

JAERI-M
84-209

多目的高温ガス実験炉の燃料格子の
核特性解析

1984年11月

土井 猛*・新藤 隆一・平野 光将・高野 誠

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 日立高速印刷株式会社

多目的高温ガス実験炉の燃料格子の核特性解析

日本原子力研究所動力炉開発・安全性研究管理部
土井 猛*・新藤 隆一・平野 光将・高野 誠

(1984年10月22日受理)

多目的高温ガス実験炉の燃料格子核特性をDELIGHT-6およびSRACコードを用いて解析し、基本的核特性量の把握、モデル化法の検討、コード間の比較検討を行なった。

解析した核特性量は、単位燃料格子の増倍率とその燃焼変化、反応度の温度効果、共鳴吸収計算における2重非均質効果、 ^{238}U の共鳴積分値、可燃性毒物反応度値である。

これらの解析を通して、以下の事項が明らかになった。

まず、計算モデルに関しては、

- 1) ^{238}U の共鳴吸収計算における燃料格子の2重非均質効果は、Mark-III燃料格子において共鳴積分で約5.5 barnの減少、格子無限増倍率で約2.6% Δk の増加をもたらす、
- 2) 衝突確率法を用いて燃料の非均質格子計算を行なうと、ポイント・モデルを用いた均質格子計算の場合よりも格子無限増倍率で約0.6% Δk 高くなる、
- 3) 多領域モデルによる可燃性毒物反応度値は、2領域モデルによるものより約20%少なく、燃焼特性もかなり異なる、
- 4) 六角形状の燃料ブロックは平均的な格子間隔を持つ円柱格子でモデル化出来るが、ダンコフ係数は実際の燃料ブロックに対応したものをを用いる必要がある、
- 5) エネルギー群構造は、 ^{238}U の分離共鳴領域では比較的細かく分割する必要があるが、熱エネルギー領域では、群定数が中性子スペクトルの空間依存性の影響を受けない程度の分割で良い。

一方、DELIGHT-6とSRACとの比較では、

- 6) 全ての特性量で良い一致を示す、
- 7) Xe, Sm, RSFPの生成、崩壊データについては再評価の必要がある。

また、DELIGHT-6の改良効果は非常に大きく、

- 8) 共鳴領域の実効断面積計算に中性子スペクトルの遮蔽効果を考慮すると、格子無限増倍率は約2.4% Δk 低くなる、
- 9) 非共鳴核種にも λ パラメータを導入すると、格子無限増倍率は約0.5% Δk 高くなる。

* 現在石川島播磨重工(株)

Nuclear Analysis of the Experimental VHTR Fuel Lattice

Takeshi DOI*, Ryuiti SHINDO, Mitsumasa HIRANO
and Makoto TAKANO

Department of Power Reactor Projects, JAERI

(Received October 22, 1984)

Nuclear properties of a fuel lattice in the experimental VHTR core were analyzed with DELIGHT-6 and SRAC codes. Analytical results by both codes were compared by using various calculational model.

The nuclear parameters were analyzed, such as a multiplication factor of a fuel lattice and its variation with burnup, a temperature effect on reactivity, an effect of double-heterogeneity in a resonance absorption calculation, a resonance integral of ^{238}U and a reactivity worth of burnable poison.

From these analyses, following results were obtained.

Firstly, on calculational models,

- 1) Effect of double-heterogeneity in the resonance absorption calculation for Mark-III fuel element, causing a decrease of about 5.5 barns in the resonance integral and an increase of about 2.6 %ΔK in the infinite multiplication factor,
- 2) The heterogeneous calculation with the collision probability method resulted in about 0.6 %ΔK higher the multiplication factor of fuel lattice than that with the point model,
- 3) The reactivity worth of burnable poison rod by a multi-region model is about 20 % less than that by a 2-region model at an initial state of burnup and its variation with burnup are fairly different,
- 4) The actual hexagonal fuel block with a fuel rod array can be modelled on the cylindrical lattice, where the Dancoff factor calculated for the actual fuel rod array in the block should be used,

* At present, Ishikawajima Harima Heavy Ind. Co.

- 5) In the fast energy range, the group structure near the ^{238}U resolved resonance should be divided relatively fine while in the thermal energy range, the group structure may be divided such that the group constants are not influenced by the spatial variation of neutron spectrum.

Secondly, on comparison between the results by DELIGHT-6 and SRAC,

- 6) The nuclear parameters obtained with both codes agreed well,
- 7) The data of fission yields and decay constants for Xe, S_m and RSFP (Rapidly saturating fission products) should be re-evaluated.

Lastly, on the improvement in DELIGHT-6,

- 8) Consideration of the neutron spectrum shielding effect in the resonance effective cross section calculation caused a decrease of about 2.4 %ΔK in the multiplication factor of fuel lattice,
- 9) The lattice multiplication factor increased about 0.5 %ΔK by introducing λ-parameters for the non-resonant nuclie.

Keywords; Fuel Cell, Burnable Poison, Resonance Absorption, Nuclear Design, Reactor Physics, VHTR, DELIGHT-6, SRAC, Nuclear Properties.

