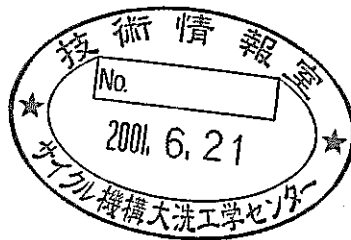


F B R 安全性試験炉における
中性子ホドスコープシステムの検討
(研究報告書)



2001年2月

核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

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)
2001

FBR 安全性試験炉における中性子ホドスコープシステムの検討 (研究報告書)

深野 義隆* 小西 賢介*

要 旨

FBR 安全性炉内試験計画 (SERAPH 計画) では、試験燃料の運動に伴う密度変化を高い時間分解能で計測する必要がある。これを可能とする有力な計測システム候補として高速中性子ホドスコープシステムを検討し、概念構築を行った。

本システムで用いる中性子検出器については、小型化及び感度の向上方策を検討し、設計概念を具体化した。また、3次元モンテカルロ計算によるコリメータ内中性子散乱挙動の評価及び光学的条件の検討により、コリメータ、スロット等のシステムの最適化を実施した。さらに、これら具体化された検出器概念、システム概念を基に、単ピン、複数ピン束、プール試験等主要試験の計測性能を定量化し、SERAPH 試験に要求される計測性能を充足することを示した。

* 大洗工学センター 要素技術開発部 高速炉安全工学グループ

Study on the neutron hodoscope system for the SERAPH in-pile experimental reactor

Yoshitaka FUKANO*, Kensuke KONISHI*

Abstract

Fast neutron hodoscope system as the main fuel motion diagnostic system in the Safety Engineering Reactor for Accident Phenomenology (SERAPH) was studied in order to realize high-resolution diagnostics for fuel density variation according to fuel motion.

Based on the study on minimization of the detector size and improvement for the detector sensitivity, optimized concept of the detector design was proposed. On the other hand, geometry of the collimator and slot system was also optimized through the evaluation of optical conditions. Using the optimized design of the detector, collimator, and slot system, diagnostic performance for main SERAPH tests (single pin test, pin bundle test and molten fuel pool test, etc.) were quantified. It was confirmed that proposed system has sufficient diagnostic capability required in the SERAPH tests.

*Fast Reactor Safety Engineering Group, Advanced Technology Division, JNC

目次

	頁
要 旨-----	i
abstract-----	ii
目 次-----	iii
表リスト-----	iv
図リスト-----	v
1. 序 論-----	1
2. 検出器の概念検討-----	3
2 - 1. 検出器電極塗布物質の選定-----	3
2 - 2. ²³⁵ U の混入による SBR の低下割合の評価-----	3
2 - 3. 中低エネルギーカットフィルターの設置による SBR 向上性の検討-----	3
2 - 4. 電極の多段化による感度向上方策の検討-----	4
2 - 5. 検出器小型化の検討-----	4
3. コリメータ、スロット形状の最適化-----	6
3 - 1. コリメータ長-----	6
3 - 2. コリメータ入口位置-----	7
3 - 3. コリメータの前面・背面形状-----	7
4. 各試験におけるホドスコープ計測性能-----	8
4 - 1. 単ピン、19 本ピン束、プール試験におけるホドスコープ計測性能-----	8
4 - 2. 複数ピン束試験での燃料移動の検知性-----	10
4 - 3. 軸方向燃料移動の検知性-----	11
4 - 4. 制御棒案内管等からの融体流出試験における検知性-----	11
5. 結 論-----	13
謝 辞-----	14
参考文献-----	15
図 表-----	16

表リスト

	頁
表 4-1 ^{232}Th 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)	16
表 4-2 ^{237}Np 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)	17
表 4-3 ^{238}U 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)	18

図リスト

	頁	
図 1-1	SERAPH ホドスコープシステム概念図	19
図 1-2	ホドスコープ設計、性能評価の流れ	20
図 2-1	各検出器塗布物質の核分裂断面積	21
図 2-2	^{238}U の純度と S/N 比との関係	22
図 2-3	^{235}U 反応率 (Cd フィルター, フィルター無)	23
図 2-4	^{235}U 反応率 (B_4C フィルター, フィルター無)	24
図 2-5	^{238}U の純度と S/N 比との関係 (フィルター厚 1 cm の場合)	25
図 2-6	電極の多段化による感度向上	26
図 2-7	ホドスコープ検出器概念図	27
図 3-1	中性子束減衰曲線 (第 1 群)	28
図 3-2	中性子束減衰曲線 (第 2 群)	29
図 3-3	中性子束減衰曲線 (第 3 群)	30
図 3-4	中性子束減衰曲線 (第 4 群)	31
図 3-5	中性子束減衰曲線 (第 5 群)	32
図 3-6	中性子束減衰曲線 (第 6 群)	33

図3-7	中性子束減衰曲線 (第7群)	34
図3-8	焦点深度	35
図3-9	コリメータ垂直断面図	36
図3-10	コリメータ・スロット概念図	37
図4-1	中性子輸送・透過計算の解析フロー及び解析体系	38
図4-2	プール試験体装荷体系でのコリメータ出口での中性子強度	39
図4-3	プール試験体装荷体系における時間分解能	40
図4-4	19本ピン束試験体装荷体系における時間分解能	41
図4-5	単ピン試験体装荷体系における時間分解能	42
図4-6	中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (7本ピン束)	43
図4-7	中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (19本ピン束)	44
図4-8	中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (37本ピン束)	45
図4-9	中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (61本ピン束)	46
図4-10	軸方向燃料移動の検知性評価 (D ₂ O冷却炉心) 二次元RZ臨界計算体系 (SERAPH 7本ピン束試験)	47
図4-11	移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D ₂ O冷却炉心、E>1MeV、ブランケット部への燃料の侵入移動)	48
図4-12	軸方向燃料移動の検知性評価 (D ₂ O冷却炉心) 二次元RZ臨界計算体系 (19本ピン束試験における中心7本の移動)	49

図 4-1 3	移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D ₂ O 冷却炉心、E>1MeV、19本ピン束試験の内部7本の移動)	50
図 4-1 4	軸方向燃料移動の検知性評価 (7本ピン束試験における中心1本の移動)	51
図 4-1 5	軸方向燃料移動の検知性評価 (19本ピン束試験における中心1本の移動)	52
図 4-1 6	移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D ₂ O 冷却炉心、E>1MeV、7本ピン束の内部1本の移動)	53
図 4-1 7	移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D ₂ O 冷却炉心、E>1MeV、19本ピン束の内部1本の移動)	54
図 4-1 8	軸方向燃料移動の検知性評価 (制御棒案内管等からの融体流出)	55
図 4-1 9	移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D ₂ O 冷却炉心、E>1MeV、7本ピン束の移動)	56

1. 序論

FBR 安全性炉内試験 (SERAPH 炉内試験) 計画^[1]における最も重要な計測は、燃料を主体とする試験部構成物質の破損・溶融移動を測定するための過渡計装であり、燃料の運動状況 (密度変化) を高い時間分解能で観測するシステムが不可欠と考えられている。このような計測のための手段としては、これまでに既存の研究炉において、移動燃料から発する高速中性子や γ 線を測定して識別する方法、パルス X線を透過させて撮影する方法 (測定対象は燃料及びスチール) などが検討されてきたが、高速中性子ホドスコープの原理を利用した方法以外については否定的な結果が得られている。従って、最も適用可能性の高い計装概念として、仏国の CABRI 炉、米国の TREAT 炉等でも実績のある高速中性子ホドスコープシステム^{[2] [3] [4] [5] [6]}を第一案と位置付けて、その概念検討を行った。

先行例の調査と予備的な特性評価^[7]に基づいて得られたシステム概念を図 1-1 に示す。SERAPH におけるホドスコープシステムはフロント及びバックスロット、コリメータ、検出器、計数回路、データ処理系から構成される。フロントスロットは、試験燃料から発生する高速中性子を駆動炉心燃料による吸収・散乱の影響を免れて導くために、コリメータ視野内の駆動炉心燃料を除去した部分である。また、フロントスロットの反対側に駆動炉心燃料が存在すると、そこから試験体を透過して飛来する高速中性子成分が試験燃料から発生する高速中性子に対してバックグラウンド成分 (ノイズ) となる。従って、この領域の駆動炉心燃料を除去し、バックスロットを設けている。試験燃料の核分裂により発生した高速中性子は、フロントスロット空間を通過した後、必要な空間分解能を得るために設けられた水平、鉛直方向の複数のスリットからなるコリメータによって検出器まで導かれる。コリメータの出口に設置される検出器は、試験燃料で発生した高速中性子をエネルギー弁別により選択的に計数するように、高エネルギー閾値型の核分裂計数管を想定する。検出器はコリメータ後面 (検出器側) 位置に水平方向、鉛直方向に多数個配列するが、通常の見出し器寸法はコリメータのスリット間隔よりも大きいものとなるため、コリメータは水平、鉛直方向ともに前面 (試験燃料側) よりも後面の幅が広がった末広がり形状となる。炉心核熱性能への影響を考慮すると、スロット幅は可能な限り狭くする必要があるのであるため、スロット幅に大きく影響する検出器サイズを最小化することが重要な課題である。

また、SERAPH においては、既存の海外炉のホドスコープシステムと比較して、以下のような点で厳しい計測環境にあることが指摘されている^{[6] [7]}。

- (1) 実機模擬性を高めるため、試験燃料に比較的均一な核加熱条件を与える。従って、SERAPH の駆動炉心は硬 (あるいは中) スペクトル炉心が指向される。この

料からのバックグラウンド高速中性子成分 (B:background) の比 (SBR:signal background ratio) が低い。

- (2) 試験燃料の規模及び過渡出力の大きさは、高速中性子信号の絶対量に影響するが、SERAPH では、小規模の単ピン試験から大規模ピン束試験まで、過渡出力の種類については、比較的緩慢かつ低出力のランプ試験から急速かつ高ピーク出力のパルス試験までの多種のものが計画されている。従って、検出器システムには広いダイナミックレンジをカバーすることが要求される。
- (3) 1cm 直径以下の単ピン試験から 10cm 直径のプール試験までの計画されている種々の試験毎の着目物理現象に応じた空間分解能の確保が必要である。

以上のような要求仕様条件の下で十分な計測性能を得るため、図 1-2 に示す検討のフローチャートに基づいて、検出器の小型化及び感度の向上方策を検討するとともに、コリメータ、スロット等のシステムの最適化を実施した。これらについて、第 2、3 章に記述する。また、最終的に具体化された検出器概念、システム概念に対して、単ピン、複数ピン束、プール試験等の主要試験の計測性能の明確化を行った^[8]。これを第 4 章に記述する。

2. 検出器の概念検討

2-1. 検出器電極塗布物質の選定

ホドスコープの検出器としては駆動炉心から検出器に入ってくるバックグラウンド中性子を排除し、試験燃料から発生する高速中性子のみを選択的に計数できる核分裂計数管が最も適している。このため、MeV オーダー程度の高エネルギー領域に核分裂反応閾値を有する核種として ^{232}Th 、 ^{237}Np 及び ^{238}U に着目した。各々を用いた核分裂計数管を想定した場合、核分裂反応断面積の比較から、その検出器感度は、高い順に $^{237}\text{Np} > ^{238}\text{U} > ^{232}\text{Th}$ と想定される。図2-1に示すように、 ^{232}Th 、 ^{237}Np 及び ^{238}U の核分裂断面積を比較すると、 ^{232}Th は ^{237}Np に比べエネルギー閾値は高いものの、断面積は小さい。このため、 ^{232}Th 核分裂計数管の方が ^{237}Np 核分裂計数管に比べSBRは高くなることが期待されるが、検出器の感度は低くなる。 ^{238}U は両者の中間的な性能を示す。SERAPHにおけるホドスコープの検出器としては、第4章で述べるように各試験における計測ニーズからホドスコープに要求される性能を考慮して、 ^{238}U 核分裂計数管が最適であるとの結論を得ている。但し、 ^{238}U の場合、中低エネルギー領域で大きな核分裂断面積を有する ^{235}U の混入が避けられないため、 ^{235}U の混入割合によって性能がどの程度変化するかを評価する必要がある。

2-2. ^{235}U の混入によるSBRの低下割合の評価

図2-2はモンテカルロ計算により、 ^{238}U の各純度に対する検出器位置でのSBR(S/N比)を計算し、純度100%の場合のSBRを1に規格化したものである。この図に示すように ^{238}U の純度が低下するほどSBRは低下する。天然ウラン(^{238}U :99.3%)に対して、 ^{238}U を天然組成以上に濃縮することは技術的に可能ではあるが、一般に工業的に生産されているものは、いわゆる減損ウランの最大99.8%程度までである。海外の検出器メーカー及び研究所等ではこれよりもさらに濃縮することが可能であり、調査結果によると~99.95%まで濃縮した実績があるとのことであった。実際の検出器試作にあたっては、さらに濃縮することも技術的には十分可能と考えられるが、本研究では、検出器性能を保守的に評価するため、この値(99.95%)を用いた。この場合SBRは純度100%の ^{238}U に比べ23%程度低下する。

2-3. 中低エネルギーカットフィルターの設置によるSBR向上性の検討

上記に加え、SBRの低下を抑えるため、検出器の前に中、低エネルギー中性子をカットするフィルタを設置することを考えた。一般に中、低エネルギー中性子をカットするために用いられるCd及び B_4C を候補としてSBRの向上性を評価した。検出器の前にCdまたは B_4C の厚さ10cmのフィルターを設置した解析体系とフィルター無しの解析体系でモンテカルロ計算を実施した。

図2-3は、Cd フィルターの設置の有無によりシグナル、ノイズ成分の反応率スペクトルがどのように変わるかを示したものである。この図から、Cd フィルターを設置した場合においても²³⁵Uの反応率は3~300eV付近の反応が支配的であり、この特性はCd フィルターを設置しない場合と同様である。従って、Cd フィルターの有効性は低いことがわかる。一方、図2-4に示すように、B₄C フィルターを設置する場合は、1MeV以上の反応が支配的となるため、中、低エネルギー中性子をカットする上でB₄C フィルターの設置が非常に有効であると言える。

次に、フィルターの厚さについて検討した。フィルターの厚さを10cmとすると、核分裂反応率は約1桁小さくなるため、本評価においては、フィルターの設置による核分裂反応率の低下が20%以下となることを目標として、フィルター厚を以下のように設定した。

一般に減衰率は $\exp(-t \cdot \mu)$ で表されるので、

$$\exp(-10 \cdot \mu) = 0.1 \text{ より、 } \mu = \ln(0.1/10) \text{ である。}$$

求めたいフィルター厚みを t とすると、

$$\exp(-t \cdot \mu) = 0.8 \text{ より、 } t = 1(\text{cm})$$

ここで μ は減衰係数である。

図2-5はフィルター厚み1cmの場合の²³⁸U純度と検出器位置でのSBR (S/N比)の関係をモンテカルロ計算により評価したものである。フィルターを設置しない場合に比べ、99.95%濃縮²³⁸U (リファレンス条件)は純度100%のものに対してSBRの低下割合は6.3%に抑えられることが分かる。

2-4. 電極の多段化による感度向上方策の検討

高いSBRを保持しつつ必要な検出器感度を得るための方策として、電極を中性子束入射方向に複数重ねた多段型の核分裂計数管の概念を検討した。図2-6は、²³²Th、²³⁷Npの各核分裂計数管を想定した場合の、検出器感度の電極段数依存性を評価したものである。図に示すように電極枚数が多いほど感度は向上するが、検出器に入射する中性子の散乱・減衰の効果に依存して、200段以上になると大きな感度の向上は見込めなくなることがわかる。また、段数が多くなるほど検出器の奥行きが長くなり、試験前の検出器の校正が困難になることも予想される。従って、検出器の電極段数として200段をリファレンスとした。

2-5. 検出器小型化の検討

検出器の大きさは、試験燃料を観測する視野数(水平、垂直方向のスリットの本数)に影響し、検出器が小さいほど空間的制約を免れ視野数を多くとることが可能である。このため、検出器の小型化の検討を行った。その結果、核分裂性物質塗布面の10mm(縦)×10mm(横)に対して、外形を20mm(縦)×15mm(横)まで

小型化可能との見通しを得た。

以上の検討を基に、構築された検出器の概念を図 2-7 に示す

3. コリメータ、スロット形状の最適化

スロットの形状を選定するにあたっては、炉心の核的な特性を低下させないよう配慮した。また、コリメータの形状を選定するにあたっては、検出器及びスロットの寸法・形状を考慮するとともに、光学的条件の検討及びコリメーション性能の評価とあわせて総合的な検討を行い最適化した。

3-1. コリメータ長

コリメータ長については、十分なコリメーション性能を確保する観点からは長尺の方が望ましいが、これは逆に、信号量の減少につながって検出感度の低下を招く。従って、両者のバランスを検討した上で最適化する必要がある。

コリメーション性能と信号減衰のトレードオフ関係を定量化するため、コリメータ内の中性子の散乱挙動をモンテカルロ手法により計算した。各エネルギー群ごとのスリットにおける中性子の散乱成分の減衰曲線を図3-1～図3-7に示す。これらの結果から、直視成分（スリットの見通す立体角内を真っ直ぐに進み、検出器に至る成分）割合は、コリメータ長が長いほど、高速群ほど大きく、コリメーション性能が高いと言える。コリメータ長は200cm程度以上では、直視成分に対して散乱成分を0.1%以下に抑えることが可能であり、200cm程度の長さで十分なコリメーション機能が得られると判断された。

また、SERAPHの試験の中で試験体燃料部からの高速中性子発生量の最も少ない単ピン試験では、検出器位置での感度が最も得にくくなる。検出器位置での中性子束は、コリメータ長の2乗に反比例するため、この単ピン試験での検出器感度を向上させるためには、可能な限りコリメータ長を短くし、検出器位置での中性子束の絶対値を増大させる必要が生ずる。

一方、燃料の密度と信号の線形性を保つ観点からは、焦点深度が重要なパラメータである。図3-8に示すように、コリメータの光学的形状は、燃料量と信号量の線形性を得るために試験燃料部の1平面（焦点面）上で合成応答関数が平坦になるように最適化して設計するが、焦点面の前後平面における合成応答関数については、平坦からのずれが生じる。図3-8中に式及びグラフで示したように、コリメータ長は短く取り、試験燃料前面からコリメータ前面までの距離は長く取るほうが応答関数の歪みを小さくする観点からは有効であることがわかる。

すなわち、コリメータ長は、検出感度を向上させ、応答関数歪みを小さくする観点からは可能な限り短尺化する必要があるが、十分なコリメーション性能を得るためには、ある程度の長さを許容する必要がある。このトレードオフ関係を踏まえ、コリメーション性能が十分得られる範囲での最小の長さ200cmをリファレンスとした。

3-2. コリメータ入口位置

コリメータの入口（試験燃料側）位置については、試験燃料に近づける方が検出器位置も試験燃料に近づき、検出感度は向上するが、一方で、図3-8に示すように、試験燃料からコリメータ入口までの距離を長く取るほうが応答関数歪みを小さくする観点からは有効であり、また、コリメータをスロット内（駆動炉心領域）に挿入することは炉心の核的性能の大きな劣化を招く可能性が有る。したがって、スロット出口位置（駆動炉心領域の外側、試験燃料中心から～100cm）にコリメータ前面を設定することとした。

3-3. コリメータの前面・背面形状

コリメータの幅については、入口側はスロットの幅から一意的に決定する。炉心の核熱特性、構造的な制約から、スロット幅は10cm程度以下とされていることから、入口のコリメータ幅は10cmとする。これに対して、コリメータ出口（検出器側）のスロット幅は、検出器の幅と個数から決定する。検出器の小型化検討から、検出器一個あたりの幅は15mmまで、また、検出器の保持構造材の厚みも5mmまでに抑えることが可能との見通しが得られている。従って試験燃料観測用10個とバックグラウンド観測用2個の検出器を配列すると、コリメータ出口の幅は23.5cmとなる。

コリメータの高さについては、コリメータの出口の高さと試験燃料の観測高さ（150.0cm）からコリメータ入口の高さを決定する。コリメータ出口の高さは、検出器の高さ（2.0cm）と検出器の保持構造の厚み（0.5cm）、及び検出器の個数（150個）から決定し、374.5cmとなる。従って、図3-9に示すように、コリメータ入口の高さは224.8cmとなる。

以上3-1～3-3に基づき最適化されたコリメータ及びスロット形状を図3-10に示す。

4. 各試験におけるホドスコープ計測性能

4-1. 単ピン、19本ピン束、プール試験におけるホドスコープ計測性能

単ピン、19本ピン束、プール試験の主要3試験について、ホドスコープの計測性能を評価するため、中性子輸送・透過計算を実施した。計算に際しては、最適な検出器を選定するため、 ^{232}Th 、 ^{237}Np 及び ^{238}U の3種類の核分裂計数管について各々評価した。なお、19本ピン束については、概略特性を把握するためにピン束全体をスミアした体系による評価であり、個々のピンを模擬した詳細な評価については、4-2節で詳述する。

図4-1に中性子輸送透過計算の解析フローと解析メッシュ分割を示す。本計算では、コリメータと平行方向に高い解析精度を得るため、試験体からスロット出口までの領域を詳細にメッシュ分割し、角度分点もこの方向に詳細分割した。

図4-2はプール試験体装荷体系でのコリメータ出口での中性子強度分布である。この図の0~5cmまでは試験燃料を直視しているチャンネルであり、外縁部の5~7cmまでのチャンネルは駆動炉心及び試験燃料から試験体構造物等で散乱されてくる中性子を観測している。試験燃料の配位、密度変化に伴うコリメータ出口での中性子強度分布の変化をもとに、各試験の計測性能を評価することができる。

ホドスコープでの計測により有意な情報を得るためには、燃料量の変化による信号の変化が統計的誤差に比べて大きいことが必要である。これは、隣接する2つの計数時間単位間の信号変化が統計誤差より大きいという条件として、以下のように表すことができる。

$$\Delta s > \beta(\Delta s) = \beta \sqrt{(S+B+\Delta s) + (S+B)} \quad (1)$$

- S : ホドスコープでの計数時間単位内の計数の信号成分
 B : ホドスコープでの計数時間単位内の計数のバックグラウンド成分
 Δs : 2つの計数時間単位間の計数の変化量
 $\delta(\Delta s)$: Δs の統計的誤差
 β : 統計的信頼度 ($\beta = 1$ で 1σ 、 $= 2$ で 2σ)

有意な情報を得るために必要な計数 $(S+B)_{\min}$ は(1)式を変形して以下のように表わされる。

$$(S+B)_{\min} > \frac{\beta^2}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left\{ 1 + \frac{2}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \right\} \quad (2)$$

α = 信号/バックグラウンドの比 (S/B)

β : 統計的信頼度 ($\beta \sigma$)

γ : 信号変化割合 $\gamma = \Delta s/S$

ここで、

$$(S+B)_{\min} = \phi \cdot \epsilon \cdot A \cdot \Delta t_{\min} \quad (3)$$

ϕ : 検出器位置でのフラックス (n/cm²/s)
 ϵ : 検出器の検出効率 (counts/n)
 A : 検出器有感面積 (cm²)
 Δt_{\min} : 必要最小時間分解能 (s)

と表せるから、(2)式より、必要最小時間分解能は、

$$\Delta t_{\min} = \frac{\beta^2}{\gamma \phi \epsilon A} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \left\{1 + \frac{2}{\gamma} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right\} \quad (4)$$

となる。

(4)式の解釈を述べる。採用する検出器を定めることにより、検出器効率 ϵ 及び検出器有感面積 A が決まり、さらにコリメータ構成を定めることにより、フラックス ϕ 及び信号/バックグラウンド比 α が決まる。このとき、必要最小時間分解能 Δt_{\min} は統計的信頼度 β と信号変化割合 γ との関数になる。すなわち、統計的信頼度 β にて、ある信号変化率 γ を示す現象を検知するためには、時間分解能 Δt_{\min} 以上を要する (Δt_{\min} より短い時定数の現象であった場合は検知できない) ことを意味する。また、元の式(4)に立ち返って、 ϵ 、 A 、 ϕ 及び α は各々が大きいほど Δt_{\min} の小さい、より高速の現象を検知できるシステムとなる。

