

**F B R 安全性試験炉の
ドップラー係数の温度依存性評価**

1999年1月

核燃料サイクル開発機構

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ
ください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

核燃料サイクル開発機構 東海事業所

運営管理部 技術情報室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Information Section,

Administration Division,

Tokai Works,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1194.

Japan

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

1999

FBR 安全性試験炉のドップラー係数の温度依存性評価

宇都 成昭*

要 旨

核燃料サイクル開発機構では FBR の実用化に向けて必要となる各種炉内試験を実施するための、FBR 安全性試験炉 SERAPH (Safety Engineering Reactor for Accident PHenomenology) の設計研究を実施してきた。

SERAPH では、試験燃料を破損、溶融あるいは分散させるのに必要なエネルギーを試験体に投入することが求められており、そのためドライバー炉心は試験要求条件に応じた様々な反応度印加機能を有することが必要とされる。反応度印加を伴う過渡時にはドライバー炉心に苛酷な熱的負荷が加えられるが、その一連の過程において炉心の健全性を確保するにはドップラー反応度による負の反応度フィードバック機能が特に重要である。

ドップラー反応度の計算に通常用いられるドップラー係数は、高速炉では絶対温度の逆数に、軽水炉ではその $-1/2$ 乗にそれぞれ比例する単一项で表されることが知られている。ところが、SERAPH 炉心の燃料は U を含まず BeO により希釈されるという従来の原子炉とは異なる特徴を有するため、ドップラー係数の温度依存性も従来の原子炉とは異なる特性を示すと考えられる。

そこで本報では、燃料ペレット平均温度の範囲として室温から 2000K までを対象に、TWOTRAN-II コードによる炉心計算で得られた温度点毎の実効増倍率を基に SERAPH 炉心のドップラー係数の温度依存性を評価した。その結果、ドップラー係数は絶対温度の $-3/2$ 乗、逆数、 $-1/2$ 乗に比例する3項の線形結合で表すことができること、室温付近の低温域と 2000K 付近の高温域を除いては絶対温度の逆数に比例する単一项のみの表示が可能であることがわかった。これらの結果は、ドップラー係数の温度依存性の本質的な説明を与える J 関数の温度依存性を理論的に考察して予測した結果とよく一致した。

本成果は今後、ドップラー係数の予測精度や、試験遂行時のドライバー炉心の性能及び安全裕度の確認に有効に反映される。

* 技術展開部 情報システム室

Evaluation of Temperature Dependence of Doppler Coefficient in a new in-pile experimental reactor for FBR safety research

Nariaki Uto*

Abstract

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

SERAPH is intended for various in-pile experiments to inject sufficient energy up to test fuel melting and even vaporization in the test section, and this requires of the driver core to have a capability of inserting a variety of reactivities appropriate for individual experimental needs. Negative reactivity feedback, Doppler reactivity, is essential to maintain the driver core integrity under various transient operation modes with reactivity insertion where the core is exposed to severe thermal transients.

The Doppler coefficients, available for calculating the Doppler reactivity effect, are well-known to be proportional to T^{-1} for fast reactors and to $T^{-1/2}$ for light water reactors, respectively, where T denotes the absolute temperature. On the other hand, the Doppler coefficient in SERAPH is considered to have a particular temperature dependence different from conventional familiar characteristics, since the core consists of the unique driver fuel diluted by BeO and with no uranium isotopes.

This report evaluates the temperature dependence of the Doppler coefficient in the SERAPH core for the fuel temperature range from room temperature to 2000K, based on core calculations by a two-dimensional neutronic transport code TWOTRAN-II. The Doppler coefficient in SERAPH is found to be expressed by a linear combination of three temperature-dependent terms that are proportional to $T^{-3/2}$, T^{-1} and $T^{-1/2}$, respectively. Also shown is that the coefficient can be approximated only by the T^{-1} -proportional term for the fuel temperature range except for the vicinity of room temperature and above around 2000K. These features agree with the theoretical prediction based on the temperature dependence of the J function, and this represents the essential characteristics of the Doppler coefficient as a function of temperature.

The results of this work are expected to be effective in confirming the accuracy of predicting the Doppler coefficient, and the experimental capability and safety margin of the driver core.

* Information System Section, Technology Management Division, JNC

目 次

1. 序論	1
2. ドップラー係数の温度依存性に関する物理的背景	3
2.1 J関数の温度特性に基づくドップラー係数の一般的性質	3
2.2 SERAPH 炉心におけるドップラー係数の温度依存性の予測	10
3. SERAPH 炉心における解析	12
4. 解析結果及び考察	19
4.1 ドップラー反応度における温度関数の線形結合性	19
4.2 ドップラー反応度に対する各温度関数項の寄与	19
4.3 制御棒チャンネルの有無、 ^3He 圧力の違いがドップラー反応度に与える影響	22
5. 結論	25

謝辞

参考文献

表 リ ス ト

表 2.1 各領域を構成する核種の原子数密度 [$\times 10^{24}$ 個/cm³]

表 3.1 計算ケース

表 3.2 218 群及び 22 群のエネルギー群構造

表 4.1 計算結果 (制御棒を含まない体系)

表 4.2 計算結果 (制御棒を含む ³He10atm 炉心体系)

表 4.3 計算結果 (制御棒を含む ³He30atm 炉心体系)

図 リ ス ト

- 図 2.1 各核種の無限希釈断面積 (1/2)
- 図 2.2 各核種の無限希釈断面積 (2/2)
- 図 2.3 ドップラー反応度 (燃料温度: 600K→1500K) に対する感度係数
- 図 3.1 重水冷却 SERAPH 炉心の炉心構成水平断面図
- 図 3.2 ドップラー係数算出用重水冷却 SERAPH 炉心 2 次元 RZ 計算体系図
(Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心に共通)
- 図 3.3 各制御棒の存在を考慮したドップラー係数算出用 2 次元 RZ 計算体系図
- 図 3.4 ドライバー燃料集合体の水平断面図及びセル計算モデル
- 図 3.5 パルス印加用制御棒 (^3He 圧力型) の水平断面図及び均質セル計算モデル
- 図 3.6 安全棒・出力調整棒 (クラスタ型) の水平断面図及び均質セル計算モデル
- 図 3.7 計算フロー
- 図 3.8 218 群実効マクロ断面積の作成方法
- 図 3.9 制御棒以外の領域における 1 次元群縮約計算体系 (Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心に共通)
- 図 3.10 各種制御棒における 1 次元群縮約計算体系 (Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心に共通)
- 図 4.1 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含まない炉心体系)
- 図 4.2 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含む $^3\text{He}10\text{atm}$ 炉心体系)
- 図 4.3 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含む $^3\text{He}30\text{atm}$ 炉心体系)
- 図 4.4 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与
(制御棒を含まない炉心体系)

- 図 4.5 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与
(制御棒を含む $^3\text{He}10\text{atm}$ 炉心体系)
- 図 4.6 Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与
(制御棒を含む $^3\text{He}30\text{atm}$ 炉心体系)
- 図 4.7 制御棒の有無によるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(Gas-Pu 炉心：ドライバー炉心燃料温度 300K)
- 図 4.8 制御棒の有無によるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(LWR -Pu 炉心：ドライバー炉心燃料温度 300K)
- 図 4.9 Gas-Pu 炉心及び LWR -Pu 炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較 (制御棒を含まない炉心体系：ドライバー炉心燃料温度 300K)
- 図 4.10 Gas-Pu 炉心及び LWR -Pu 炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較 (制御棒を含む $^3\text{He}10\text{atm}$ 炉心体系：ドライバー炉心燃料温度 300K)
- 図 4.11 Gas-Pu 炉心及び LWR -Pu 炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較 (制御棒を含む $^3\text{He}30\text{atm}$ 炉心体系：ドライバー炉心燃料温度 300K)

1. 序論

核燃料サイクル開発機構では FBR の実用化に向けて必要となる各種炉内試験を実施するための、FBR 安全性試験炉 SERAPH (Safety Engineering Reactor for Accident PHenomenology) の設計研究を実施している。

SERAPH を用いた過渡試験では、中空円筒形のドライバー炉心に様々なパターンの反応度を印加することにより、試験燃料を破損、溶融あるいは分散させるのに必要なエネルギーを円筒形の中心に設置された試験体に投入する^{[1]~[6]}。このとき、ドライバー炉心には苛酷な熱的負荷が加わるため、一連の試験遂行過程における炉心健全性の確保に十分配慮した炉心設計が必須となる。この安全上の配慮においては、即時に負の反応度フィードバックとして機能するドップラー反応度が炉心の安全設計で求められる固有の負の安全特性を確保する上で特に重要である。

通常ドップラー反応度は、核熱動特性計算において、静的炉心核計算にて予め得られているドップラー係数と熱計算の中で得られる燃料温度変化を組み合わせで求められる。ドップラー係数は一般に炉心の中性子スペクトルに依存し、例えば高速炉では絶対温度の逆数に、軽水炉ではその-1/2 乗にそれぞれ比例する単一項で表されることが知られている^[7]。

ところで SERAPH 炉心は、U を含まずかつ BeO により希釈された燃料 (Pu-BeO) を用いることや、高い減速比を有する冷却材 D₂O 及び燃料希釈材 BeO の存在により中速スペクトルを形成するなど、従来の原子炉には類を見ない特徴を有している^[1]。したがって、ドップラー係数の温度依存性も従来の原子炉とは異なる特性を示すと考えられる。

そこで本報では、ドライバー燃料平均温度として、原子炉起動前からドライバー燃料に対する制限条件までを包絡する 300~2000K を対象に、SERAPH 炉心のドップラー係数の温度依存性について評価した。

2 章では、既存の文献を参考にドップラー係数の温度依存性に関する物理的背景についてレビューし、その結果を基に SERAPH 炉心のドップラー係数の温度依存性を予測する。3 章では、SERAPH 炉心を対象としたドップラー反応度の解析方法や条件について述べる。4 章では、3 章で得られた計算結果を基に、ドップラー係数がどのような温度依存項により表されるかについて、燃料中の Pu 同位体組成比の違いや中性子吸収材の存在の有無による比較も含めて考察する。5 章で本研究の成果をまとめる。

2. ドップラー係数の温度依存性に関する物理的背景

ここではドップラー係数の温度依存性について、ドップラー係数の本質的説明を与えるJ関数と呼ばれるものを用いた物理的背景をレビューし^{[7] [8]}、その結果を基にSERAPH炉心におけるドップラー係数の温度依存性を予測する。

2.1 J関数の温度特性に基づくドップラー係数の一般的性質

ドップラー係数の前に、共鳴吸収による中性子吸収量 I について考える。 I は次式で表される。

$$I = \frac{\sigma_p \Gamma_\gamma}{E_0} J(\xi, \beta) \quad (1)$$

ここで、

σ_p : 共鳴核種からみた時のバックグラウンド断面積で、以下の式で表す。

$$\sigma_p = \sum_{i=1} \frac{N_i \sigma_i}{N_1} \quad ; i \text{ は共鳴核種} \quad (1')$$

(N_i : 核種 i の原子数密度, σ_i : 核種 i の散乱断面積)

Γ_γ : 共鳴エネルギー準位の捕獲幅, E_0 : 共鳴エネルギー準位

である。また $J(\xi, \beta)$ はいわゆる J 関数と呼ばれるもので、次式で表される。

$$J(\xi, \beta) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{\psi(x, \xi)}{\psi(x, \xi) + \beta} \quad (2)$$

ここで、

$$\psi(x, \xi) = \frac{\xi}{\sqrt{4\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} dp \frac{1}{1+p^2} \exp\left\{-\frac{\xi^2(x-p)^2}{4}\right\} \quad (3)$$

であり、 ξ , x , p はそれぞれ

$$\xi = \frac{\Gamma}{\Delta} = \frac{\Gamma}{\sqrt{4\pi E k T / M}} \quad (4)$$

$$x = \frac{2}{\Gamma} (E - E_0) \quad (5)$$

$$p = \frac{2}{\Gamma} (E_r - E_0) \quad (6)$$

Γ : 共鳴エネルギー準位の全幅,

E : 実験室系での中性子の運動エネルギー,

E_r : 中性子と原子核の相対運動エネルギー,

m : 中性子の質量,

T : 熱運動をしている原子核の絶対温度,

M : 原子核の質量,

k : ボルツマン定数

である。すなわち、 $\psi(x, \xi)$ は共鳴ピークの形状を示すものである。なお、 Δ は通常、共鳴のドップラー幅と呼ばれているものである。

また、式 (2) の右辺の β は、

$$\beta = \frac{\sigma_p}{\sigma_0} \quad (7)$$

σ_0 : 共鳴ピーク位置での共鳴核種のミクロ断面積

で共鳴核種からみたバックグランド断面積と共鳴ピーク断面積の比である。

ところで、ドップラー係数とは燃料の単位温度変化当たりの反応度変化であるから、本質的には式 (1) の温度 T に関する微分で表される。 σ_p , Γ , E_0 が温度に依らず一定であることを考えると、結局ドップラー係数は J 関数の温度

微分、すなわち dJ/dT に比例することになる。したがって、各体系に応じて dJ/dT の温度依存性を調べればよい。

参考文献 [7] , [8] では、式 (2) で表される J 関数の特性から β/ψ の大きさに着目し、その大きさの違いによる J 関数がどのような温度依存性を示すかについて考察している。その内容を以下に記す。

(i) $\beta/\psi \rightarrow \infty$ のとき

$\psi(x, \xi)$ は最大値 1 の関数である。したがって、この条件は β が無限大、すなわち共鳴ピークを持つ吸収材が無限希釈された状態に相当する。

このとき、 $J(\xi, \beta)$ の右辺分母の $\psi(x, \xi)$ は無視できて、

$$J(\xi, \beta) = \frac{1}{2\beta} \int_{-\infty}^{\infty} dx \psi(x, \xi) = \frac{\pi}{2\beta} \quad (8)$$

となり、温度に依らず一定となる。すなわち、温度上昇に伴いドップラー拡がりが生じてても、中性子吸収量 I は変わらない。よってその温度微分に比例するドップラー係数は温度に依らず常に 0 となる。

(ii) $\beta/\psi \gg 1$ のとき

この条件は共鳴ピークを持つ吸収材に比べて、減速材の割合が極めて多い場合、すなわち燃料が大幅に希釈された場合に相当する。

このときの $J(\xi, \beta)$ について、参考文献 [7] では参考文献 [9] , [10] を参照し説明を行っている。この説明は SERAPH 炉心のドップラー係数の温度依存性を明らかにする上で重要であると考えられるため、その内容を以下に記す。

Reichel は J 関数の特性を調べ、 $\beta/\psi_0 \gg 1$ (ψ_0 は式 (3) における関数 ψ の最大値で、 $x=0$ 、すなわち $E=E_0$ のときの値) の条件下で、式 (2) の右

辺の被積分関数 ψ を多項式展開した結果、 J は $T^{-1/2}$ に比例することを明らかにした^{[9] [10]}。その結果、 J の温度微分、すなわちドップラー係数に比例する dJ/dT は $T^{-3/2}$ に比例して変化する。

ところで、 β が大きいという条件は次のうちのいずれか、あるいはその両方が成立することを意味する。

- ・ 共鳴エネルギー準位 E_0 が高い（このとき、共鳴ピーク断面積 σ_0 は小さい）
- ・ 吸収材（共鳴核種）1個当たりの散乱断面積、すなわちバックグランド断面積 σ_p が大きい

また、関数 ψ は温度0で最大値1をとり、高温になるにつれ急激に減少するという特徴をもつ。したがって、このような ψ の特徴もまた $\beta/\psi \gg 1$ の条件につながる。

核分裂性核種に対しては、通常は比較的低濃度で存在し、したがって核分裂性核種からみたバックグランド断面積 σ_p は比較的大きいため（200～400 barn）、 β が大きいという仮定は1 keV付近以上のエネルギー領域においては通常妥当である。このことから、核分裂性核種の温度依存性は $T^{-3/2}$ 則にしたがって全体のドップラー係数に寄与することとなる。

(iii) β/ψ が1よりも極端に大きくないとき

上記(ii)の場合よりも β/ψ が小さい場合、すなわち自己遮蔽効果がより大きい場合においても、(ii)と同様に J 関数を展開することが可能である。 β/ψ が順次小さくなるにつれ、 J 関数の温度依存性は $T^{-1/2}$ 則と $\ln T$ 則の間（ドップラー係数の温度依存性は $T^{-3/2}$ 比例と T^{-1} 比例の間）、 $T^{-1/2}$ 則（ドップラー係数の温度依存性は $T^{-1/2}$ 比例）、 T^{-1} 則（ドップラー係数の温

度依存性はなし) というように順次変化するという結果が得られる。ただし、最後の T^{-1} 則は自己遮蔽効果が極端に大きい条件に相当し、バックグラウンド断面積が 5 barn 以下となる数 eV 以下のエネルギー領域での共鳴に対してのみ問題となる (SERAPH の場合、数 eV 以下のエネルギー領域に相当する 1 eV のところに ^{240}Pu の巨大共鳴吸収ピーク ($\sim 10^5$ barn) が存在するが、 ^{240}Pu は燃料中で大幅に希釈されているため、ここでいう“極端に大きい自己遮蔽効果”にはならない)。

この場合については、参考文献 [8] において $\beta/\psi < 1$ 、 $\beta/\psi \ll 1$ の 2 ケースについて以下のように詳しい説明がなされている。

(iii-1) $\beta/\psi < 1$ のとき

この場合は共鳴吸収で中性子束は大きく窪む。下図に示すように J の被積分関数は $\beta < \psi$ の領域ではほぼ 1 になり、 $\psi = \beta$ のところでは $1/2$ になる。この点の x の値を x_β と書くと、 $x > x_\beta$ の領域では被積分関数は 0 へ近づく。

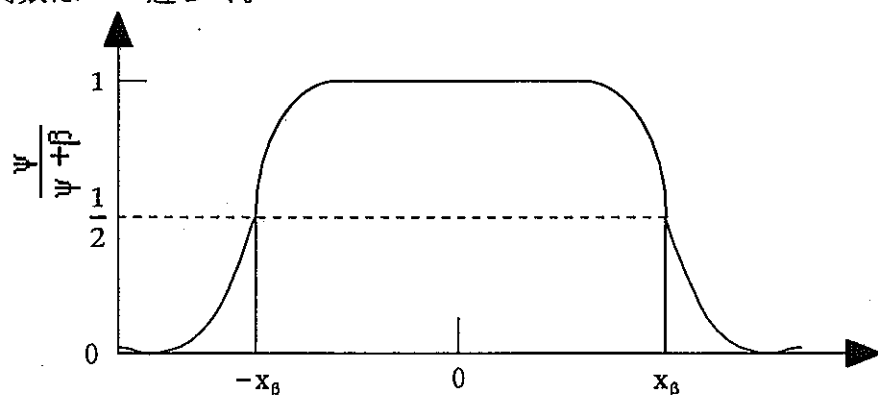


図 $\beta < \psi$ のときの被積分関数

このとき J の値は上図の曲線と x 軸とで囲まれる面積で、次のように近似できる。

$$J = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} dx \frac{\psi(x, \xi)}{\psi(x, \xi) + \beta} \cong X_\beta \quad (9)$$

ところで、 $T \gg 0$ のとき x_β は、は次式により求まる。

$$\beta = \psi(x, \xi) = \frac{\sqrt{\pi}\xi}{2} e^{-\frac{\xi^2 x_\beta^2}{4}} \quad (10)$$

これから、

$$x_\beta = \frac{2}{\xi} \sqrt{\log \frac{\sqrt{\pi}\xi}{2\beta}} = c_1 \frac{1}{\xi} = c_2 T^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

となる。したがって、 J の温度微分の温度依存性は、

$$\frac{dJ}{dT} = \frac{dx_\beta}{dT} = \frac{c_2}{T^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

である。すなわち、ドップラー係数は絶対温度 T の $-1/2$ 乗に比例する。

ところで、 $\beta < \psi$ という条件は、

- (a) 共鳴核種に対する減速材の原子数密度割合が比較的小さい、
- (b) (共鳴核種に対する減速材の割合が比較的多いかもしれないが) ドップラー反応度に大きく寄与するエネルギー領域での共鳴ピークの値がバックグラウンド断面積に比べてかなり大きい、

のいずれかに相当する。軽水炉の場合、ドップラー反応度に最も大きな寄与を示す共鳴核種 ^{238}U からみた減速材核種は燃料のみに着目すると燃料中の酸素のみであるが、その原子数密度は ^{238}U と同じオーダーである。図 2-1、2-2 に示す種々の核種の断面積曲線にみるように^[11]、酸素の弾性散乱断面積は数百 keV 以下の広いエネルギー範囲にわたり 5 barn 程度でほぼ一定であることから、中性子スペクトルが非常に軟らかい軽水炉でドップラー反応度に大きく寄与

するエネルギー領域（～100 eV 以下の領域）での ^{238}U の共鳴吸収ピーク値～ 10^3 barn はバックグラウンド断面積に比べ、式 (1) より 2 桁大きい。したがって、軽水炉においては上記 (b) の条件が相当することになり、よく知られているように軽水炉のドップラー係数は一般に絶対温度の-1/2 乗に比例することになる。

(iii-2) $\beta/\psi \ll 1$ のとき

減速材が吸収材に比べて極端に少ない場合で、通常の原子炉ではこういう場合は起こらない。この場合は分母の β を ψ に比べて無視すると、 J の被積分関数は 1 となり、 $J = x_\beta$ となる。ただし、この場合は上記 (iii-1) で示した図の x_β を非常に大きくした場合で、 $x = x_\beta$ のところではドップラー拡がりによる影響は小さく、 $\psi(x, \xi) \doteq 1/(1+x^2)$ としてよい。