目 次

1. はじめに.....	1
2. DELIGHT の改良	1
2.1 共鳴吸収計算.....	1
2.2 燃料格子計算.....	3
2.3 可燃性毒物格子計算	3
3. 解析対象の燃料格子.....	3
4. 燃料格子核特性の検討	7
4.1 計算モデル	7
4.2 解析結果	9
4.3 ま と め	19
5. 燃料格子モデルの検討	28
5.1 形状モデルの効果	28
5.2 エネルギー群構造モデルの効果.....	36
5.3 ま と め	38
6. おわりに.....	38
参考文献	38

Contents

1. Introduction	1
2. Improvement of DELIGHT	1
2.1 Resonance absorption calculation	1
2.2 Fuel lattice calculation	3
2.3 Burnable poison lattice calculation	3
3. Fuel lattice model for analysis.....	3
4. Investigation of nuclear properties in fuel lattices	7
4.1 Computational models	7
4.2 Analytical results	9
4.3 Conclusion	19
5. Investigation of analytical models for fuel lattices	28
5.1 Effect of geometrical model	28
5.2 Effect of energy group structure model	36
5.3 Conclusion	38
6. Concluding remarks	38
Reference	38

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉 (VHTR) の炉心核設計では中性子スペクトル計算及び格子群定数作成用に高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6⁽¹⁾ が使用されている。初めて DELIGHT⁽²⁾ が開発されて以来、計算モデルや核データ・ライブラリーなどに多くの改良が加えられ現在の DELIGHT-6 に到っている。その中でも DELIGHT-5⁽³⁾ から DELIGHT-6 への改良は、計算モデル、核特性量に及ぼす影響の点から最も大きなものであり、① IR法による共鳴吸収計算法の改良、② 燃料格子計算および可燃性毒物格子計算への多領域モデル衝突確率法の考慮、③ 共通変数配列の可変性、④ 断面積出力の多様化・充実化がなされ、使用上の便宜、計算精度の向上が計られた。

この DELIGHT-6 の計算精度を検討するために、原研 SHE (半均質臨界実験装置) をはじめとする各種臨界実験体系を対象とした実験解析が行なわれ、臨界質量、中性子束分布、制御棒および可燃性毒物反応度値、燃料および減速材反応度温度効果、等の基本的核特性量について計算と実験の良い一致が得られており、臨界実験解析を通し、核計算コードシステムの核データ・ライブラリー及び解析手法の妥当性が確認されたといえる。一方、解析上の手法とは別に実際の VHTR を対象とする燃料格子あるいは炉心体系の解析に際して用いられる計算上のモデル化や計算条件についての詳細な検討も必要になってきた。

このため、VHTR 燃料格子を DELIGHT-6 および原研熱中性子炉体系標準解析コードシステム SRAC⁽⁴⁾ を用いて解析し、種々の計算モデルによる解析結果の比較を通し、その核特性を把握した。この中には、DELIGHT-6 の改良が核特性に及ぼす影響の検討及び SRAC を用いた詳細解析の結果も含まれている。本報告書はこれらの解析結果をまとめたものであるが、DELIGHT-6 の改良効果を説明するために理論的内容についても簡単に触れた。

2. DELIGHT の改良

計算モデルの改良が燃料格子の核特性へ及ぼす影響を把握するために、理論的内容に簡単に触れる必要がある。

2.1 共鳴吸収計算

DELIGHT-5 までは、分離共鳴準位の共鳴積分は IR法を用いて、以下の式で求めていた。

$$RI = \frac{\sigma_M}{2E_0} \frac{\Gamma_r \Gamma_n}{\Gamma_a + \lambda_0 \Gamma_n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Psi(x, \xi)}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta} dx \quad (2.1.1)$$

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉 (VHTR) の炉心核設計では中性子スペクトル計算及び格子群定数作成用に高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6⁽¹⁾ が使用されている。初めて DELIGHT⁽²⁾ が開発されて以来、計算モデルや核データ・ライブラリーなどに多くの改良が加えられ現在の DELIGHT-6 に到っている。その中でも DELIGHT-5⁽³⁾ から DELIGHT-6 への改良は、計算モデル、核特性量に及ぼす影響の点から最も大きなものであり、① IR 法による共鳴吸収計算法の改良、② 燃料格子計算および可燃性毒物格子計算への多領域モデル衝突確率法の考慮、③ 共通変数配列の可変性、④ 断面積出力の多様化・充実化がなされ、使用上の便宜、計算精度の向上が計られた。

この DELIGHT-6 の計算精度を検討するために、原研 SHE (半均質臨界実験装置) をはじめとする各種臨界実験体系を対象とした実験解析が行なわれ、臨界質量、中性子束分布、制御棒および可燃性毒物反応度値、燃料および減速材反応度温度効果、等の基本的核特性量について計算と実験の良好一致が得られており、臨界実験解析を通し、核計算コードシステムの核データ・ライブラリー及び解析手法の妥当性が確認されたといえる。一方、解析上の手法とは別に実際の VHTR を対象とする燃料格子あるいは炉心体系の解析に際して用いられる計算上のモデル化や計算条件についての詳細な検討も必要になってきた。

このため、VHTR 燃料格子を DELIGHT-6 および原研熱中性子炉体系標準解析コードシステム SRAC⁽⁴⁾ を用いて解析し、種々の計算モデルによる解析結果の比較を通し、その核特性を把握した。この中には、DELIGHT-6 の改良が核特性に及ぼす影響の検討及び SRAC を用いた詳細解析の結果も含まれている。本報告書はこれらの解析結果をまとめたものであるが、DELIGHT-6 の改良効果を説明するために理論的内容についても簡単に触れた。