(4)式を用いて、中性子輸送透過計算の結果を基に、主要試験 (プール、19本ピン束、単ピン試験) に対するホドスコープの計測性能を評価した結果を以下の①~③に記す。ここで、検出器の検出効率及び有感面積については、第2章で述べた最適化された検出器概念に基づき、以下の値を想定した。また、コリメータ及びスロットの形状・寸法は第3章に述べたものとした。

	検出器感度	有感面積
²³⁷ Np 核分裂計数管	1.16×10^{-3}	1cm ²
²³⁸ U 核分裂計数管	3.84×10^{-4}	1cm ²
²³² Th 核分裂計数管	7.32×10^{-5}	1cm ²

① プール試験

プール試験では、単ピン試験やピン束試験ほどの高い密度変化検知分解能は必要とされず、20%程度の密度変化を検知できることを目標とした。図4-3に示すように、20%の燃料密度変化を ^{232}Th 核分裂計数管で検知するのに必要な時間は10ms程度であるのに対して、 ^{238}U 核分裂計数管では、 $\sim 2\text{ms}$ である。 ^{237}Np 核分裂計数管を用いれば、1ms以下で検知することは可能だが、SBRが大きく低下すること、及び、プール試験では20%程度の密度変化を数msの時間分解能で検知できれば十分との見通しから、 ^{238}U 核分裂計数管を最適な検出器として選定した。

② 19本ピン束試験

ピン束試験では、プール試験に比べさらに詳細な密度変化を検知する必要がある、5%程度の密度変化を1msの時間分解能で検知できることを目標とした。図4-4に示すように、 ^{238}U 核分裂計数管はこの目標値をクリアしており、また ^{237}Np 核分裂計数管に比べSBRが高く、信号の質も高いことから、 ^{238}U 核分裂計数管が最適である。

③ 単ピン試験

単ピン試験はプール試験、ピン束試験に比べて試験燃料量そのものが小さいため、信号量も低く、図4-5に示す通り、 ^{232}Th 核分裂計数管では、1msの時間分解能では20%程度の密度変化も検知困難である。 ^{237}Np 核分裂計数管を用いれば、10%程度の密度変化も検知可能ではあるが、単ピン試験においても、 ^{237}Np 核分裂計数管のSBRの低さを考慮すると、 ^{238}U 核分裂計数管を用いて、質の高い信号を得ることが望ましい。これによって、1msの時間分解能で20%程度の密度変化を捉えることが可能である。

4.2. 複数ピン束試験での燃料移動の検知性

SERAPHにおいて計画されている、局所事故、複数ピン束での過出力試験等においては、燃料ピン束の内部での燃料の移動、密度変化を検知することが求められる。このため、燃料ピン単位での移動、密度変化を模擬した解析を行い、これに対するホドスコープの計測性能を評価した。

解析手法は基本的には図4-1と同様であるが、本解析では、試験燃料ピンを個々に扱う必要があるため、試験体内を詳細にメッシュ分割した体系で、中性子増倍計算を実施した。増倍計算とは、中性子輸送計算によって算出した核分裂率分布を駆動炉心部分にのみ与え、試験体燃料の核分裂率分布の算出と、透過計算を同時に行う手法である。

7本、19本、37本、61本ピン束について中心から燃料ピンがリング状に欠損した解析ケースを設定し、各解析ケース(図4-6～4-9)についてコリメータ出口での中性子強度分布を

での中性子強度分布を求め、基準ケースからの中性子強度の変化を表4-1～4-3に整理した。この信号変化率と(4)式とから、必要最小時間分解能を求め、表4-1～4-3に同時に整理した。

表4-1に示すように、 ^{232}Th 核分裂計数管では、19本ピン中の1本ピンの喪失を検知するのに1s以上を要し、また、37本、61本中の7本ピンの喪失を検知するのに数100msの時間分解能を要することがわかり、 ^{232}Th 核分裂計数管では、比較的速い現象である局所事故試験等の燃料の損傷の拡大を検知することは非常に困難である。一方、表4-2に示すように ^{237}Np 核分裂計数管ではこれらを検知できる可能性はあるが、SBRが低いことによる信号の信頼性に不安がある。従って、やはり、両者の中間的な性能にある ^{238}U 核分裂計数管を用いることが最も望ましいと考えられる。

4-3. 軸方向燃料移動の検知性

試験体の熱膨張等によるフィッサイル部上端位置の変化や、燃料が炉心高さを越えて軸方向ブランケット領域まで移動した場合の検知性を評価するため、図4-10に示すように、ピン束の長さを変えた時の中性子強度分布の変化を調べる計算を実施した。 ^{238}U 核分裂計数管のエネルギー閾値(～1MeV)以上の中性子強度の変化率は40%以上(図4-11)であり、この変化は図4-4に示したように1ms以内の時間分解能で十分検知可能である。また、図4-12に示すように、19本ピン束の内側7本程度のピンの移動に対しては3%程度の信号変化(図4-13)が得られ、これは10ms以内の時間分解能で十分検知可能であることが図4-4から分かる。但し、図4-14、15に示すように、7本ピン束、19本ピン束とも、中心の1本ピン程度の燃料が炉心高さの範囲で移動した場合の信号変化は1%程度以下(図4-16、17)に留まるため、検出には100ms程度を要する。

4-4. 制御棒案内管等からの融体流出試験における検知性

制御棒案内管(CRGT: Control Rod Guide Tube)等を通じた熔融炉心物質流出挙動を模擬した試験については、軸方向の燃料移動の検知性が重要となる。CRGT等による熔融炉心物質流出挙動を模擬した試験では、燃料の流出経路の断面積は7本ピン束と同等以上の流路断面積であり、7本ピン束試験での軸方向の燃料移動の検知性に比べ高い検知性能を示すと考えられる。従って7本ピン束の軸方向の燃料移動の検知性を評価することによって、CRGT等による融体流出実験の検出性を保守的に評価することができる。図4-18に示したように、7本ピン束の基準体系の場合と軸方向上部に10cm程度移動した体系の場合との比較から信号の変化率を求め、(4)式を用いて必要最小時間分解能を求めた。信号の変化率は図4-19に示したように25%程度であり、必要最小時間分解能は定格出力相当の条件でも～16msと試算される。このことから、熔融炉心物質流出試験において要求される軸方向燃料移動の時間分解能は

また、要求されている径方向、軸方向の空間分解能はそれぞれ、2cm 及び 2～5cm であり、現状の 1cm の空間分解能は十分要求条件を満足していると言える。

5. 結論

SERAPHの中性子ホドスコープ検出器として ^{238}U 核分裂計数管を選定するとともに、検出器の小型化及び感度向上方策を検討し、有感部10mm(縦)×10mm(横)に対して、検出器外形を20mm(縦)×15mm(横)まで小型化し、電極を200段まで多段化して感度を向上させた検出器概念を具体化した。

また、3次元モンテカルロ計算によるコリメータ内中性子散乱挙動評価及び光学的な条件の検討によってコリメータ長を200cm程度まで短尺化可能との見通しを得るとともに、コリメータ形状・寸法、配置等のシステム構成を最適化した。

これら最適化された条件の基で、中性子輸送・透過計算により、単ピン、複数ピン束、プール試験等の主要試験に対する燃料移動計測性能を定量化し、SERAPH試験に要求される計測性能を充足するシステムが構築できることを示した。

本研究成果は、炉心構成及び炉体構造の検討成果と併せて、施設設計の具体化に有効に反映される。

謝 辞

本検討の実施にあたっては、多くの関係者の方々の支援、協力を頂いた。

特に検討のほぼ全体にわたって、作業の進め方、技術的内容について野中信之氏(現在 FBRサイクル開発推進部)からは多大な指導・助言を頂いた。全体施設設計との整合調整にあたっては、川太徳夫氏(現 KEDO)の指導・助言を頂いた。宇都成昭氏(現 システム技術開発部)からは駆動炉心に関する組成・核データの提供を受け、駆動炉心との取り合い条件等に関し助言を頂いた。日本テクニカルシステム(株)の坂本聡氏、海老沢透氏、原子力システム(株)の水野正弘氏には中性子輸送・透過計算、3次元モンテカルロ計算等の膨大な解析作業と解析結果の整理を実施して頂いた。新型炉技術開発(株)の小山和也氏、多田恵子氏、三菱重工業(株)の日比宏基氏、白木貴子氏には解析評価の中核として本検討に携わって頂いた。

ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 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.
- [2] K. Baumung et al., "The CABRI Fast Neutron Hodoscope", Nuclear Technology, Oct. 1985-Vol.71.
- [3] A. De Volpi et al., "Fast-Neutron Hodoscope at TREAT: Development and Operation", Nuclear Technology, Nov. 1975-Vol.27.
- [4] A. De Volpi et al., "Fast-Neutron Hodoscope at TREAT: Data Processing, Analysis, and Results", Nuclear Technology, Sept. 1976-Vol.30.
- [5] A. De Volpi et al., "Fast-Neutron Hodoscope at TREAT: Methods for Quantitative Determination of Fuel Dispersal", Nuclear Technology, Jan. 1982-Vol.56.
- [6] NSRR 研究委員会実験計装開発専門部会「放射線による燃料移動測定の現状」, JAERI-M7683, 1978.
- [7] 小西賢介他, "高速炉安全性試験炉における試験燃料移動計装の検討", 日本原子力学会 1995 年春の年会.
- [8] 小西賢介他, "FBR 安全性炉内試験計画 SERAPH(6) : 物質移動計装システムの特
性評価", 日本原子力学会 1995 年秋の大会.

表 4 - 1 ^{232}Th 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)

バンドル本数	^{232}Th	喪失した燃料ピン数		
		1本	7本	19本
7本	基準ケースからの変化率 (%)	-10.87	—	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.0E+07	—	—
	時間分解能 (ms)	990	—	—
19本	基準ケースからの変化率 (%)	-5.53	-23.39	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.3E+07	1.1E+07	—
	時間分解能 (ms)	2434	176	—
37本	基準ケースからの変化率 (%)	-3.65	-13.58	-29.69
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.6E+07	1.4E+07	1.10E+07
	時間分解能 (ms)	4644	384	103
61本	基準ケースからの変化率 (%)	-2.31	-9.29	-18.76
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.7E+07	1.6E+07	1.4E+07
	時間分解能 (ms)	13295	900	251

表 4 - 2 ^{237}Np 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)

バンドル本数	^{237}Np	喪失した燃料ピン数		
		1本	7本	19本
7本	基準ケースからの変化率 (%)	-8.44	—	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	2.1E+07	—	—
	時間分解能 (ms)	81	—	—
19本	基準ケースからの変化率 (%)	-4.46	-19.47	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	2.6E+07	2.2E+07	—
	時間分解能 (ms)	181	12	—
37本	基準ケースからの変化率 (%)	-2.99	-11.56	-26.53
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	3.1E+07	2.8E+07	2.3E+07
	時間分解能 (ms)	331	25	6
61本	基準ケースからの変化率 (%)	-1.92	-7.98	-16.59
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	3.4E+07	3.2E+07	2.9E+07
	時間分解能 (ms)	913	57	15

表 4 - 3 ^{238}U 検出器によるバンドル試験の検出性 (1σ)

バンドル本数	238U	喪失した燃料ピン数		
		1本	7本	19本
7本	基準ケースからの変化率 (%)	-9.37	—	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.5E+07	—	—
	時間分解能 (ms)	200	—	—
19本	基準ケースからの変化率 (%)	-4.86	-21.68	—
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	1.9E+07	1.6E+07	—
	時間分解能 (ms)	484	28	—
37本	基準ケースからの変化率 (%)	-3.21	-12.63	-27.7
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	2.2E+07	2.0E+07	1.7E+07
	時間分解能 (ms)	924	65	16
61本	基準ケースからの変化率 (%)	-2.05	-8.68	-17.5
	検出器位置での中性子束 (n/cm ² /s)	2.5E+07	2.3E+07	2.1E+07
	時間分解能 (ms)	2669	157	42