すなわち x_β は、

$$x_\beta = \psi(x, \xi) = \frac{1}{1+x_\beta} = \beta, x_\beta = \sqrt{\frac{1-\beta}{\beta}} \doteq \frac{1}{\sqrt{\beta}} \quad (13)$$

のように求まる。

この x_β は絶対温度 T によらないで、 J の温度微分は

$$\frac{dJ}{dT} = \frac{dx_\beta}{dT} = 0 \quad (14)$$

となる。すなわち、減速材が極端に少ない場合も、極端に多い場合 (i.e. 共鳴核種が無限希釈されている場合) と同様、共鳴吸収は温度に依存しない。すなわち、ドップラー係数は温度に依らず常に 0 である。

2.2 SERAPH 炉心におけるドップラー係数の温度依存性の予測

2.1 節におけるドップラー係数の温度依存性のレビュー結果を基に、SERAPH 炉心におけるドップラー係数の温度依存性について予測してみる。

SERAPH の場合、ドップラー反応度に大きく寄与する共鳴核種 (Pu 同位体) は燃料中で BeO に大きく希釈されている。表 2-1 に示す燃料セル中の領域ごとの原子数密度にみるように、燃料中に存在する Pu 同位体の原子数密度は同じく燃料中の BeO に比べて 2 桁小さい。

ここで、図 2-1~2-2 に示した断面積曲線のうち、Gas-Pu 炉心を例に取り挙げ、燃料核種である ^{239}Pu , ^{240}Pu 各々の共鳴吸収ピーク値、及び希釈材構成核種である BeO, O の散乱断面積から、式 (1') で示したバックグラウンド断面積を ^{239}Pu , ^{240}Pu 各々に対し概算する。

表 2-1 に示した原子数密度を基に、 ^{239}Pu , ^{240}Pu , BeO, O の原子数密度を概略的にそれぞれ 0.75, 0.25, 50, 50 と相対値で表す。また、図 2-1(1),(2) に示した断面積曲線から、同じく概略的に BeO, O の散乱断面積をともに 5 barn とする。

このとき、式 (1') で表されるバックグラウンド断面積は、

- ・ (^{239}Pu のバックグラウンド断面積) = $(5 \times 50 + 5 \times 50) / 0.75 = 670 \text{ barn}$
- ・ (^{240}Pu のバックグラウンド断面積) = $(5 \times 50 + 5 \times 50) / 0.25 = 2000 \text{ barn}$

と概略評価される。

一方、図 2-2(5),(6) に示した ^{239}Pu , ^{240}Pu の吸収断面積曲線から、各々の共鳴ピーク値をみると、

- ・ ^{239}Pu の共鳴ピーク

10~100 eV 付近で $10^2 \sim$ 数百 barn 程度 (0.29 eV においてのみ一桁大きい $5 \times 10^3 \text{ barn}$)

- ・ ^{240}Pu の共鳴ピーク

10~100 eV 付近で 10^3 barn 程度 (1 eV においてのみ二桁大きい $\sim 10^5$ barn)

となっている。SERAPH 炉心の中性子スペクトルが中速スペクトルであることから、10~100 eV 付近のエネルギー領域はドップラー反応度に大きく寄与すると考えられる。このことは図 2-3 に示す、一般化摂動論に基づく感度解析コード SAGEP を用いたドップラー反応度に対する感度係数の結果からもわかる^[12]。

以上のことから、核分裂性核種である ^{239}Pu 、親核種である ^{240}Pu とともに共鳴ピーク値とバックグラウンド断面積はほぼ全エネルギー域にわたり同程度の値であることがわかる。したがって、前節で述べた β は 1 から大きくずれた値とはならない。このことから、SERAPH ドライバー炉心を構成する燃料組成の特徴は 2.1 節で分類した条件 (iii) に相当する。また、このような特性は Gas-Pu 炉心だけでなく、LWR-Pu 炉心についても同様に言える。

したがって、SERAPH 炉心における J 関数の温度依存性 (i.e. ドップラー反応度の温度依存性) は極端に大きい自己遮蔽効果に相当する J 関数に関する T^{-1} 則以外の項、すなわち $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の線形結合 (ドップラー係数の温度依存性について言えば、 $T^{-3/2}$ 比例項、 T^{-1} 比例項、 $T^{-1/2}$ 比例項の線形結合) で表されると予測できる。つまり、SERAPH 炉心におけるドップラー係数の温度依存性は通常の高速炉で成立する T^{-1} 比例、または通常の軽水炉で成立する $T^{-1/2}$ 比例というような、単一項で表される可能性は低いと考えられる。

3. SERAPH 炉心における解析

本解析では、現行の重水冷却/PuO₂-BeO 燃料 SERAPH 基準炉心として検討しているガス炉取り出し Pu 組成炉心（以下、Gas-Pu 炉心と称する。）、及びその比較のため軽水炉取り出し Pu 組成炉心（以下、LWR-Pu 炉心と称する。）を対象として、ドップラー係数の温度依存性について調べることにした。Pu 同位体組成比は以下の通りである。

対象炉心	Pu 同位体組成比 [w/o]
Gas-Pu 炉心	²³⁹ Pu : ²⁴⁰ Pu = 75 : 25
LWR-Pu 炉心	²³⁹ Pu : ²⁴⁰ Pu : ²⁴¹ Pu : ²⁴² Pu : ²⁴¹ Am = 57.1 : 24.9 : 8.8 : 7.2 : 2.0

ドライバー燃料中の PuO₂ と BeO の体積比は PuO₂ : BeO = 5 : 95 とした。これは、現行の SERAPH 炉心設計研究でレファレンスとして用いられているものである^[1]。これらの条件下で、ドライバー燃料温度を 300~2000 K の範囲で変化させて、各温度に対する炉心の実効増倍率 k_{eff} 、並びに対応する反応度 $\rho(T)$ ($=1-1/k_{\text{eff}}$) を TWOTRAN-II コード^[13] による 2次元 RZ 計算で求めた。

各温度でのドップラー反応度 $\rho_D(T)$ は、燃料温度が基準温度 T_0 (本解析では 300 K とした) から T に変化したときの反応度変化で定義した。

解析対象とした SERAPH 炉心水平断面図を図 3-1 に、同図を基に作成した本解析用の 2次元 RZ モデルを図 3-2、図 3-3 にそれぞれ示す。図 3-2 は制御棒の存在を考慮しない場合、図 3-3 はその存在を考慮する場合で、制御棒の存在の有無がドップラー係数の評価に与える影響についても調べた。制御棒集合体の取り扱いについての詳細は後述する。

図 3-1 に示されているように、実際の炉心構成では試験体における物質移動を計測するため、ホドスコープスロットと称する領域が設けられるが、本解析が 2

次元 RZ 体系に基づいていることを踏まえ、この領域についてはドライバー燃料集合体で置き換えることとした。

ドライバー燃料集合体の水平断面図、及び同領域の実効マクロ断面積作成用セル計算モデルを図 3-4 に示す。同図において、1 集合体当たりの冷却材（重水）体積率は 30%である。実効マクロ断面積の作成については後述する。

図 3-1 に示されている 3 種類の制御棒領域の水平断面図を図 3-5 (1)、3-6 (1) に示す。図 3-5 (1) はパルス印加用制御棒、図 3-6 (1) は出力調整棒（クラスタ型）、安全棒（クラスタ型）の水平断面図を示したものである。ここでは出力調整棒と安全棒の構造及び組成条件をすべて同じとした。実際の計算においては、これらの制御棒の存在を考慮しない場合（このとき、制御棒集合体はすべてドライバー燃料集合体に置き換える）と、考慮する場合の 2 ケースを対象とした。制御棒の存在を考慮する場合については、各制御棒の吸収材に係わる条件を以下のように設定した。

- ・パルス印加用制御棒

- ^3He ガス圧 10 atm、30 atm の 2 ケースを選定

- ・安全棒、出力調整棒

- ともにドライバー炉心部全引き抜き状態とし、図 3-3 (a) に示すように吸収材を含む領域については、ここでは炉体構造設計で検討対象の一つとしている制御棒下側駆動方式を考慮し、炉心下端より下側に固定した。

さらに、これらの制御棒の存在の 2 次元 RZ 体系上でのモデル化は以下のように行った。

- (i) パルス印加用制御棒

- 図 3-1 に示すように、本制御棒棒集合体 6 体の全体積を求め、その体積を保存するような円環形状でモデル化した。試験体中心から円環の中心までの

径方向距離は試験体中心から本制御棒集合体中心位置までの径方向距離と等しくなるように設定した。なお、本制御棒には実効マクロ断面積作成段階から図 3-5 (2) に示すような均質モデルを適用した。

(ii) 出力調整棒 (クラスタ型)

図 3-6 (c) に示す制御棒ピンがクラスタ 6 基全体に占める全体積 $V_{\text{clust/pri}}$ を保存するような円環形状でモデル化した。

$V_{\text{clust/pri}}$ は次のようにして求められる。図 3-6 (c) に示す制御棒ピンは同図 (1) に示すクラスタ型制御棒集合体 1 体当たり 6 本存在すること、クラスタ 1 基はクラスタ型制御棒集合体 3 体から構成されること、円環内にはこのようなクラスタが 6 基存在することから、制御棒ピン 1 本当たりの体積を $V_{\text{abs/pin}}$ として、

$$V_{\text{clust/pri}} = 6 \times 3 \times 6 \times V_{\text{abs/pin}} = 108 V_{\text{abs/pin}}$$

となる。

なお、試験体中心から円環の中心までの径方向距離は試験体中心からクラスタ 1 基の中心位置までの径方向距離と等しくなるように設定した。また、図 3-6 (c) の制御棒ピンは挿入時 (中心領域は B_4C ペレット)、引き抜き時 (中心領域 He 充填) とともに実効マクロ断面積作成段階から同図 (2) に示す均質モデルを適用した。

(iii) 安全棒 (クラスタ型)

図 3-6 (c) に示す制御棒ピンがクラスタ 4 基全体に占める全体積 $V_{\text{clust/back}}$ を保存するような円環形状でモデル化した。

$V_{\text{clust/back}}$ の求め方は上記 (ii) と同様であり、次のようにして求められる。

$$V_{\text{clust/back}} = 6 \times 3 \times 4 \times V_{\text{abs/pin}} = 72 V_{\text{abs/pin}}$$

となる。

なお、試験体中心から円環の中心までの径方向距離は試験体中心からクラ

スタ 1 基の中心位置までの径方向距離と等しくなるように設定した。また、図 3-6 (c) の制御棒ピンは挿入時（中心領域は B_4C ペレット）、引き抜き時（中心領域 He 充填）ともに実効マクロ断面積作成段階から同図 (2) に示す均質モデルを適用した。

以上の計算条件を基に設定した本解析の計算ケースを表 3-1 にまとめた。

以下に、制御棒設置条件及び計算手順について述べる。

(1) 制御棒設置条件

(イ) パルス印加用(3He)制御棒

図 3-5 (2) に示すように元の形状から各々の物質の体積割合を求め、その割合を用いて無限均質セル計算にて 218 群の実効マクロ断面積を作成する。2次元 RZ 炉心計算では、ここで求められたものを 22 群に縮約して用いる。

本制御棒は、図 3-1 に示すようにスロット領域の上下対称に 3 基ずつ配置される(3 基の炉中心からの径方向距離は等しくない。)。ここでは、これら計 6 基の全体積を求め、その体積を保存するように炉中心から P1 制御棒セルの中心までの径方向距離を半径とする円が円環の中心となるようなリングモデルを設定した。

(ロ) 出力調整棒, 安全棒 (クラスタ型)

図 3-6 (2) に示すように元の形状から各々の物質の体積割合を求め、その割合を用いて無限均質セル計算を行い、挿入、引抜き各条件の下で 218 群実効マクロ断面積を各々作成する。なお、これらの 218 群実効マクロ断面積は出力調整棒及び安全棒の両方に用いられる。

2次元 RZ 炉心計算では、ここで求められたものを 22 群に縮約して用

いる。

出力調整棒は、図 3-1 に示すように、互いに 1 燃料集合体分ずつ離れた 3 基を一組として（3 基のセットの炉中心からの径方向距離は等しくない。）、スロット領域に対し上下対称となるように計 18 基が配置される。ここでは、図 3-6 (c) に示すような六角形状セル中の 6 本のピンの体積を制御棒本数倍した体積を求め、これを保存するように、炉中心から P3 に示す 3 基の制御棒セルの中心位置までの径方向距離を半径とする円が円環の中心となるようなリングモデルを設定した。

安全棒については、図 3-1 に示すように 3 基を一組としてスロット領域に対し上下対称となるように計 12 基が配置される。ここでは、出力調整棒の場合と同様にこれら 12 基の全体積を求め、その体積を保存するように、炉中心から P2 に示す 3 基の制御棒セルの中心位置までの径方向距離を半径とする円が円環の中心となるようなリングモデルを設定した。

(2) 計算手順

計算手順を図 3-7 に示す。同図に示すように 218 群実効マクロ断面積作成、及び群縮約計算には SCALE4 コードシステム^[14]を、2次元 RZ 炉心計算には TWOTRAN-II コードを使用し、以下の手順に沿って行った。

(a) 218 群実効マクロ断面積の作成 (図 3-7 (a) に対応)

計算に使用するすべての物質領域の 218 群実効マクロ断面積の作成には、SCALE4 コードシステムの CSASI、CSASIX モジュールにて行った。なお、核断面積セットには ENDF/B-協ベースの 218 群 CSRL 断面積セット^[11]を使用した。

CSASI モジュールは均質セル計算を行い、218 群の実効マクロ断面積

を作成する。この計算では図 3-8 (イ) に示すようにドライバー炉心を除くすべての物質を対象とした。

CSASIX モジュールは 1 次元セル計算を行い、セル内の中性子束で重み付けしたセル平均の実効マクロ断面積を作成する。この計算では図 3-8 (ロ) に示す六角形状非均質セル体系 (図 3-4 (2)) を基に表 3-1 に示すすべてのケースのドライバー炉心を対象に行った。

(b) 複数の 218 群実効マクロ断面積の結合 (図 3-7 (b) に対応)

後述する 22 群縮約計算を行うためには、各計算ケースごとに使用する複数の 218 群実効マクロ断面積ファイルを 1 つのファイルに結合することが必要になる。このためには、図 3-8 (ハ) に示すように WAX モジュールを用いる。

(c) 各物質の 22 群実効マクロ断面積の作成 (図 3-7 (c) に対応)

218 群から 22 群への群縮約計算は図 3-7 (c) に示すように、SCALE4 コードシステムのモジュールである 1 次元 S_N 輸送計算コード XSDRNPM を用いて ANISN 形式の 22 群実効マクロ断面積を作成する。ここで、218 群 CSRL 断面積セットの 218 群エネルギー群構造、及び 22 群縮約計算に用いた 22 群構造を表 3-2 に示す。

計算では各制御棒物質、軸反射体、及び軸ブランケット燃料を除き、図 3-9 (1) に示す 1 次元円柱体系を用いて行う。この際、各計算ケースに対応したドライバー炉心(Gas,LWR-Pu 燃料、燃料温度)をドライバー領域に与える。

軸ブランケット燃料、軸反射体については、それぞれ図 3-9 (2)、(3) に示すように、燃料温度を 600K とする炉心領域を含む 1 次元円柱体系を用いて縮約計算を行う。同様の縮約計算を制御棒についても図 3-10 に示す 1 次元円柱体系を用いて行う。

(d) TWOTRAN-II コード用断面積ファイルの作成 (図 3-7 (d) に対応)

(c) で作成された ANISN 形式の断面積ファイルをそのまま TWOTRAN-II コードに使用することはできない。そこで、ファイル変換プログラムを用いて各計算ケースに対応した TWOTRAN-II コード用断面積ファイルを作成する。

(e) 2次元 RZ 炉心計算 (図 3-7 (e) に対応)

(d) で作成された断面積ファイルを用いて以下に示す計算条件にて、TWOTRAN-II コードによる 2次元 RZ 炉心計算を行った。

・制御棒の設置の有無条件の 2 種について行った。(図 3-2、3-3 に示す。)

・中性子束の収束判定条件： 1.0×10^{-5} 以下

・ S_N 次数：8

・PI 次数：1 ($P_0 \sim P_1$ 成分)

4. 計算結果及び考察

計算結果を表 4-1～4-3 に示す。表 4-1、4-2、4-3 はそれぞれ制御棒を含まない体系（図 3-2）、制御棒含・ ^3He 10 atm の体系（図 3-3）、制御棒含・ ^3He 30 atm の体系（図 3-3）に対する計算結果で、いずれの表も Gas-Pu 炉心及び LWR-Pu 炉心の両者の結果を示した。

4.1 ドップラー反応度における温度関数の線形結合性

表 4-1、4-2、4-3 におけるドップラー反応度の値（300 K を基準温度に設定）を温度を横軸にとってプロットしたものをそれぞれ図 4-1、4-2、4-3 に示す。これらいずれの図においても、2.2 節で SERAPH 炉心のドップラー反応度の温度依存性を温度 T に関する $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の 3 項による線形結合と予測したことを踏まえ（ドップラー係数の温度依存性は $T^{-3/2}$ 比例項、 T^{-1} 比例項、 $T^{-1/2}$ 比例項による線形結合）、図中の各プロット点を $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の線形結合で関数フィッティングした曲線も示した。

図 4-1～4-3 にみるように、Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心のいずれにおいても、制御棒の存在の有無に依らず、プロット点はすべてフィッティング曲線上に乗っていることがわかる。このことから、2.2 節で述べた SERAPH 炉心のドップラー反応度が $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の 3 項による線形結合で表されるとの予測は妥当であることが確認された。言い換えれば、ドップラー係数は $T^{-3/2}$ 比例項、 T^{-1} 比例項、 $T^{-1/2}$ 比例項による線形結合で表される。

4.2 ドップラー反応度に対する各温度関数項の寄与

4.1 節で述べた $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の各々が全体のドップラー反応度どのように寄与するかについて分析を行う。

図 4-1～4-3 でフィッティングした曲線を $T^{-1/2}$ 項、 $\ln T$ 項、 $T^{1/2}$ 項の 3 項に分

解し、これらの総和が-100 となるように規格化したものを図 4-4~4-6 に棒グラフで示す。図 4-4、4-5、4-6 はそれぞれ制御棒を含まない体系、制御棒含・ ^3He 10 atm の体系、制御棒含・ ^3He 30 atm の体系に対するもので、いずれの図も Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心の両者について示した。

Pu 組成や制御棒の存在の有無に依らず、負の値を示す $\ln T$ 項が全体のドップラー反応度に対し最大の寄与を示している。

$T^{-1/2}$ 項、 $T^{1/2}$ 項については、前者が正の値、後者が負の値として、互いにキャンセルしながら全体のドップラー反応度に寄与する傾向を示している。ところがドップラー温度点が比較的低い場合、特に Gas-Pu 炉心では $T^{-1/2}$ 項の寄与が $T^{1/2}$ 項の寄与を大きく上回っており、これら 2 項の和は正味の寄与となっている。ドップラー温度点が高くなるにつれ、Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心の両者とも、相対的に $T^{-1/2}$ 項の寄与が減少し、 $T^{1/2}$ 項の寄与が増大する傾向を示している。Gas-Pu 炉心における高温域での特性をみると、 $T^{-1/2}$ 項、 $T^{1/2}$ 項の両項がうまくキャンセルして正味の寄与はほぼゼロとなっているが、同様の特性を LWR-Pu 炉心についてみると、 $T^{1/2}$ 項の寄与の方が相対的に大きくなり、これらの 2 項による正味の寄与は負となっている。

4.1 節及び本節で述べたドップラー反応度の温度依存性についてまとめると、次のようになる。

- (1) Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心ともドップラー反応度は $T^{-1/2}$ 項 (正)、 $\ln T$ 項 (負)、 $T^{1/2}$ 項 (負) の 3 項の線形結合で表され、どの温度点においても負の値をとる $\ln T$ 項が最大の寄与を示す。
- (2) Gas-Pu 炉心では、比較的低いドップラー温度点では $T^{-1/2}$ 項が $T^{1/2}$ 項よりも相対的に大きな寄与を示し、これら 2 項の正味の寄与は正となる。2000 K 近くの高温度域では両項はほぼ拮抗し、これら正味の寄与はほぼゼロとな

るため、全体のドップラー反応度は見かけ上 $\ln T$ 項のみで表される。

- (3) LWR-Pu 炉心では、比較的低いドップラー温度点では $T^{-1/2}$ 項と $T^{1/2}$ 項がほぼ拮抗し、これら 2 項の正味の寄与はほぼゼロとなるため、全体のドップラー反応度は見かけ上 $\ln T$ 項のみで表される。2000 K 近くの高温域では $T^{1/2}$ 項が $T^{-1/2}$ 項よりも相対的に大きな寄与を示し、これら 2 項の正味の寄与は負となる。
- (4) 上記 (1) ~ (3) より、室温付近の低温域と 2000 K 近くの高温域を除く温度領域では、ドップラー反応度は $\ln T$ に比例する単一項（ドップラー係数は T の逆数に比例する単一項）で表すことが可能である。

本研究により、従来の原子炉に類を見ない燃料組成を有する SERAPH 炉心のドップラー係数は、室温に近い低温域と 2000K 付近の高温域以外の温度領域では絶対温度の逆数に比例する単一項のみで表示可能であること、低温及び高温域では絶対温度のそれぞれ $-1/2$ 乗及び $-3/2$ 乗に比例する項が有意な寄与を示すことが明らかとなった。