2. DELIGHT の改良

計算モデルの改良が燃料格子の核特性へ及ぼす影響を把握するために、理論的内容に簡単に触れる必要がある。

2.1 共鳴吸収計算

DELIGHT-5 までは、分離共鳴準位の共鳴積分は IR 法を用いて、以下の式で求めていた。

$$RI = \frac{\sigma_M}{2E_0} \frac{\Gamma_r \Gamma_n}{\Gamma_a + \lambda_0 \Gamma_n} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Psi(x, \xi)}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta} dx \quad (2.1.1)$$

$$\alpha = \frac{2\Gamma\lambda_n}{\Gamma_a + \lambda_n\Gamma_n} \sqrt{\frac{\sigma_{po}\Gamma_n}{\sigma_o\Gamma}} g_J \quad (2.1.2)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{\Gamma_a + \lambda_n\Gamma_n} \cdot \frac{\sigma_N}{\sigma_o} \quad (2.1.3)$$

$$\sigma_M = \lambda_o\sigma_{po} + \sum_{\substack{i \in f \\ i \neq 0}} \frac{N_i}{N_o} \sigma_{pi} + \frac{1-\gamma}{\gamma} \sum_{i \in m} \frac{N_i}{N_o} \sigma_{pi} + \frac{1-c}{\gamma N_o \ell} \quad (2.1.4)$$

$$\sigma_N = \lambda_o\sigma_{po} + \sum_{\substack{i \in f \\ i \neq 0}} \frac{N_i}{N_o} \sigma_{pi} + \frac{1}{\bar{P}_o} \left\{ \frac{1-\gamma}{\gamma} \sum_{i \in m} \frac{N_i}{N_o} \sigma_{pi} + \frac{1-c}{\gamma N_o \ell} \right\} \quad (2.1.5)$$

但し、 E_0 は共鳴エネルギー、 Γ_γ 、 Γ_a 、 Γ_n 、 Γ は捕獲、吸収、散乱および全幅、 g_J はスピン係数、 N_o 、 N_i は共鳴核種および非共鳴核種の原子数密度、 σ_{po} 、 σ_{pi} は共鳴核種および非共鳴核種のポテンシャル散乱断面積、 f は燃料カーネル、 m は黒鉛マトリックスおよび燃料粒子の被覆層を表わす。 γ は燃料コンパクト中の燃料カーネル体積割合、 c は燃料格子系のダンコフ係数、 ℓ は燃料コンパクトの平均コード長である。 \bar{P}_o は燃料カーネルに対する自己遮蔽因子の平均値（共鳴が属するエネルギー群における）である。

共鳴積分から実効断面積への変換は

$$\bar{\sigma}_g = \frac{\sum_{\ell \in g} R I_\ell}{\Delta u_g} \quad (2.1.6)$$

に基づいて行なわれた。但し、 ℓ は共鳴、 g はエネルギー群を表わす指標、 Δu_g は g 群のレサジー幅である。

DELIGHT-6 では、共鳴計算法に改良が加えられている。まず、(2.1.1) 式は、 $\Psi(x, \xi)$ 、 $x(x, \xi)$ 関数を計算するサブルーチンを導入することにより直接数値積分している。また、(2.1.4)、(2.1.5) 式の σ_M 、 σ_N では、非共鳴核種と非均質性を表わす項にも λ パラメーターを導入し、

$$\sigma_M = \lambda_o\sigma_{po} + \sum_{\substack{i \in f \\ i \neq 0}} \frac{N_i}{N_o} \lambda_i \sigma_{pi} + \frac{1-\gamma}{\gamma} \sum_{i \in m} \frac{N_i}{N_o} \lambda_i \sigma_{pi} + \frac{1-c}{\gamma N_o \ell} \lambda_M \quad (2.1.7)$$

$$\sigma_N(x) = \lambda_o\sigma_{po} + \sum_{\substack{i \in f \\ i \neq 0}} \frac{N_i}{N_o} \lambda_i \sigma_{pi} + \frac{1}{P_o(x)} \left\{ \frac{1-\gamma}{\gamma} \sum_{i \in m} \frac{N_i}{N_o} \lambda_i \sigma_{pi} + \frac{1-c}{\gamma N_o \ell} \lambda_M \right\} \quad (2.1.8)$$

としている。但し、 $P_o(x)$ は燃料格子の二重非均質性を表わすためのものであり、エネルギー依存性を持つ燃料カーネルの自己遮蔽因子である。 $\sigma_N(x)$ の導入により (2.1.3) 式の β は次のように改められる。

$$\beta(x) = \frac{\Gamma}{\Gamma_a + \lambda_n\Gamma_n} \cdot \frac{\sigma_N(x)}{\sigma_o} \quad (2.1.9)$$

共鳴積分から実効断面積への変換は、中性子スペクトルの共鳴による遮蔽効果を考慮して、次式に基づいて行なう。

$$\frac{1}{\sigma_g} = \frac{\text{Sum} RI_\ell^g}{\Delta u_g - \text{Sum} \delta_\ell^g} \quad (2.1.10)$$