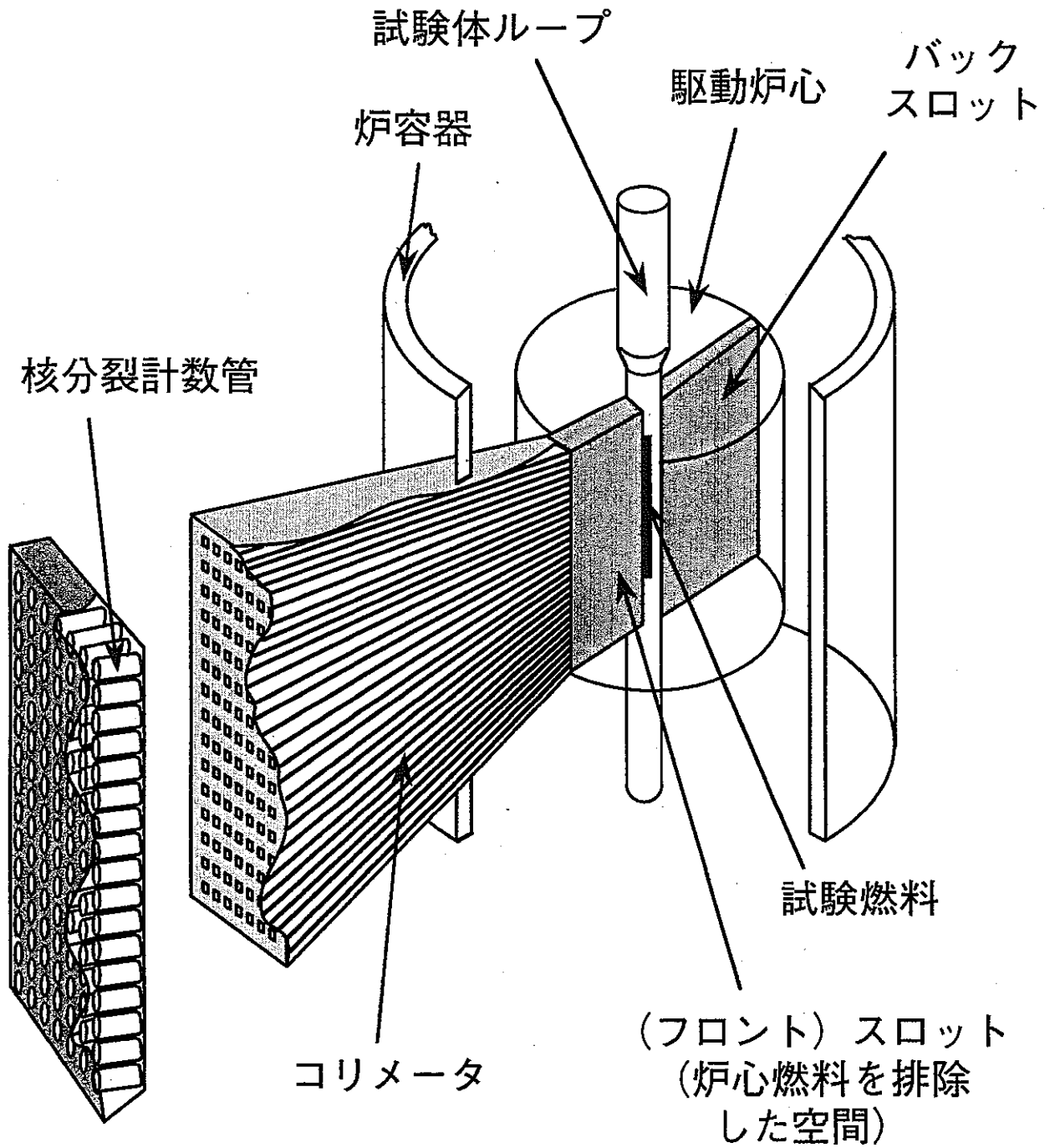


図 1-1 SERAPHホドスコープシステム概念図

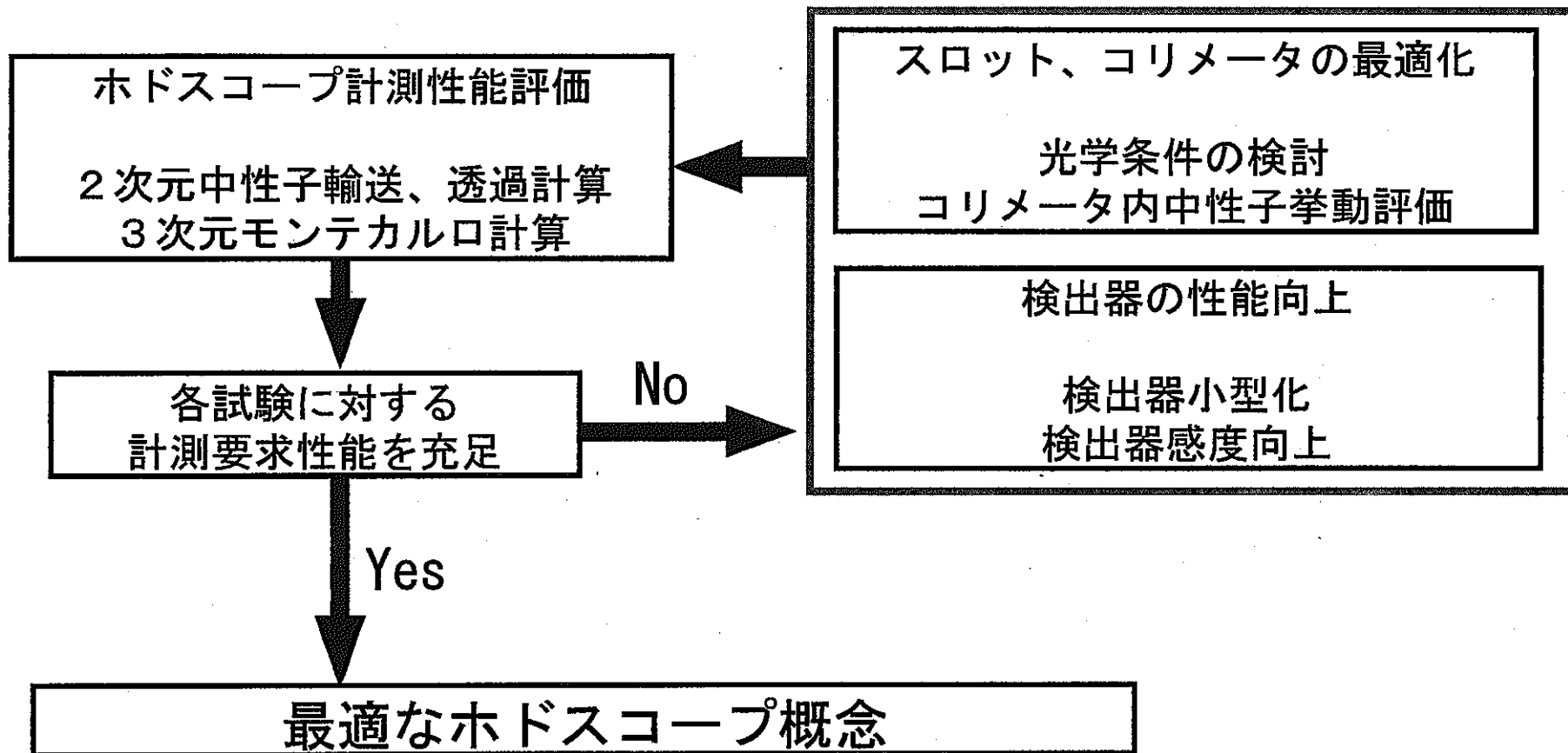


図 1-2 ホドスコープ設計、性能評価の流れ

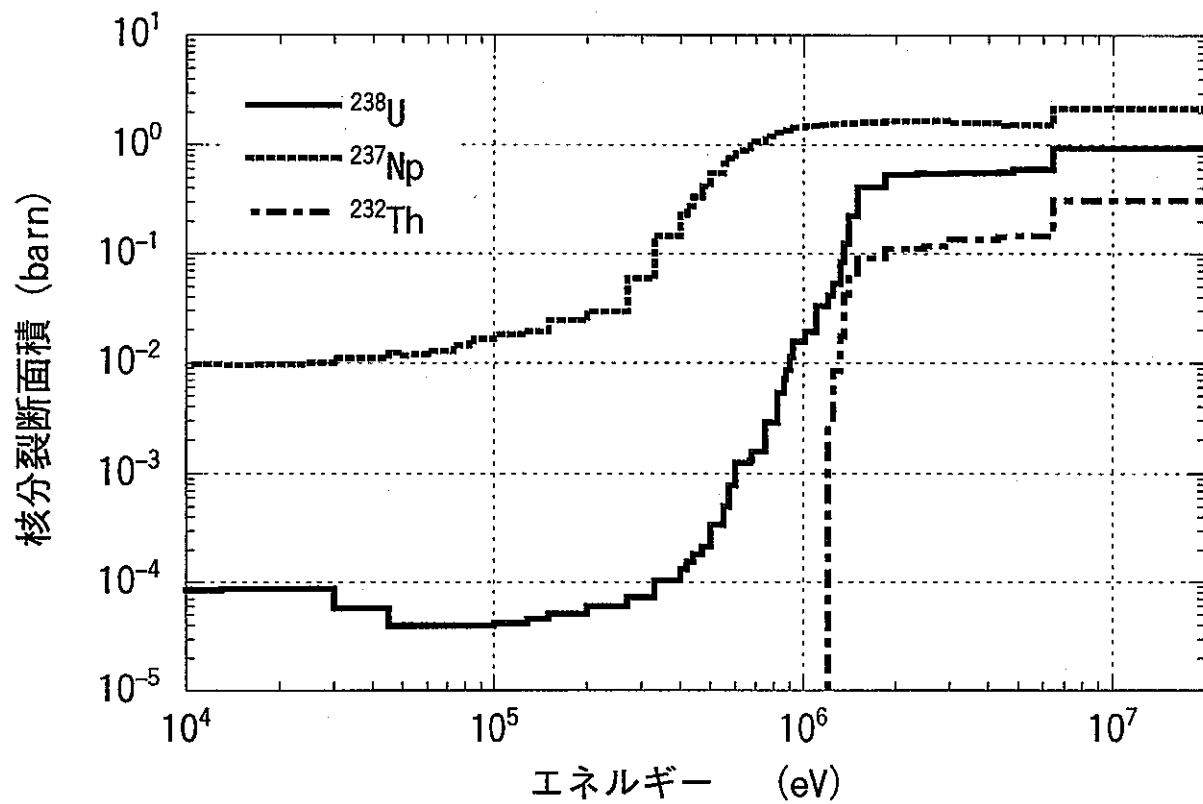


図 2-1 各検出器塗布物質の核分裂断面積

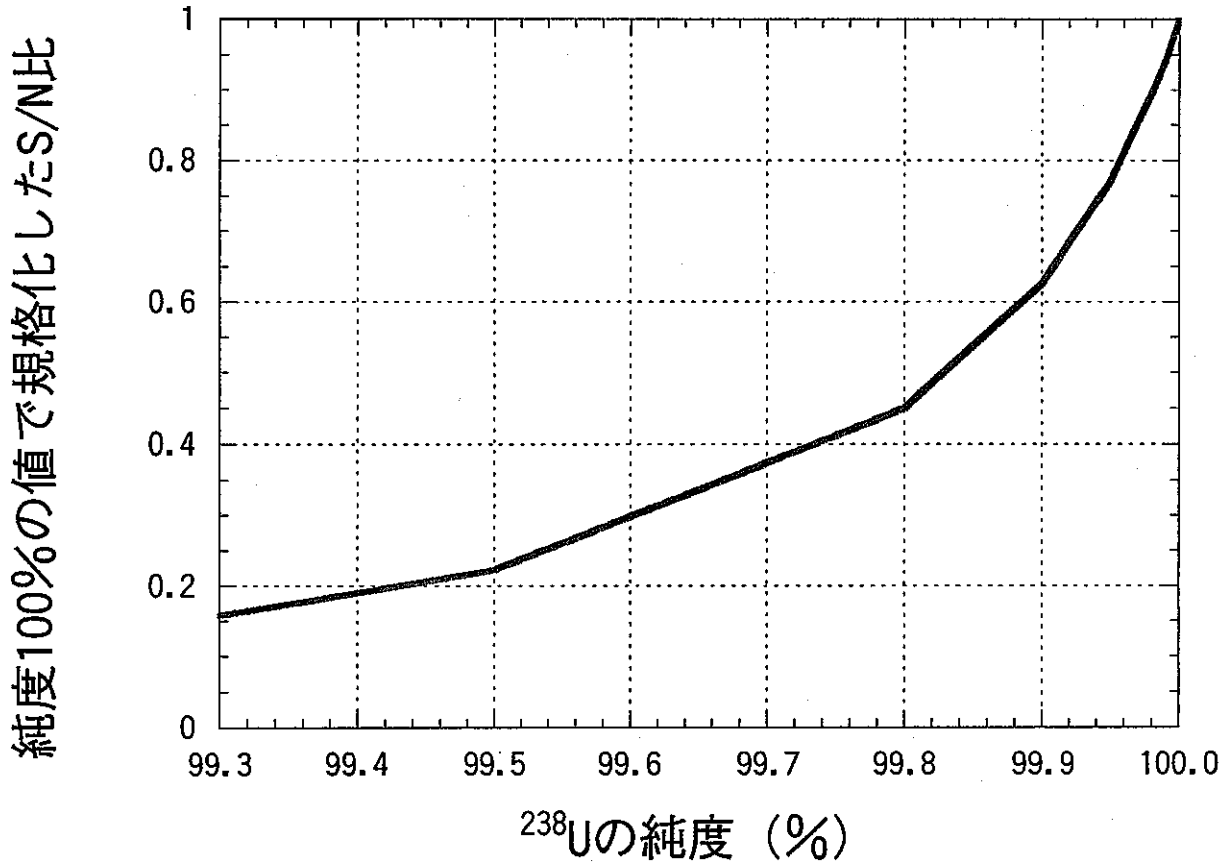


図 2-2 ^{238}U の純度とS/N比との関係

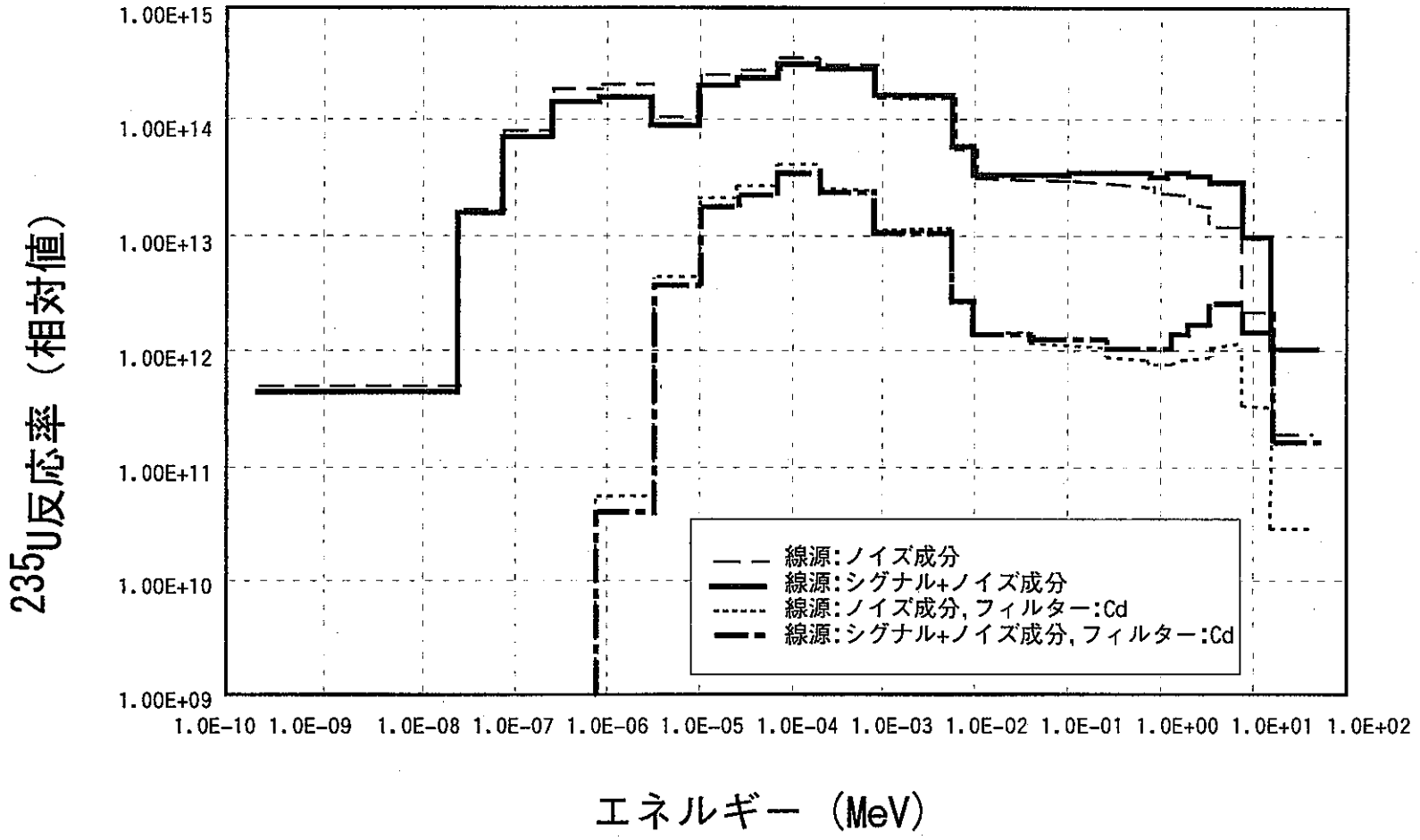


図 2-3 235U反応率 (Cdフィルター, フィルター無)

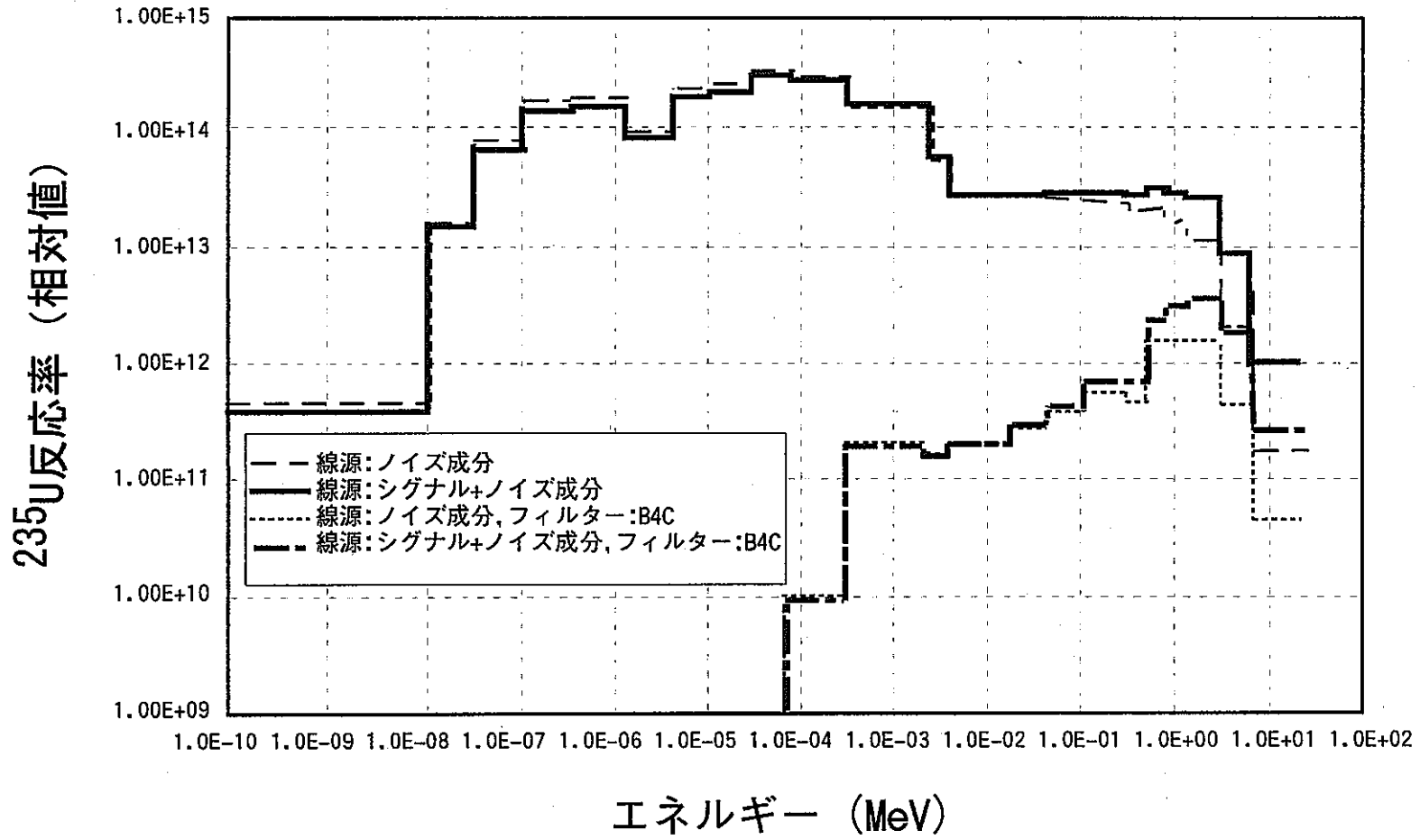


図 2-4 235U反応率 (B4Cフィルター, フィルター無)

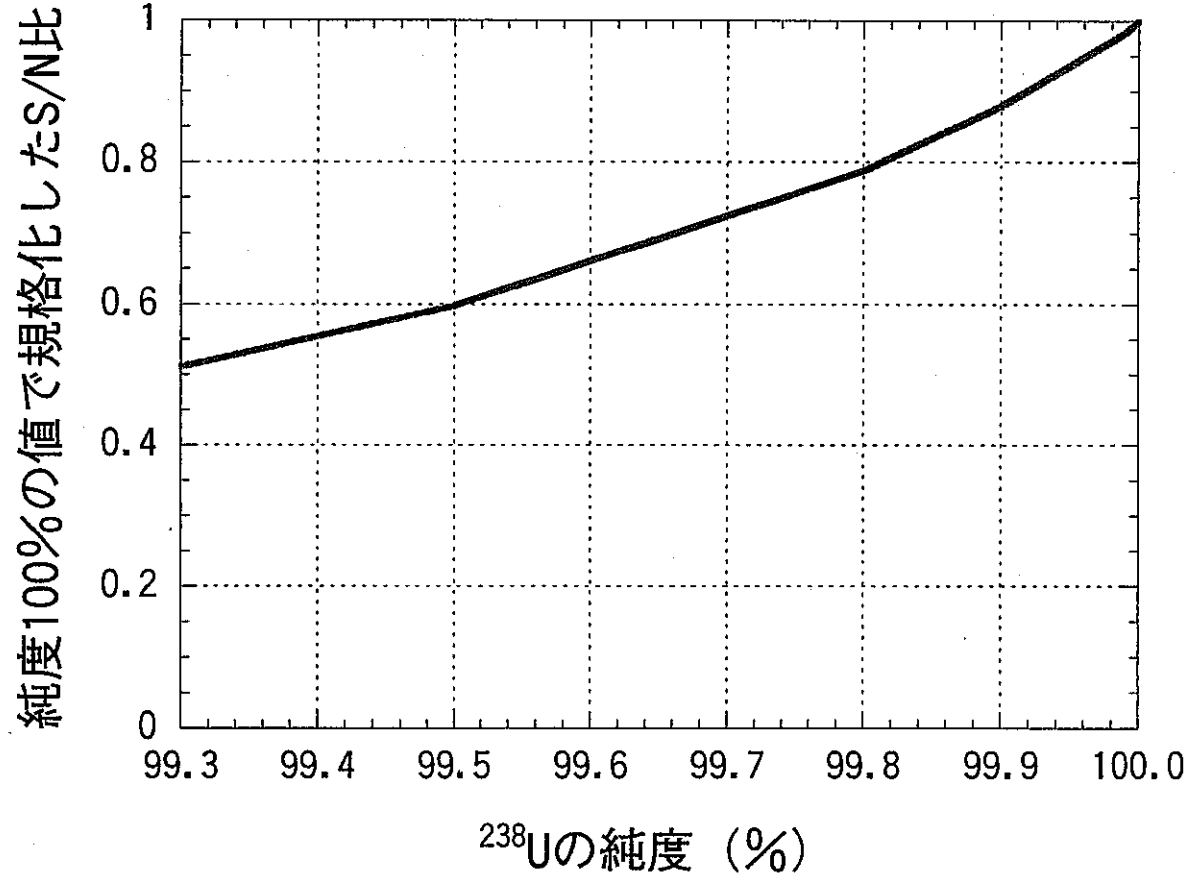


図 2-5 ^{238}U の純度とS/N比との関係 (フィルタ厚1cmの場合)

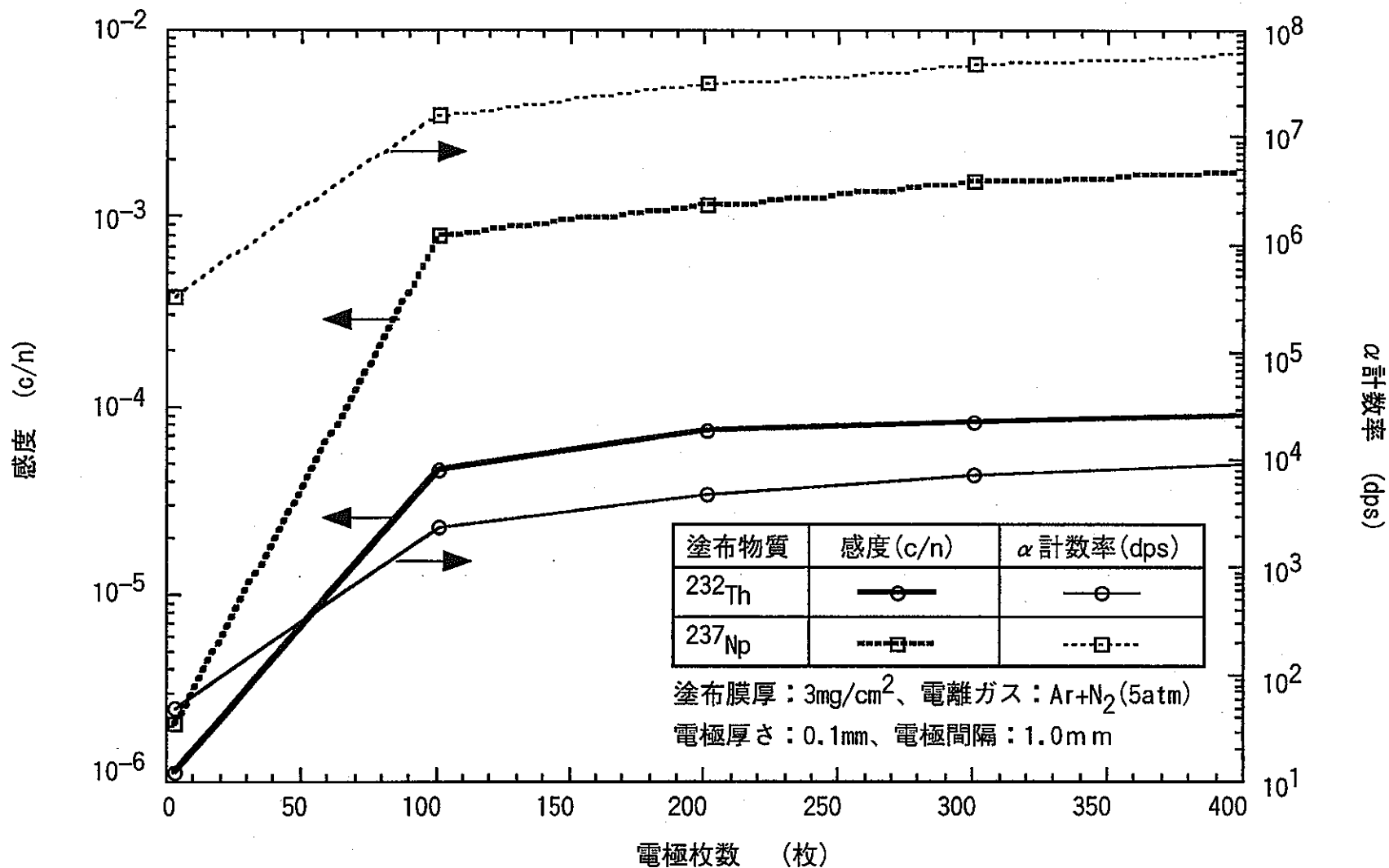


図 2-6 電極の多段化による感度向上

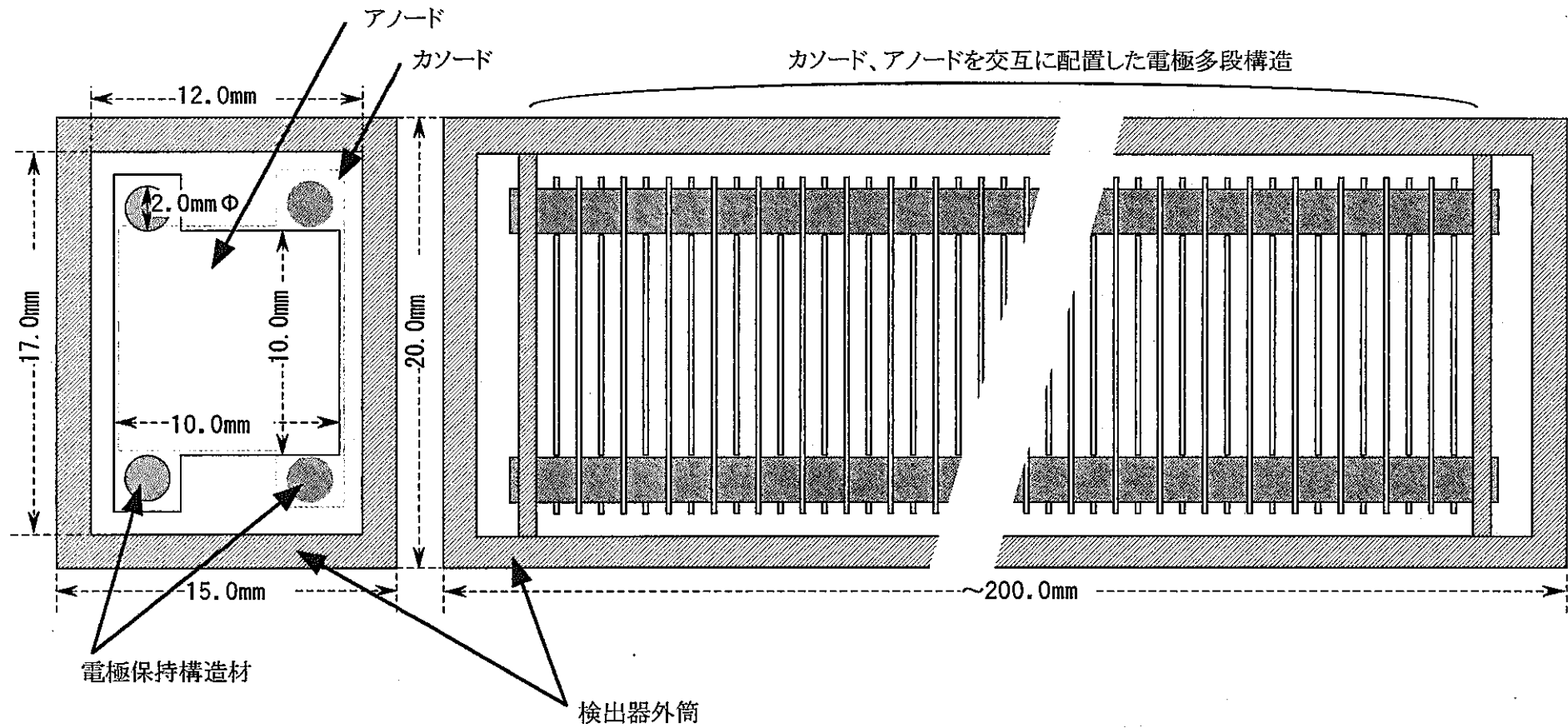


図 2-7 ホドスコープ検出器概念図

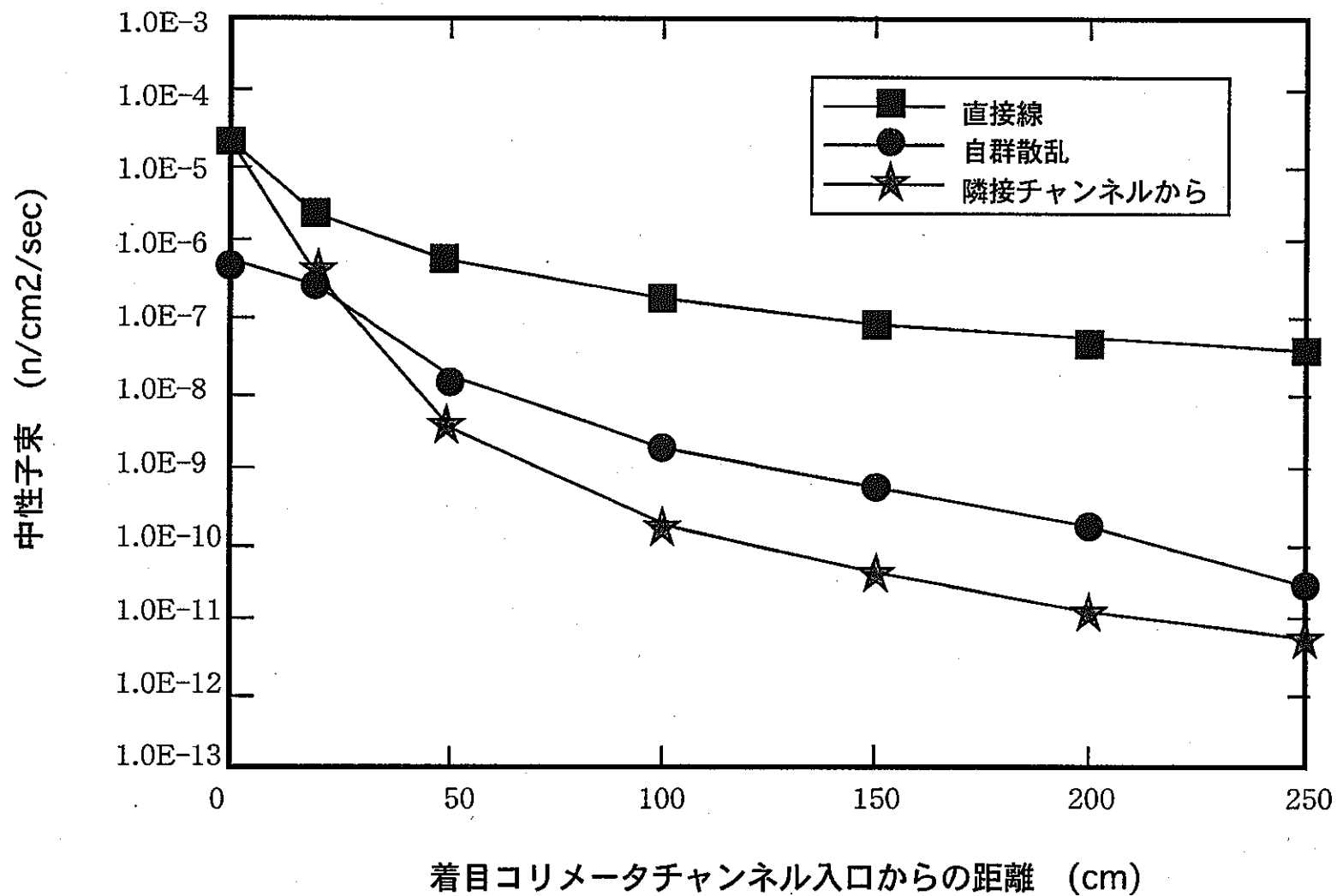


図 3-1 中性子束減衰曲線 (第 1 群: 20.0~6.434MeV)