ところで、ドライバー燃料中のどの核種が絶対温度の $-1/2$ 乗及び $-3/2$ 乗に比例する項に大きく寄与しているかについて、2 章の議論に基づき、以下に定性的に考察する。

まず、 ^{240}Pu のドップラー係数への寄与について考えると、 $\sim 10^5$ barn という巨大共鳴吸収ピークを示す 1 eV 付近は、SERAPH 炉心の中性子スペクトル分布の特性を考えれば、ドップラー係数を含めた種々の核特性に対して有意な影響を与えると考えられる。この共鳴吸収ピークの値は、2 章によればバックグラウンド断面積の 50 倍程度であるから、ドップラー係数の温度依存性は 2 章の

(iii-1)、すなわち“ドップラー係数が絶対温度の $-1/2$ 乗に比例する”に相当する。さらに、この ^{240}Pu による 1 eV での共鳴吸収ピーク以外に、2 章の (iii-

1) の条件に顕著に該当するケースが考えられないことから、ドップラー係数における $T^{-1/2}$ 比例項は ^{240}Pu による 1 eV での共鳴吸収ピークによりほぼ支配されたものであると推定される。

一方、ドップラー係数における $T^{-3/2}$ 比例項の寄与については、2.1 節の (ii) の議論により、核分裂性核種である ^{239}Pu の寄与が支配的であると予想される。

本報ではこのような核種毎の特性を定性的に考察したが、今後定量的に分析することで、ドップラー係数の予測精度の向上や、その予測精度の確認に必要と思われるサンプルドップラー試験の適切な条件設定（サンプル中の燃料核種同位体組成比、燃料希釈率、測定温度等）への反映が期待される。

4.3 制御棒チャンネルの有無、 ^3He 圧力の違いがドップラー反応度に与える影響

本節では制御棒チャンネルの有無、及び ^3He ガス圧制御棒の ^3He 圧力の違いにより、ドップラー反応度がどのように異なるかについて調べる。

表 4-1、4-2 の“3) ドップラー反応度 $\rho_D(T)$ の算出結果”を比較すると、Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心ともに制御棒チャンネルがある方 (^3He 圧力 : 10 atm) がドップラー反応度は僅かに低下していることがわかる。概ね、Gas-Pu 炉心では 4~5%、LWR-Pu 炉心では 1~2% 程度の低下である。

また、表 4-1~4-3 で同様の比較を行うと、Gas-Pu 炉心、LWR-Pu 炉心ともに制御棒チャンネルがあり、かつ ^3He 圧力が高くなると (30 atm)、ドップラー反応度の低下幅はさらに増加し、制御棒チャンネルなしの場合に比べ、Gas-Pu 炉心で 6~7%、LWR-Pu 炉心で 2~3% それぞれ低下している。

この要因を調べるために、図 4-7、4-8 に制御棒チャンネルの有無、及び ^3He 圧力の違いによるドライバー領域平均の中性子スペクトル分布を比較した。図 4-7 が Gas-Pu 炉心、図 4-8 が LWR-Pu 炉心に対するものである。両図からわか

るように、制御棒チャンネルの設置によりスペクトルがやや軟化しており、 ^3He 圧力を 10 atm から 30 atm に増大させることでさらに軟化していることがわかる。

本解析では ^3He ガス圧制御棒以外の制御棒チャンネルにおけるフォロワー材は He (^4He) ガスを考えているため、制御棒チャンネル設置によってドライバー燃料集合体に流れる重水が結果的に削除されたことになる。そのため、中性子の減速が減り、スペクトルは硬くなる傾向を示す。

また、 ^3He ガス圧を増大させることは、 ^3He の吸収断面積が低エネルギー中性子ほど大きいというエネルギー特性 ($1/v$ 特性) を勘案すれば、より低エネルギーの中性子の吸収が増加することになる。これもスペクトルが硬くなる要因となる。

以上より、制御棒チャンネルの設置、及び ^3He ガス圧の増大は、いずれも僅かではあるがドライバー領域平均の中性子スペクトルを硬化させる。したがって、ドップラー効果は効きにくくなり、ドップラー反応度は僅かながら低下することになる。

ところで、Gas-Pu 炉心の方が LWR-Pu 炉心よりも、制御棒チャンネルの設置、及び ^3He ガス圧の増大によるドップラー反応度の低下幅が大きいのが、これは次のように両者の中性子スペクトル特性の違いによる。

Gas-Pu 炉心と LWR-Pu 炉心のドライバー領域平均中性子スペクトル分布の比較を図 4-9~4-11 に示す。どの図においても Gas-Pu 炉心の方が軟らかいスペクトル分布を示していることがわかる。これは、LWR-Pu 炉心の方は燃料中に存在する ^{242}Pu が 3 eV 付近に共鳴吸収ピークを有しているため、それによる中性子束の低下が生じるが、Gas-Pu 炉心ではそのような影響は生じないためである。吸収材核種である ^{10}B や ^3He の吸収断面積特性 ($1/v$ 特性) を考えると、スペクトルのより軟らかい Gas-Pu 炉心の方が、これら核種のインベントリ増

大により親核種 (^{240}Pu) による共鳴吸収、すなわちドップラー効果が低減される。これが Gas-Pu 炉心の方が、制御棒チャンネルの設置、及び ^3He ガス圧の増大によるドップラー反応度の低下幅がやや大きくなる要因である。

5. 結論

$\text{PuO}_2\text{-BeO}$ をドライバー炉心燃料とする SERAPH 炉心について、室温から 2000K までの燃料ペレット平均温度を対象にドップラー係数の温度依存性を評価した。得られた結論は以下の通りである。

- (1) Gas-Pu 炉心 ($^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} = 75 : 25$)、LWR-Pu 炉心 ($^{239}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu} : ^{241}\text{Pu} : ^{242}\text{Pu} : ^{241}\text{Am} = 57.1 : 24.9 : 8.8 : 7.2 : 2.0$) とも、ドップラー反応度は $T^{-1/2}$ 項 (正)、 $\ln T$ 項 (負)、 $T^{1/2}$ 項 (負) の 3 つの温度依存項 (ドップラー係数で言えば $T^{-3/2}$ 項、 T^{-1} 項、 $T^{-1/2}$ 項の 3 つの温度依存項) による線形結合で表され、どの温度点においても負の値をとる $\ln T$ 項 (ドップラー係数で言えば T^{-1} 項) が最大の寄与を示す。
- (2) Gas-Pu 炉心では、比較的低いドップラー温度点では $T^{-1/2}$ 項が $T^{1/2}$ 項よりも相対的に大きな寄与を示し、これら 2 項の正味の寄与は正となる。2000 K 近くの高温度域では両項はほぼ拮抗し、これら正味の寄与はほぼゼロとなるため、全体のドップラー反応度は見かけ上、通常の高速度炉と同じ $\ln T$ 項のみ (ドップラー係数でいえば絶対温度の逆数に比例) で表される。
- (3) LWR-Pu 炉心では、比較的低いドップラー温度点では $T^{-1/2}$ 項と $T^{1/2}$ 項がほぼ拮抗し、これら 2 項の正味の寄与はほぼゼロとなるため、全体のドップラー反応度は見かけ上、通常の高速度炉と同じ $\ln T$ 項のみ (ドップラー係数でいえば絶対温度の逆数に比例) で表される。2000 K 近くの高温度域では $T^{1/2}$ 項が $T^{-1/2}$ 項よりも相対的に大きな寄与を示し、これら 2 項の正味の寄与は負となる。
- (4) 上記 (1) ~ (3) より、Gas-Pu 炉心は 2000 K 近くの高温度域で、LWR-Pu 炉心は比較的低い温度で、通常の高速度炉と同じくドップラー係数は絶対温度の逆数に比例する特性を示す。室温付近の低温域と 2000 K 近くの高温度域を

除く温度領域では、ドップラー反応度は $\ln T$ に比例する単一項（ドップラー係数は T の逆数に比例する単一項）で近似することが可能である。

- (5) 制御棒に用いる中性子吸収材の存在を考慮することでドップラー反応度は低下するが、その大きさは高々数%程度であり、ドップラー反応度の評価に与える影響は軽微である。 Gas-Pu 炉心と LWR-Pu 炉心間での比較では、中性子スペクトルが前者の方が軟らかいことに起因し、 Gas-Pu 炉心の方がドップラー反応度の低下幅は大きくなる。

本成果は、核種毎にドップラー係数の各温度依存項への寄与をみるマイクロレベルでの定量的分析を組み合わせることで、ドップラー係数の予測精度や、試験遂行時のドライバー炉心の性能及び安全裕度の確認に有効に反映されることが期待される。

謝辞

本研究を進めるに当たって、多くの方々から貴重なご助言を賜りました。

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

(株) 東芝・原子力技術研究所の川島正俊氏並びに山岡光明氏にはドップラー反応度に対する感度解析にご協力を賜りました。

ナトリウム・安全工学試験部高速炉安全工学グループの近藤悟グループリーダーにはご多忙の身であるにも係わらず本報告書を熱心に査読して頂きました。

ここに感謝の意を表し、これらの方々へ厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] N. Uto, et al. , “ Evaluation of Neutronic Characteristics of In-pile Test Reactor for fast Reactor Safety Research, ” *Proc. Int. Conf. on the Physics of Reactors (PHYSOR96)* ,Vol 2, D-93, Mito, September 16-20 (1996) .
- [2] 大洗工学センターSERAPH 計画技術検討グループ：「FBR 安全性炉内試験計画 (SERAPH 計画) の検討」、PNC TN9410 94-154 (1995 年 3 月) .
- [3] 宇都成昭他、原子力学会 1994 年秋の大会、G70、「高速炉用インパイル試験炉のドライバー炉心と試験体との核結合解析」
- [4] 宇都成昭他、原子力学会 1995 年春の年会、C12、「高速炉安全性試験炉における核特性解析 -ナトリウムを冷却材とするドライバー炉心の静的核特性-」
- [5] 大野修司他、原子力学会 1995 年秋の大会、D12、「FBR 安全性炉内試験計画 SERAPH (4) : 駆動炉心の炉心特性」
- [6] 宇都成昭他、原子力学会 1996 年春の年会、E25、「FBR 安全性炉内試験計画 SERAPH (9) : 駆動炉心による加熱特性」
- [7] 小林啓介、「原子炉物理」、コロナ社 (1996) .
- [8] H. H. Hummel and D. Okrent, “ Reactivity Coefficients in Large Fast Power Reactors, ” American Nuclear Society (1970) .
- [9] A. Reichel, “ Trends in The Temperature Dependence of Effective Resonance Integrals, ” British Report AEEW-R-102 (1961) .
- [10] A. Reichel, *J.Nucl. Energy, Pts. A&B*, 17 : 281-292 (1963) .

- [11] W. E. Ford, C. C. Webster and R. M. Westfall, " A 218-Group Neutron Cross-section Libraries in the AMPX Master Interface Format for Criticality Safety Studies, " ORNL/CSD/TM-4 (1976) .

- [12] 川島正俊氏, 山岡光明氏、私信 (1994) .

- [13] K. D. Lathrop and F. W. Brinkley, " TWOTRAN-II : An Interfaced, Exportable Version of the TWOTRAN Code for Two - Dimensional Transport," LA-4848-MS, July (1973) .

- [14] N. F. Landers and L. M. Petrie, " CSAS4 : An Enhanced Criticality Safety Analysis Module with An Optimum Pitch Search Option, " Oak Ridge National Laboratory.

表 2.1 各領域を構成する核種の原子数密度

[$\times 10^{24}$ 個 / cm^3]

領域	核種名	Gas-Pu炉心	LWR-Pu炉心
燃料	プルトニウム-239	9.06216e-04	6.88835e-04
	プルトニウム-240	3.02072e-04	3.00385e-04
	プルトニウム-241	—	1.06160e-04
	プルトニウム-242	—	8.68584e-05
	アメリシウム-241	—	2.41273e-05
	ベリリウム	6.34502e-02	6.34502e-02
	酸素	6.58667e-02	6.58628e-02
ギャップ	アルミニウム	1.53563e-02	1.53563e-02
	酸素	2.30345e-02	2.30345e-02
被覆管	ジルコニウム	4.24659e-02	4.24659e-02
	スズ	4.98536e-04	4.98536e-04
	鉄	1.41270e-04	1.41270e-04
	クロム	7.58664e-05	7.58664e-05
冷却材 + α	重水素	5.58486e-02	5.58486e-02
	水素	5.64128e-04	5.64128e-04
	酸素	2.82081e-02	2.82081e-02
	ジルコニウム	6.16605e-03	6.16605e-03
	スズ	7.23874e-05	7.23874e-05
	鉄	2.05124e-05	2.05124e-05
	クロム	1.10158e-05	1.10158e-05

表 3.1 計算ケース

(1) 各種制御棒未設置炉心

Gas-Pu 炉心		LWR-Pu 炉心	
計算ケース名	燃料温度 (K) 条件	計算ケース名	燃料温度 (K) 条件
PDG5A2	300.0	PDL5A5	300.0
PDG5A1	600.0	PDL5A4	600.0
PDG5A3	900.0	PDL5A6	900.0
PDG5A4	1200.0	PDL5A7	1200.0
PDG5A5	1500.0	PDL5A8	1500.0
PDG5A6	1800.0	PDL5A9	1800.0
PDG5A7	2000.0	PDL5A0	2000.0

(2) 各種制御棒設置炉心

(2-1) ^3He ガス圧 10 atm 条件

Gas-Pu 炉心		LWR-Pu 炉心	
計算ケース名	燃料温度 (K) 条件	計算ケース名	燃料温度 (K) 条件
PDG5A21	300.0	PDL5A51	300.0
PDG5A11	600.0	PDL5A41	600.0
PDG5A31	900.0	PDL5A61	900.0
PDG5A41	1200.0	PDL5A71	1200.0
PDG5A51	1500.0	PDL5A81	1500.0
PDG5A61	1800.0	PDL5A91	1800.0
PDG5A71	2000.0	PDL5A01	2000.0

(2-2) ^3He ガス圧 30 atm 条件

Gas-Pu 炉心		LWR-Pu 炉心	
計算ケース名	燃料温度 (K) 条件	計算ケース名	燃料温度 (K) 条件
PDG5A23	300.0	PDL5A53	300.0
PDG5A13	600.0	PDL5A43	600.0
PDG5A33	900.0	PDL5A63	900.0
PDG5A43	1200.0	PDL5A73	1200.0
PDG5A53	1500.0	PDL5A83	1500.0
PDG5A63	1800.0	PDL5A93	1800.0
PDG5A73	2000.0	PDL5A03	2000.0

表3.2 218群及び22群のエネルギー群構造

群数		上限エネルギー (eV)	群数		上限エネルギー (eV)	群数		上限エネルギー (eV)	群数		上限エネルギー (eV)				
1	1	2.0000e+07	11	56	3.0000e+03	15	111	2.5000e+01	18	166	1.2000e+00				
	2	2		6.4340e+06	57		2.5800e+03	112		2.2500e+01	167	1.1750e+00			
3		4.8000e+06		58	2.2900e+03		113	2.1000e+01		168	1.1500e+00				
4		4.3040e+06	59	2.2000e+03	114		2.0000e+01	169		1.1400e+00					
3	5	3.0000e+06	12	60	1.8000e+03		115	1.9000e+01		170	1.1300e+00				
	6	2.4790e+06		61	1.5500e+03		116	1.8500e+01		171	1.1200e+00				
	7	2.3540e+06		62	1.5000e+03		117	1.7000e+01		172	1.1100e+00				
	8	1.8500e+06		63	1.1500e+03		118	1.6000e+01		173	1.1000e+00				
	9	1.5000e+06		64	9.5000e+02		119	1.5100e+01		174	1.0900e+00				
	10	1.4000e+06		65	6.8300e+02		120	1.4400e+01		175	1.0800e+00				
4	11	1.3560e+06	13	66	6.7000e+02		16	121		1.3750e+01	176	1.0700e+00			
	12	1.3170e+06		67	5.5000e+02			122		1.2900e+01	177	1.0600e+00			
	13	1.2500e+06		68	3.0500e+02			123		1.1900e+01	178	1.0500e+00			
	14	1.2000e+06	69	2.8500e+02	124			1.1500e+01		179	1.0400e+00				
	15	1.1000e+06	70	2.4000e+02	125			1.0000e+01		180	1.0300e+00				
	16	1.0100e+06	71	2.1000e+02	126	9.1000e+00		181		1.0200e+00					
	17	9.2000e+05	72	2.0750e+02	127	8.1000e+00		182		1.0100e+00					
	18	9.0000e+05	73	1.9250e+02	128	7.1500e+00		183		1.0000e+00					
	19	8.7500e+05	74	1.8600e+02	129	7.0000e+00		184	9.7500e-01						
	20	8.6110e+05	75	1.2200e+02	130	6.7500e+00		185	9.5000e-01						
5	21	8.2000e+05	14	76	1.1900e+02	17		131	6.5000e+00	19	186	9.2500e-01			
	22	7.5000e+05		77	1.1500e+02			132	6.2500e+00		187	9.0000e-01			
	23	6.7900e+05		78	1.0800e+02			133	6.0000e+00		188	8.5000e-01			
	24	6.7000e+05		79	1.0000e+02			134	5.4000e+00		189	8.0000e-01			
	25	6.0000e+05		80	9.0000e+01			135	5.0000e+00		190	7.5000e-01			
	26	5.7300e+05		81	8.2000e+01		136	4.7500e+00	191		7.0000e-01				
	27	5.5000e+05		82	8.0000e+01		137	4.0000e+00	192		6.5000e-01				
6	28	4.9952e+05	14	83	7.6000e+01		18	138	3.7300e+00		20	193	6.0000e-01		
	29	4.7000e+05		84	7.2000e+01			139	3.5000e+00			194	5.5000e-01		
	30	4.4000e+05		85	6.7500e+01			140	3.1500e+00			195	5.0000e-01		
	31	4.2000e+05		86	6.5000e+01			141	3.0500e+00			196	4.5000e-01		
	32	4.0000e+05		87	6.1000e+01			142	3.0000e+00			197	4.0000e-01		
7	33	3.3000e+05		88	5.9000e+01			143	2.9700e+00			198	3.7500e-01		
	34	2.7000e+05		89	5.3400e+01			144	2.8700e+00			199	3.5000e-01		
	35	2.0000e+05		90	5.2000e+01			145	2.7700e+00			200	3.2500e-01		
	36	1.5000e+05	91	5.0600e+01	146	2.6700e+00		201	3.0000e-01						
	37	1.2830e+05	92	4.9200e+01	147	2.5700e+00		202	2.7500e-01						
8	38	1.0000e+05	14	93	4.8300e+01	19		148	2.4700e+00			21	203	2.5000e-01	
	39	8.5000e+04		94	4.7000e+01			149	2.3800e+00	204			2.2500e-01		
	40	8.2000e+04		95	4.5200e+01			150	2.3000e+00	205			2.0000e-01		
	41	7.5000e+04		96	4.4000e+01			151	2.2100e+00	206			1.7500e-01		
	42	7.3000e+04		97	4.2400e+01			152	2.1200e+00	207			1.5000e-01		
	43	6.0000e+04		98	4.1000e+01		153	2.0000e+00	208	1.2500e-01					
	44	5.2000e+04		99	3.9600e+01		154	1.9400e+00	209	1.0000e-01					
	45	5.0000e+04		100	3.9100e+01		155	1.8600e+00	210	9.0000e-02					
9	46	4.5000e+04	15	101	3.8000e+01		22	156	1.7700e+00	22	211		8.0000e-02		
	47	3.0000e+04		102	3.7000e+01			157	1.6800e+00		212		7.0000e-02		
	48	2.5000e+04		103	3.5500e+01			158	1.5900e+00		213		6.0000e-02		
10	49	1.7000e+04	15	104	3.4600e+01			18	159		1.5000e+00		21	214	5.0000e-02
	50	1.3000e+04		105	3.3750e+01				160		1.4500e+00			215	4.0000e-02
	51	9.5000e+03		106	3.3250e+01				161		1.4000e+00			216	3.0000e-02
	52	8.0300e+03		107	3.1750e+01				162		1.3500e+00			217	2.5300e-02
	53	6.0000e+03		108	3.1250e+01	163			1.3000e+00		218			1.0000e-02	
	54	3.9000e+03		109	3.0000e+01	164			1.2500e+00		219			1.0000e-05	
11	55	3.7400e+03	15	110	2.7500e+01	165			1.2250e+00						

表 4.1 計算結果（制御棒を含まない体系）

1) 温度 T における実効増倍率 $k_{\text{eff}}(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}	300.0	1.087865	1.080335
PD{G,L}5A{1,4}	600.0	1.083431	1.073222
PD{G,L}5A{3,6}	900.0	1.080208	1.068672
PD{G,L}5A{4,7}	1200.0	1.077710	1.065268
PD{G,L}5A{5,8}	1500.0	1.075649	1.062525
PD{G,L}5A{6,9}	1800.0	1.073842	1.060222
PD{G,L}5A{7,0}	2000.0	1.072748	1.058861