但し、 RI_ℓ^g は共鳴 ℓ の g 群内での共鳴積分値、 δ_ℓ^g は中性子スペクトル遮蔽因子の g 群内での積分値であり、

$$RI_\ell^g = \frac{\sigma_M}{2E_0} \cdot \frac{\Gamma \Gamma_\gamma}{\Gamma_a + \lambda_o \Gamma_n} \int_{\Delta x_g} \frac{\Psi(x, \xi)}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x)} dx \quad (2.1.11)$$

$$\delta_\ell^g = \frac{\Gamma_a + \Gamma_n}{2E_0} \int_{\Delta x_g} \frac{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x) - \theta}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x)} dx \quad (2.1.12)$$

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_a + \lambda_o \Gamma_n} \cdot \frac{\sigma_M}{\sigma_o} \quad (2.1.13)$$

で表わされる。但し、積分範囲 Δx_g は、 $[x_{g-1}, x_g]$ と $[-x_g, -x_{g-1}]$ の和である。

2.2 燃料格子計算

DELIGHT-5 では、炉心計算に使用する燃料格子の実効断面積の算出は、格子の組成を均一に混合（原子数密度を空間的に平均）したポイント・モデルに基づいていた。

これに対して DELIGHT-6 では改良が加えられ、燃料格子体系の輸送計算を新たに組込んだ衝突確率法ルーチンを用いて行ない、得られた中性子束分布を空間的重み関数として各領域の断面積を平均化することにより、燃料格子の実効断面積を求めている。

2.3 可燃性毒物格子計算

DELIGHT-5 では、可燃性毒物格子計算を毒物棒と均質燃料の 2 領域（2 メッシュ）から成る空間モデルで衝突確率法を用いて行ない、得られた中性子束分布を空間的重み関数として各領域の断面積を平均化することにより可燃性毒物格子の実効断面積を求めている。

DELIGHT-6 では、輸送計算を多領域モデル（領域数、メッシュ数は任意）で行なえるよう改良されている。

3. 解析対象の燃料格子

解析の対象とする燃料格子系について述べる。

VHTR の燃料ブロック（Mark-III 燃料体*）は、Fig. 3.1 に示すように平径 299mm の六角柱状黒鉛ブロックに、内径 18mm、外径 36mm の燃料コンパクトを黒鉛製スリーブに封入して構成される 12 本の燃料棒を挿入したものである。燃料コンパクトは、4 重被覆した直径 600 μ m

* 詳細設計(1)において設計された燃料体である。

$$\frac{1}{\sigma_g} = \frac{\text{Sum} RI_\ell^g}{\Delta u_g - \text{Sum} \delta_\ell^g} \quad (2.1.10)$$

但し、 RI_ℓ^g は共鳴 ℓ の g 群内での共鳴積分値、 δ_ℓ^g は中性子スペクトル遮蔽因子の g 群内での積分値であり、

$$RI_\ell^g = \frac{\sigma_M}{2E_0} \cdot \frac{\Gamma \Gamma_\ell}{\Gamma_a + \lambda_0 \Gamma_n} \int_{\Delta x_g} \frac{\Psi(x, \xi)}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x)} dx \quad (2.1.11)$$

$$\delta_\ell^g = \frac{\Gamma_a + \Gamma_n}{2E_0} \int_{\Delta x_g} \frac{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x) - \theta}{\Psi(x, \xi) + \alpha x(x, \xi) + \beta(x)} dx \quad (2.1.12)$$

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_a + \lambda_0 \Gamma_n} \cdot \frac{\sigma_M}{\sigma_0} \quad (2.1.13)$$

で表わされる。但し、積分範囲 Δx_g は、 $[x_{g-1}, x_g]$ と $[-x_g, -x_{g-1}]$ の和である。

2.2 燃料格子計算

DELIGHT-5 では、炉心計算に使用する燃料格子の実効断面積の算出は、格子の組成を均一に混合（原子数密度を空間的に平均）したポイント・モデルに基づいていた。

これに対して DELIGHT-6 では改良が加えられ、燃料格子体系の輸送計算を新たに組込んだ衝突確率法ルーチンを用いて行ない、得られた中性子束分布を空間的重み関数として各領域の断面積を平均化することにより、燃料格子の実効断面積を求めている。

2.3 可燃性毒物格子計算

DELIGHT-5 では、可燃性毒物格子計算を毒物棒と均質燃料の 2 領域（2 メッシュ）から成る空間モデルで衝突確率法を用いて行ない、得られた中性子束分布を空間的重み関数として各領域の断面積を平均化することにより可燃性毒物格子の実効断面積を求めている。

DELIGHT-6 では、輸送計算を多領域モデル（領域数、メッシュ数は任意）で行なえるよう改良されている。

3. 解析対象の燃料格子

解析の対象とする燃料格子系について述べる。

VHTR の燃料ブロック（Mark-III 燃料体^{*}）は、Fig. 3.1 に示すように平径 299mm の六角柱状黒鉛ブロックに、内径 18mm、外径 36mm の燃料コンパクトを黒鉛製スリーブに封入して構成される 12 本の燃料棒を挿入したものである。燃料コンパクトは、4 重被覆した直径 600 μm

* 詳細設計(1)において設計された燃料体である。

の UO_2 カーネルを黒鉛マトリックス中に分散して混合焼結したものである。燃料粒子と燃料コンパクトから成る燃料格子は 2 重の非均性を持つことになる。

被覆燃料粒子、燃料コンパクトおよび燃料ブロックの寸法・諸元を Table 3.1 に示す。解析の対象とした濃縮度 3.5% の燃料格子の原子数密度（不純物は含まず）を Table 3.2 に示す。

Table 3.2 Atomic number densities of VHTR fuel lattice.