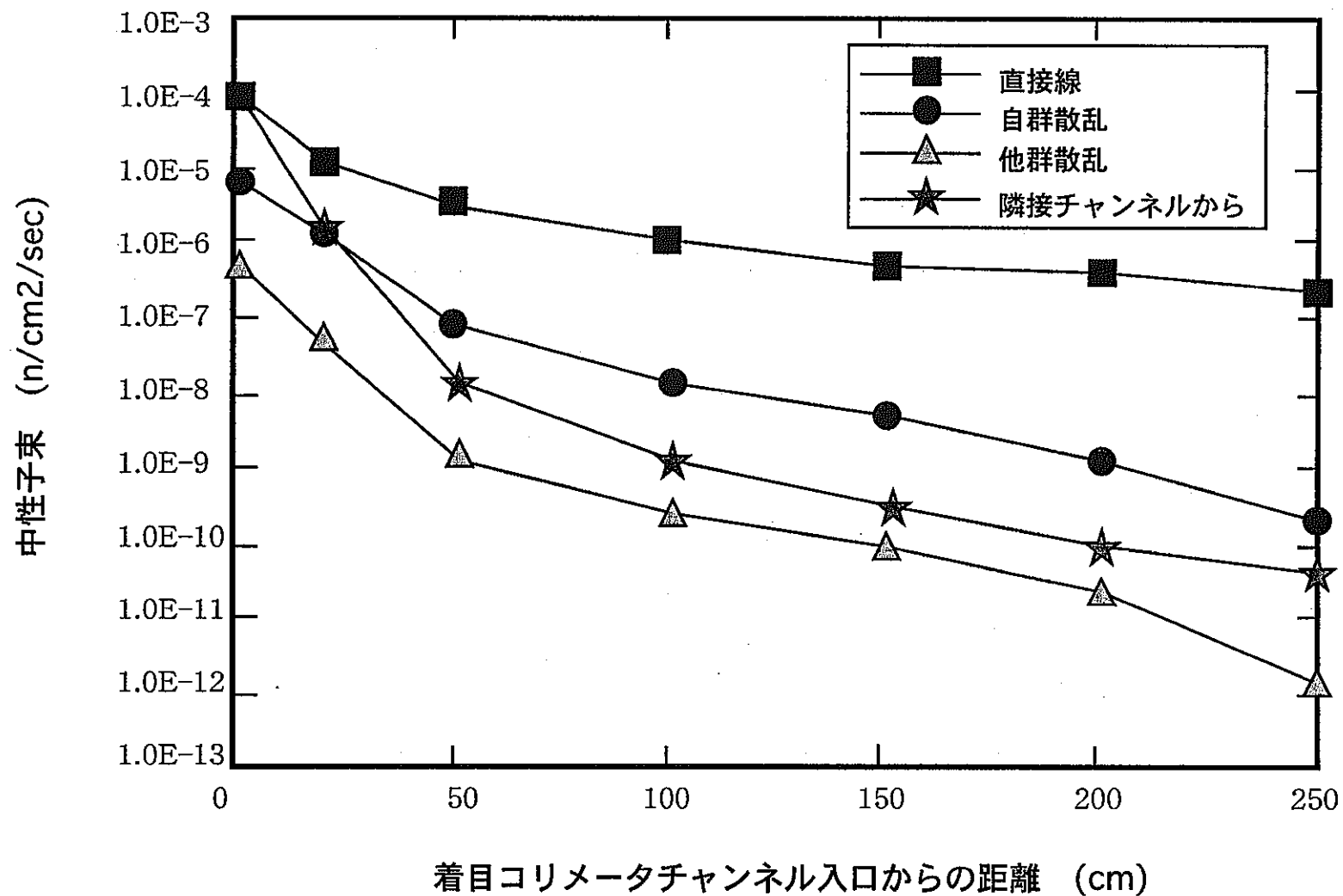


図 3-2 中性子束減衰曲線 (第 2 群: 6.434~3.0MeV)

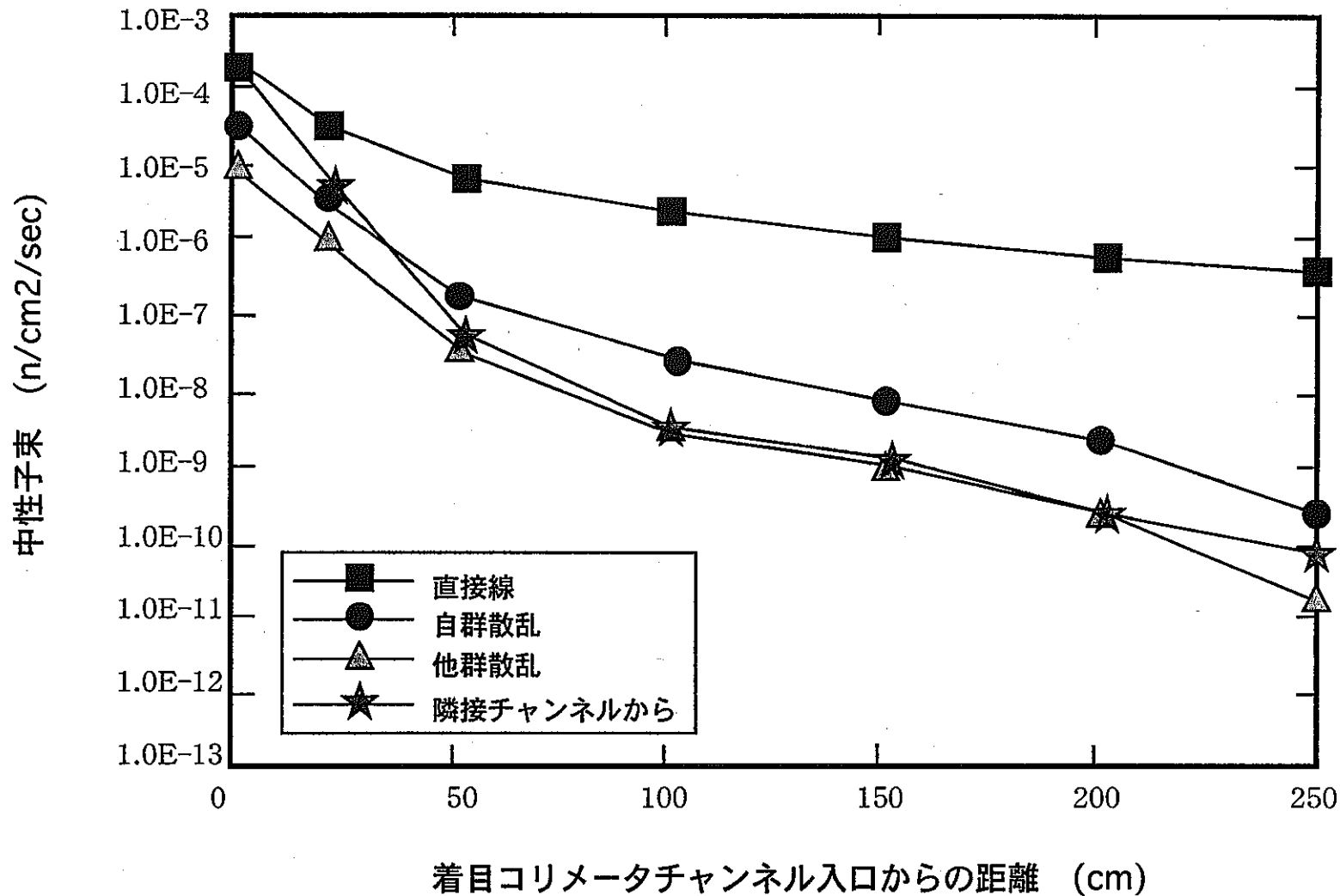


図 3 - 3 中性子束減衰曲線 (第 3 群: 3.0~1.356MeV)

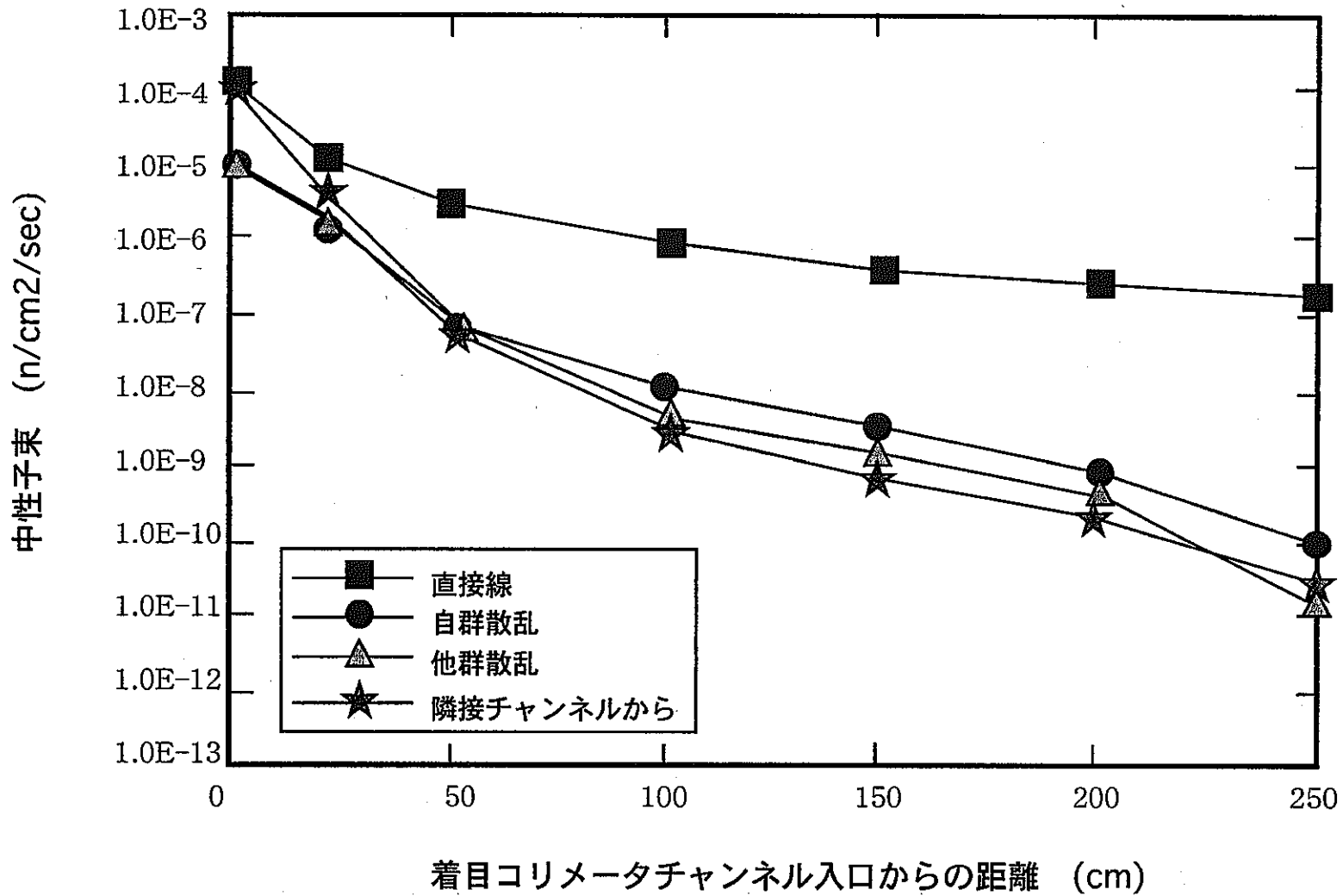


図 3-4 中性子束減衰曲線 (第 4 群: 1.356~0.82MeV)

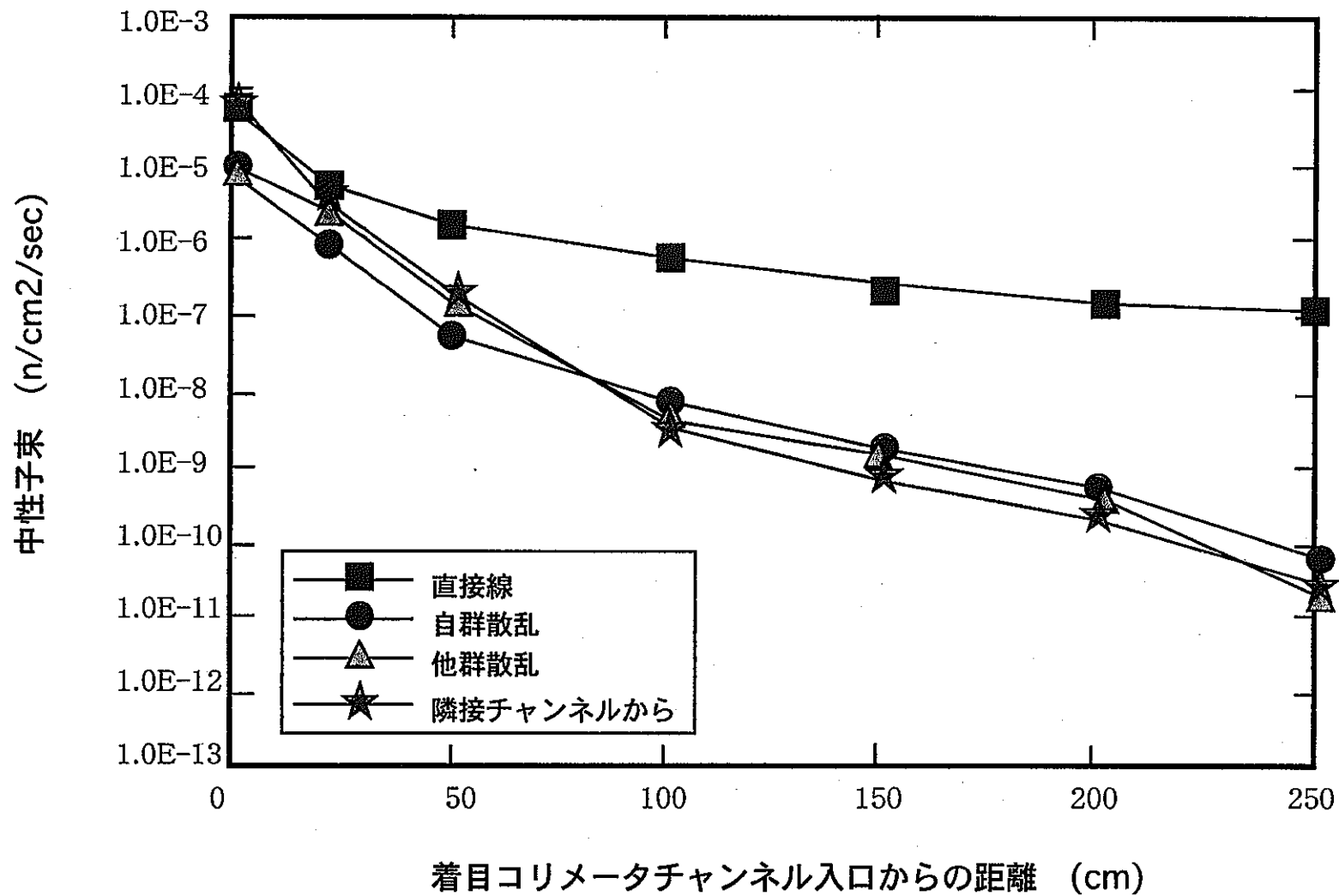


図 3-5 中性子束減衰曲線 (第 5 群: 0.82~0.49952MeV)

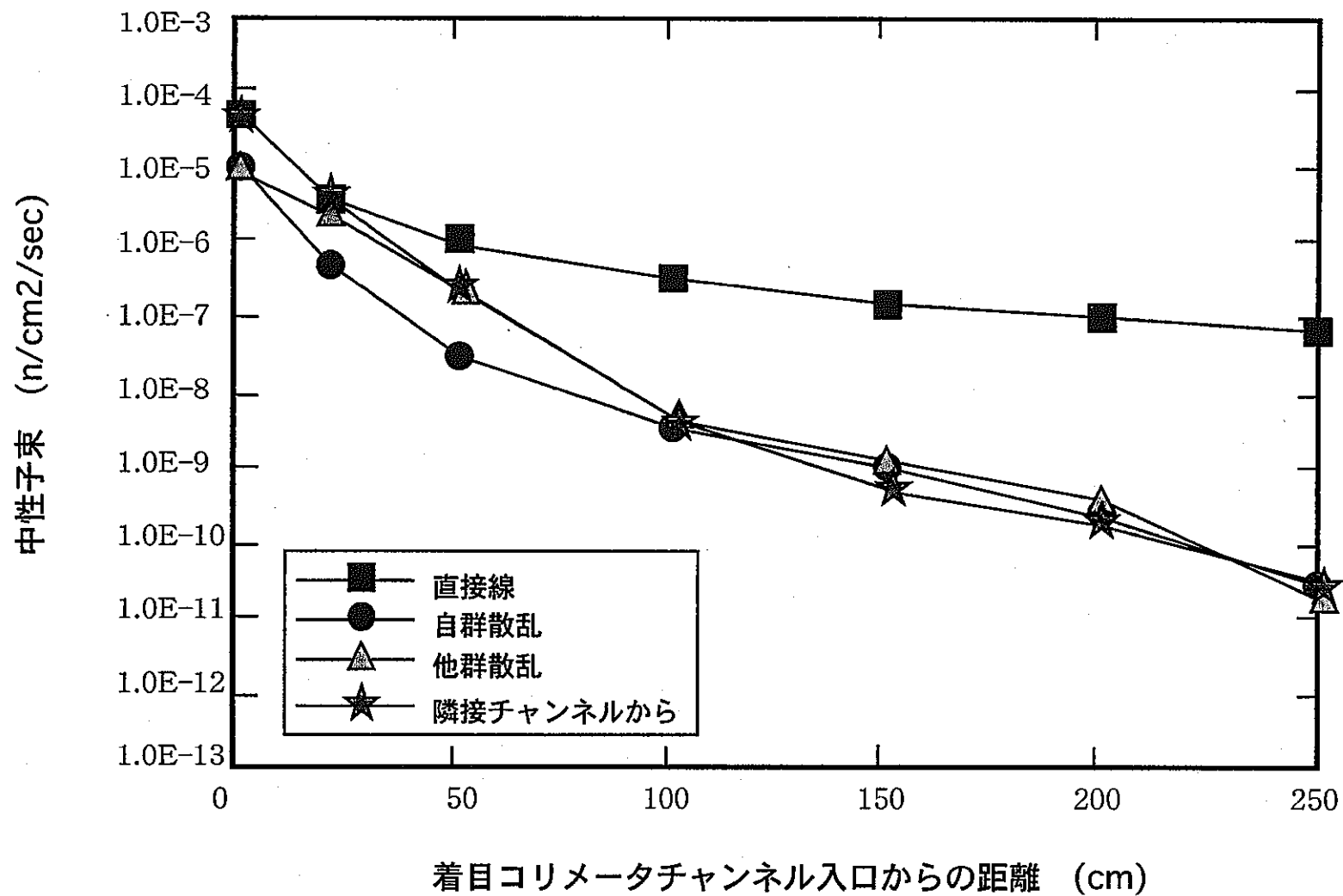


図 3-6 中性子束減衰曲線 (第 6 群: 0.49952~0.33MeV)

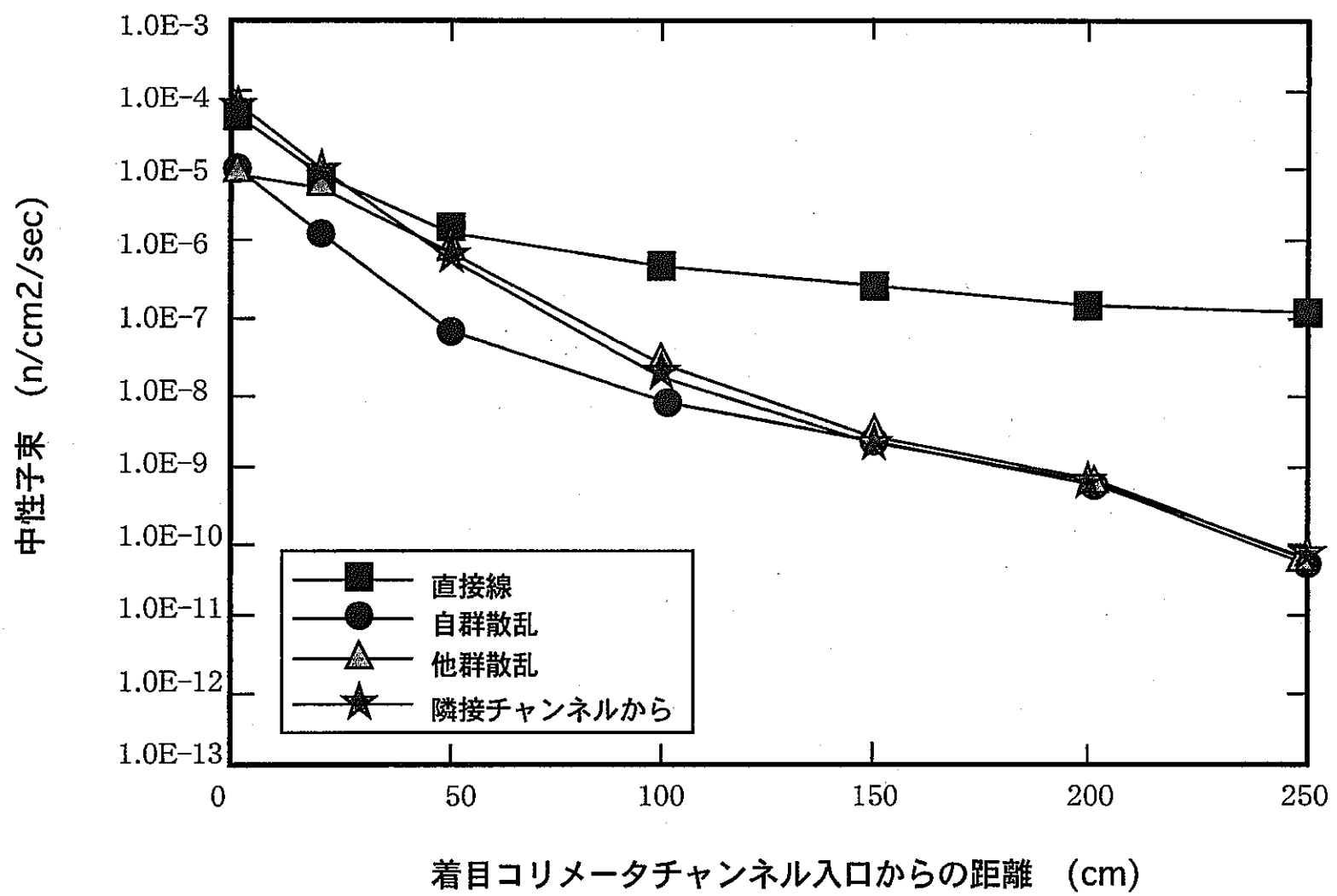


図 3-7 中性子束減衰曲線 (第 7 群: 0.33~0.1MeV)