2) 温度 T における反応度 $\rho(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}	300.0	0.080768	0.074361
PD{G,L}5A{1,4}	600.0	0.077006	0.068226
PD{G,L}5A{3,6}	900.0	0.074252	0.064259
PD{G,L}5A{4,7}	1200.0	0.072107	0.061269
PD{G,L}5A{5,8}	1500.0	0.070329	0.058846
PD{G,L}5A{6,9}	1800.0	0.068764	0.056801
PD{G,L}5A{7,0}	2000.0	0.067815	0.055589

$$\rho(T) = 1.0 - \frac{1}{k_{\text{eff}}(T)}$$

3) ドップラー反応度 $\rho_D(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}	300.0	0.00000	0.00000
PD{G,L}5A{1,4}	600.0	-0.00376	-0.00613
PD{G,L}5A{3,6}	900.0	-0.00652	-0.01010
PD{G,L}5A{4,7}	1200.0	-0.00866	-0.01309
PD{G,L}5A{5,8}	1500.0	-0.01044	-0.01552
PD{G,L}5A{6,9}	1800.0	-0.01200	-0.01756
PD{G,L}5A{7,0}	2000.0	-0.01295	-0.01877

$$\rho_D(T) = \rho(T) - \rho(T_0) \quad T_0 = 300.0\text{K}$$

表 4.2 計算結果（制御棒を含む³He 10 atm 炉心体系）1) 温度 T における実効増倍率 $k_{\text{eff}}(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}1	300.0	1.058434	1.052560
PD{G,L}5A{1,4}1	600.0	1.054418	1.045902
PD{G,L}5A{3,6}1	900.0	1.051496	1.041646
PD{G,L}5A{4,7}1	1200.0	1.049245	1.038477
PD{G,L}5A{5,8}1	1500.0	1.047375	1.035910
PD{G,L}5A{6,9}1	1800.0	1.045730	1.033754
PD{G,L}5A{7,0}1	2000.0	1.044729	1.032483

2) 温度 T における反応度 $\rho(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}1	300.0	0.055208	0.049935
PD{G,L}5A{1,4}1	600.0	0.051609	0.043887
PD{G,L}5A{3,6}1	900.0	0.048974	0.039981
PD{G,L}5A{4,7}1	1200.0	0.046934	0.037051
PD{G,L}5A{5,8}1	1500.0	0.045232	0.034665
PD{G,L}5A{6,9}1	1800.0	0.043730	0.032652
PD{G,L}5A{7,0}1	2000.0	0.042814	0.031461

$$\rho(T) = 1.0 - \frac{1}{k_{\text{eff}}(T)}$$

3) ドブラー反応度 $\rho_D(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}1	300.0	0.00000	0.00000
PD{G,L}5A{1,4}1	600.0	-0.00360	-0.00605
PD{G,L}5A{3,6}1	900.0	-0.00623	-0.00995
PD{G,L}5A{4,7}1	1200.0	-0.00827	-0.01288
PD{G,L}5A{5,8}1	1500.0	-0.00998	-0.01527
PD{G,L}5A{6,9}1	1800.0	-0.01148	-0.01728
PD{G,L}5A{7,0}1	2000.0	-0.01239	-0.01847

$$\rho_D(T) = \rho(T) - \rho(T_0) \quad T_0 = 300.0\text{K}$$

表 4.3 計算結果（制御棒を含む³He 30 atm 炉心体系）1) 温度 T における実効増倍率 $k_{\text{eff}}(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}3	300.0	1.045301	1.040131
PD{G,L}5A{1,4}3	600.0	1.041461	1.033668
PD{G,L}5A{3,6}3	900.0	1.038665	1.029551
PD{G,L}5A{4,7}3	1200.0	1.036524	1.026491
PD{G,L}5A{5,8}3	1500.0	1.034735	1.024013
PD{G,L}5A{6,9}3	1800.0	1.033163	1.021925
PD{G,L}5A{7,0}3	2000.0	1.032210	1.020699

2) 温度 T における反応度 $\rho(T)$ の算出結果

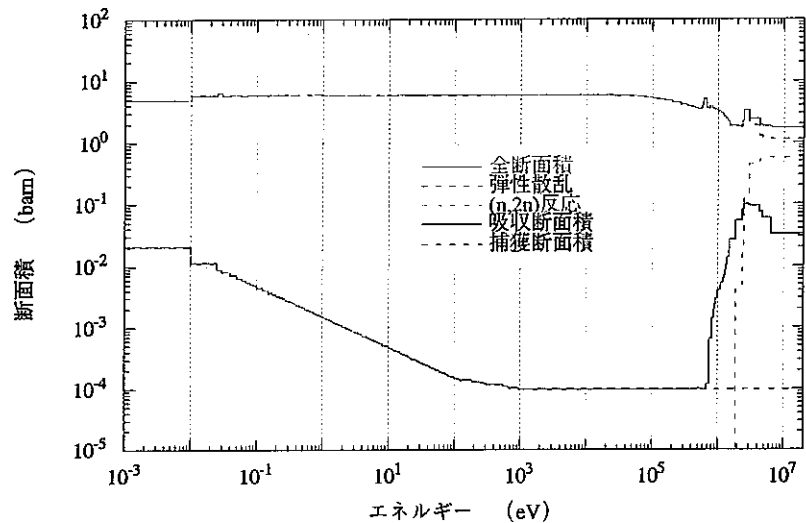
ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}3	300.0	0.043338	0.038583
PD{G,L}5A{1,4}3	600.0	0.039810	0.032571
PD{G,L}5A{3,6}3	900.0	0.037226	0.028703
PD{G,L}5A{4,7}3	1200.0	0.035237	0.025807
PD{G,L}5A{5,8}3	1500.0	0.033569	0.023450
PD{G,L}5A{6,9}3	1800.0	0.032098	0.021455
PD{G,L}5A{7,0}3	2000.0	0.031205	0.020279

$$\rho(T) = 1.0 - \frac{1}{k_{\text{eff}}(T)}$$

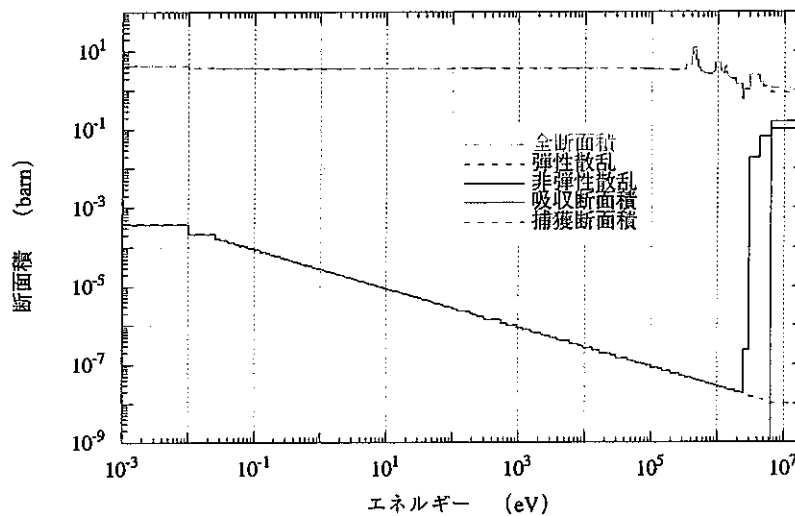
3) ドップラー反応度 $\rho_D(T)$ の算出結果

ケース名	温度 (K)	Gas炉取り出しPu炉心	軽水炉取り出しPu炉心
PD{G,L}5A{2,5}3	300.0	0.00000	0.00000
PD{G,L}5A{1,4}3	600.0	-0.00353	-0.00601
PD{G,L}5A{3,6}3	900.0	-0.00611	-0.00988
PD{G,L}5A{4,7}3	1200.0	-0.00810	-0.01278
PD{G,L}5A{5,8}3	1500.0	-0.00977	-0.01513
PD{G,L}5A{6,9}3	1800.0	-0.01124	-0.01713
PD{G,L}5A{7,0}3	2000.0	-0.01213	-0.01830

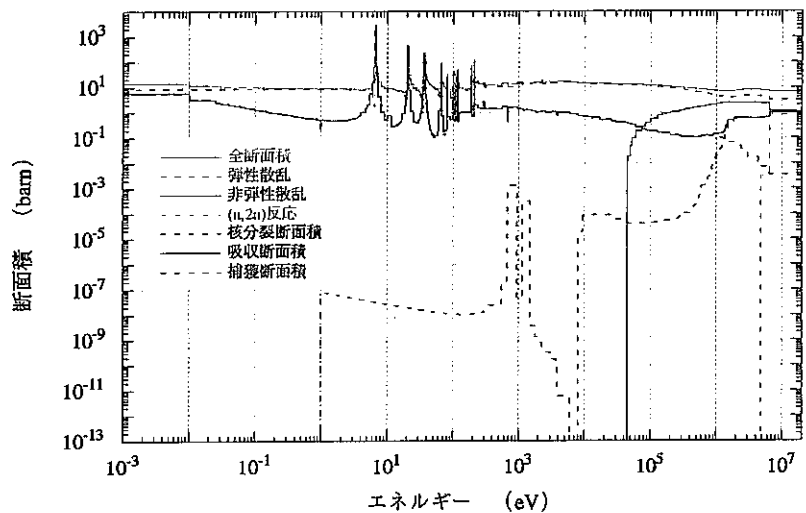
$$\rho_D(T) = \rho(T) - \rho(T_0) \quad T_0 = 300.0\text{K}$$



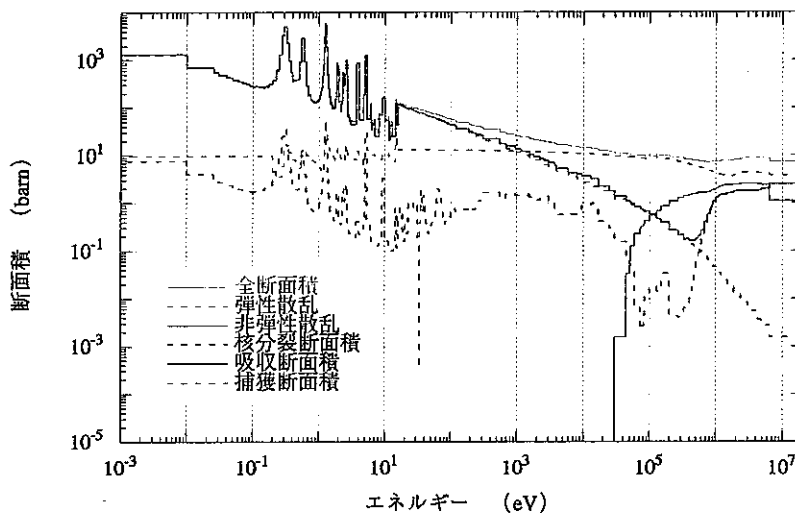
(1) ベリリウム (BE-9 ENDF/B-IV) <BE:4009>



(2) 酸素 (OXYGEN-16 ENDF/B-IV MAT 1276) <O:8016>

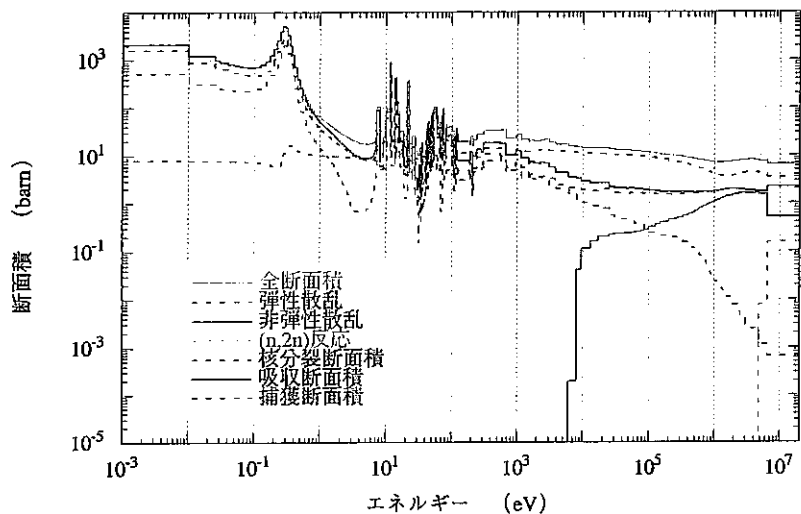


(3) ウラン-238 (ENDF/B-IV MAT 1262) <U-238:92238>

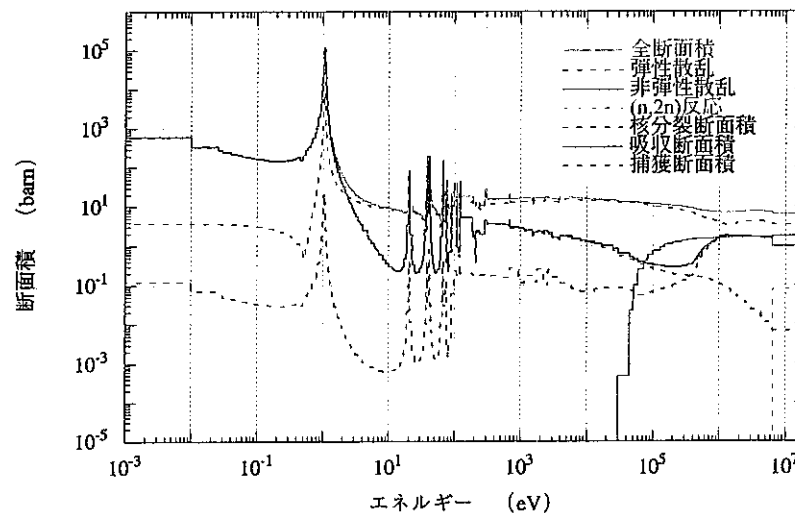


(4) アメニウム-241 (1056 P-3 293K) <AM-241:95241>

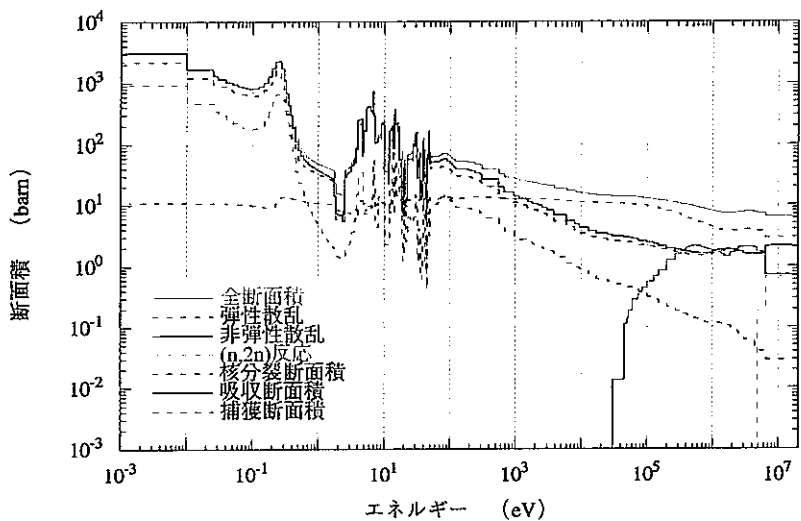
図2.1 各核種の無限希釈断面積 (1/2)



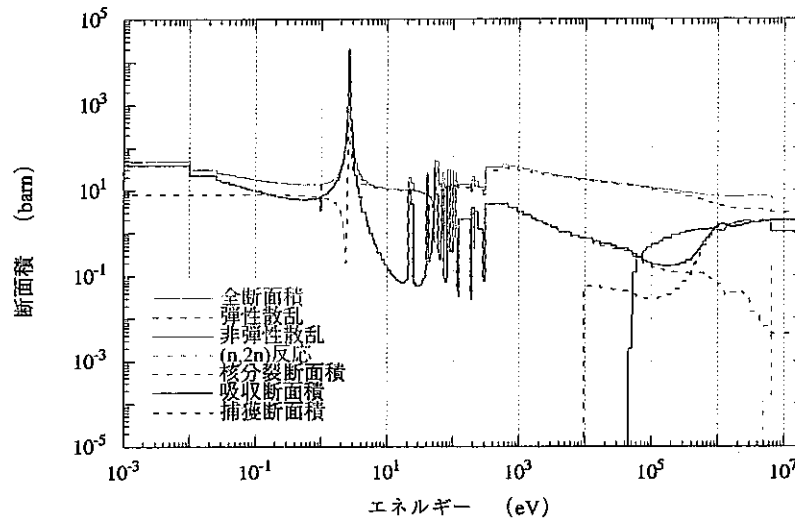
(5) プルトニウム-239 (ENDF/B-IV MAT 1264) <PU-239:94239>



(6) プルトニウム-240 (ENDF/B-IV MAT 1265) <PU-240:94240>

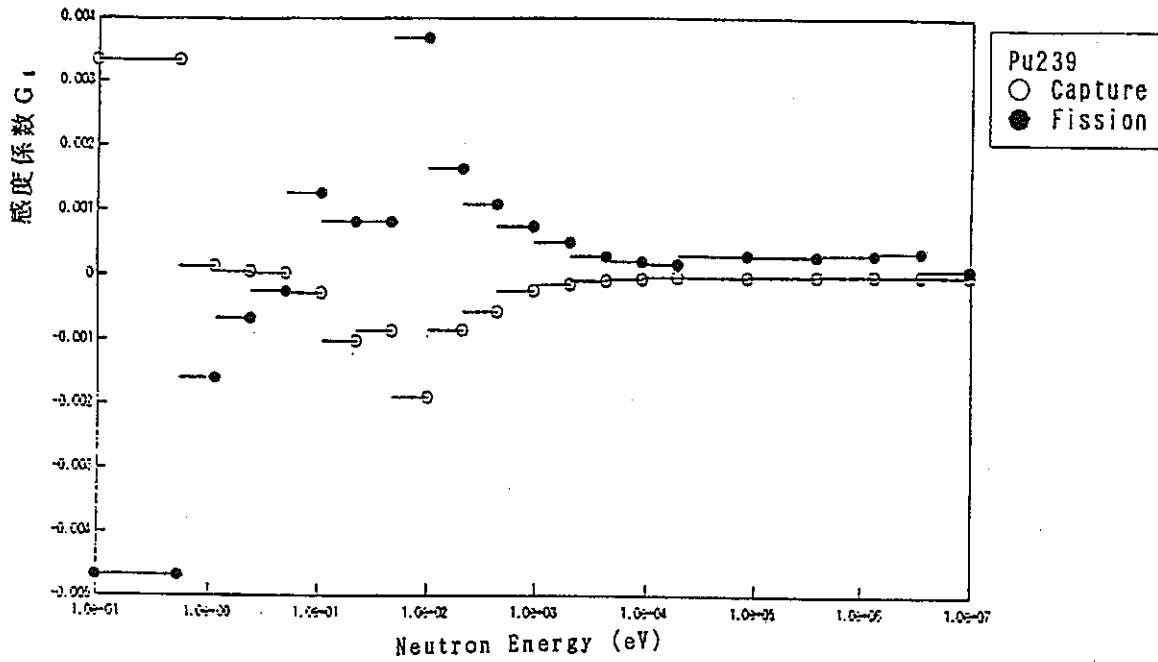


(7) プルトニウム-241 (ENDF/B-IV MAT 1266) <PU-241:94241>

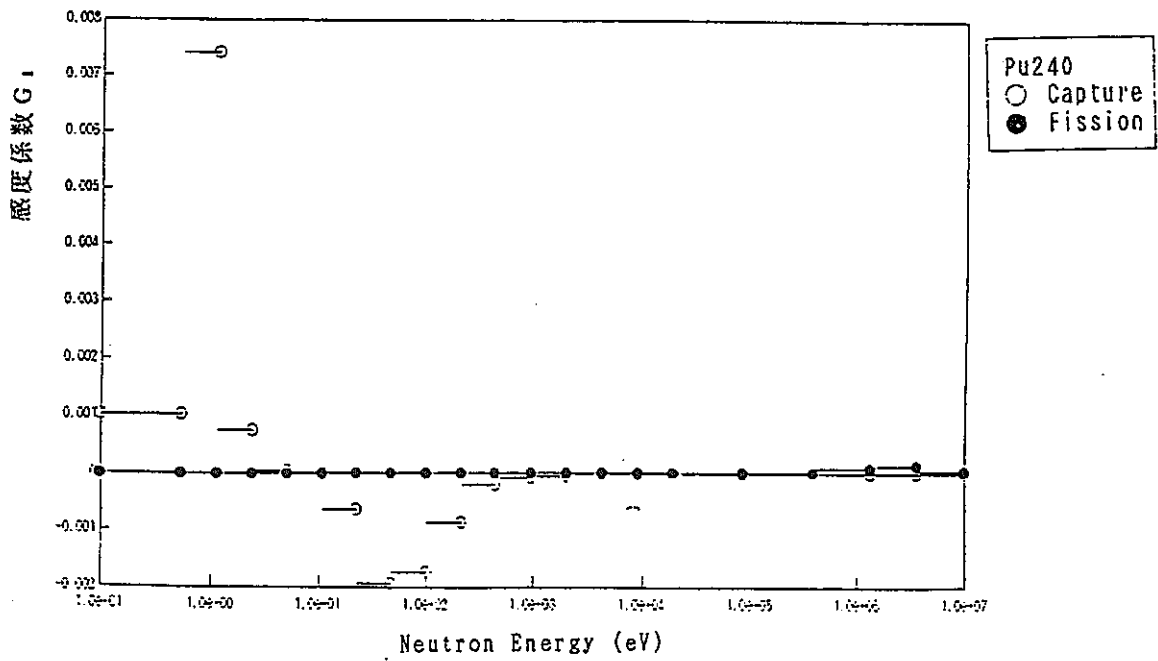


(8) プルトニウム-242 (ENDF/B-IV MAT 1161) <PU-242:94242>

図2.2 各核種の無限希釈断面積 (2/2)