Region Nuclide	Inner coolant	Fuel compact	Graphite sleeve	Outer coolant	Graphite block
^{235}U	—	$6.9509 - 5$	—	—	—
^{238}U	—	$1.8950 - 3$	—	—	—
^{12}C	—	$7.5824 - 2$	$8.7747 - 2$	—	$8.2857 - 2$
^{16}O	—	$3.9290 - 3$	—	—	—
He	$9.3500 - 6$	—	—	$9.3500 - 6$	—
Si	—	$1.8304 - 3$	—	—	—

($\times 10^{24}/\text{cm}^3$)

Note. Enrichment of fuel is 3.5%.

Table 3.1 Design parameters of VHTR fuel block (Mark-III fuel element based on detailed design (stage I))

(1) Coated Fuel Particle					
Diameter		920 μ			
Type of coating		TRISO			
Kernel	Material		UO ₂		
	Initial density		95% TD		
	Diameter		600 μ		
Coating layer	Material	Initial density	Thickness		
1 st	Low density P _y C	1.1 g/cm ³	60 μ		
2 nd	High density P _y C	1.85 g/cm ³	30 μ		
3 rd	S _i C	3.2 g/cm ³	25 μ		
4 th	High density P _y C	1.85 g/cm ³	45 μ		
(2) Fuel Rod					
Fuel compact					
Material		Coated particles and graphite			
Density		2.4 g/cm ³			
Packing fraction		30%			
Inner/Outer diameter		18mm/36mm			
Length		36mm			
Graphite sleeve					
Material		Graphite			
Density		1.75g/cm ³			
Inner/Outer diameter		36.3mm/46mm			
Length		568mm			
(3) Fuel Element					
Column pitch (triangular)		300mm			
Fuel element					
Shape		Hexagonal block			
Width across flats		299mm			
Length		570mm			
Number of fuel rods per fuel element					
Standard element		12			
Number of dowels per fuel element		3			
Block material		Graphite			
Block density		1.75g/cm ³			
Burnable poison hole					
Diameter		13mm			
Depth		529mm			
Burnable poison					
Material		Boronated graphite (boron 2.5%)			
Diameter		12mm			
Stack length		500mm			