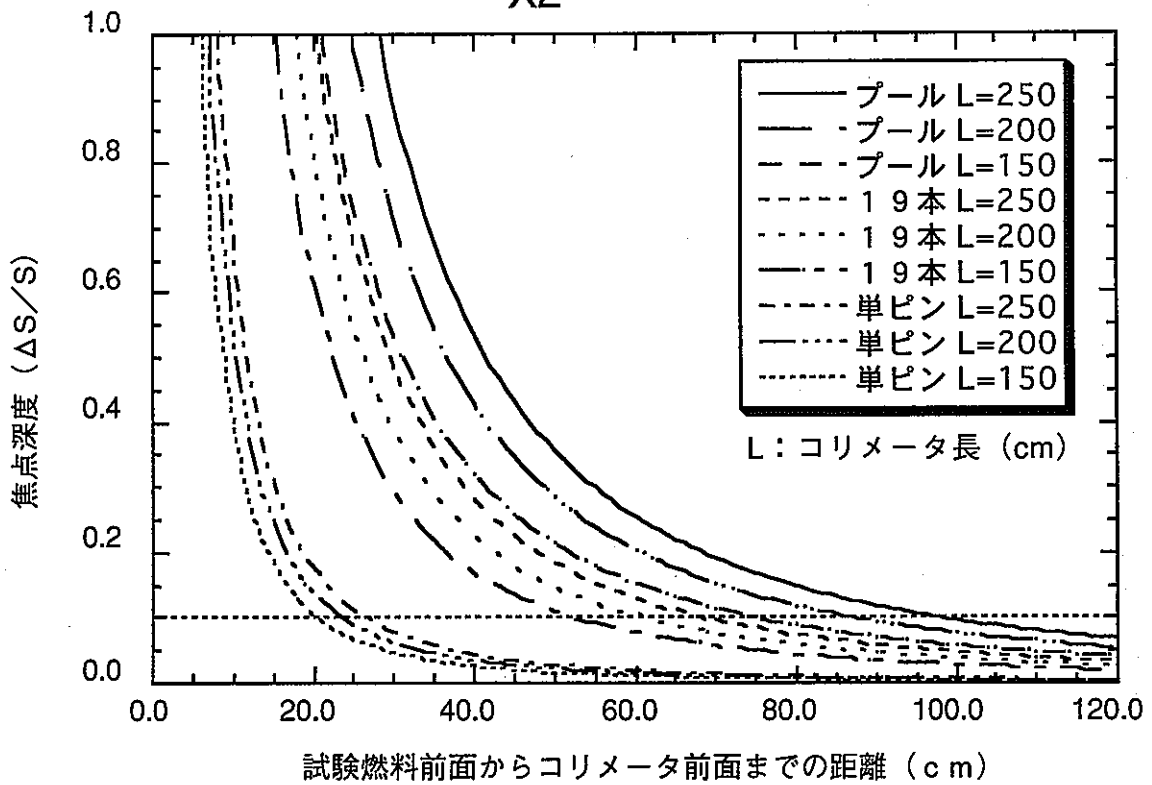
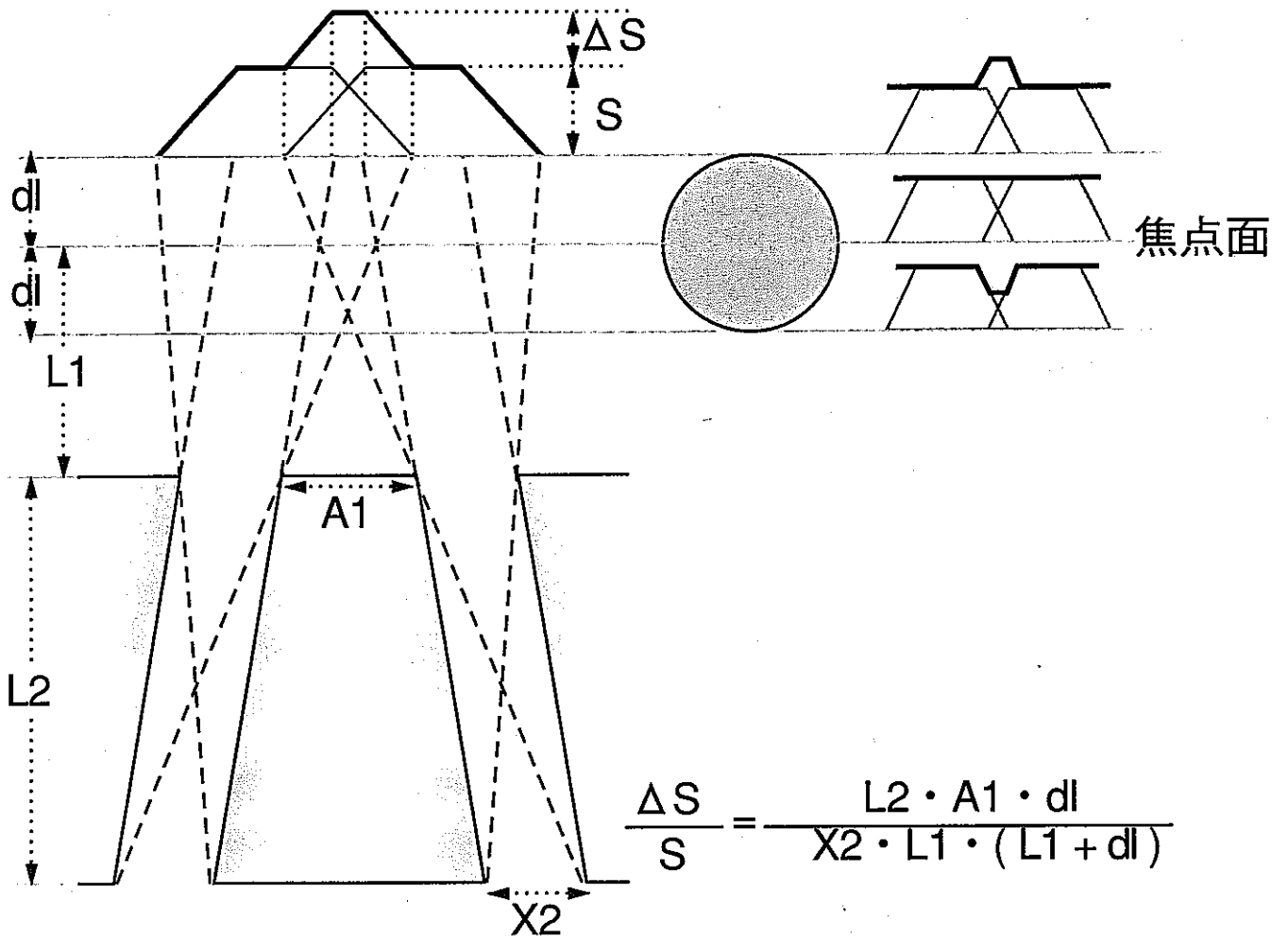


図 3-8 焦点深度

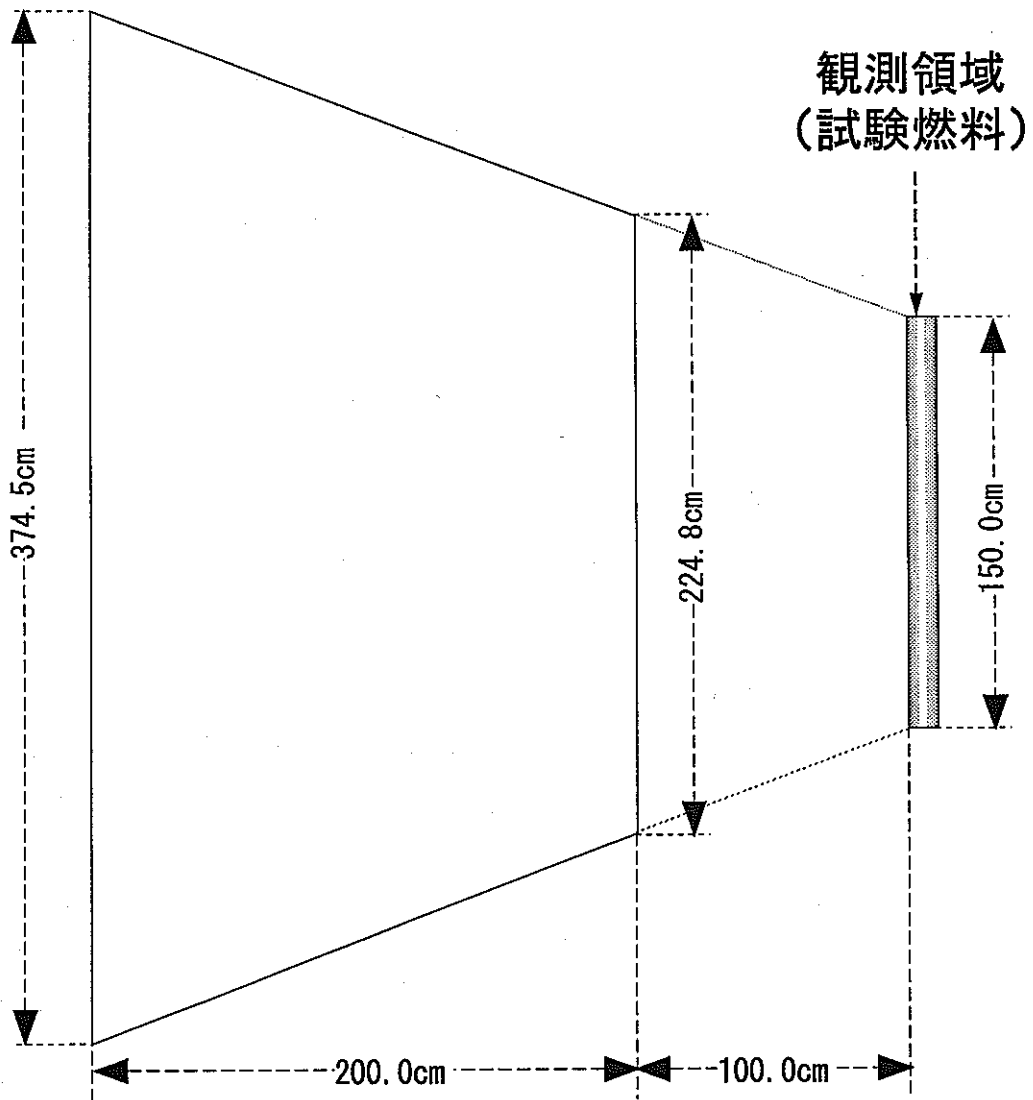


図3-9 コリメータ垂直断面図

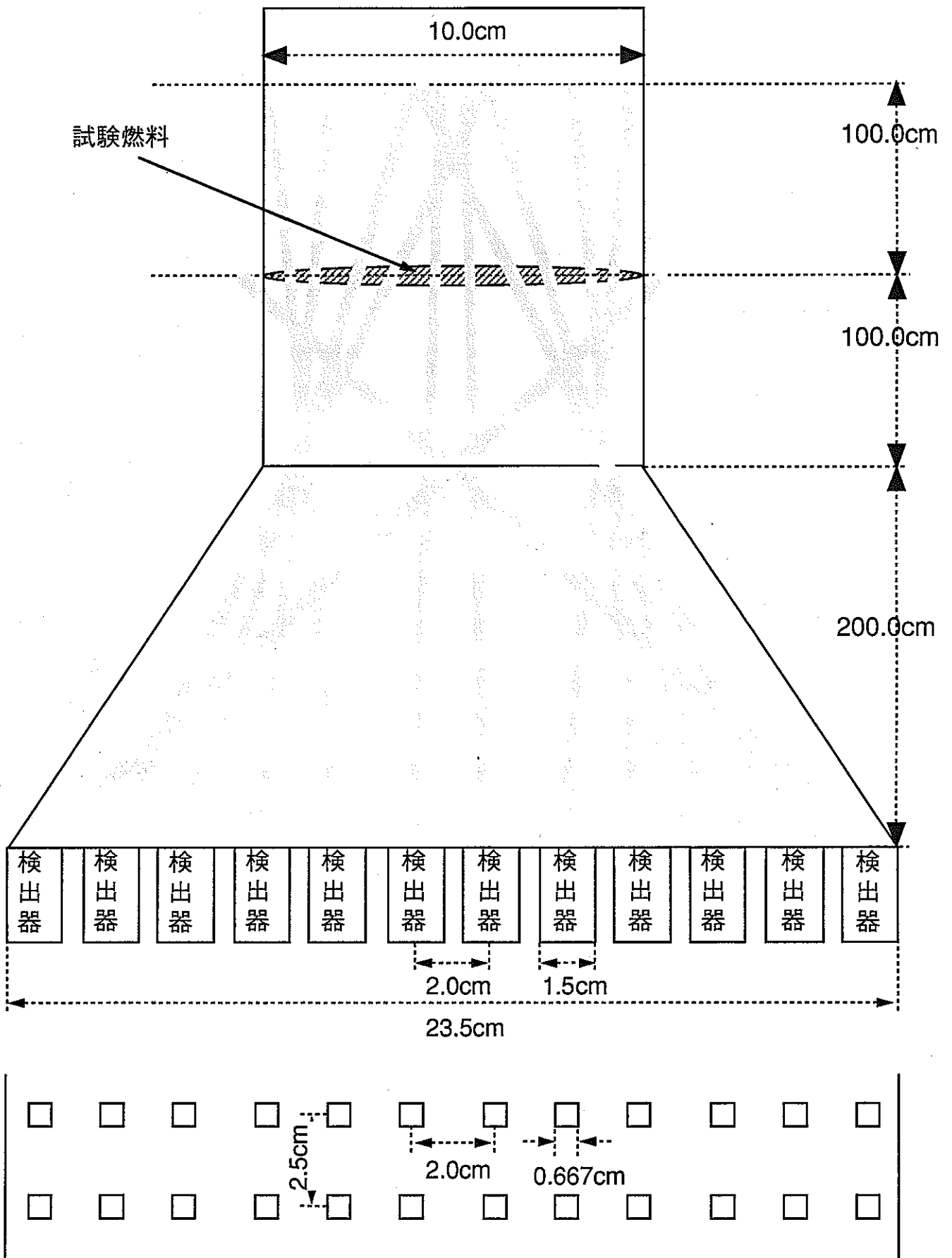


図 3-10 コリメータ・スロット概念図

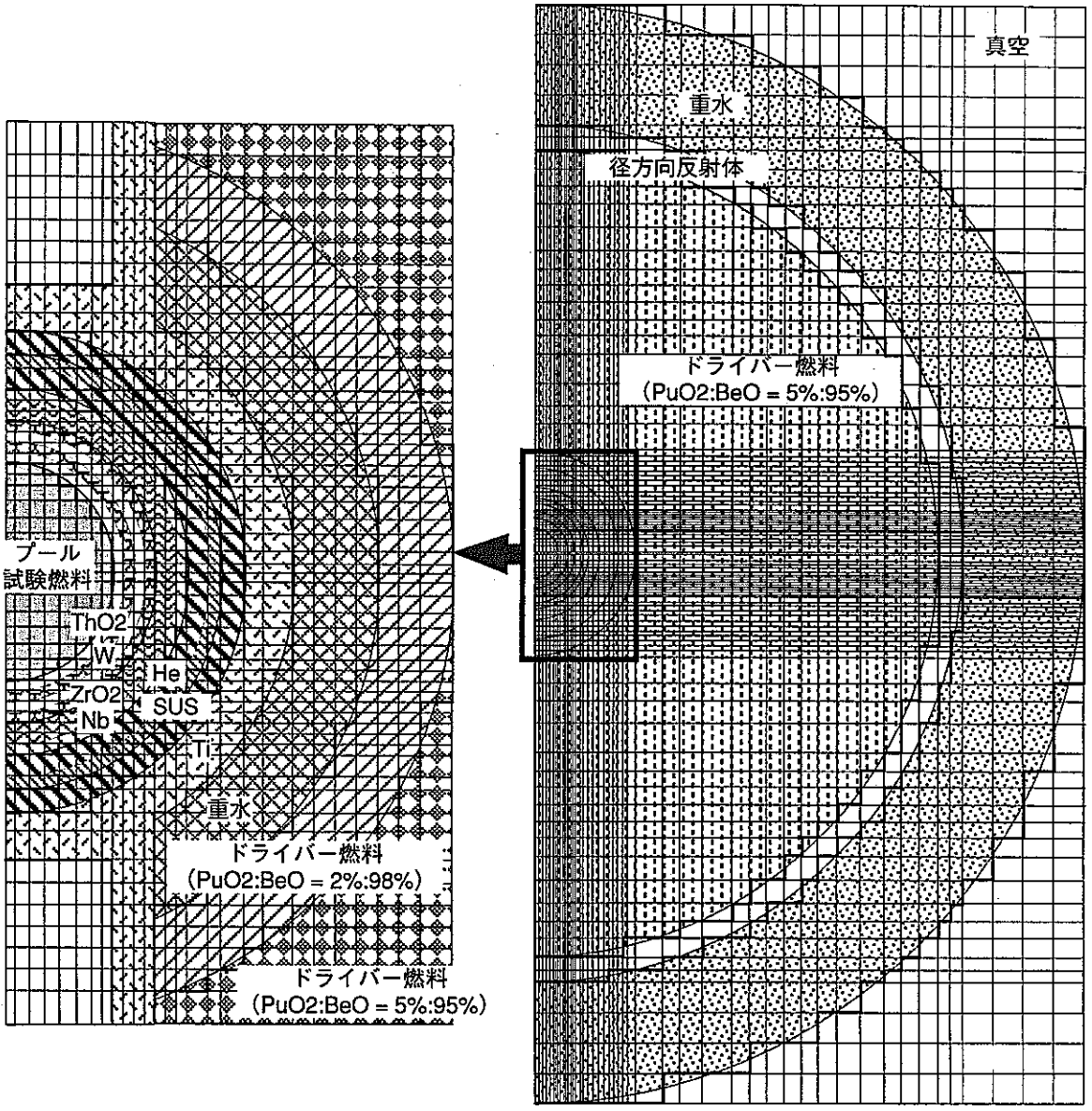
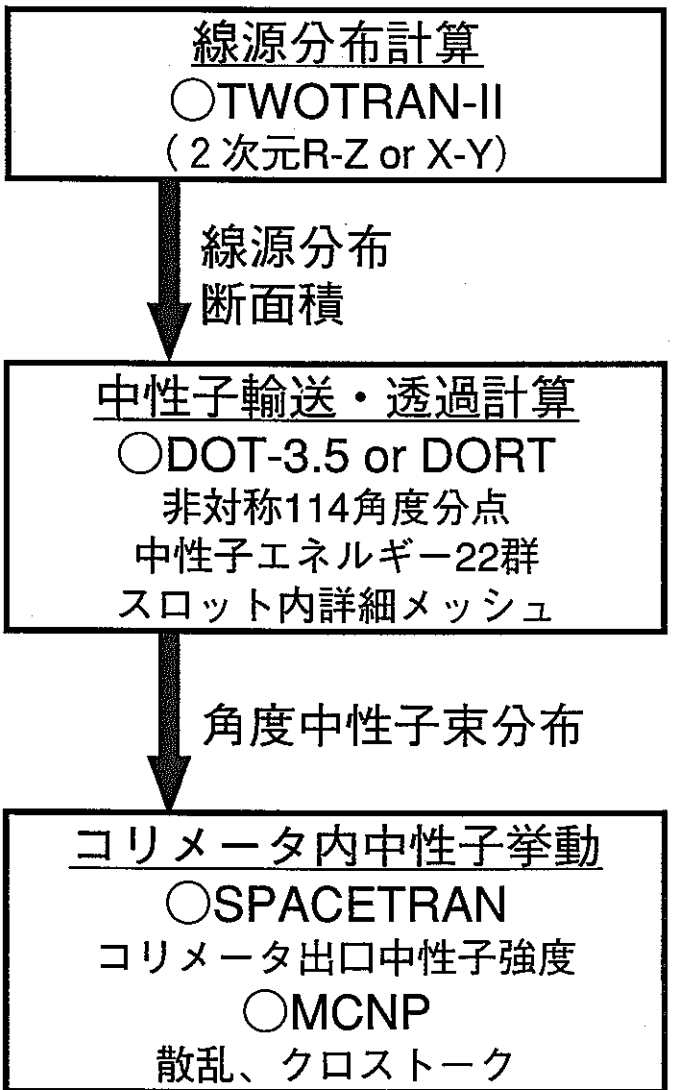