(1) ^{239}Pu 捕獲及び核分裂断面積



(2) ^{240}Pu 捕獲及び核分裂断面積

図 2.3 ドップラー反応度 (燃料温度:600K→1500K) に対する感度係数

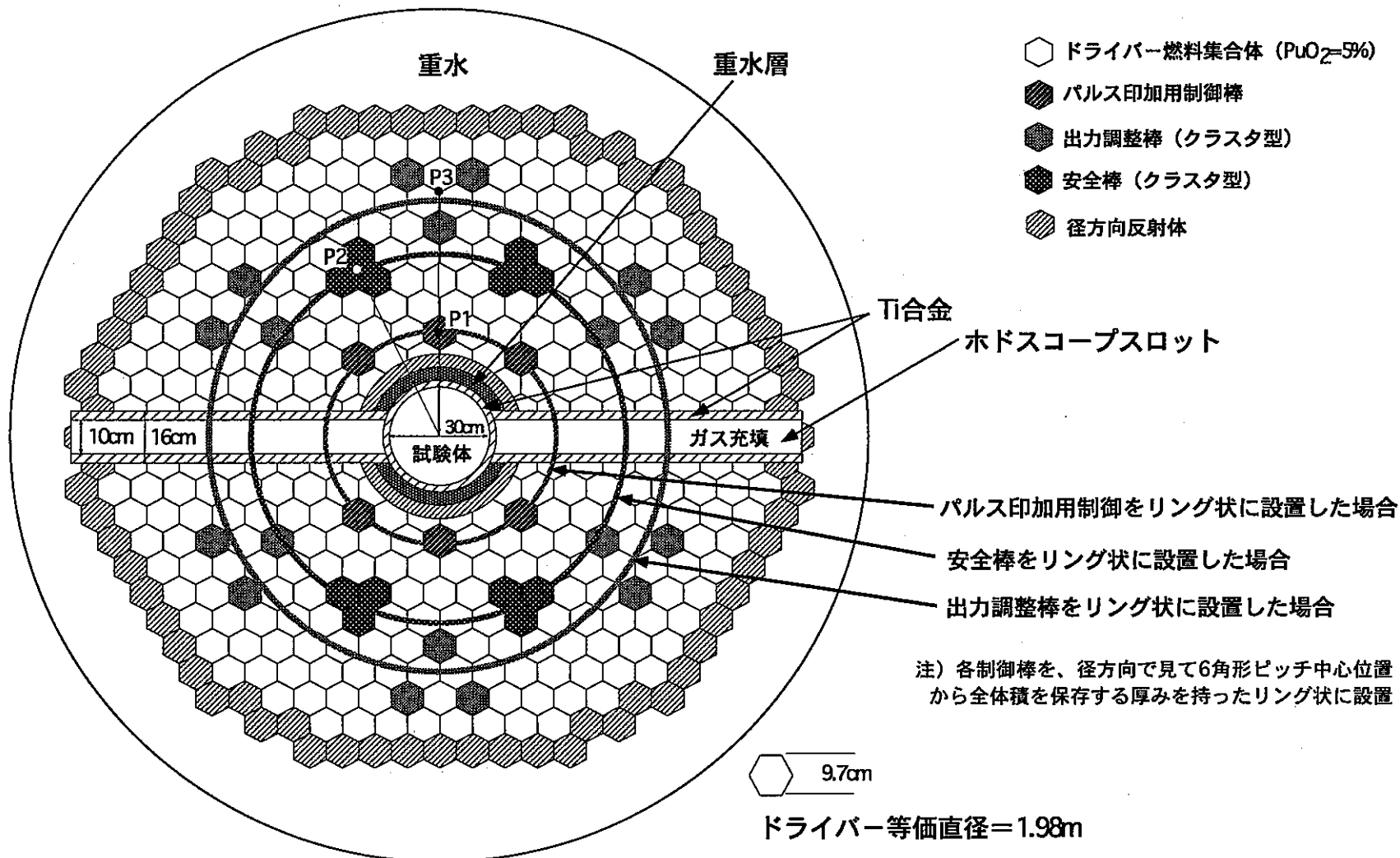


図3.1 重水冷却SERAPH炉心の炉心構成水平断面図

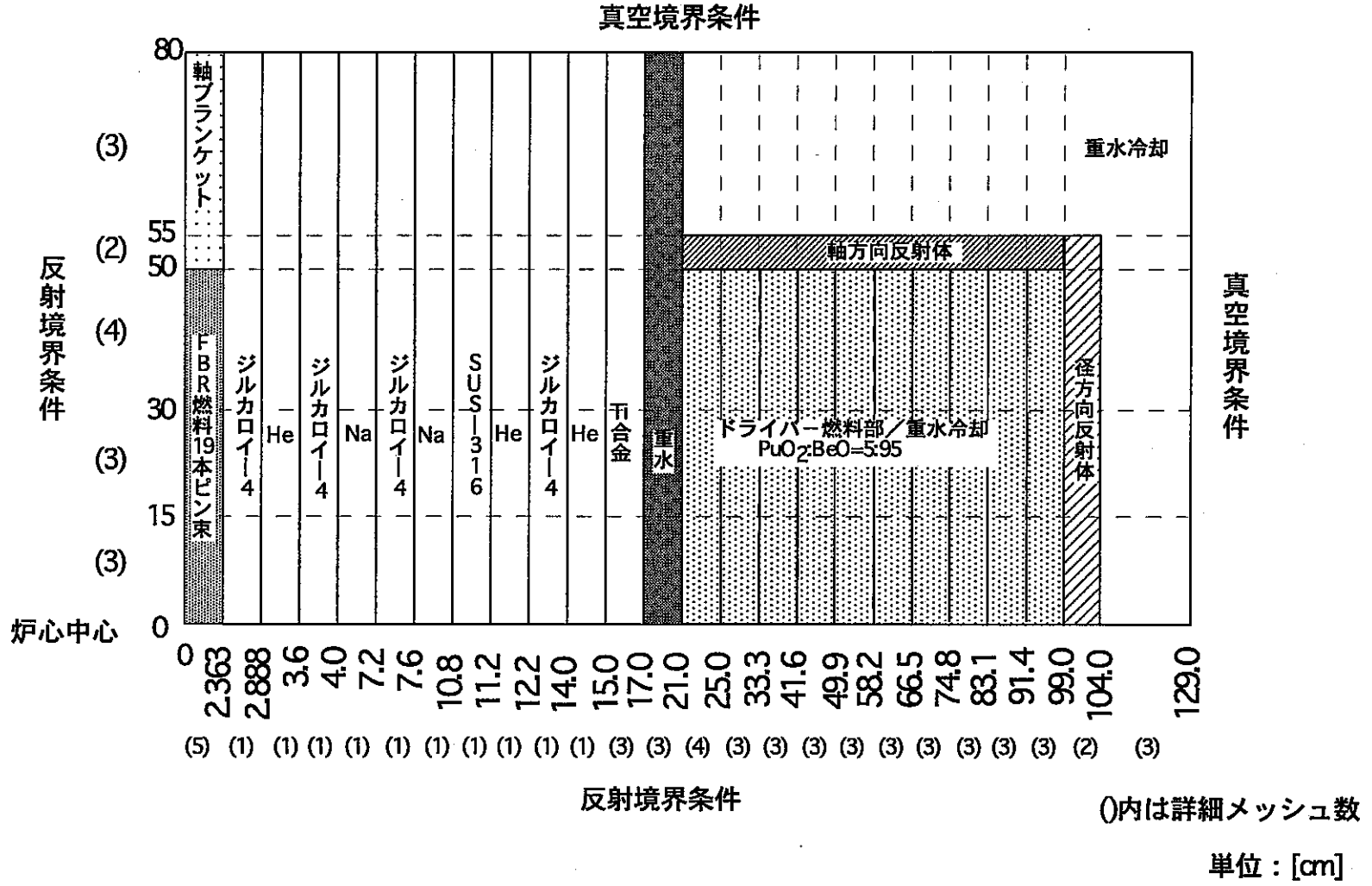


図3.2 ドップラー係数算出用重水冷却SERAPH炉心2次元RZ計算体系図
(Gas-Pu炉心、LWR-Pu炉心に共通)

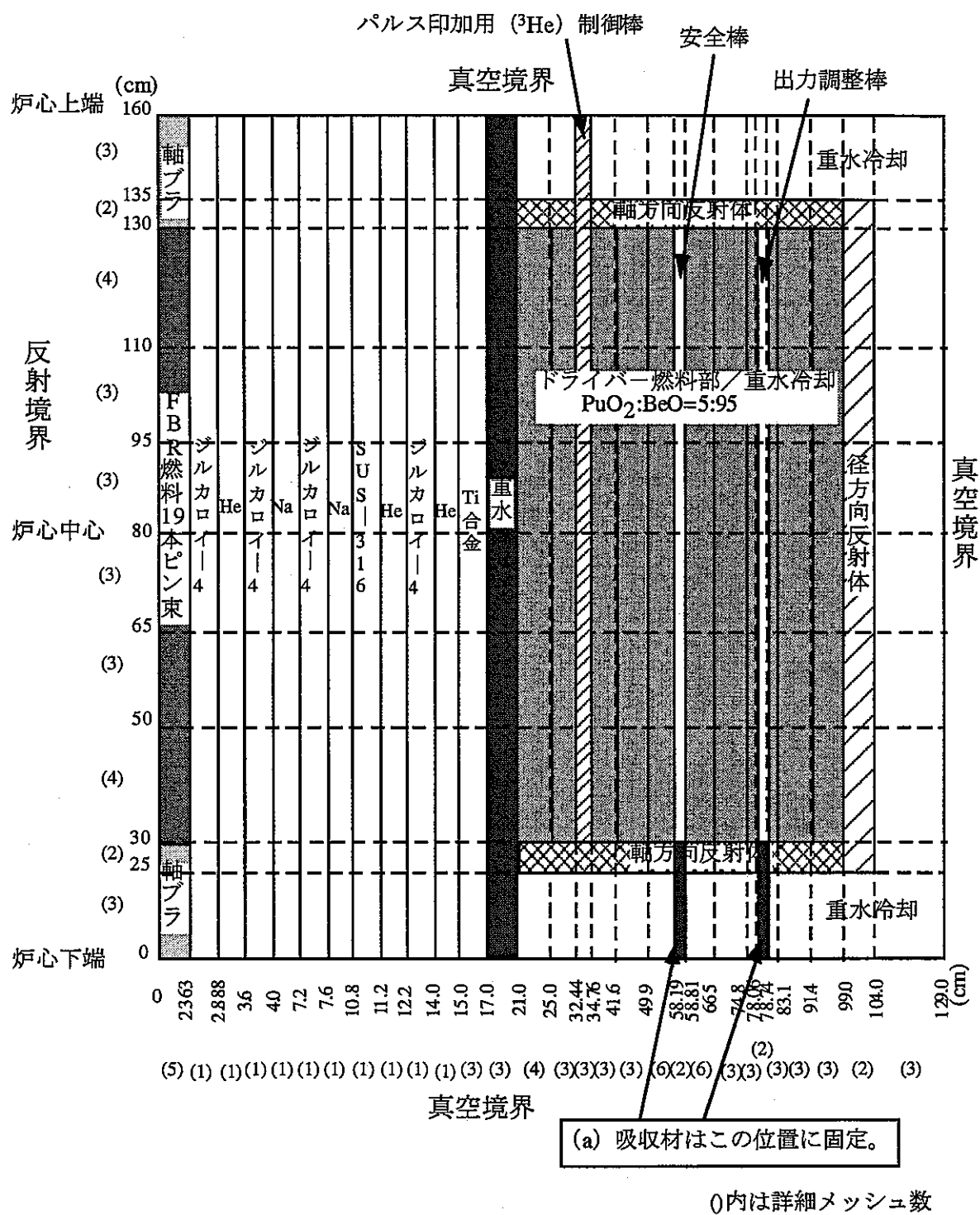
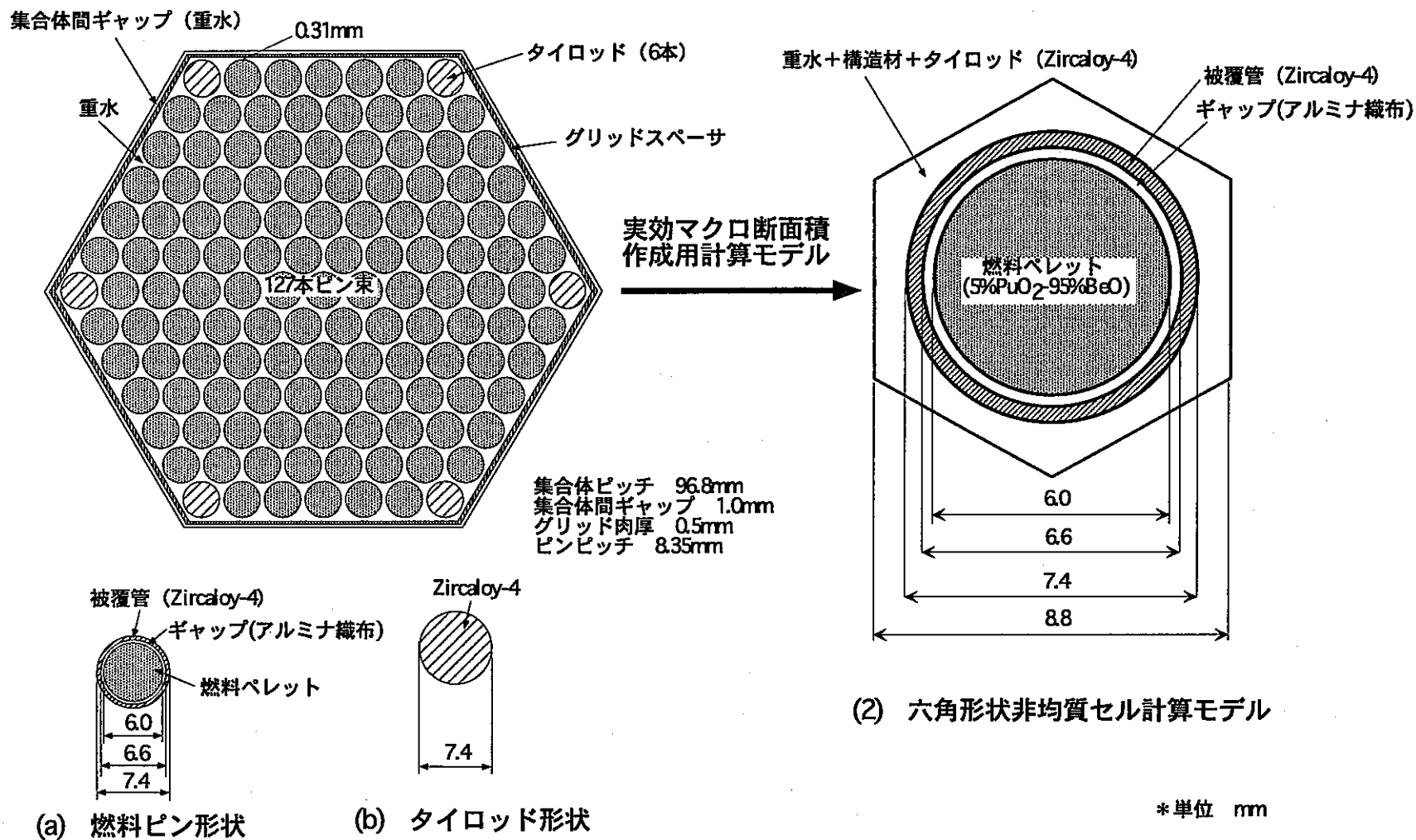