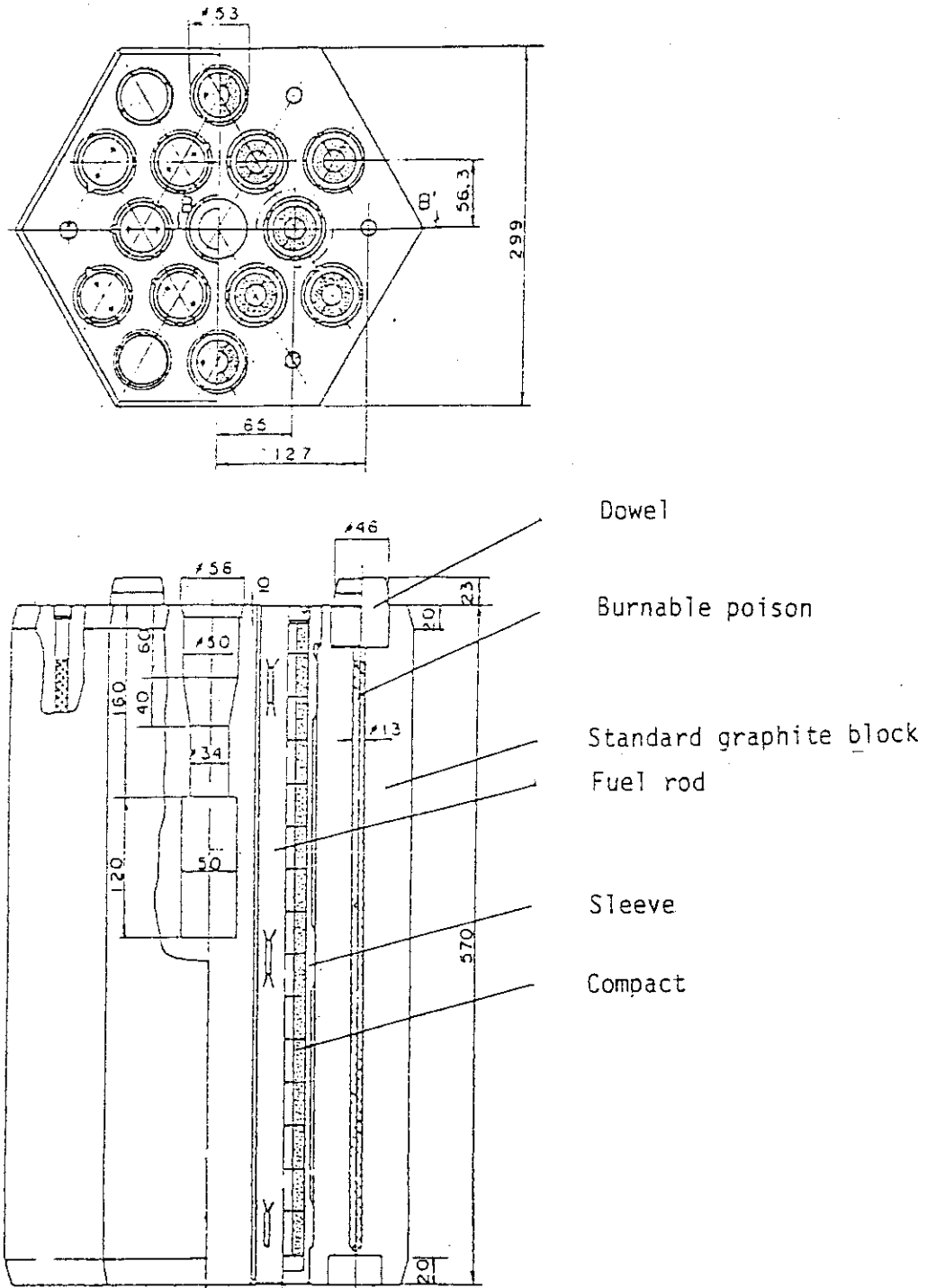


Fig. 3.1 Standard fuel block of VHTR.
 (Mark-III fuel element based on
 Detailed Design (stage I))

4. 燃料格子核特性の検討

4.1 計算モデル

燃料格子計算では、六角柱状の燃料ブロックを、円柱形で近似した1本の燃料棒格子で代表させるため、余剰端黒鉛を含む燃料ブロック内の黒鉛部は均一に12本の燃料棒の周囲に割り当てるモデルを採用した。更に、黒鉛スリーブ、冷却孔および黒鉛ブロックは均質化し、3領域から成る計算モデルを用いた。Fig. 4.1.1 に計算形状を示す。なお、DELIGHT-6とSRACによる計算ではこの非均質モデルを用いたが、DELIGHT-5による計算では、各領域の組成を均質化したポイント・モデルを用いた。

可燃性毒物格子計算では、可燃性毒物棒の周囲に均質化された燃料ブロックを配置するという1次元円筒座標の計算モデルを用いた。計算形状をFig. 4.1.2に示す。

解析に使用したエネルギー群数は、DELIGHT-5, 6では、中性子スペクトル計算に111群、燃料および可燃性毒物格子計算に18群、SRACでは全て107群とした。

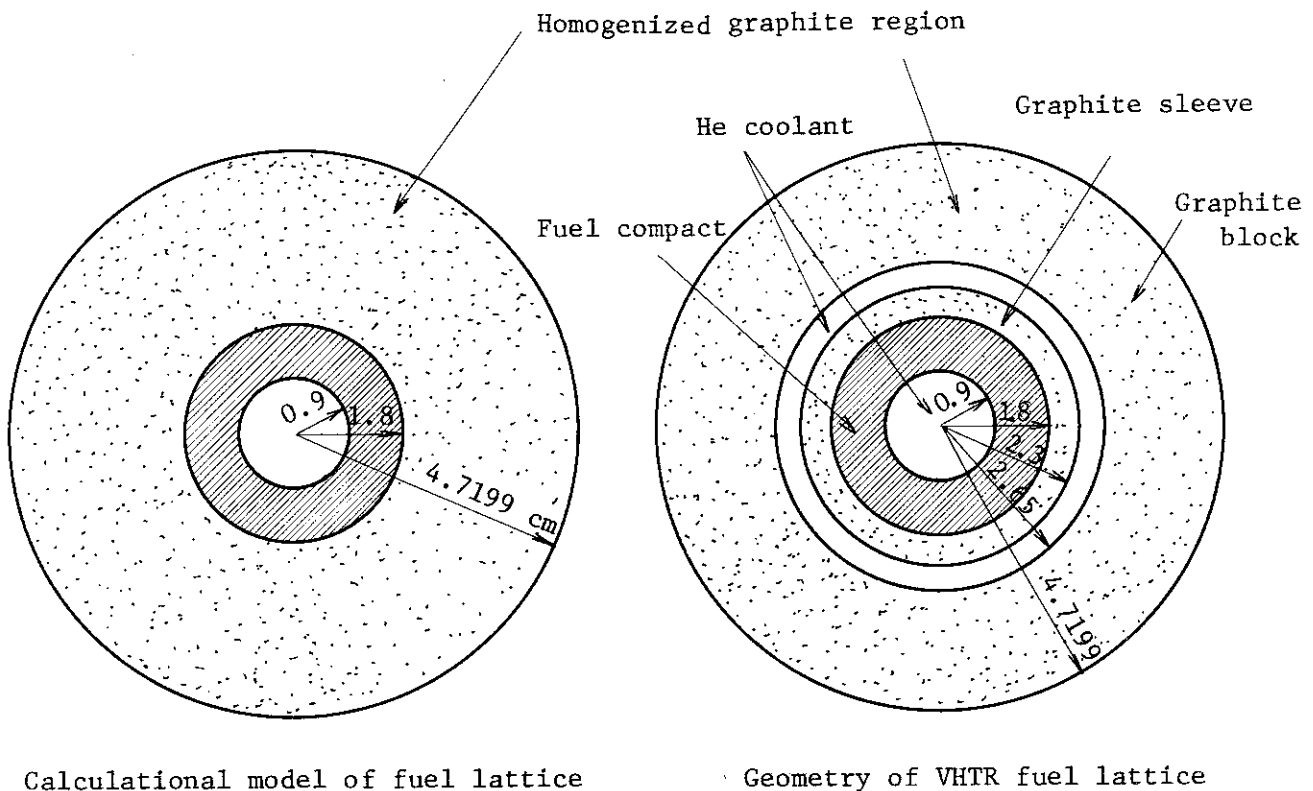


Fig. 4.1.1 VHTR fuel lattice calculational model.

