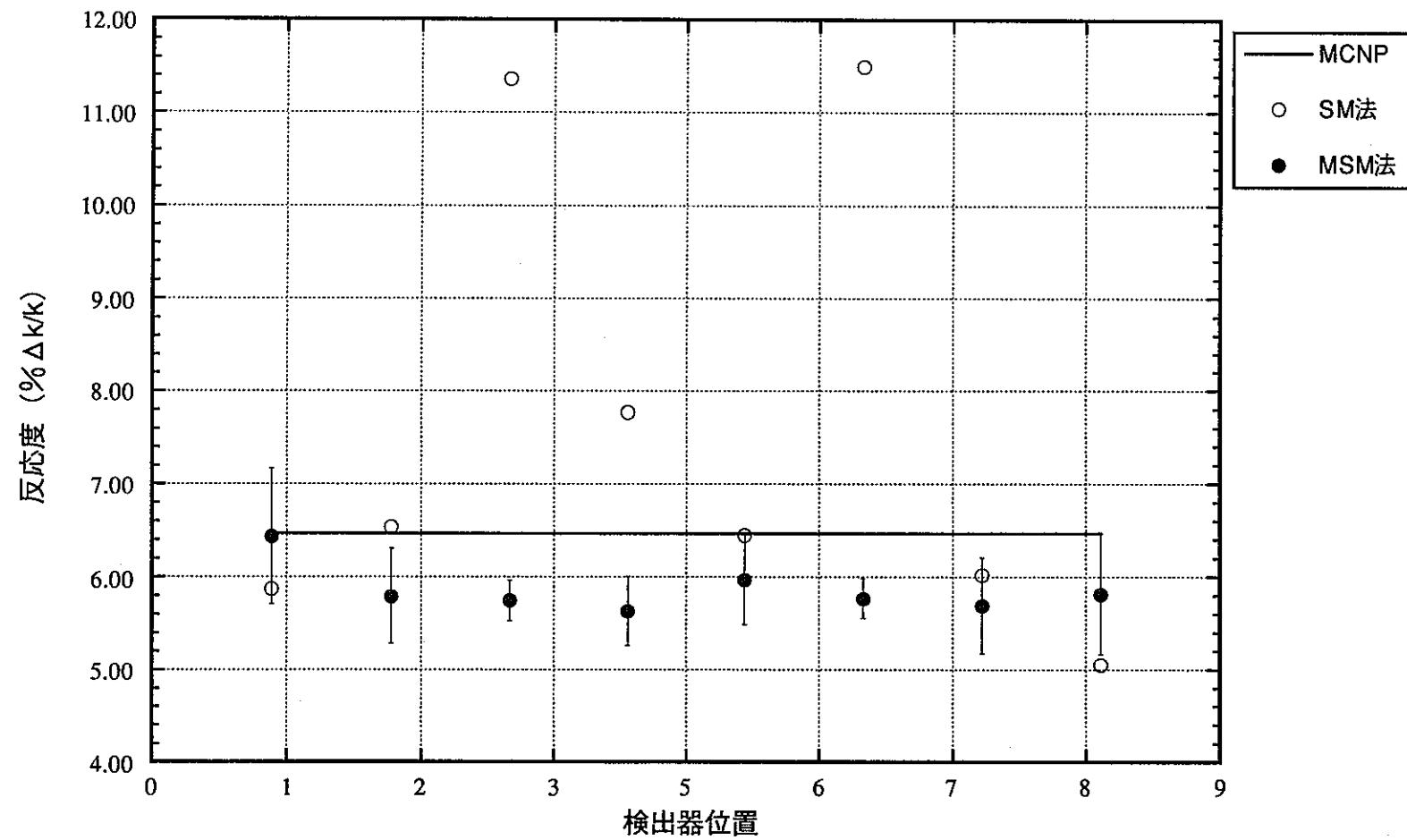
(領域番号と領域組成の対応は第4. 2表を参照)