図 4-1 中性子輸送・透過計算の解析フロー及び解析体系

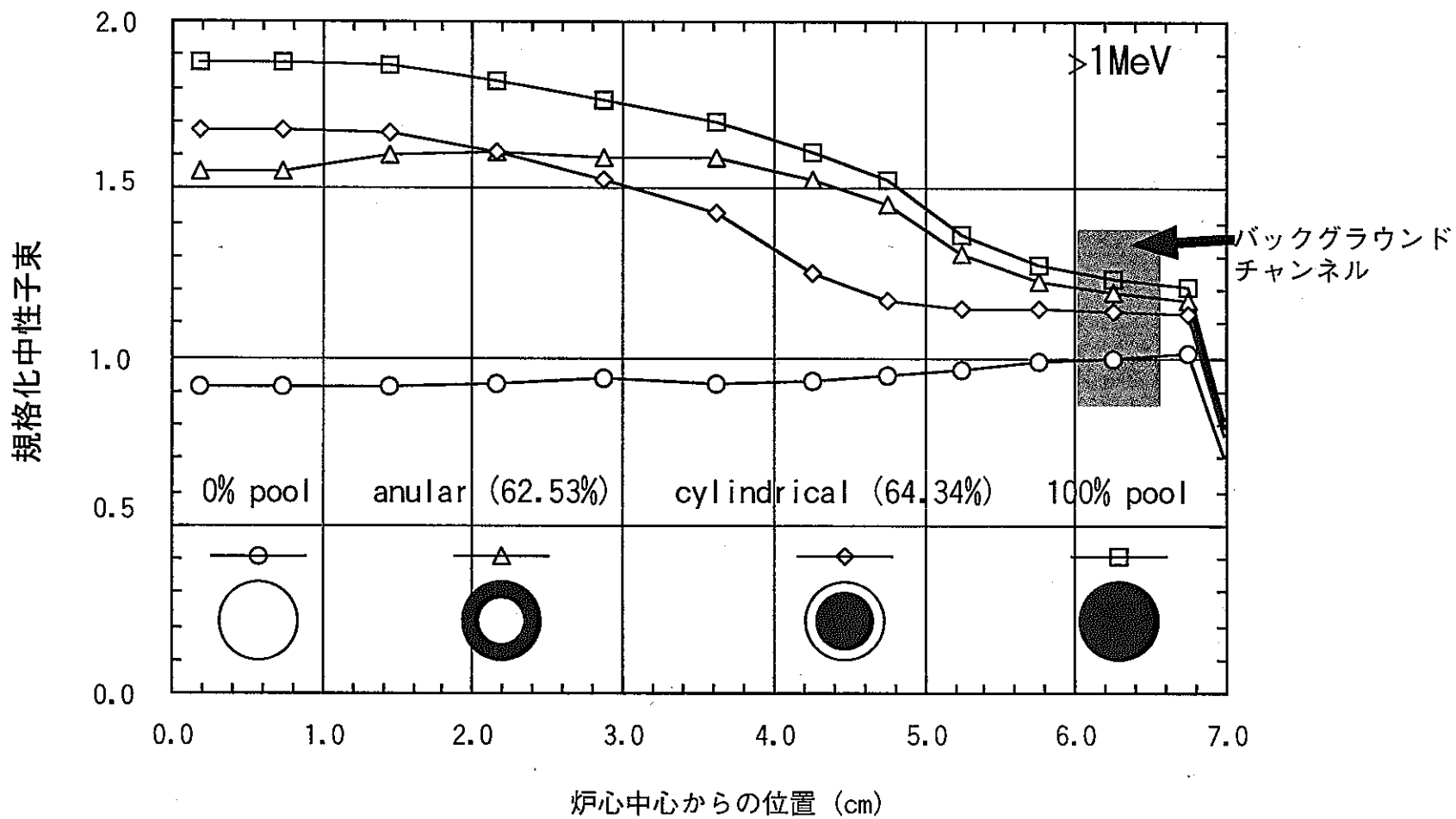


図4-2 プール試験体装荷体系でのロリメータ出口での中性子強度

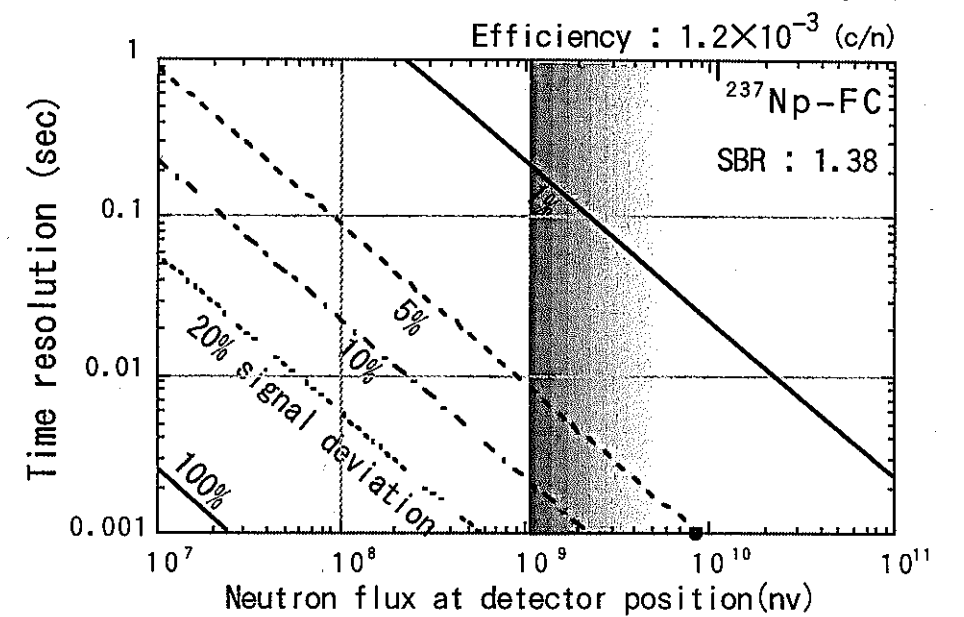
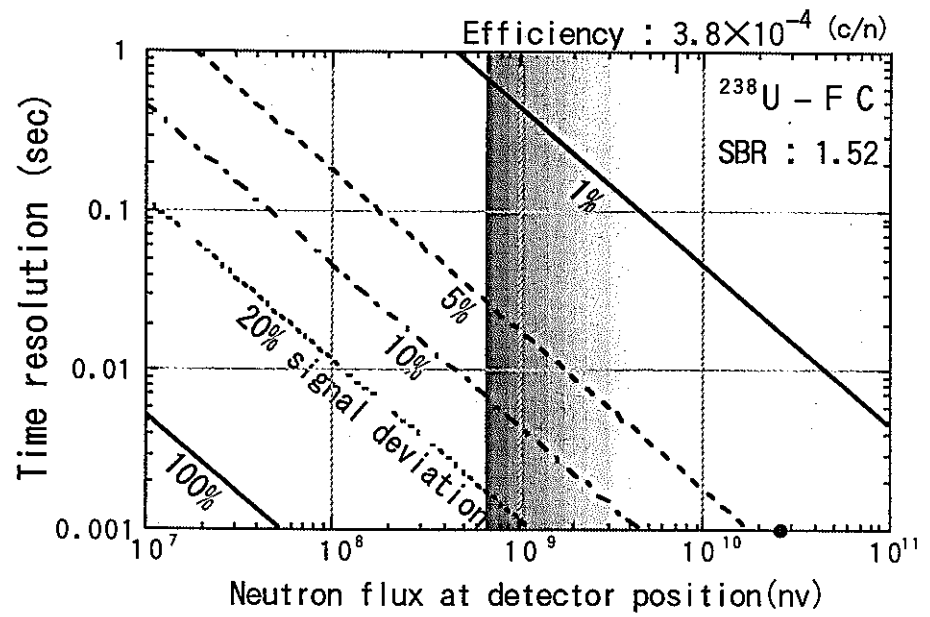
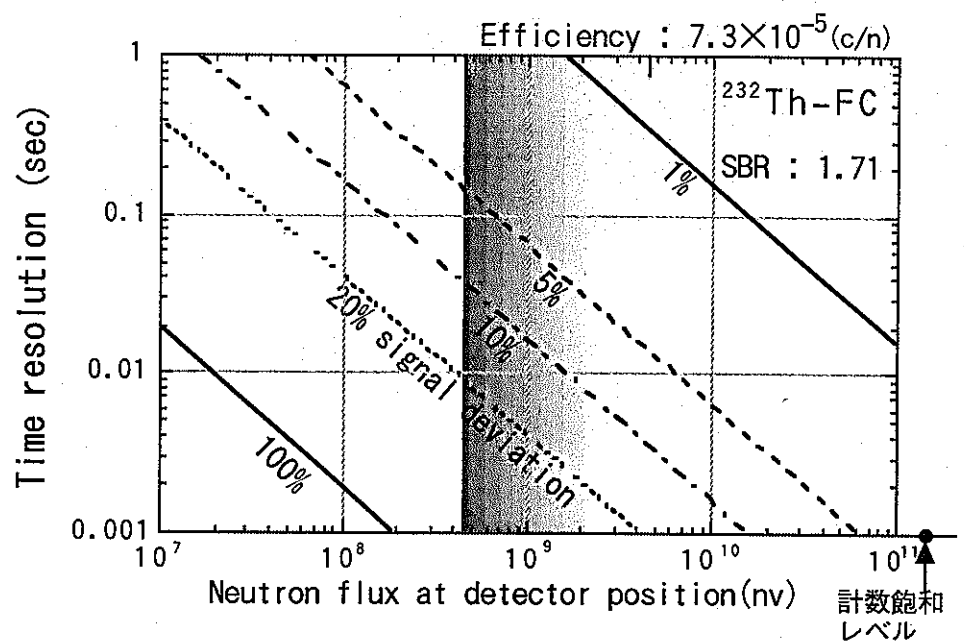
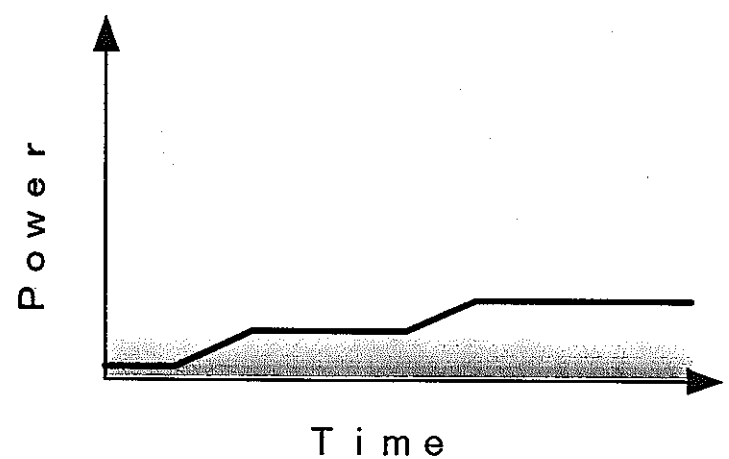


図 4-3 プール試験体装荷体系における時間分解能

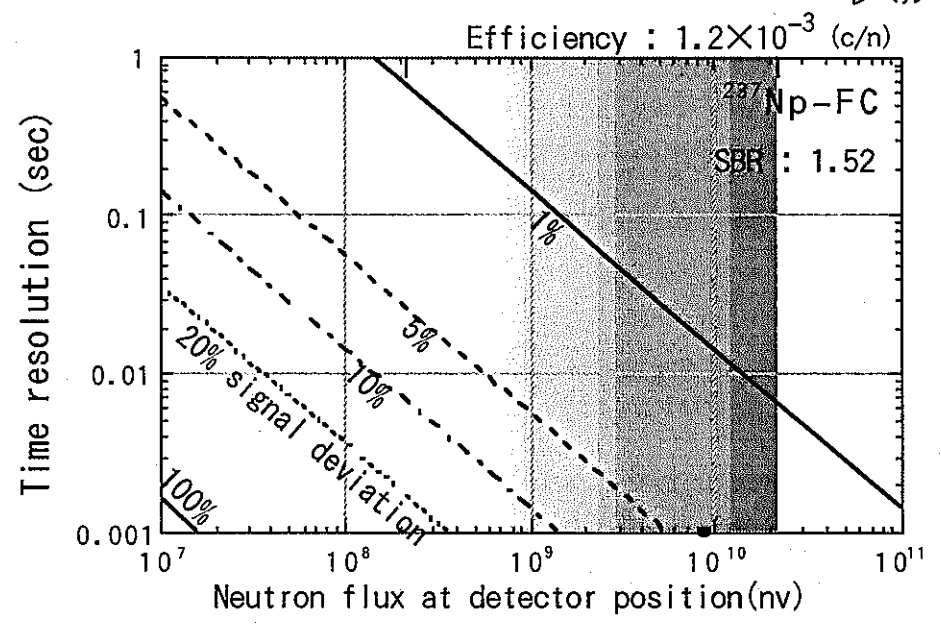
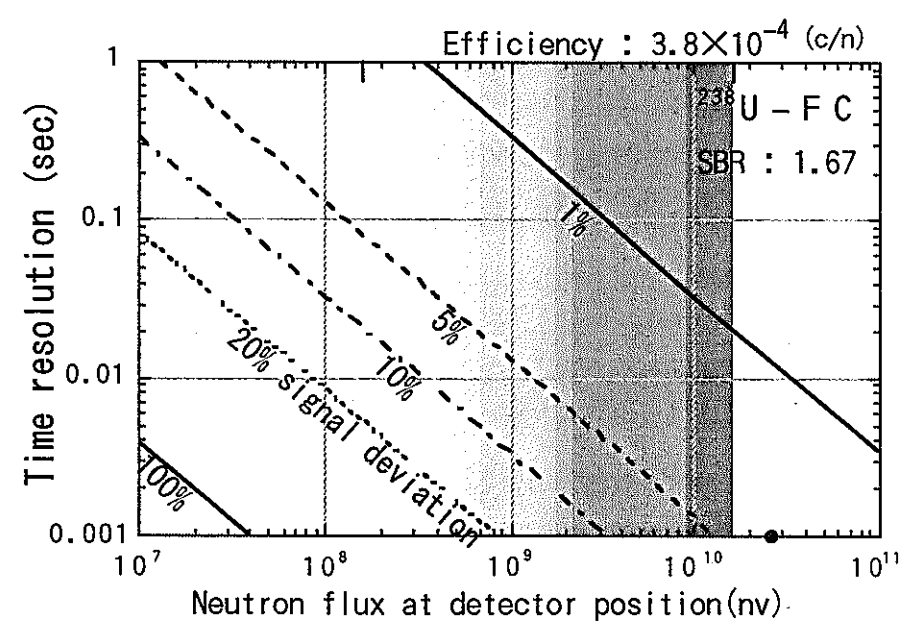
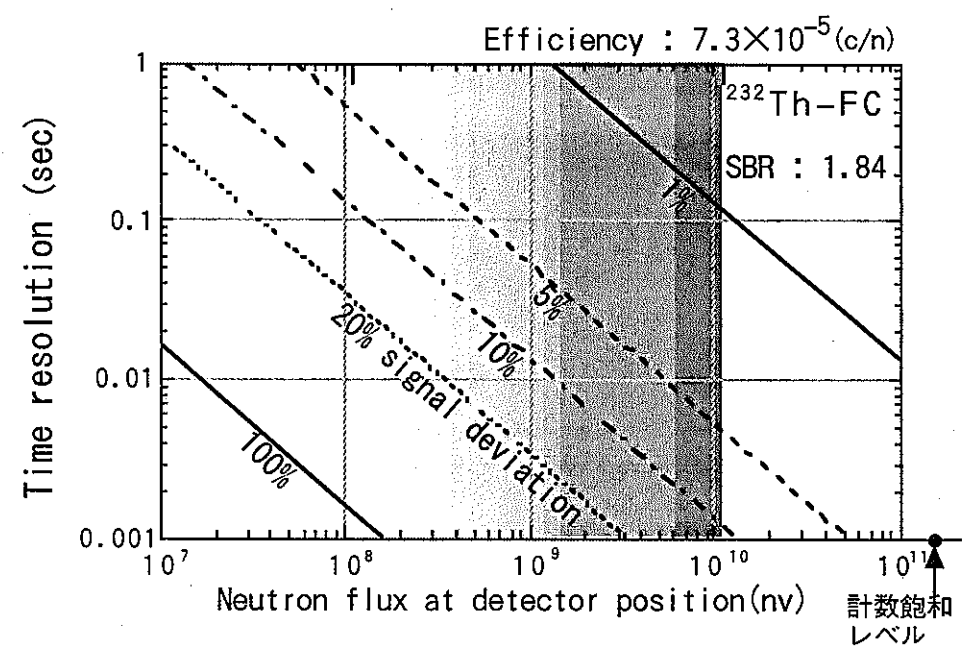
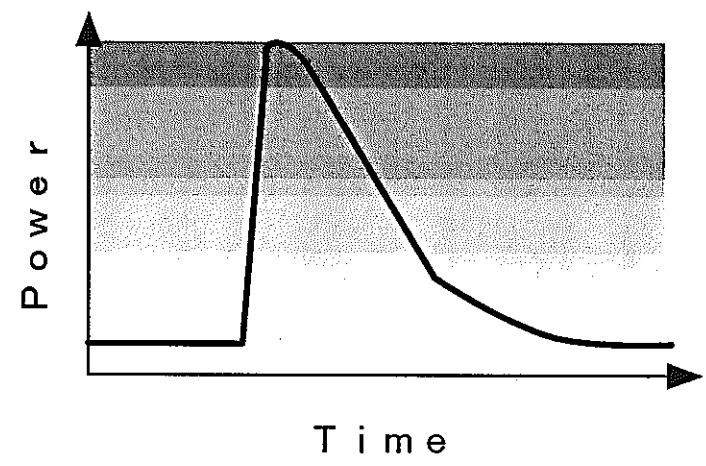


図 4-4 19本ピン束試験体装荷体系における時間分解能

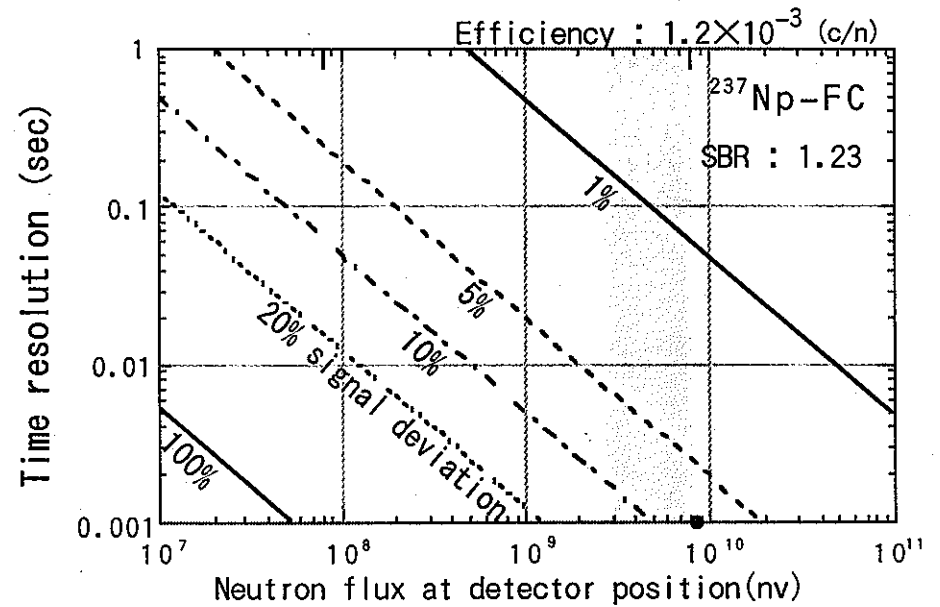
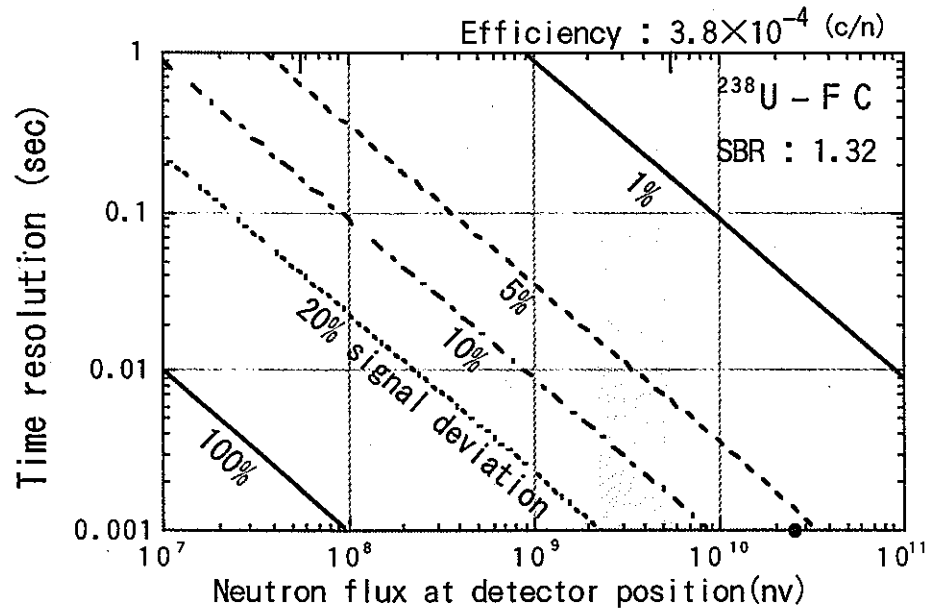
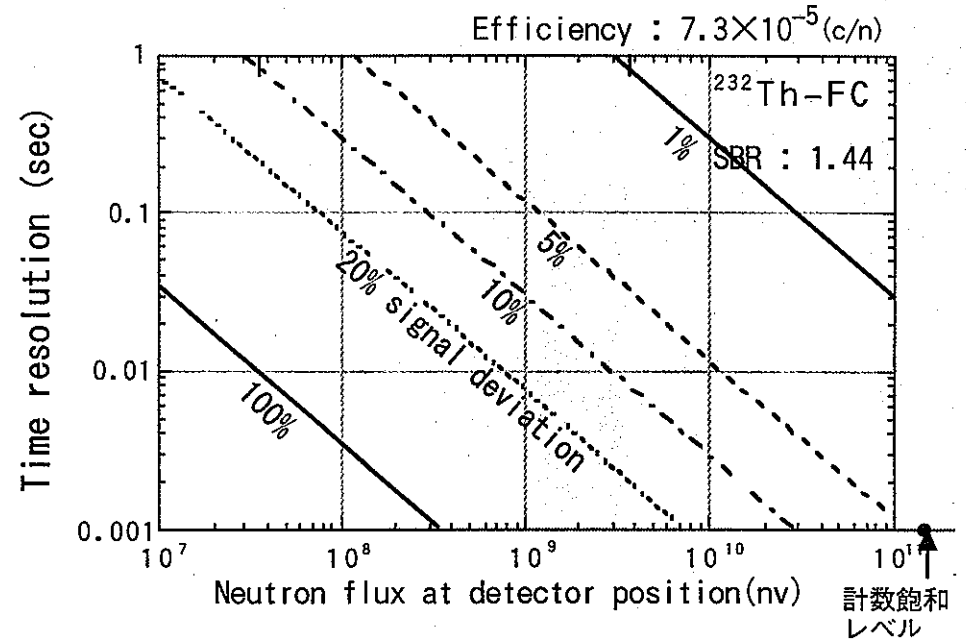
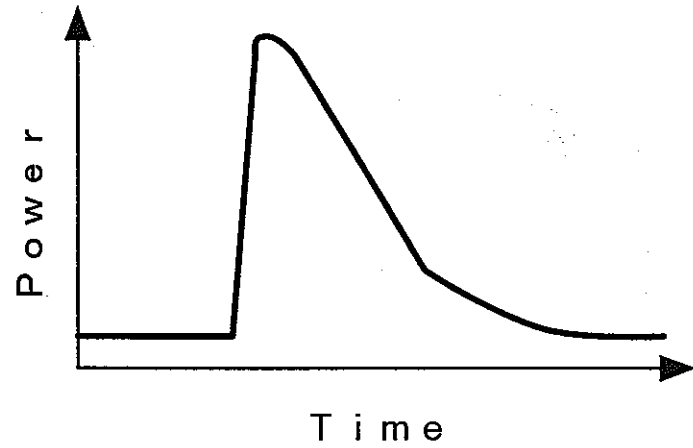


図 4-5 単ピン試験体装荷体系における時間分解能

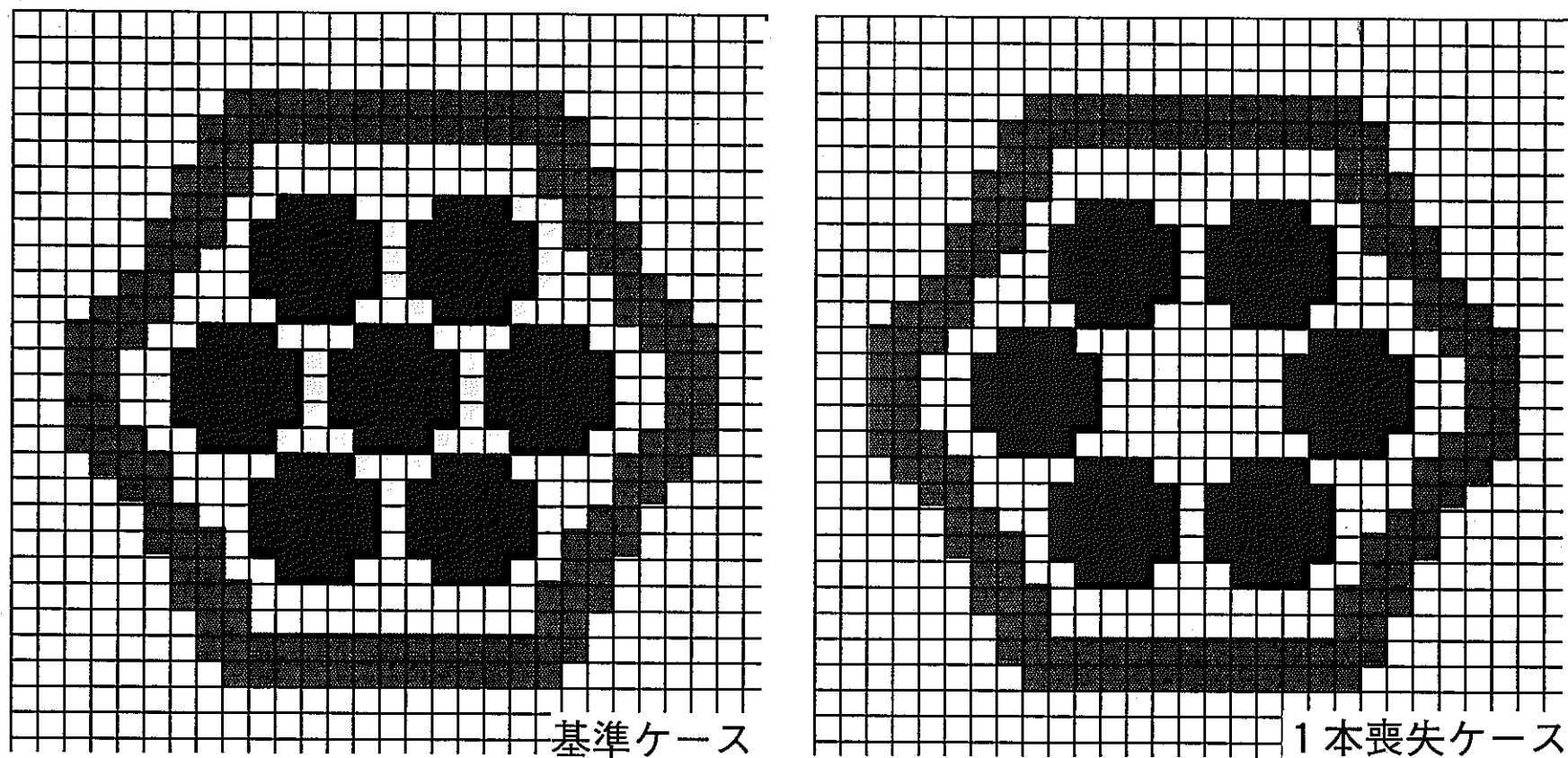
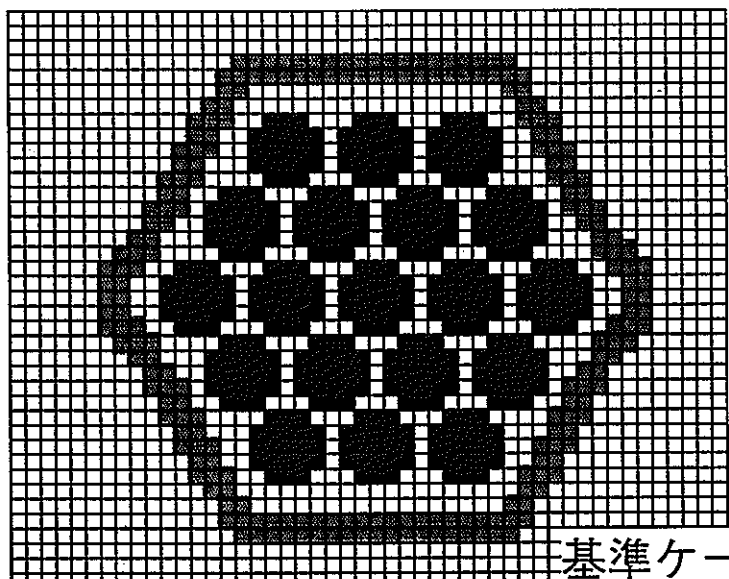
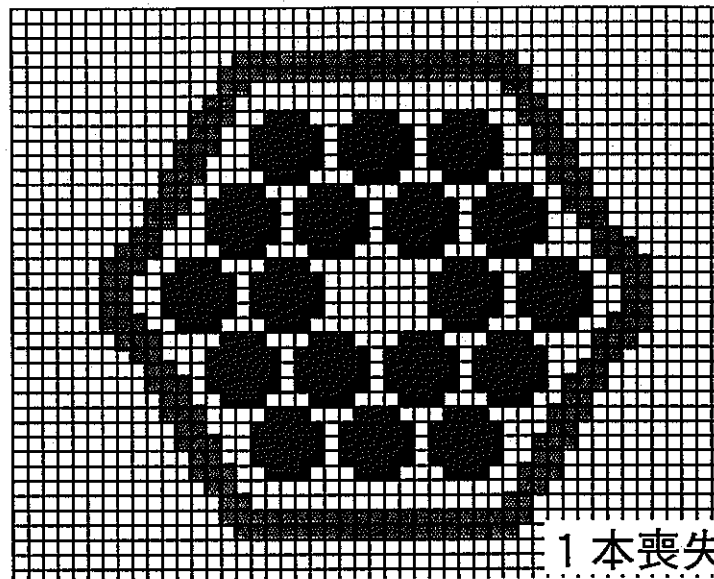