図 3.3 各制御棒の存在を考慮したドップラー係数算出用
2次元 RZ 計算体系図



(1) ドライバー燃料集合体の水平断面図

図3.4 ドライバー燃料集合体の水平断面図及びセル計算モデル

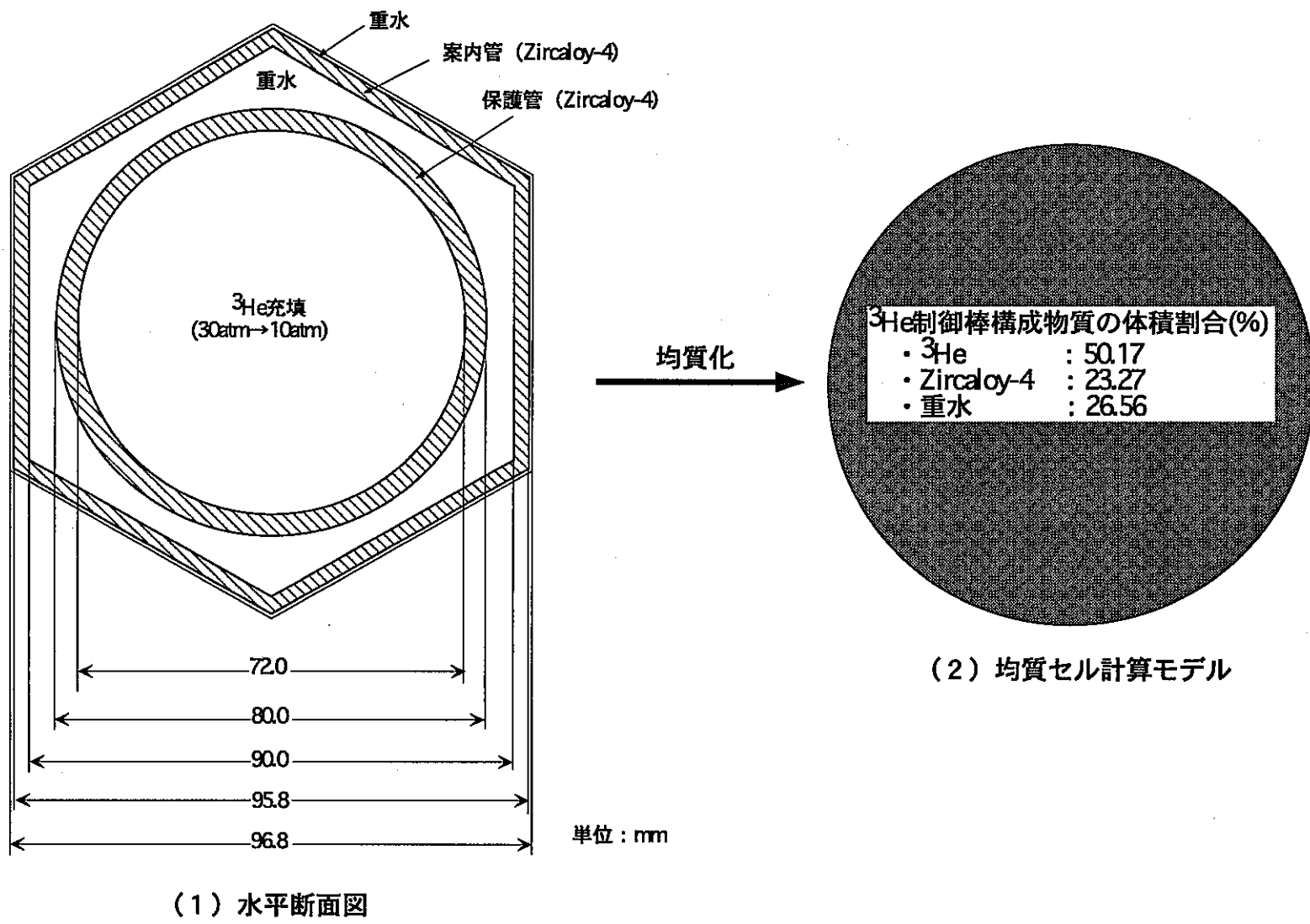


図3.5 パルス印加用制御棒 (^3He 圧力型) の水平断面図及び均質セル計算モデル

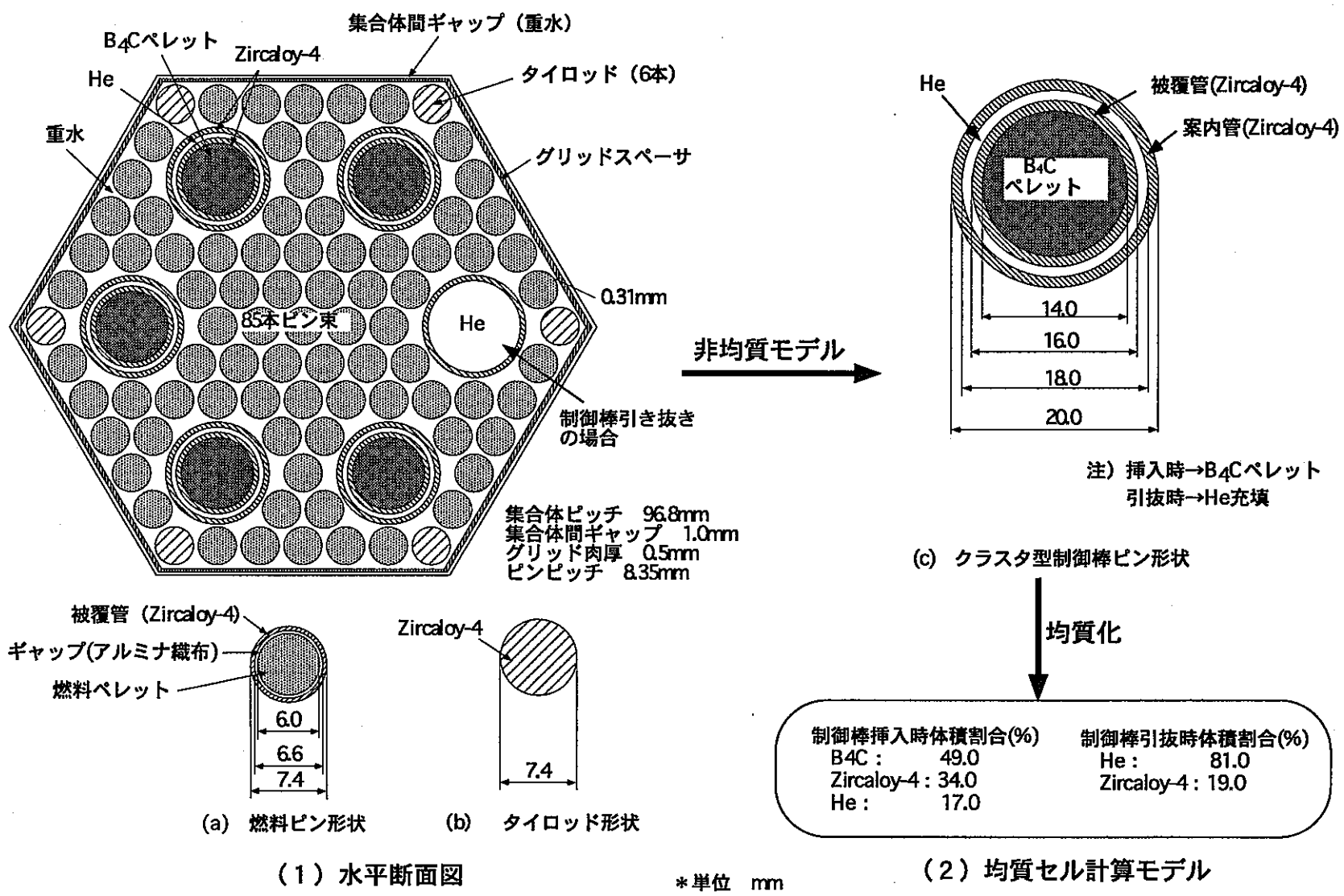


図3.6 安全棒・出力調整棒 (クラスタ型) の水平断面図及び均質セル計算モデル

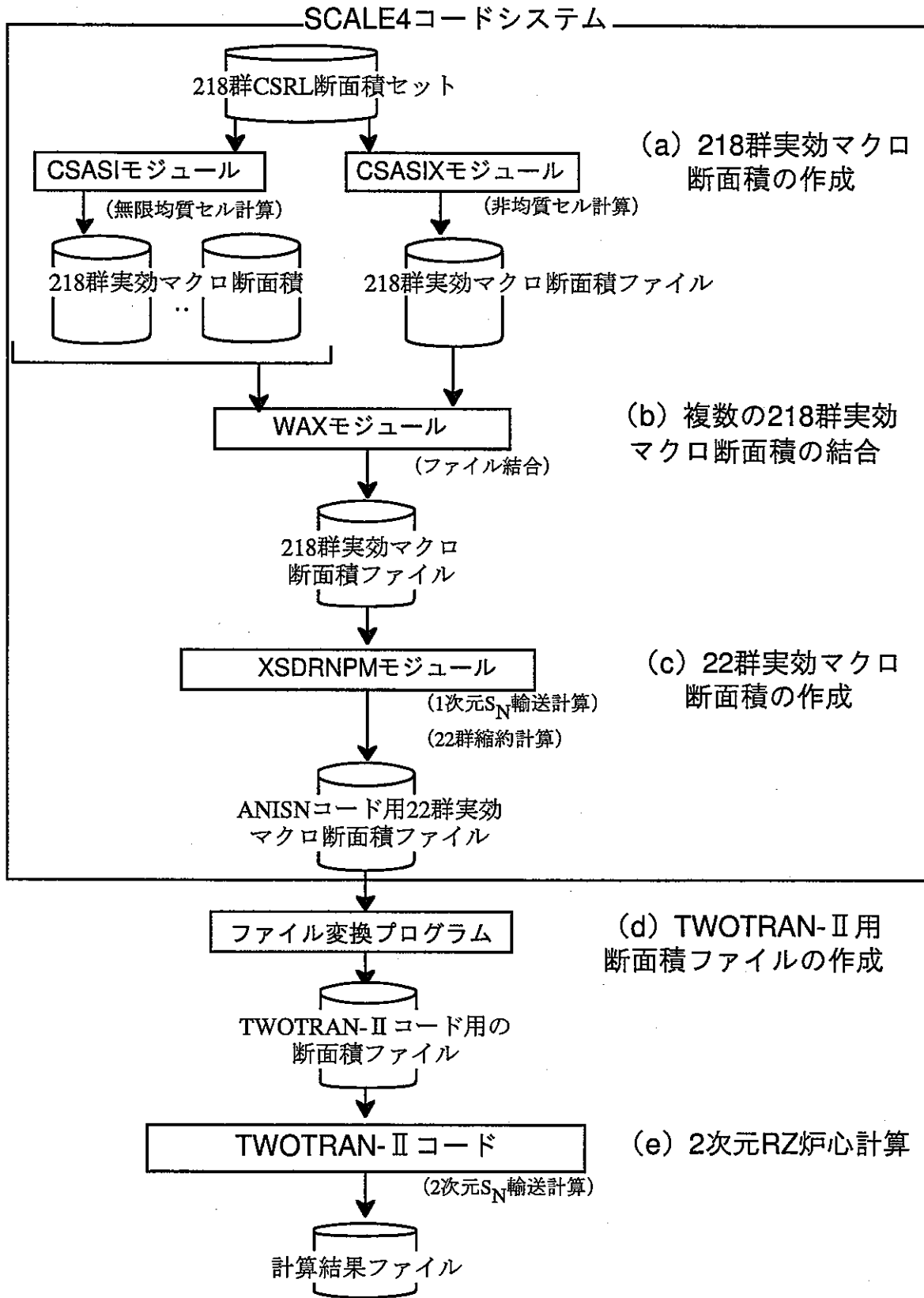
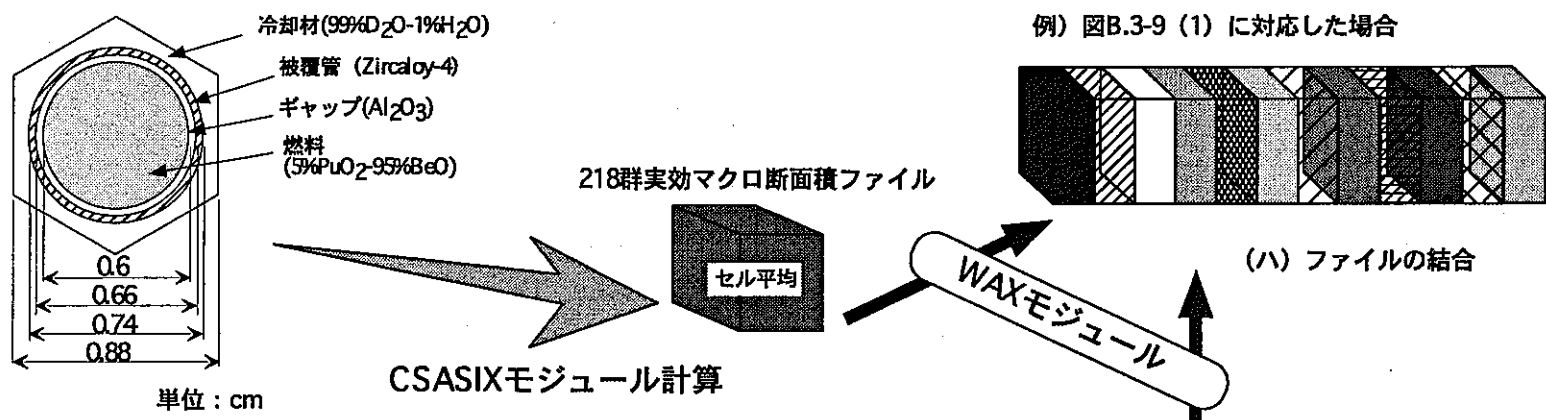


図 3.7 計算フロー



(ロ) ドライバー炉心の六角形状非均質セル体系

- | | | |
|---------------------|---------------------|-------------|
| | | |
| FBR 19本ピン束 | Zircaloy-4 (温度708K) | He (温度708K) |
| | | |
| Na (温度708K) | SUS-316 (温度708K) | He (温度320K) |
| | | |
| Zircaloy-4 (温度320K) | Ti合金 (温度320K) | 重水 (温度320K) |
| | | |
| 径方向反射体 (温度320K) | 炉心外側重水 (温度320K) | パルス印加用制御棒 |
| | | |
| 安全棒・出力調整棒 | 軸方向反射体 (温度320K) | 軸ブランケット |

(イ) 無限均質セル体
 <ドライバー炉心を除く物質>

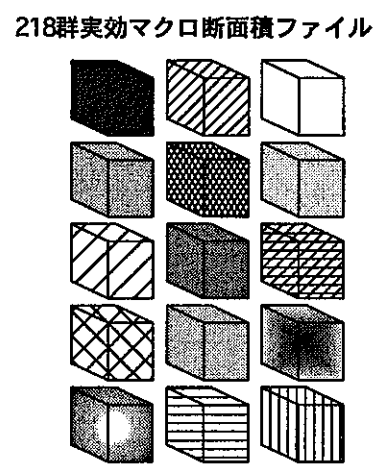
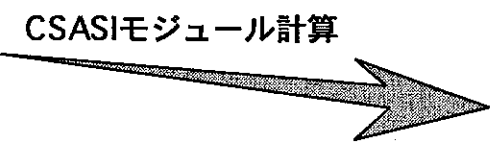
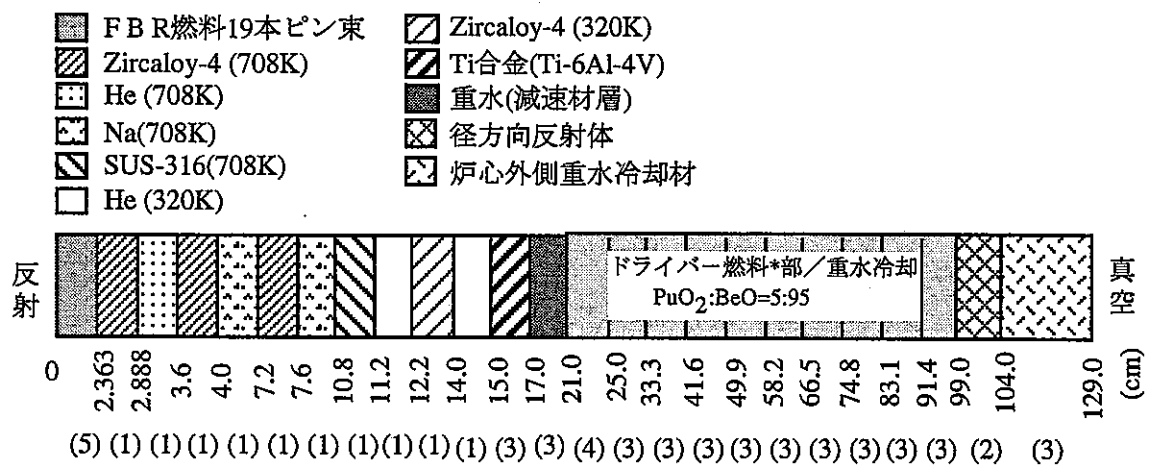


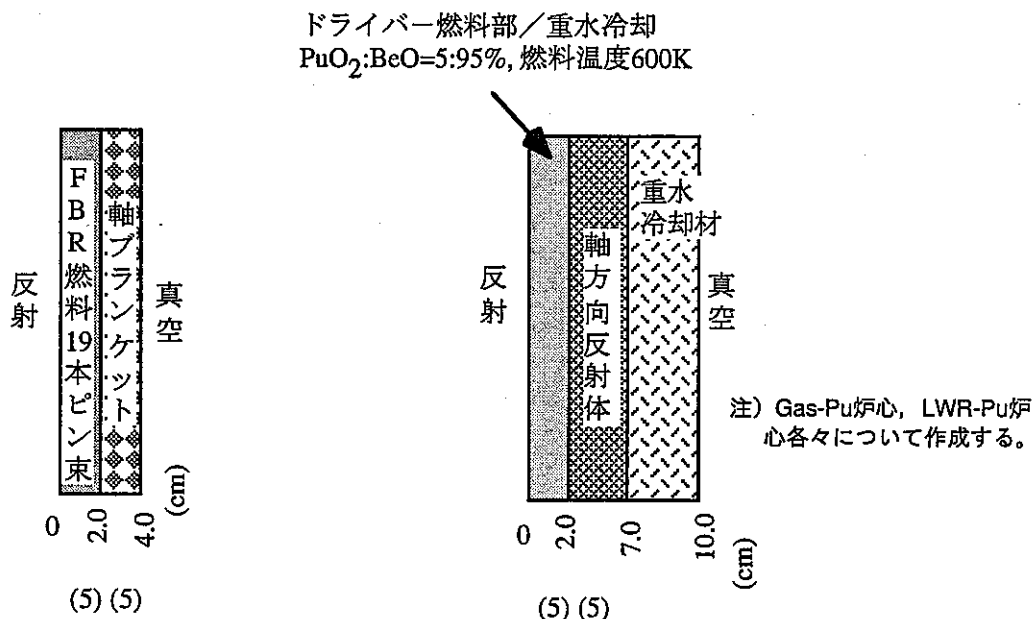
図3.8 218群実効マクロ断面積の作成方法



()内は詳細メッシュ数

*:計算条件に応じて、変更する。

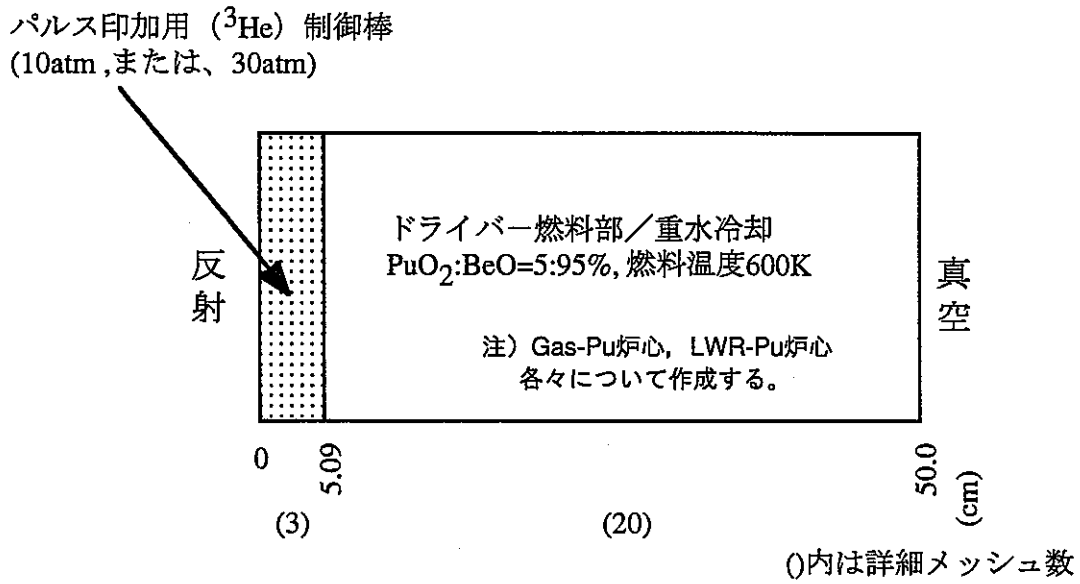
(1) 2次元RZ計算における径方向各領域に対応した体系



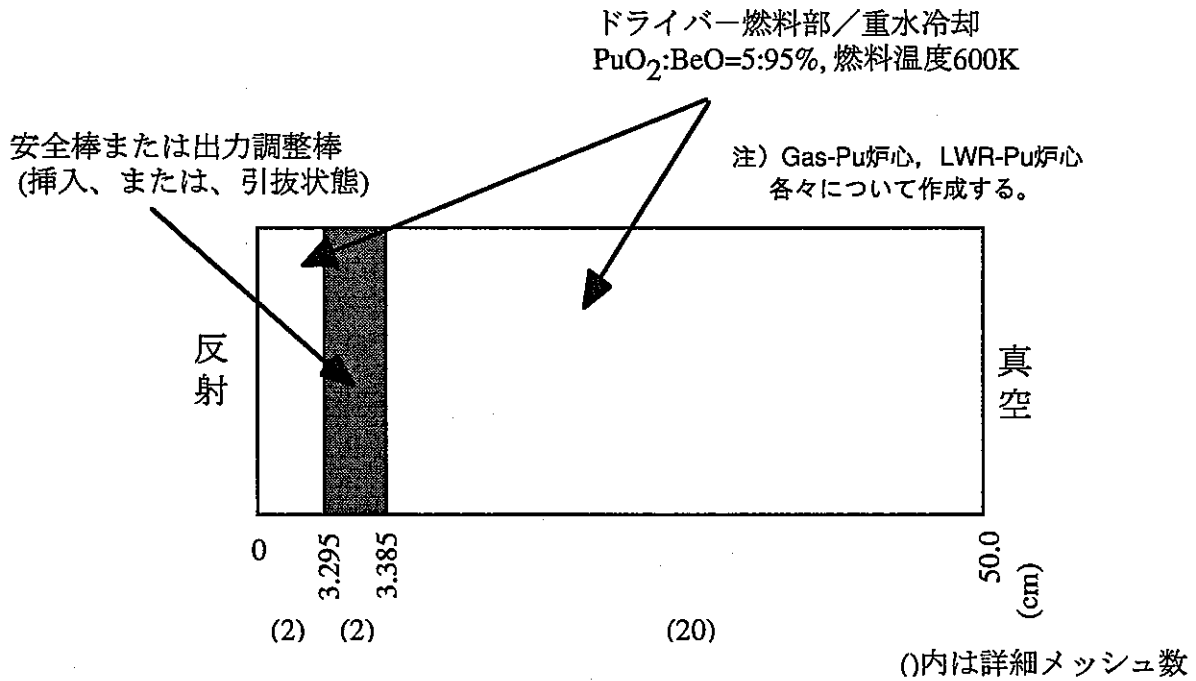
(2) 軸ブランケット
 に対応した体系

(3) 軸方向反射体
 に対応した体系

図 3.9 制御棒以外の領域における 1次元群縮約計算体系
 (Gas-Pu 炉心, LWR-Pu 炉心に共通)



(4) パルス印加用 (^3He) 制御棒に対応した体系



(5) 安全棒及び出力調整棒(挿入,引抜状態)に対応した体系

図 3.10 各種制御棒における 1次元群縮約計算体系
(Gas-Pu 炉心, LWR-Pu 炉心に共通)

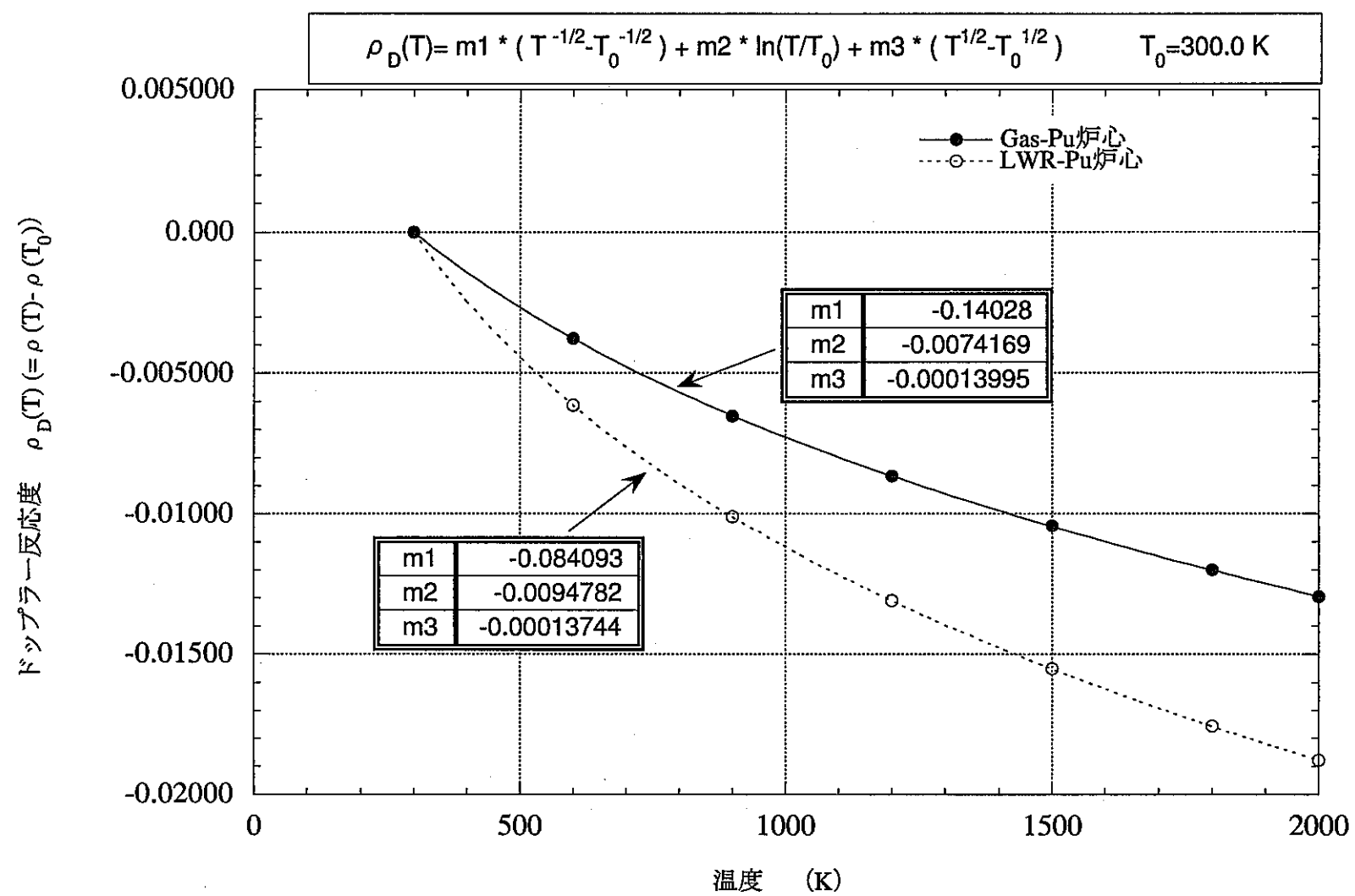


図4.1 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含まない炉心条件)