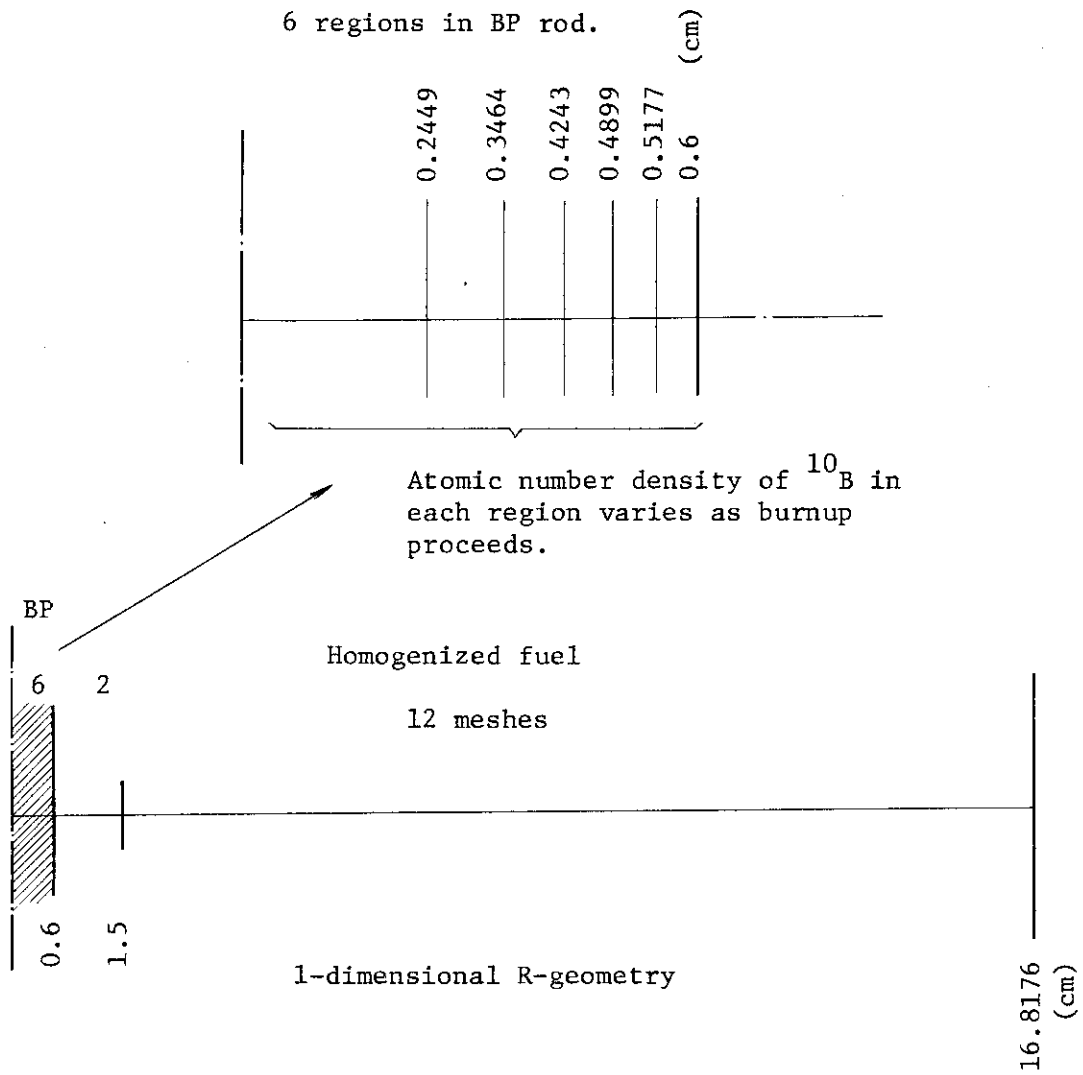


Fig. 4.1.2 Calculational model of BP lattice.

4.2 解析結果

DELIGHT-5, 6およびSRACコードを用いて行なった燃料格子解析の結果について述べる。

(1) 2重非均質性

燃料格子の2重非均質性が ^{238}U の共鳴積分値に及ぼす影響をDELIGHT-6を用いて解析した結果をFig. 4.2.1に示す。この図は、燃料カーネル半径に対する ^{238}U の共鳴積分値と格子無限増倍率を示したものであり、両者ともほぼ直線的に変化している。半径ゼロと300 μm における差が2重非均質性と考えられ、共鳴積分で約5.5 barn、格子無限増倍率で約2.6% Δk の相違となっている。