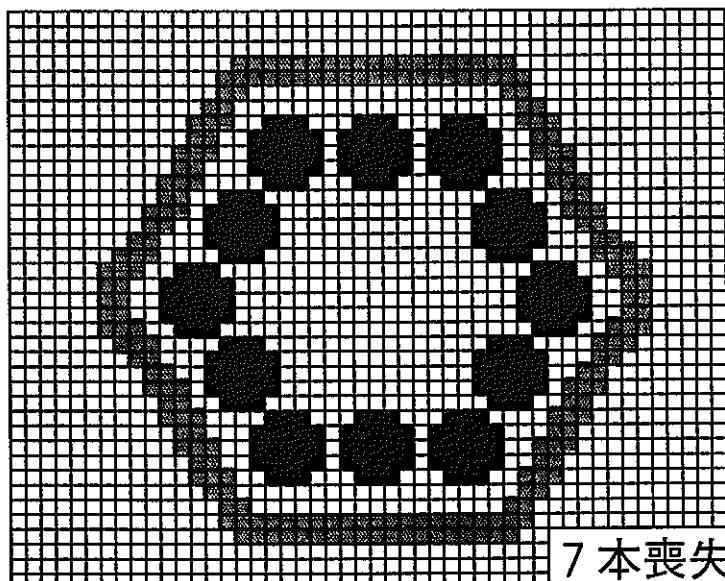
図4-6 中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (7本ピン束)



基準ケース

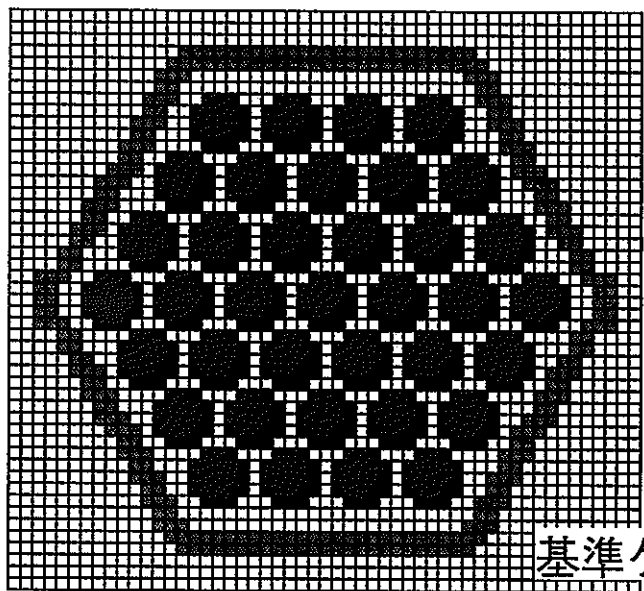


1本喪失ケース

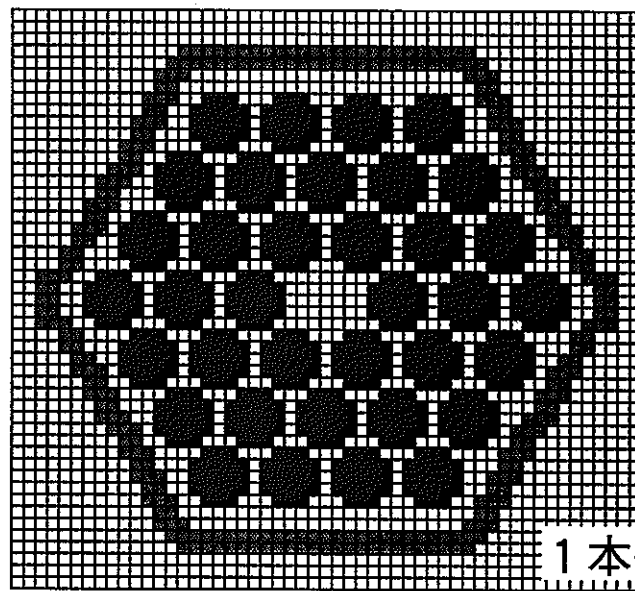


7本喪失ケース

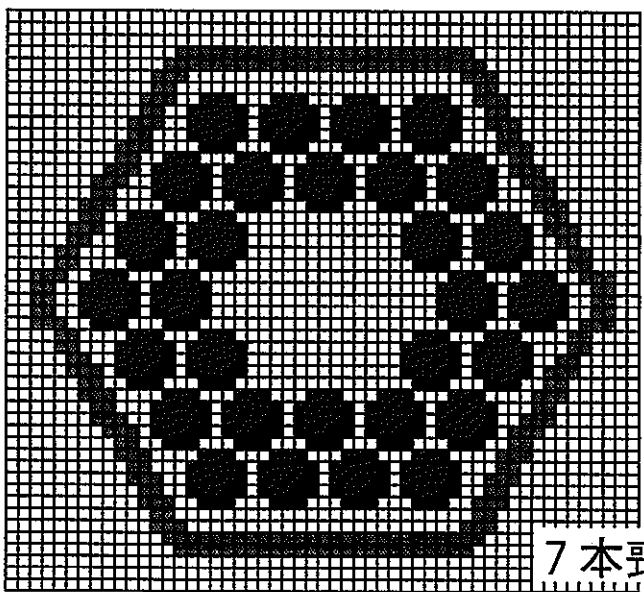
図4-7 中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (19本ピン束)



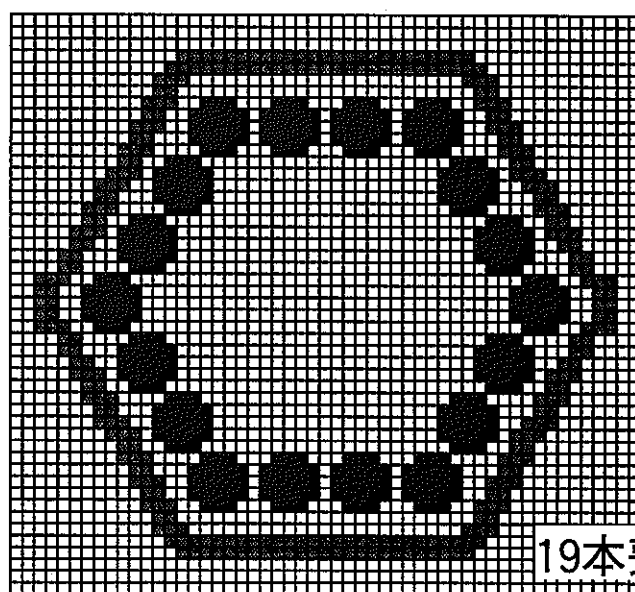
基準ケース



1本喪失ケース



7本喪失ケース



19本喪失ケース

図 4-8 中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (37本ピン束)

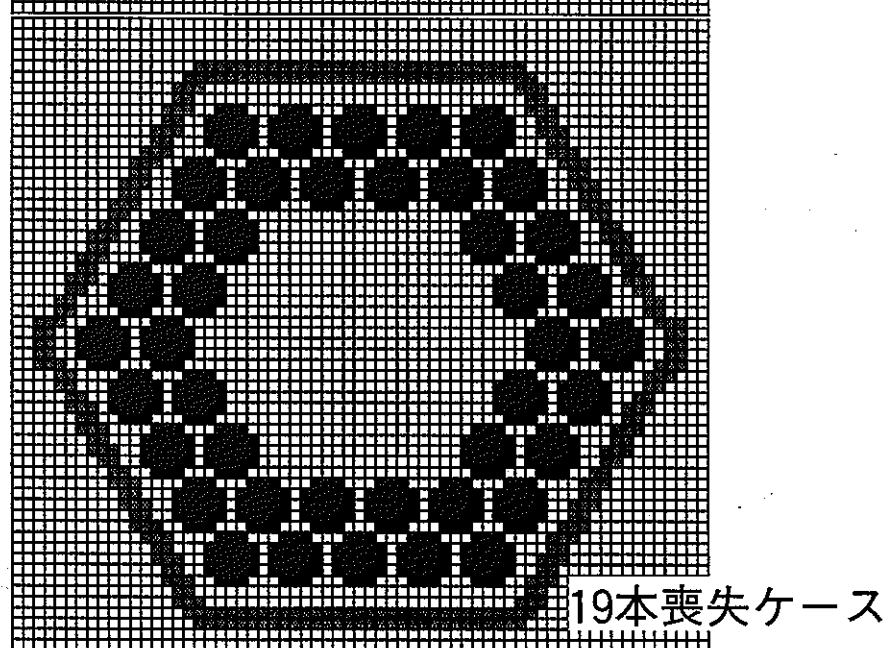
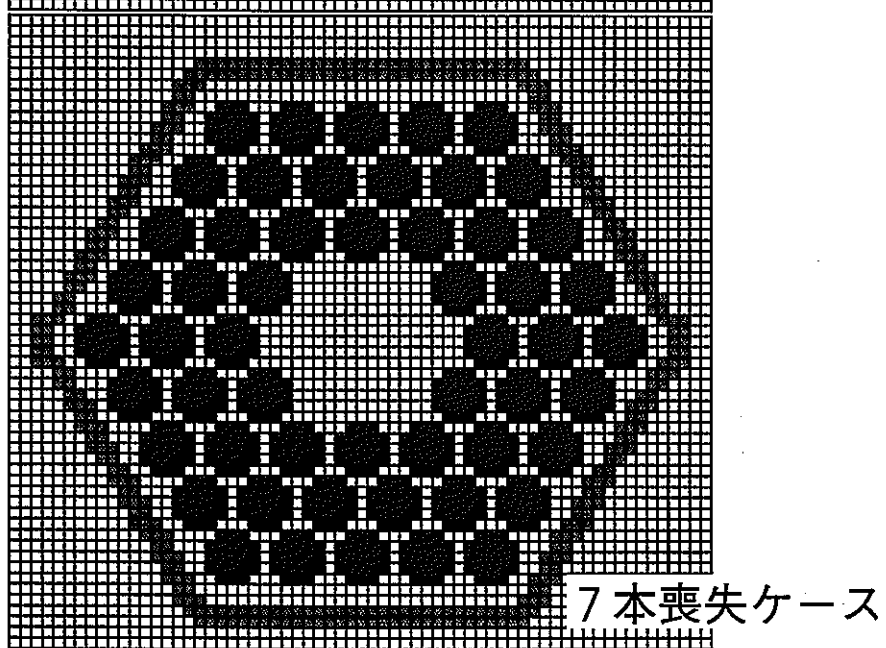
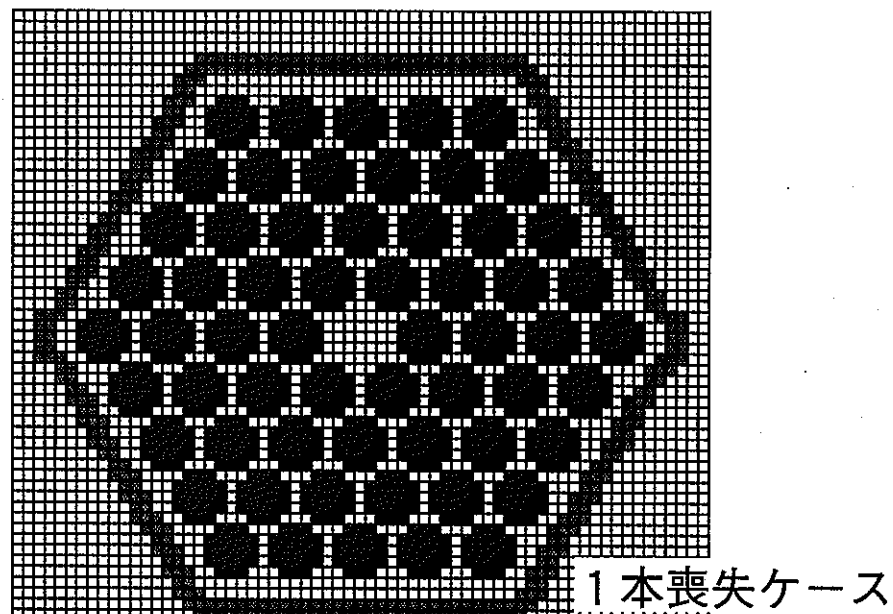
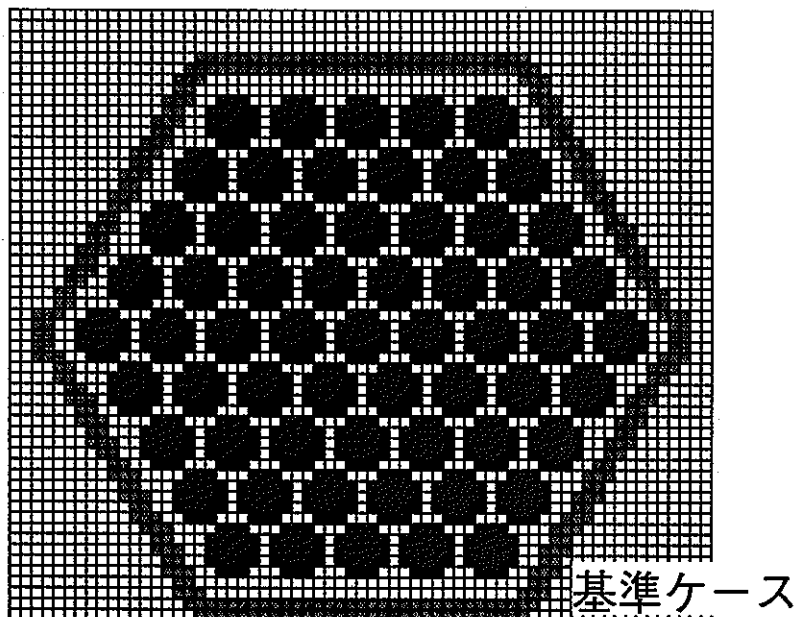


図4-9 中性子増倍計算における試験体内詳細メッシュ分割 (61本ピン束)

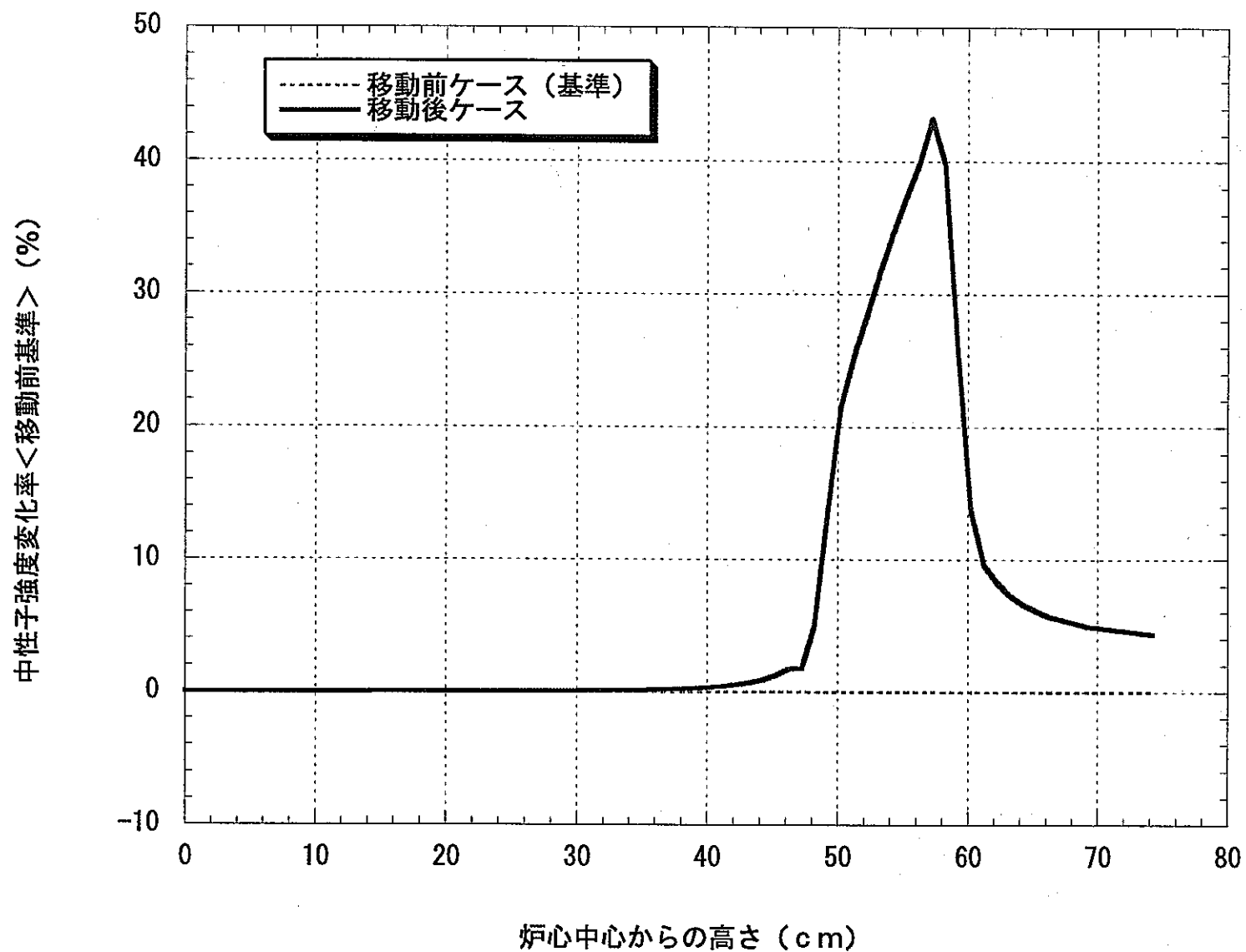


図4-1-1 移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布
(D₂O冷却炉心、E>1MeV、ブランケット部への燃料の侵入移動)

炉心上端

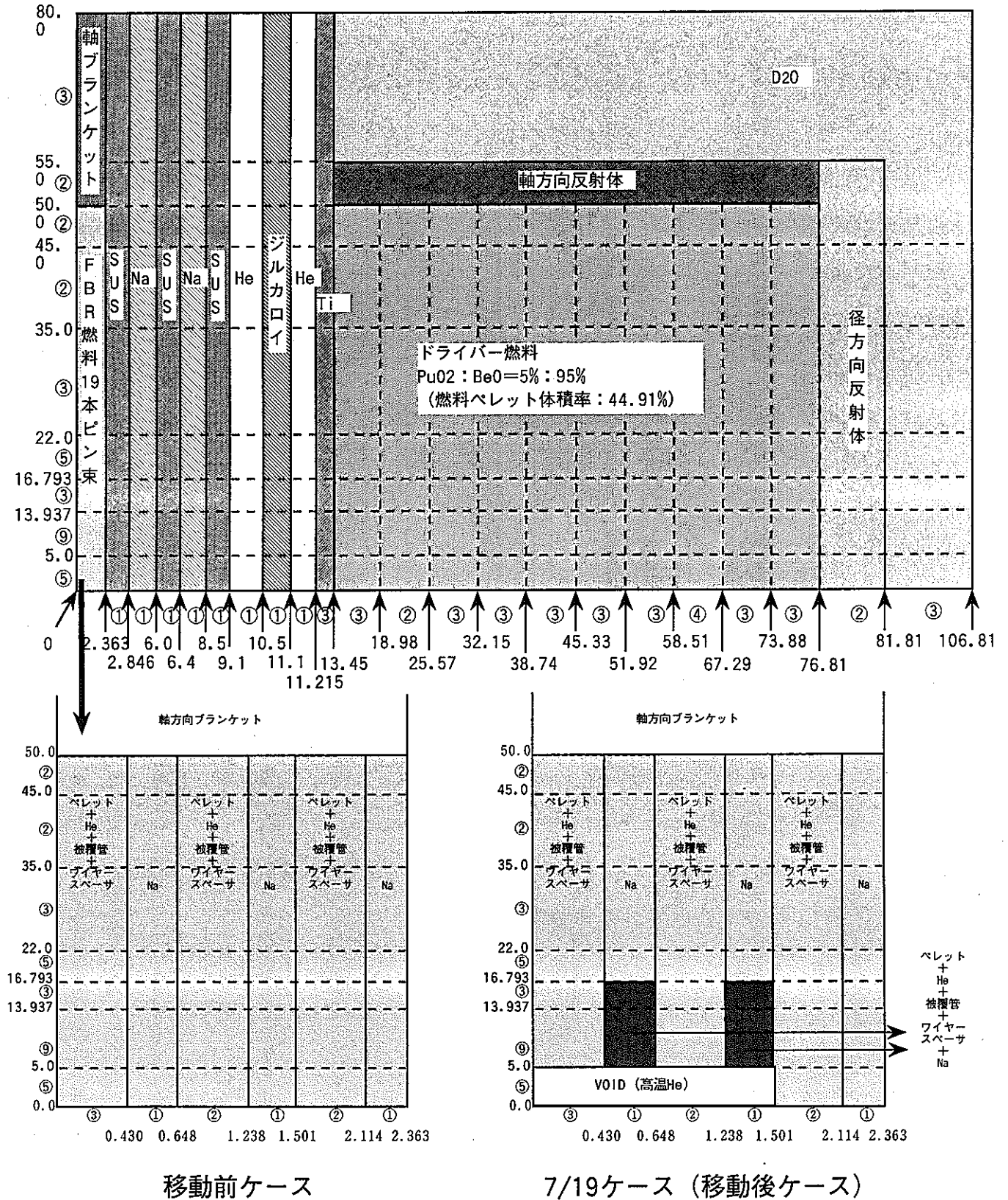


図 4-1 2 軸方向燃料移動の検知性評価 (D₂O冷却炉心)
二次元RZ臨界計算体系
(19本ピン束試験における中心7本の移動)