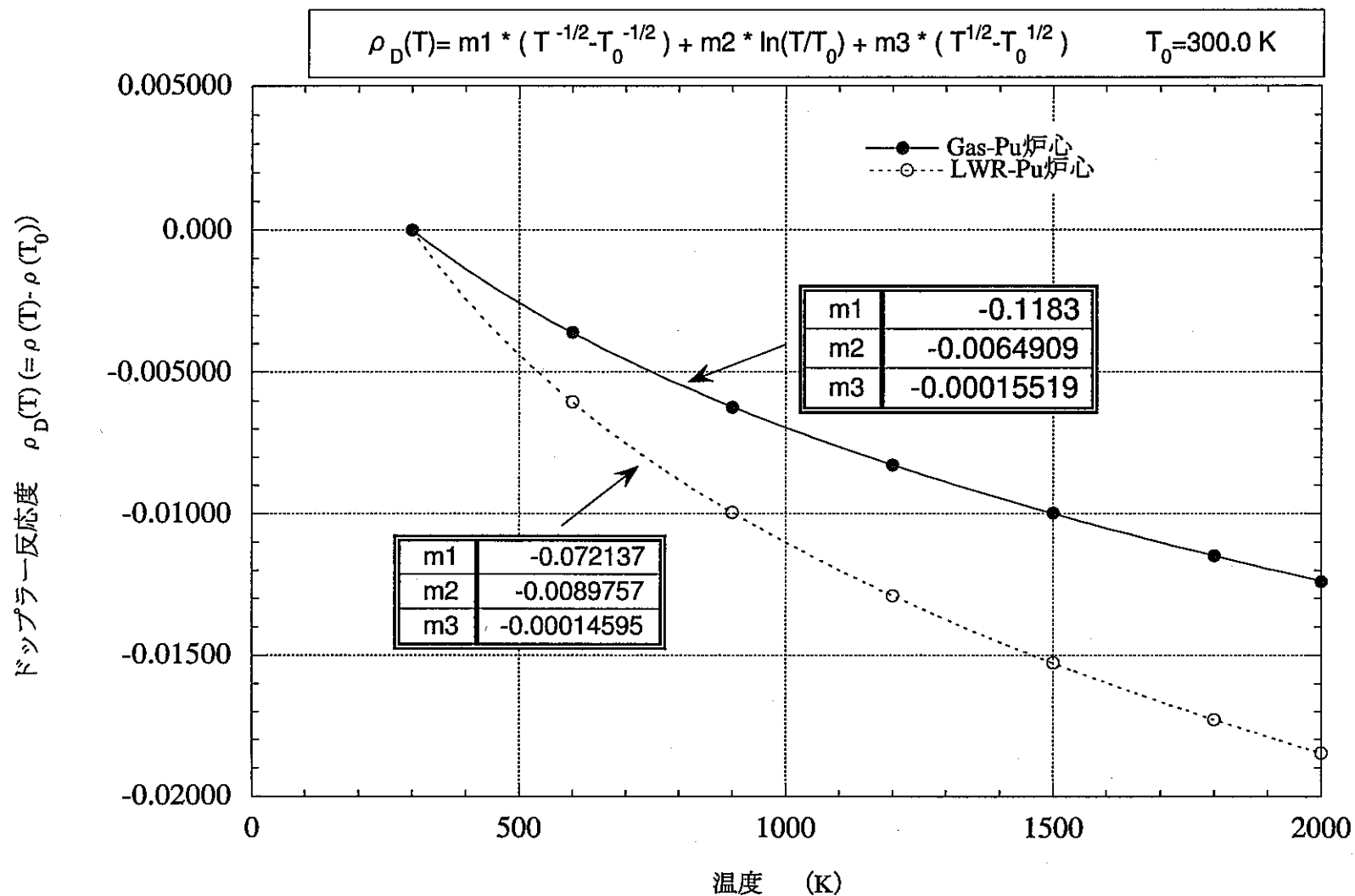


図4.2 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含む³He 10atm炉心体系)

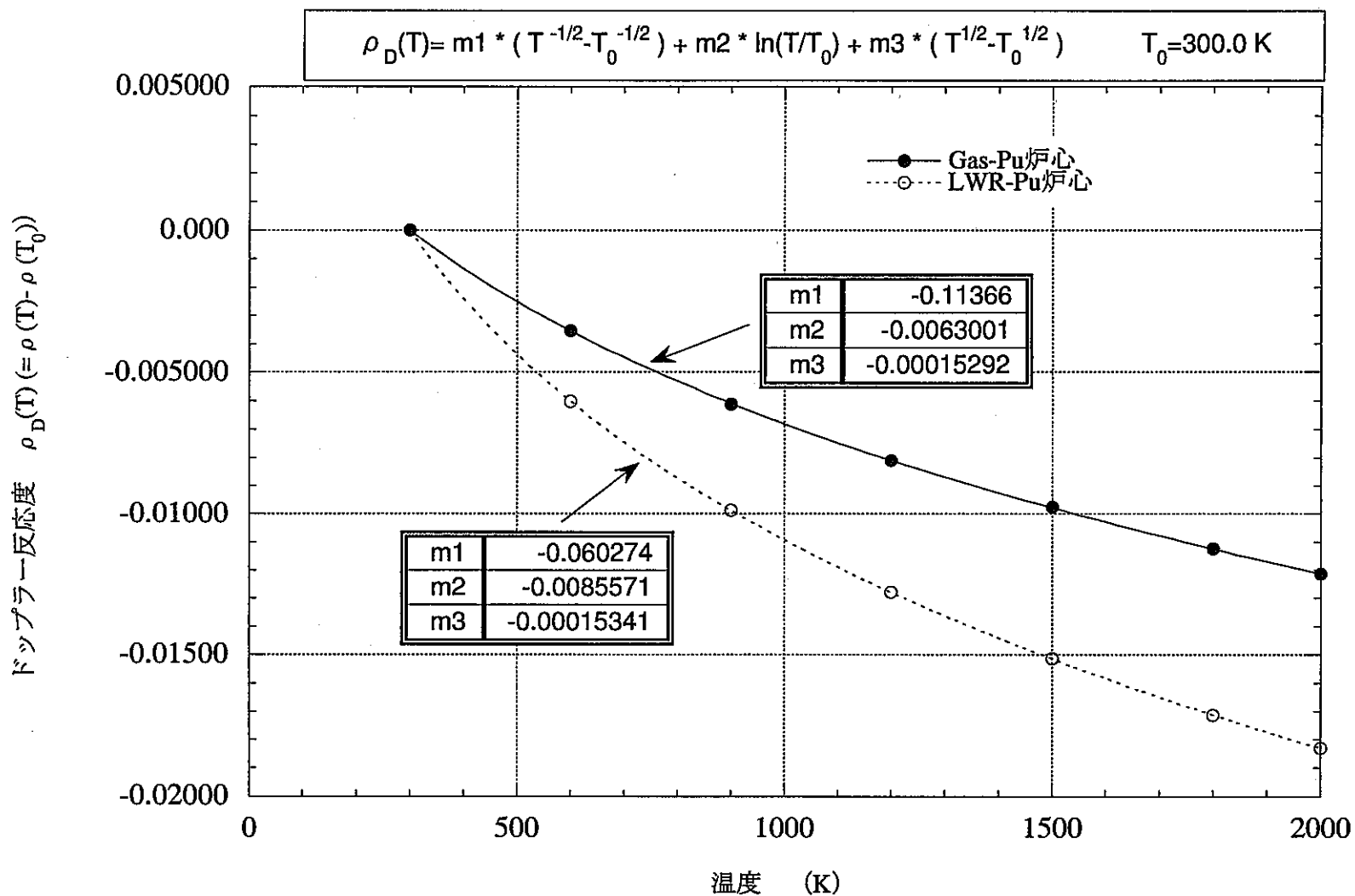
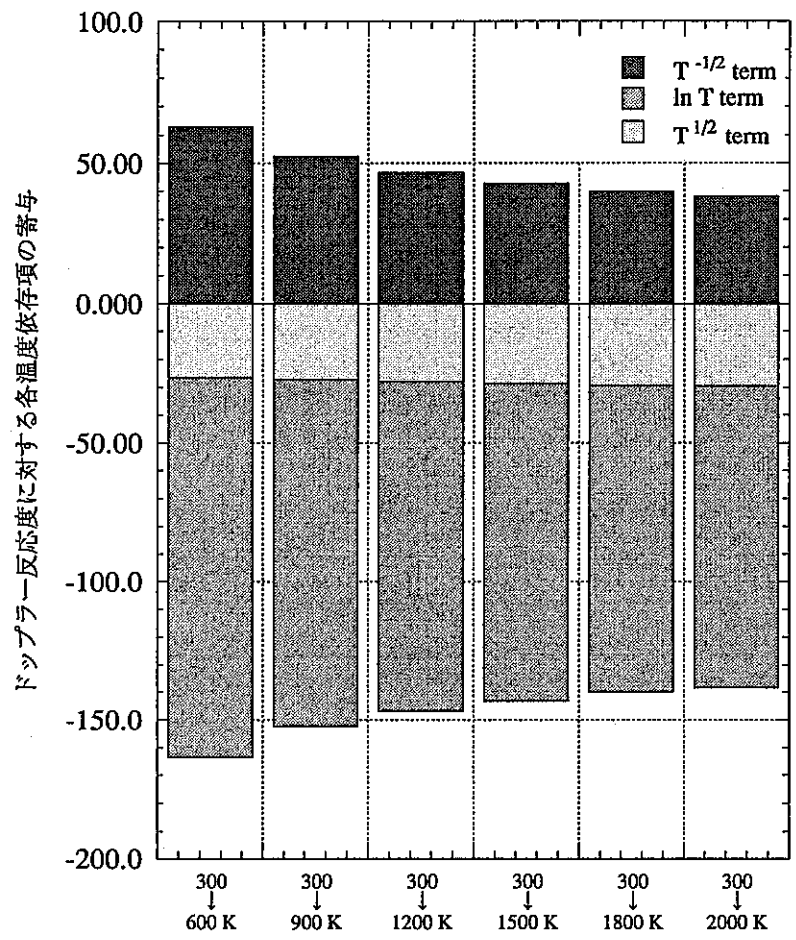
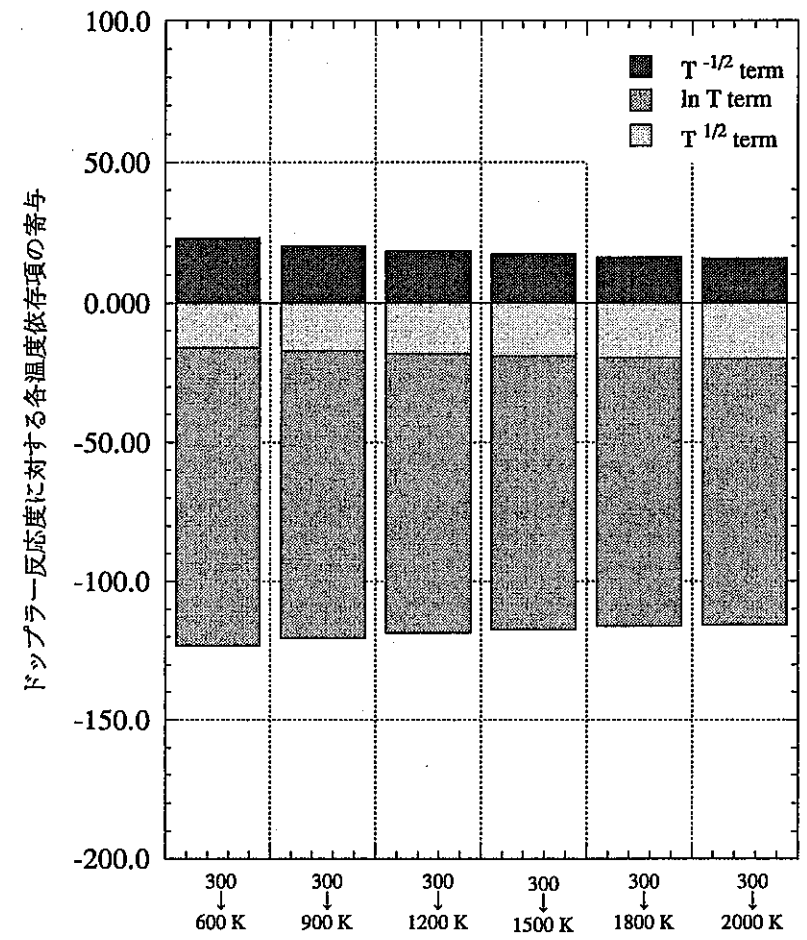


図4.3 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の温度依存性
(制御棒を含む³He 30atm炉心体系)



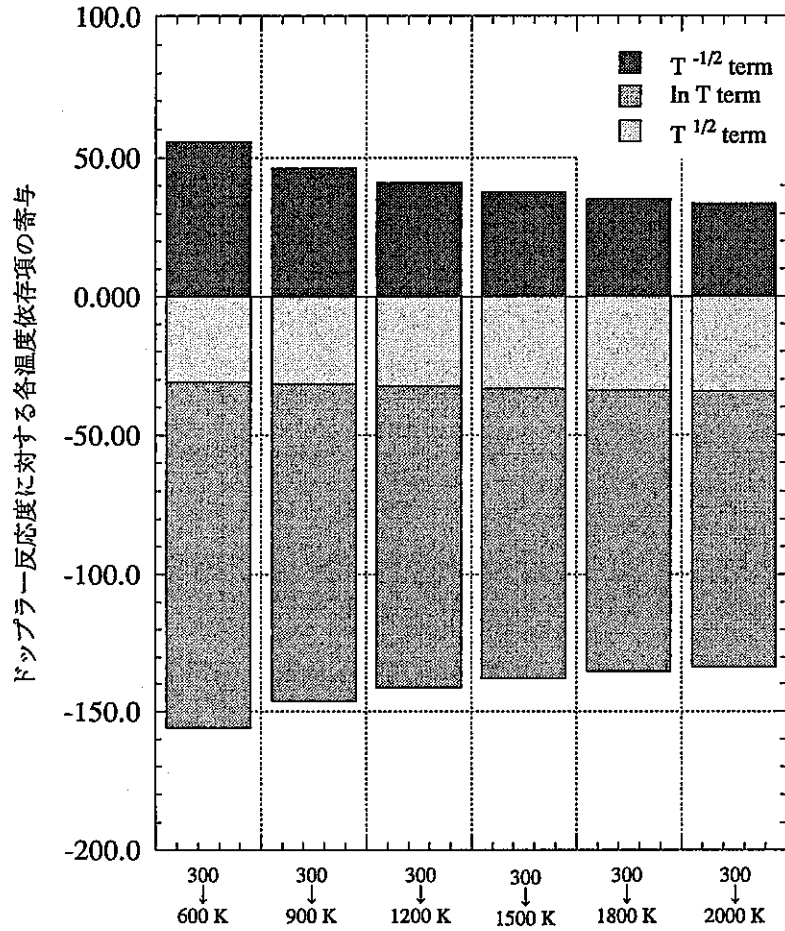
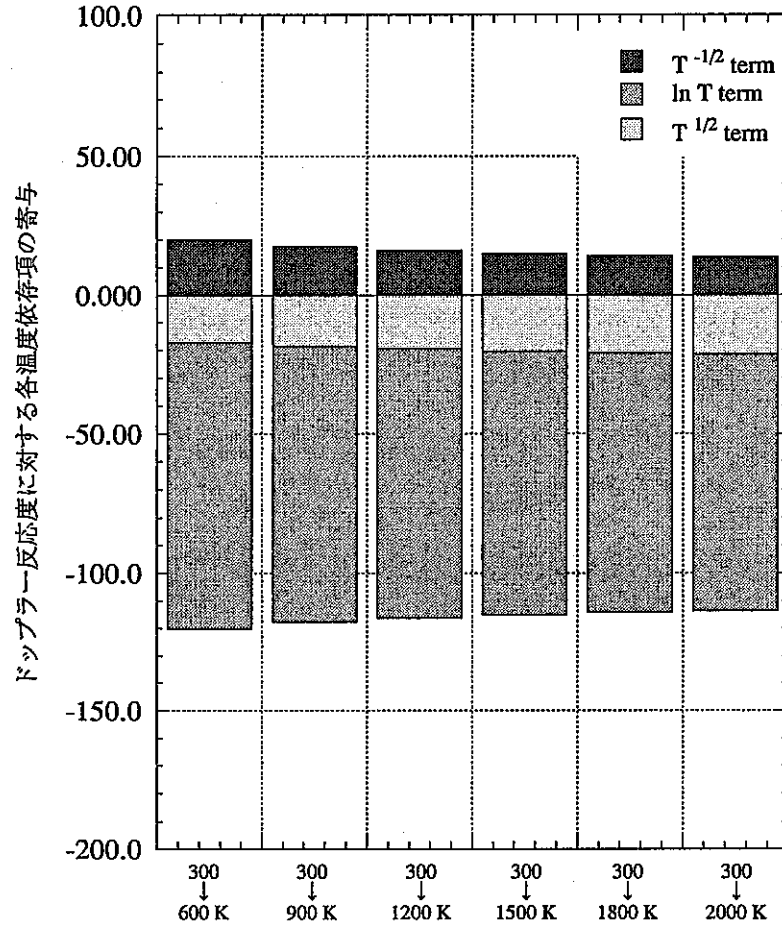
(1) Gas-Pu炉心(制御棒無)



(2) LWR-Pu炉心(制御棒無)

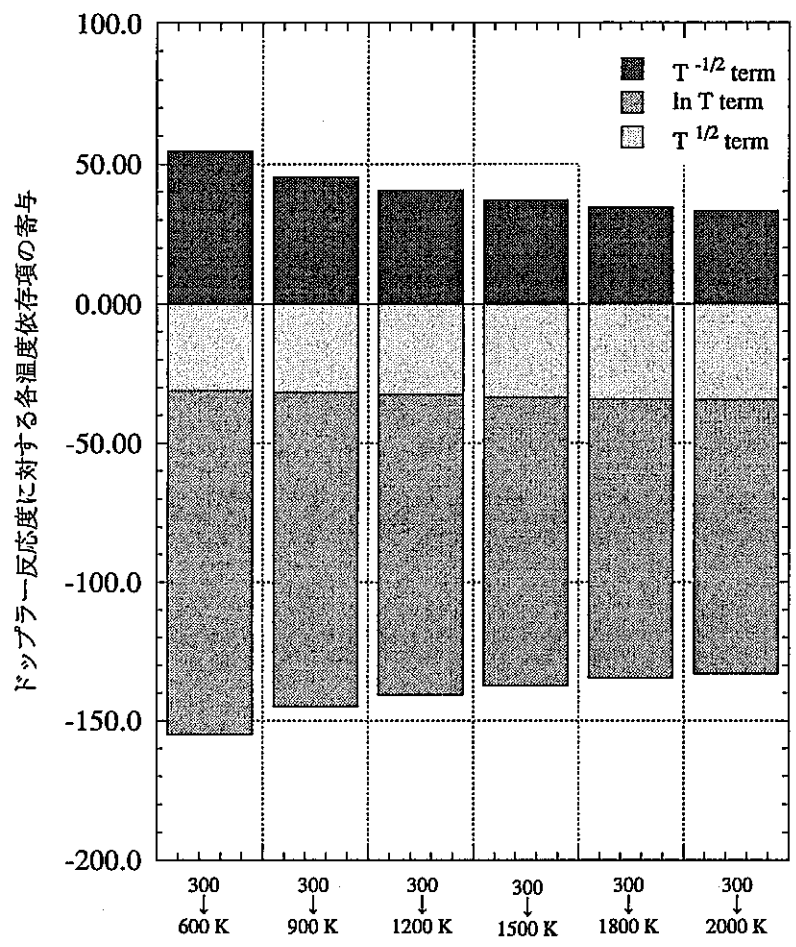
規格化条件：3項の総和=-100

図4.4 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与 (制御棒を含まない炉心体系)