第4. 10図 軸方向バックリング計算モデルおよび領域番号

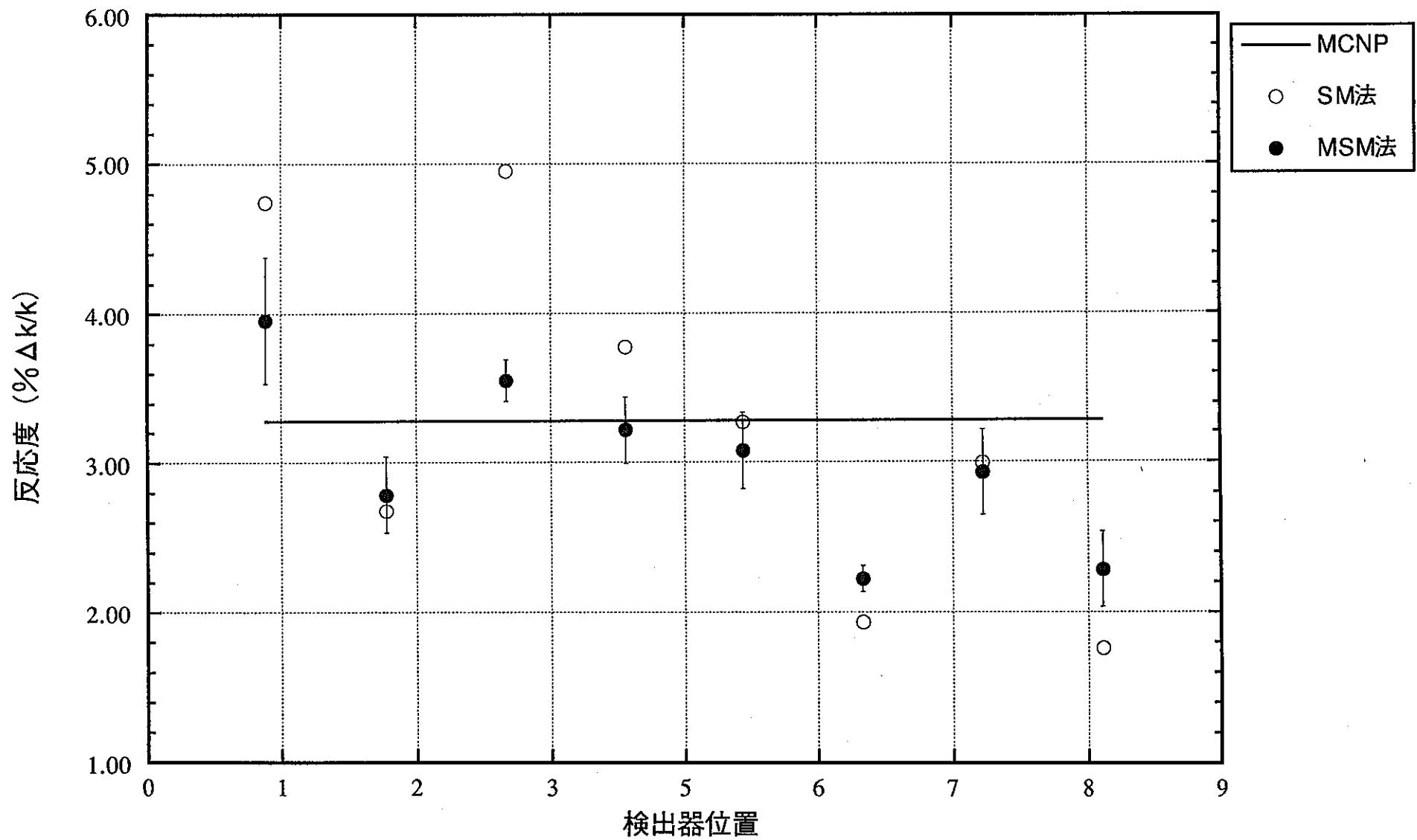
(2次元R-Z体系：炉心中心～炉心槽)