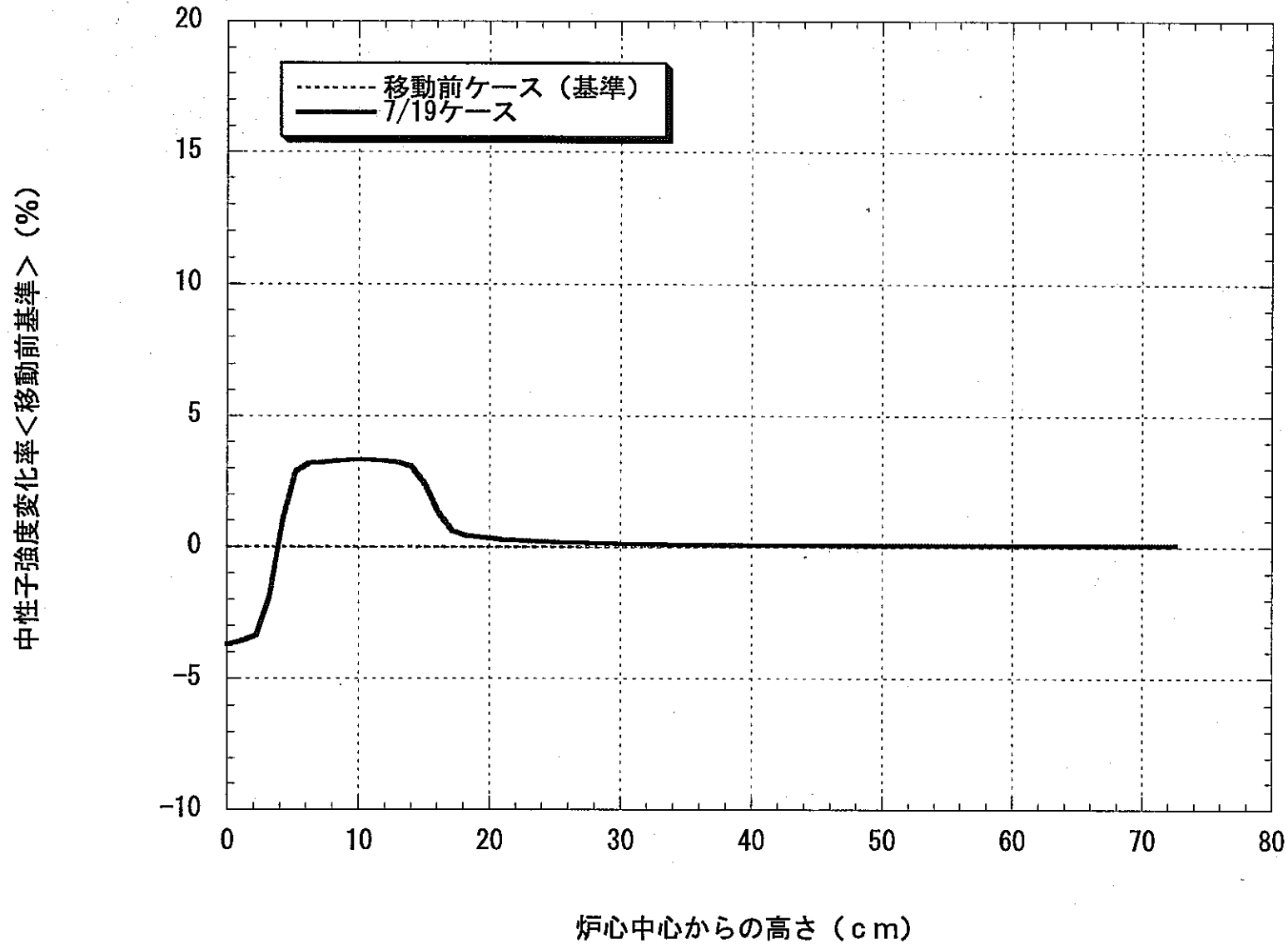


図4-13 移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布
(D20冷却炉心、 $E>1\text{MeV}$ 、19本ピン束の内部7本の移動)

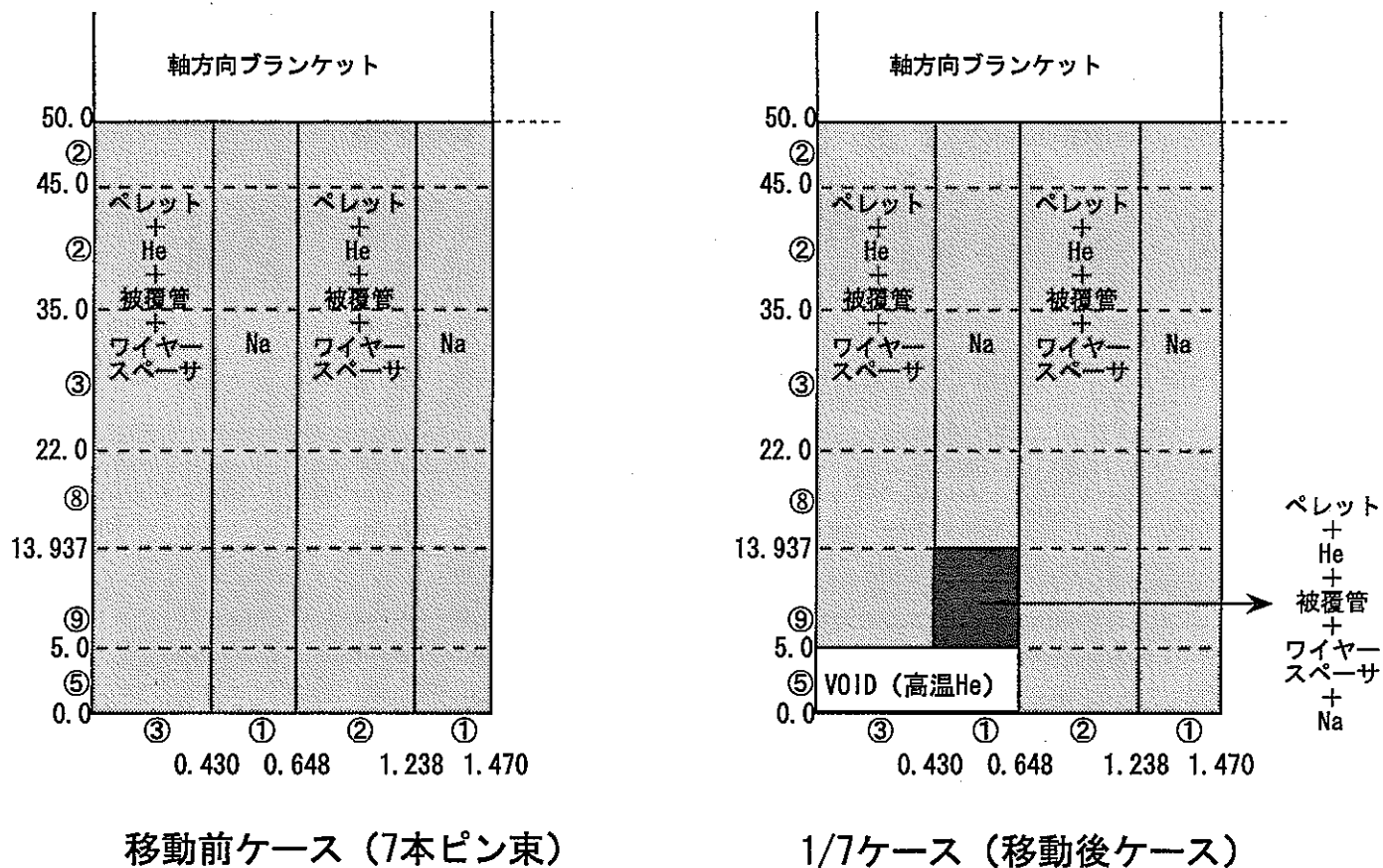
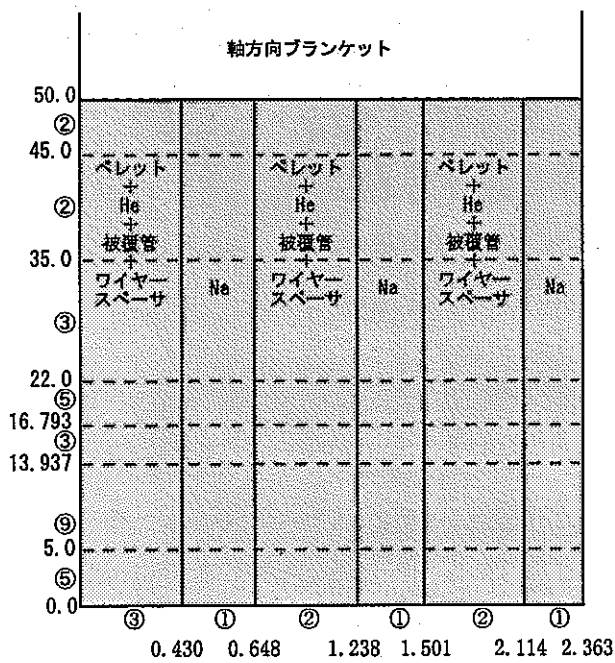
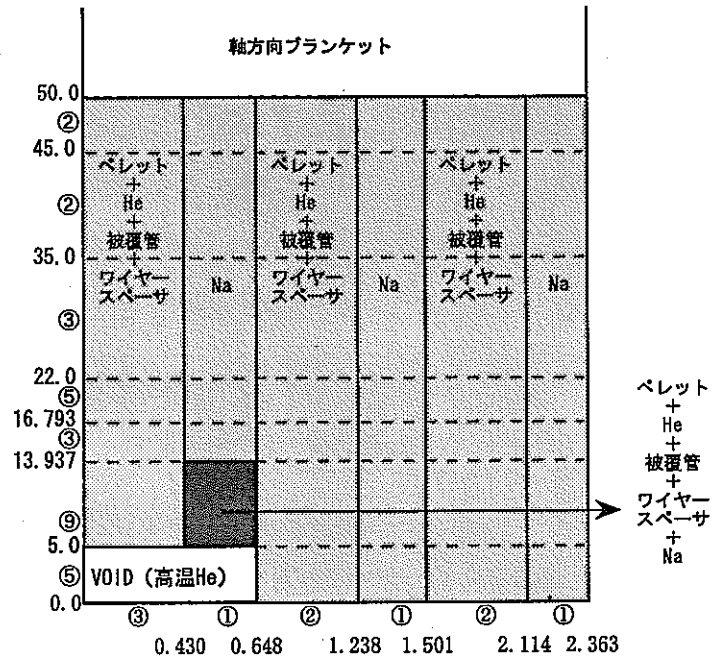


図4-14 軸方向燃料移動の検知性評価
(7本ピン束試験における中心1本の移動)



移動前ケース (19本ピン束)



1/19ケース (移動後ケース)

図4-15 軸方向燃料移動の検知性評価
(19本ピン束試験における中心1本の移動)

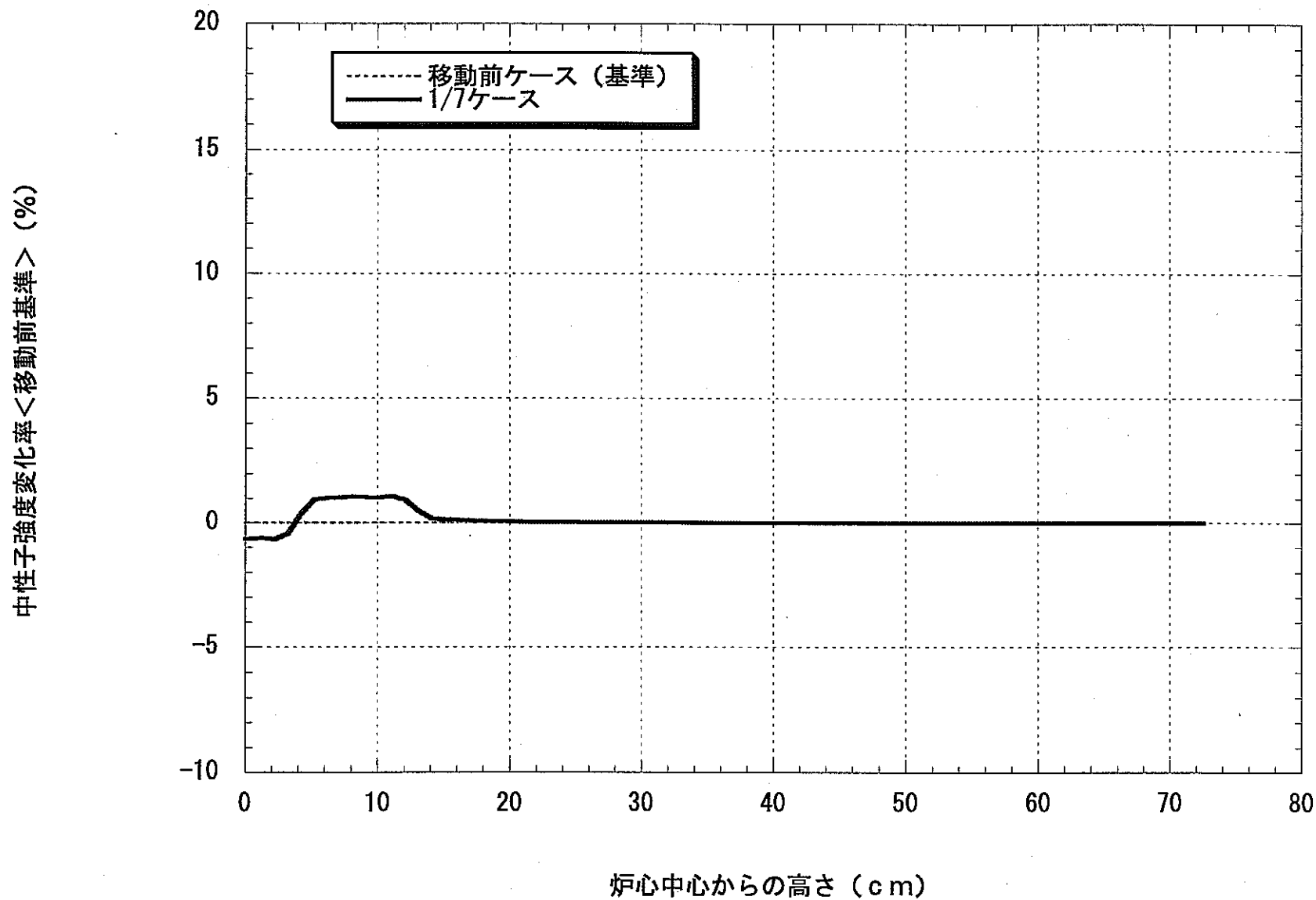


図4-16 移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D₂O冷却炉心、E>1MeV、7本ピン束の内部1本の移動)

中性子強度変化率<移動前基準> (%)

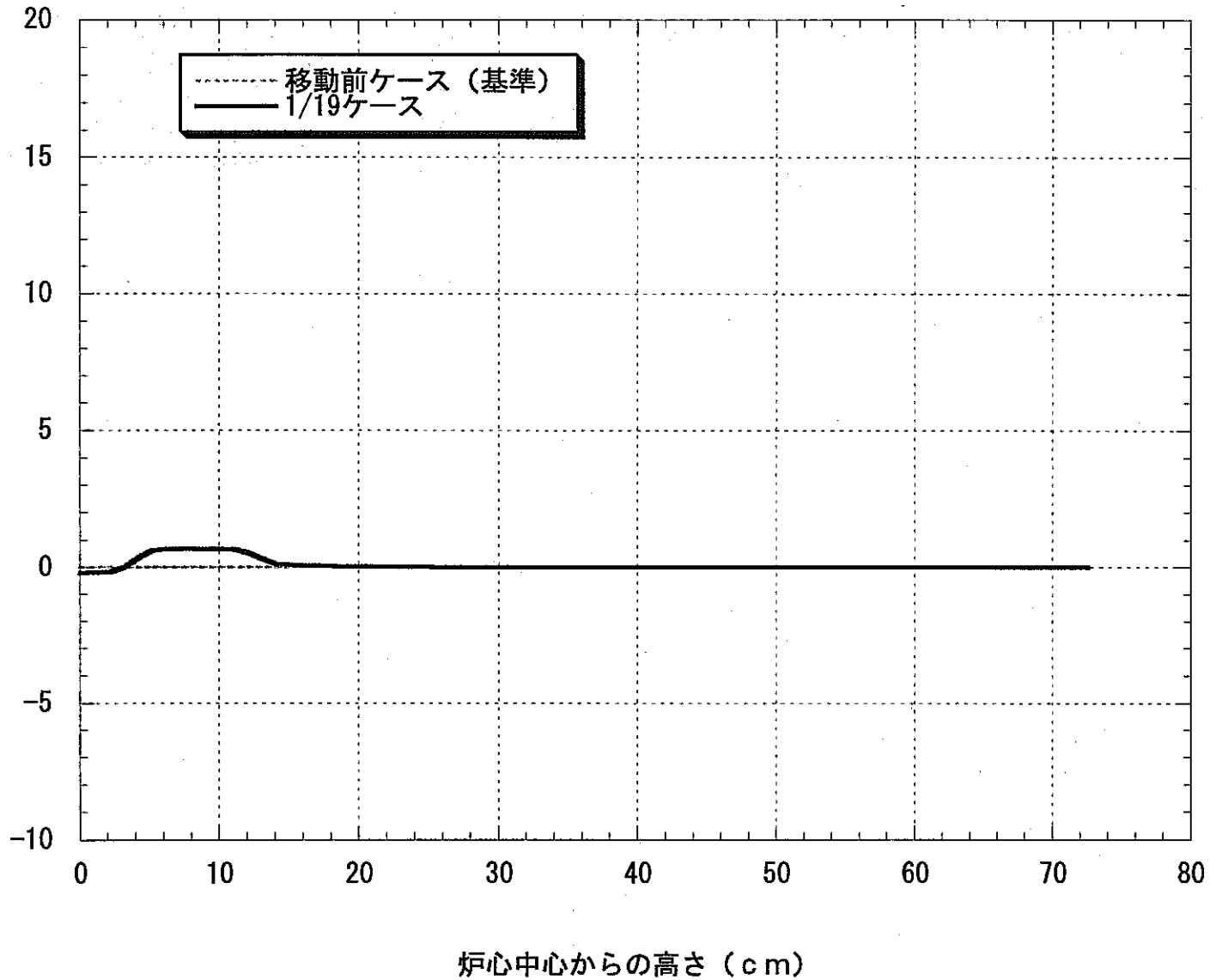
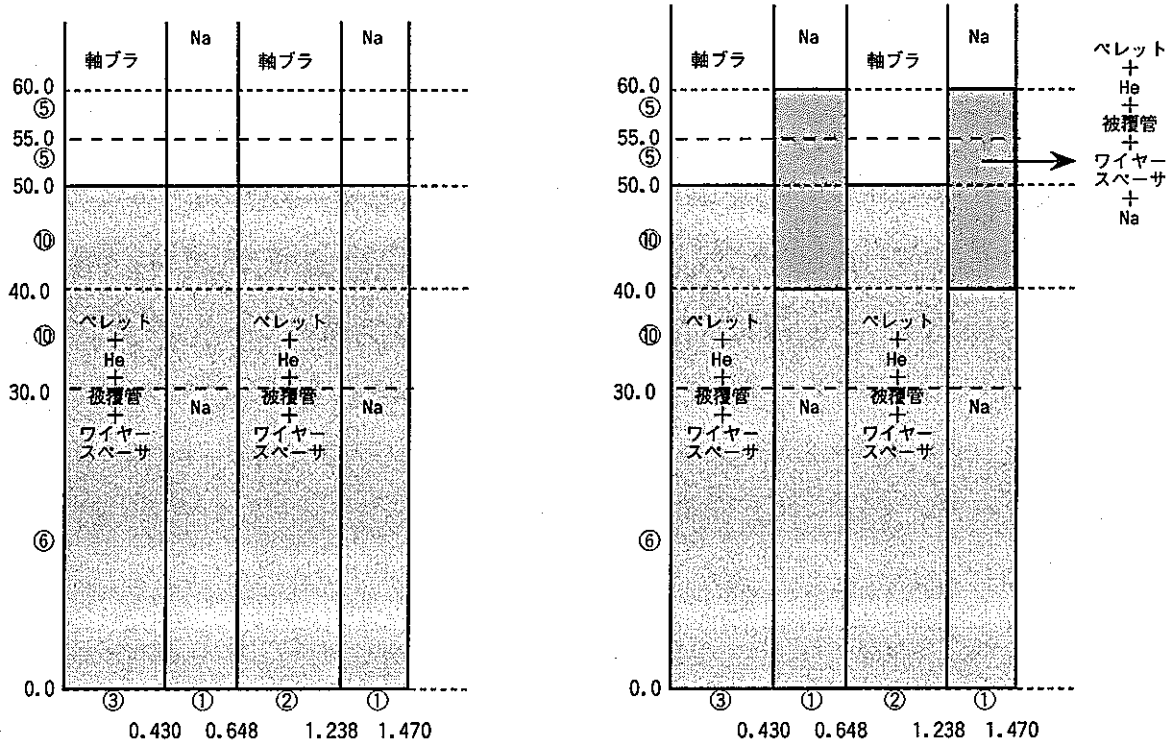


図 4-1 7 移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布 (D₂O冷却炉心、E>1MeV、19本ピン束の内部1本の移動)



移動前ケース (7本ピン束)

移動後ケース

図4-18 軸方向燃料移動の検知性評価
(制御棒案内管等からの融体流出)

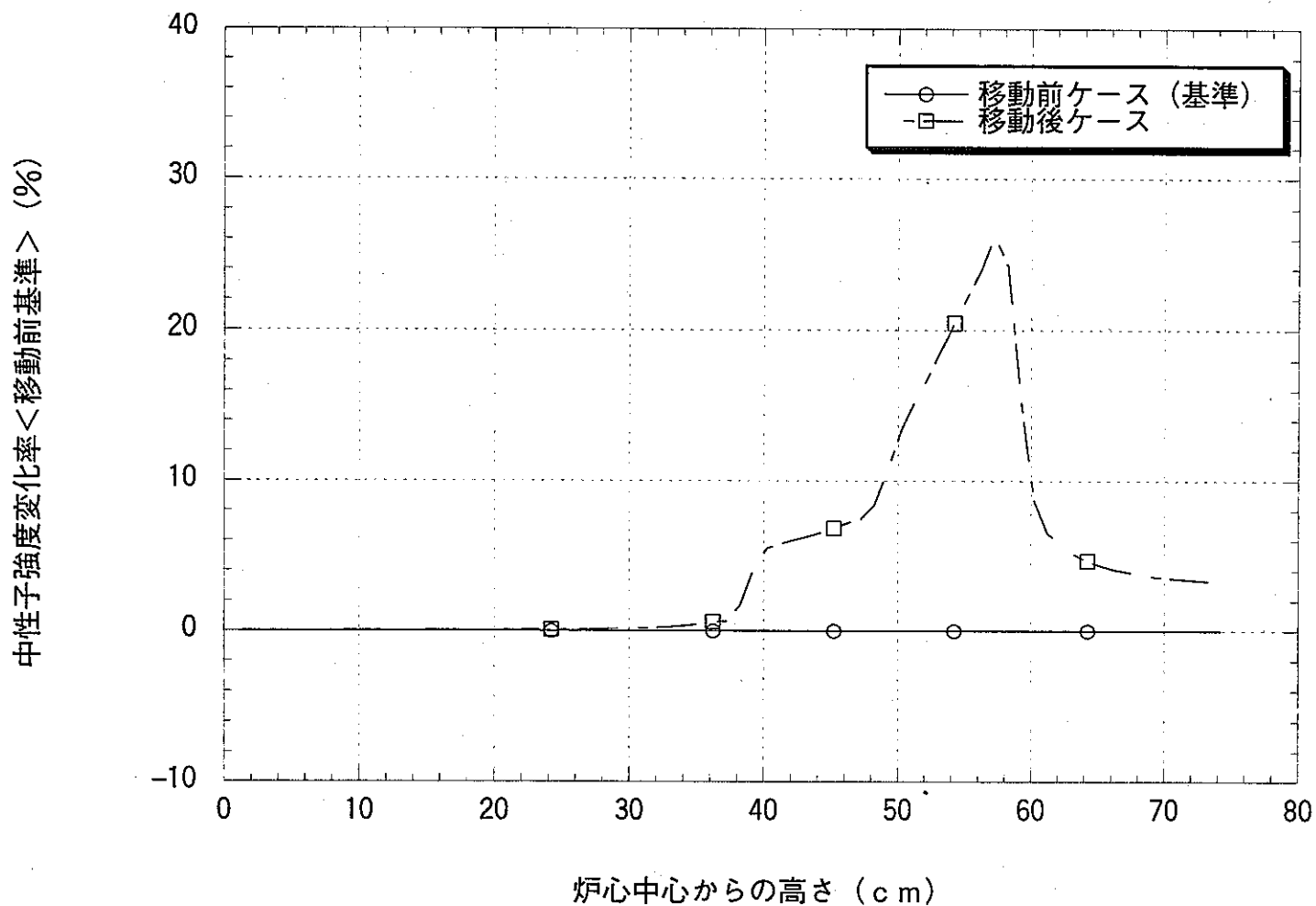


図 4-19 移動前ケースを基準とした時の中性子強度変化率の軸方向分布
(D_2O 冷却炉心、 $E>1MeV$ 、7本ピン束の移動)