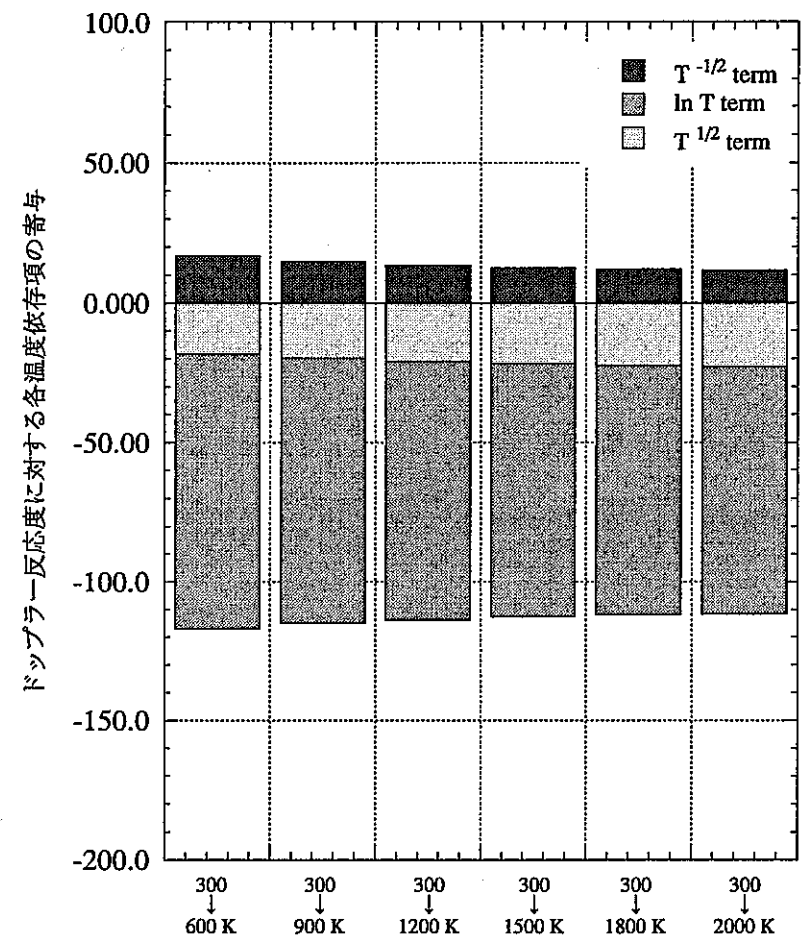
(1) Gas-Pu炉心(制御棒含, ^3He 10atm)(2) LWR-Pu炉心(制御棒含, ^3He 10atm)

規格化条件：3項の総和=-100

図4.5 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与
(制御棒を含む ^3He 10atm炉心体系)



(1) Gas-Pu炉心(制御棒含,³He 30atm)



(2) LWR-Pu炉心(制御棒含,³He 30atm)

規格化条件：3項の総和=-100

図4.6 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドップラー反応度の各温度依存項の寄与 (制御棒を含む³He 30atm炉心体系)

単位レサジー当りのドライバ領域平均相対中性子束

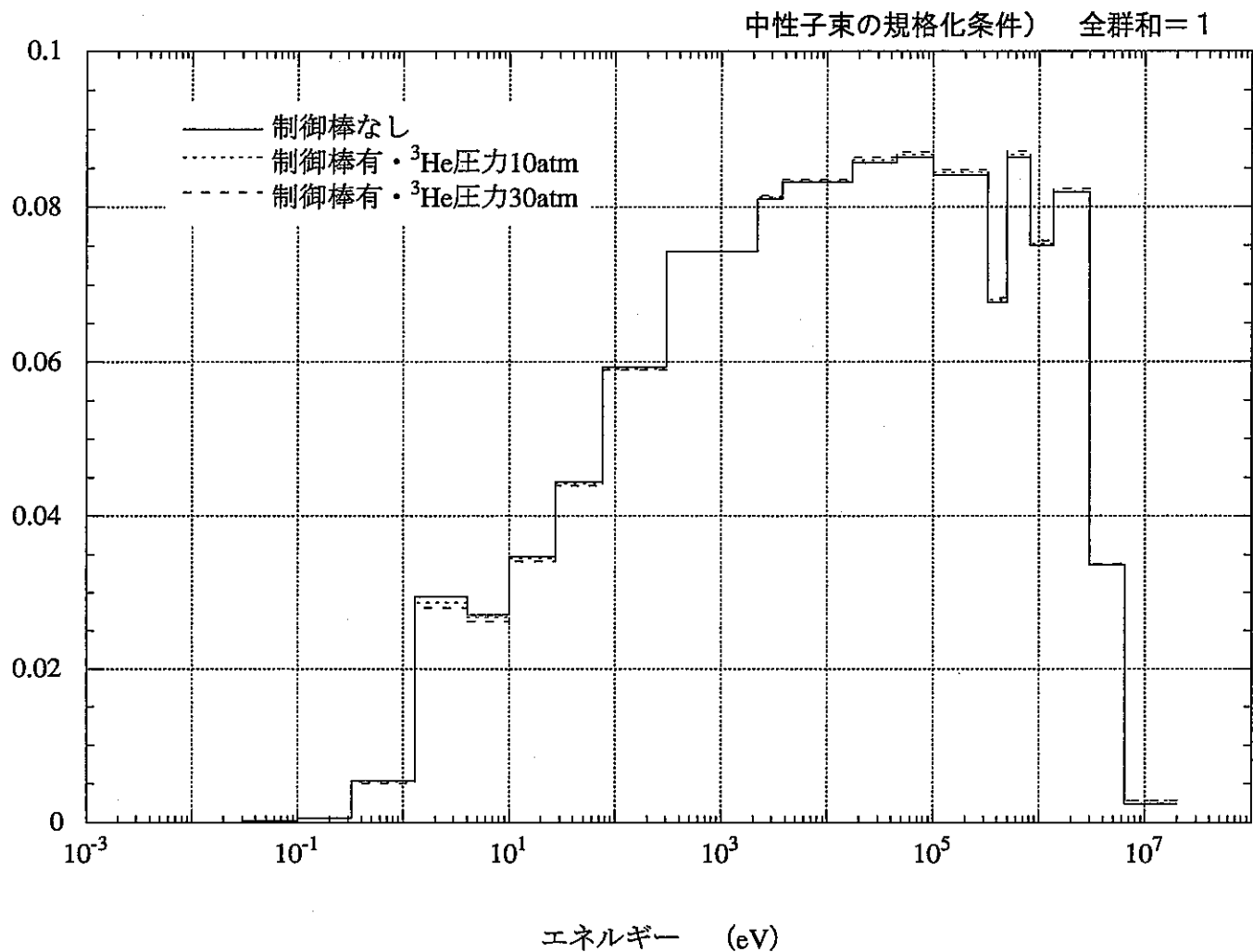


図4.7 制御棒の有無によるドライバ領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(Gas-Pu炉心：ドライバ炉心燃料温度300K)

単位レサジー当りのドライバークル領域平均相対中性子束

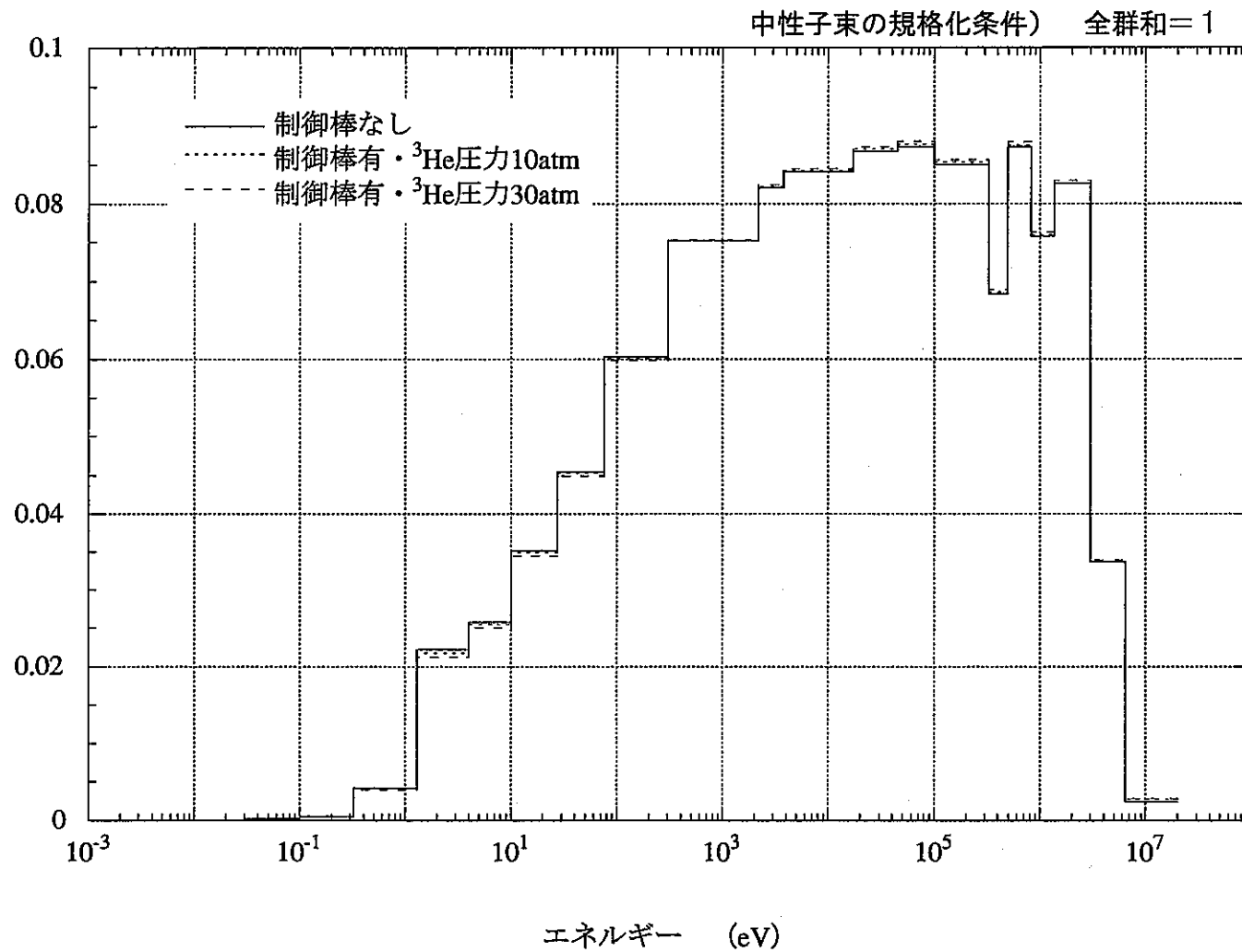


図4.8 制御棒の有無によるドライバークル領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(LWR-Pu炉心：ドライバークル燃料温度300K)

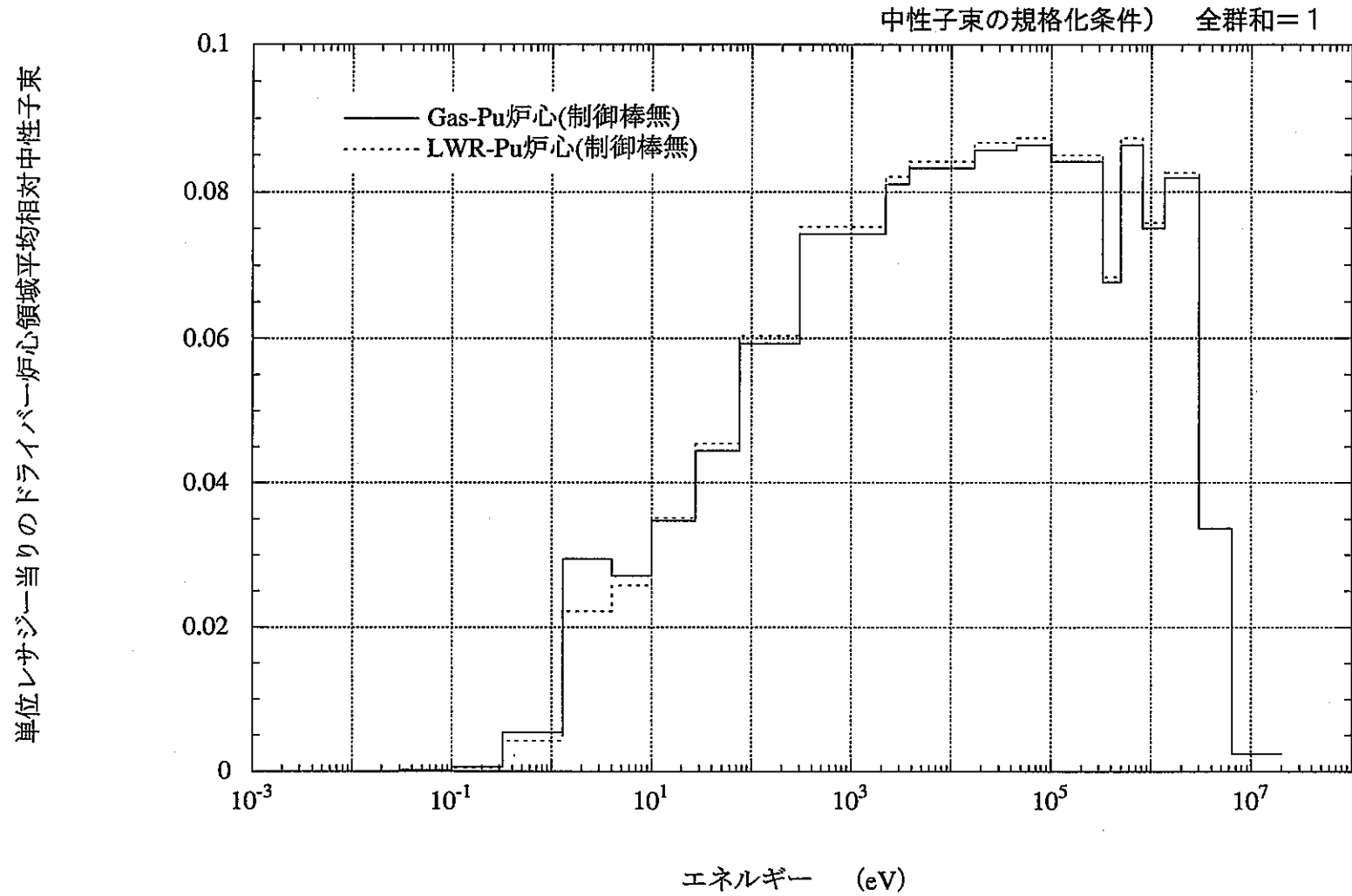


図4.9 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(制御棒を含まない炉心体系：ドライバー炉心燃料温度300K)

単位レサジー当りのドライバー炉心領域平均相対中性子束

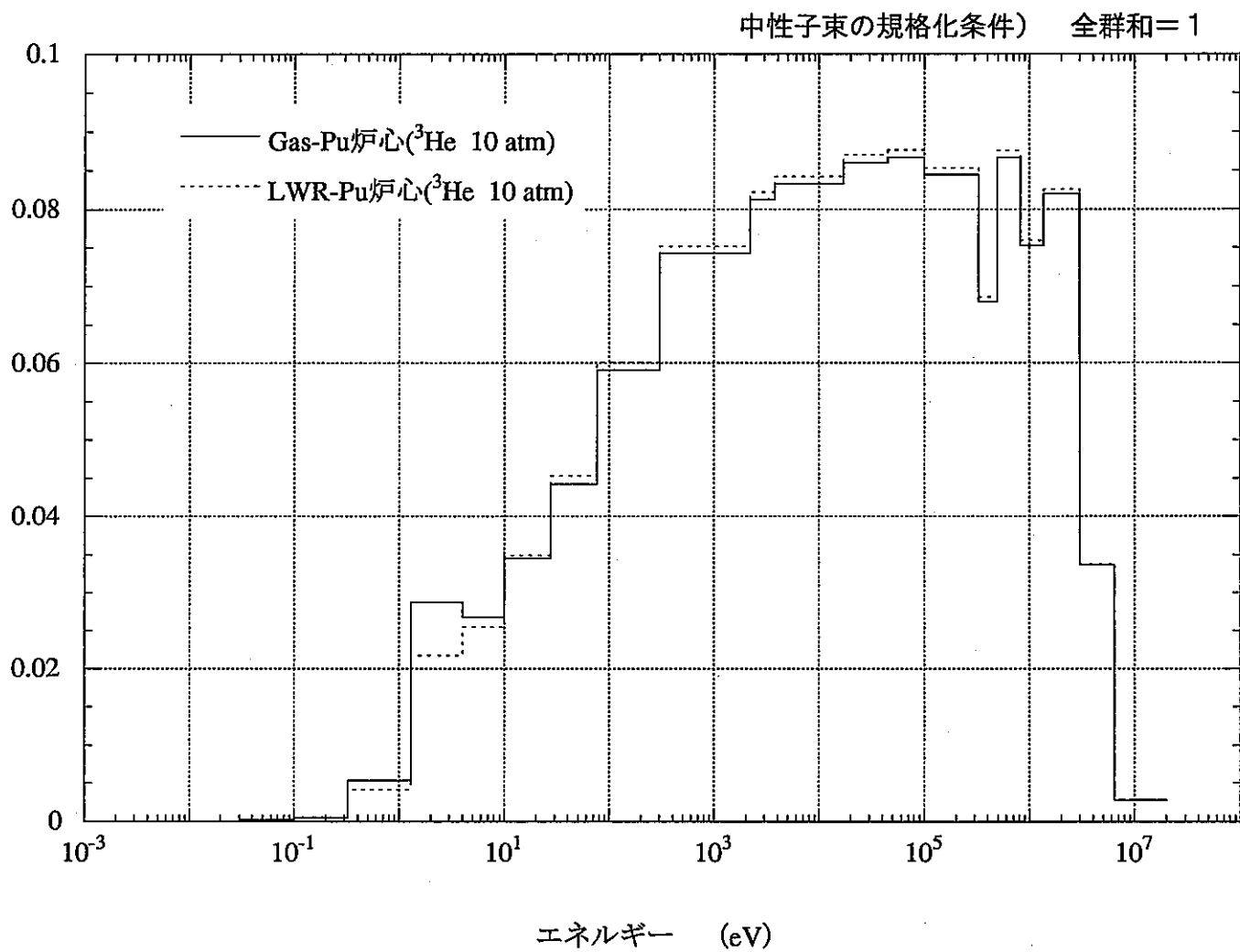


図4.10 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(制御棒を含む ^3He 10atm炉心体系：ドライバー炉心燃料温度300K)

単位レサジー当りのドライバー領域平均相対中性子束

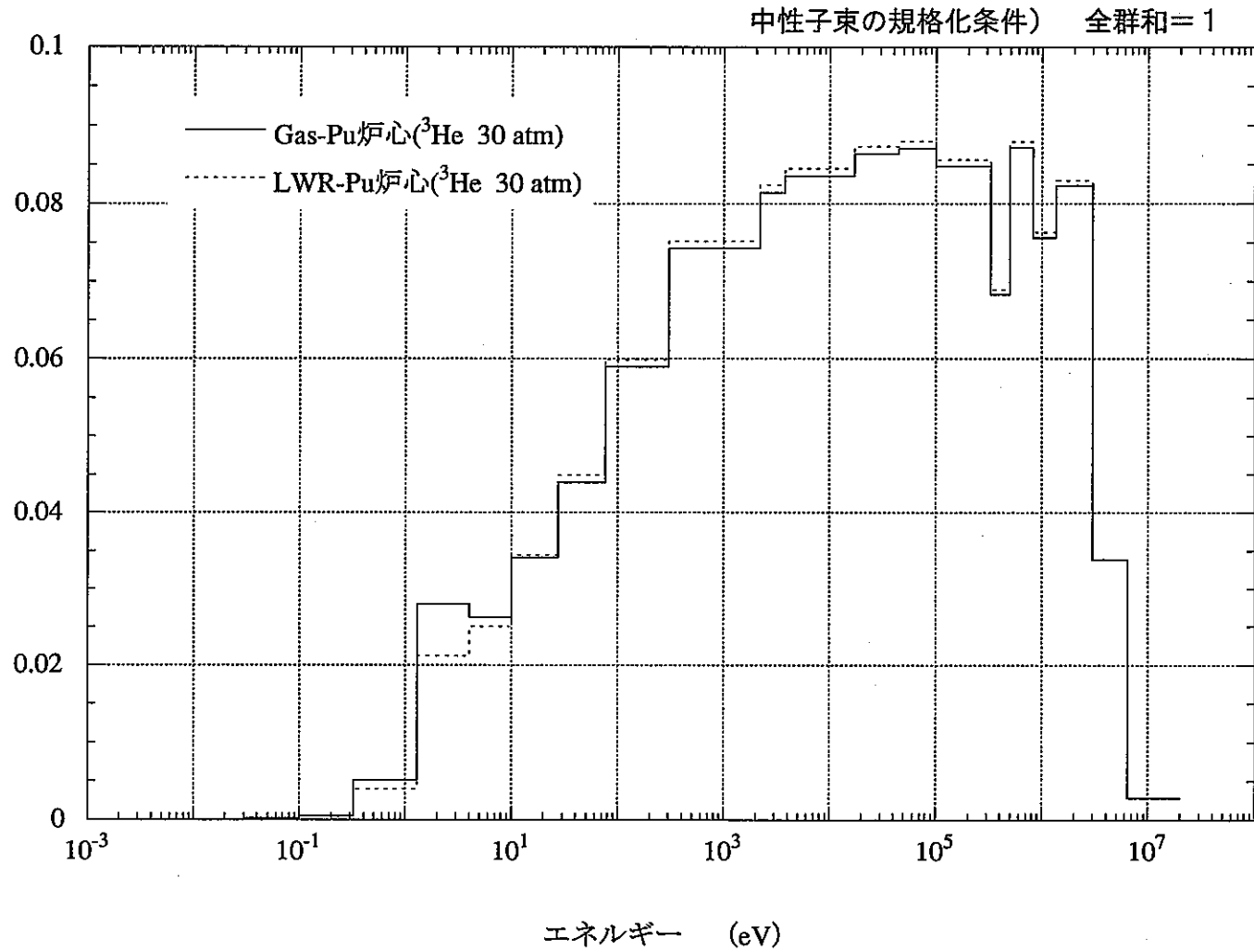


図4.11 Gas-Pu炉心及びLWR-Pu炉心におけるドライバー領域平均相対中性子スペクトル分布の比較
(制御棒を含む ^3He 30atm炉心体系：ドライバー炉心燃料温度300K)