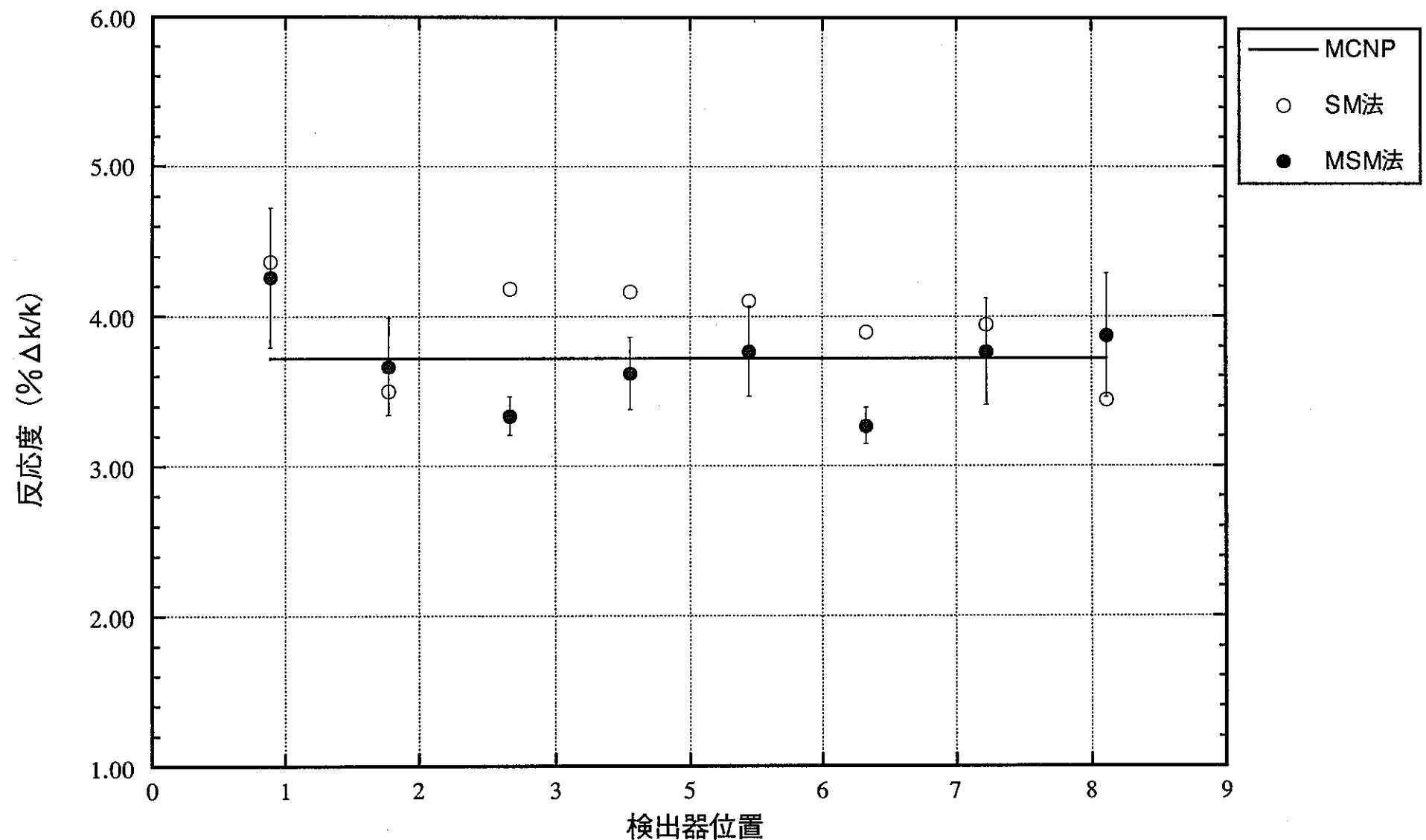
第4.11図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度（ケース2： $K=0.9708$ ）



第4.12図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度（ケース3： $K=0.9393$ ）



第4.13図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度（ケース4a : K=0.9683）



第4.14図 検出器位置毎のMSM法とSM法による反応度（ケース4b： $K=0.9641$ ）

5. まとめ

5. 1 結論

(1) 初期中性子束分布の計算方法の検討

固有値計算で得られた中性子束と随伴中性子束を用いて作成した初期中性子束分布を用いることにより、従来難しいとされていた浅い未臨界系での固定線源問題が解けることがわかった。この方法を前年度行ったMSM法の適用性検討に用いることにより、補正係数の計算精度の向上を得た。たとえば、比較的深い未臨界度（実効増倍率 = 0.9671）の体系では、MSM法により予測した反応度と直接計算値との差異が約 7.3% から約 0.4% に減少した。

(2) 中性子束計算方法の精度評価

MSM法での中性子束計算に用いられるXY体系とRθ体系の接続計算の精度の検討を簡単なモデルで行った。その結果、接続法自体は十分な精度を持つことが確認された。

(3) MSM法の反応度測定精度の予備検討

実炉心をモンテカルロ計算で模擬して求めた反応度と検出器応答を用いて、MSM法による反応度予測を行った。深い未臨界系では、SM法を用いると反応度予測値に -22% ~ +78% のばらつきが生じていたのが、MSM法を用いることによりモンテカルロ計算の統計誤差に起因する誤差（約 10%）程度のばらつきに減少した。

5. 2 今後の課題

(1) 準正係数の計算のための輸送計算方法の検討

X Y 体系と 360° R θ 体系の接続計算の精度の検討を簡単なモデルで行った結果、D O R T および D O T 3, 5 の周期境界条件の取扱いに何らかの問題が有り、線源から離れた境界付近の中性子束が過小評価または過大評価されているおそれがあることがわかった。炉内・炉外 N I S 検出器の応答計算を行うためには 360° R θ モデルによる計算は不可欠であり、D O R T コードのコーディング内容調査を行って、この問題点を解決する必要がある。

(2) M S M 法の精度の検討

モンテカルロ計算値を実測値とみなして、M S M 法により反応度予測を行った結果、最大 10 % 程度の過小評価となった。この計算では基本配置の実効増倍率が 0.977 (M C N P 計算値) と低く、より臨界に近い基本配置を用いた場合の予測精度を知ることが今後の課題として残った。また、もんじゅ炉心よりもシンプルな系で、広い反応度の範囲について、十分に統計誤差を小さくしたモンテカルロ計算値と M S M 法による予測値を比較して、さまざまな反応度での M S M 法の予測精度を調べていくことが必要である。

参考文献

- [1] W.A.Rhoades and R.L.Childs, "An Updated Version of The DOT 4 One- and Two-Dimensional Neutron/Photon Transport Code,"ORNL-5851, (1982)
- [2] 佐々木 研治、岩井 敏、横堀 仁、鈴置 善朗、「遮蔽用核定数の整備（I V）」、PNC J208 85-01, (1985)
- [3] K.Koyama et al., "RADHEAT-V3, A Code System for Generating Coupled Neutron and Gamma Ray Group Constants and Analyzing Radiation Transport,"JAERI-M 7155 (1977)
- [4] J.F.Briesmeister, Ed, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A,"La-7396-M, rev. 2 (1986), Rev. for Version 4 (1991)
- [5] 「M S M法の適用性検討」、PNC PJ2222 92-001, (1992)
- [6] 「燃料装荷時の検出器応答計算】、PNC PJ2222 92-002, (1992)

付録

浅い未臨界系での固定中性子源問題のための初期中性子束分布計算コード

I N I F L X

使用説明書

1. コードの概要

本プログラムは、DORTコードを用いて浅い未臨界系での固定線源問題を解く際に、早い収束を得るために初期中性子束分布を計算する。先ず、ForwardとAdjointの固有値 ($\lambda - mode$) 計算を行い、得られた実効増倍率と基本モード中性子束・随伴中性子とから、次式により、固定線源計算の初期中性子束 $\phi(r, E)$ を計算する。

$$\phi(r, E) = f \cdot \phi^*(r, E)$$

$$f = - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot s(r, E) dEdr}{\int_r \int_E \phi^*(r, E) \cdot \chi(E) \int_{r'} \nu \Sigma_s(r, E') \phi'(r, E') dE' dEdr}$$

ここで、

$\phi^*(r, E)$: 固有値計算で得られたForward中性子束分布

$\phi^*(r, E)$: 固有値計算で得られたAdjoint中性子束分布

$s(r, E)$: 固定中性子源分布

ρ : 体系の反応度 = $(1 - k) / k$

計算された初期中性子束分布は、VARMFLM形式で出力され、DORTの初期中性子束として利用できる。

2. 入力データの説明

カード 1 (フリーフォーマット)

I D S, M T, I Z M

I D S 固定線源を与える領域数

M T 断面積ファイルに収納されている全材質数

I Z M 領域数

以下の入力は F I D O 形式で与える。

1 \$ \$ (M (I, J), I = 1, IM), J = 1, JM) (IM × JM 個)

メッシュ毎の領域番号 (DORT 入力の 8 \$ \$ と同一)

2 \$ \$ (MM (IZ), IZ = 1, IZM) (IZM 個)

領域毎の材質番号 (DORT 入力の 9 \$ \$ と同一)

3 ** (X (IG), IG = 1, IGM) (IGM 個)

核分裂スペクトル (DORT 入力の 1 \$ \$ と同一)

4 \$ \$ (IZS (IS), IS = 1, IDS) (IDS 個)

固定線源を与える領域番号

5 ** (SRC (IS), IS = 1, IDS) (IDS 個)

領域 I Z S (IS) に与える線源強度 (n/sec./cm³)

T (ターミネータ)

以下の変数は DORT のスカラーフラックスファイル (VARFLM) から読み込む。

IM : R (X) 方向メッシュ数

JM : Z (Y, θ) 方向メッシュ数

IGM : エネルギー群数

3. 入出力機番

<u>論理機番</u>	<u>入力／出力</u>	<u>形式</u>	<u>内容</u>
5	I	カード	カード入力データ
6	O	リスト	プリント出力
3 1	I / O	バイナリ	ワークファイル
3 2	I / O	バイナリ	ワークファイル
4 0	I	バイナリ	G I X形式断面積ファイル
7 1	I	バイナリ	Forward計算のスカラーフラックスファイル(VARFLM)
7 2	I	バイナリ	Adjoint計算のスカラーフラックスファイル(VARFLM)
7 3	O	バイナリ	初期中性子束分布(VARFLM形式)

4. 入力データ例

6 132 32
1\$\$
88R11 (DORTの8\$\$\$)
3Q88
38R11 12R10 38R11
33R11 22R10 33R11
30R11 28R10 30R11
27R11 34R10 27R11
25R11 12R10 14R9 12R10 25R11
:
:
23R11 10R10 8R9 2R8 2R9 2R8 8R9 10R10 23R11
25R11 12R10 14R9 12R10 25R11
27R11 34R10 27R11
30R11 28R10 30R11
33R11 22R10 33R11
38R11 12R10 38R11
88R11
3Q88
2\$\$
-1 -5 -9 -13 -17 -21 -25 -29 -33 -129 (DORTの9\$\$\$)
-37 -41 -53 -65 -57 -69 -61 -73 -101 -117
-105 -121 -109 -125 -77 -81 -85 -89 -93 -97
-113 -113
3**
5.0100-02 1.4201-01 2.1950-01 2.1591-01 1.5998-01 9.9492-02
5.5570-02 2.9064-02 2.0720-02 5.9295-03 1.3516-03 3.0404-04
6.8032-05 1.5198-05 3.3919-06 8.2495-07 1.2653-07 1.9404-08
2.9766-09 4.1871-10 1.2023-10
4\$\$
1 2 3 5 31 32
5**
3.62978E+2 3.62978E+2 3.62978E+2 5.00312E+2 6.9126E+6 6.9126E+6
T