SRACコードを用いて解析した2重非均質効果との比較をTable 4.2.1に示す。2重非均質性による格子無限増倍率への影響はSRACでも約2% Δk に達し、2重非均質性が ^{238}U 共鳴吸収に与える影響は決して無視出来る量ではないことが分かる。なお、1重および2重非均質の格子無限増倍率はDELIGHT-6, SRACとも良く一致している。

(2) 燃料温度係数

燃料温度を300 $^{\circ}\text{K}$ から1200 $^{\circ}\text{K}$ まで変えた場合の1重および2重非均質における格子無限増倍率をDELIGHT-6およびSRACを用いて計算した結果をFig. 4.2.2に示す。SRACコードの場合、共鳴計算をPEACO法とIR法(1重非均質のみ)を用いて行なうことが出来るため、両結果を示してある。

格子無限増倍率の温度に対する変化の傾向は、1重非均質、2重非均質の場合ともDELIGHT-6とSRACで良く一致している。

300 $^{\circ}\text{K}$ から1200 $^{\circ}\text{K}$ までの範囲における温度反応度係数をTable 4.2.2に示す。反応度係数のDELIGHT-6とSRACの相違は高々2~3%であることが分かる。

(3) 減速材温度係数

減速材温度を300 $^{\circ}\text{K}$ から1200 $^{\circ}\text{K}$ まで変えた場合の格子無限増倍率をFig. 4.2.3に示す。1重非均質の場合、DELIGHT-6とSRACによる格子無限増倍率の変化の傾向は、良く一致している。2重非均質の場合には、DELIGHT-6を用いて、燃料格子計算をポイント・モデルと非均質モデルの両方で行なった。燃料格子計算をポイント・モデルで行なうと格子無限増倍率を約0.5% Δk だけ低く評価する。減速材温度に対する変化の傾向は両者とも類似である。

300 $^{\circ}\text{K}$ から1200 $^{\circ}\text{K}$ までの範囲における減速材温度係数をTable 4.2.3に示す。熱中性子束遮蔽効果が減速材温度係数に及ぼす影響はほとんどない。減速材温度係数はDELIGHT-6とSRACでほとんど相違のないことが分かる。

(4) 格子燃焼特性

燃料格子を室温(300 $^{\circ}\text{K}$)で平均出力密度2.2w/ccの割合で燃焼させた場合の格子無限増倍率燃焼変化をFig. 4.2.4に示す。

DELIGHT-6については1重非均質の非均質燃料格子計算の結果を示してある。SRACでは、IR法を用い、燃焼チェーンとして主要FP核種を個別に扱ったIIJIMAモデルと、生成・崩壊特性に応じてFP核種をグループ別に扱った(DELIGHT-6も同様)ENDFB2モデルにより計算を行なった。

SRACのIIJIMAモデルとENDFB2モデルの結果を比較すると、燃焼0～50日の間で、計算手法による相違が明らかであり、特に燃焼開始直後の反応度低下はIIJIMAモデルのような正確なチェーンモデルを用いて評価する必要がある。燃焼600日程度になると、両者で約0.6% Δk の相違が生ずる。

DELIGHT-6による格子無限増倍率も燃焼初期においてはSRAC(ENDFB2モデル)と一致していても、Xe & Sm蓄積時(5日)には約1.5% Δk 低い。そこで、DELIGHT-6の計算において、Xe, Sm, RSFP(rapidly saturating fission product)の生成率にSRACのENDFB2のデータを用いた場合、生成率と崩壊定数にENDFB2のデータを用いた場合の格子無限増倍率もFig. 4.2.4に示す。生成率データを入れ替えると格子増倍率は約0.5% Δk 高くなり、更に崩壊定数も入れ替ると約1% Δk 高くなる。RSFPの核種分類分けの相違によると考えられる若干の相違は残されるが、生成率と崩壊定数に共通なデータを用いると、DELIGHT-6とSRACによる格子無限増倍率の燃焼特性はほぼ一致することが分かる。今後、RSFPデータ(DELIGHT-6はENDF/B-3, SRACはENDF/B-2を採用)の再評価が必要となる。

(5) 可燃性毒物反応度価値

DELIGHT-6による可燃性毒物格子の無限増倍率をFig. 4.2.5に示す。可燃性毒物を含んでいない燃料格子の無限増倍率も併記されており、両者の差が可燃性毒物反応度価値と考えることが出来る。

可燃性毒物格子の増倍率は、メッシュ数(毒物棒/燃料領域)が(8/12), (6/14), (3/15), (1/15)および(1/1)の場合について示してある。

毒物棒領域、燃料領域ともメッシュ数を多くして行くと結果は一定のところに収束して行く。毒物領域は1メッシュであっても燃料領域のメッシュ数を多くとったものは、その特性が両領域多メッシュの場合に良く似ている。しかし、燃料領域を1メッシュ(DELIGHT-5相当)とすると、格子無限増倍率とその燃焼特性は大幅に異なって来る。燃焼初期の可燃性毒物反応度価値をTable 4.2.4に示す。多メッシュの場合と比較すると、(1/1)メッシュの場合には可燃性毒物反応度価値を約20%も大きく評価することになる。これは、燃料領域が1メッシュのため可燃性毒物に向かう中性子の挙動が十分な精度で表現されないためであり、衝突確率法で解析する場合、毒物棒のみならず燃料領域のメッシュ分割にも十分な注意を払う必要があるといえよう。

(6) DELIGHT-6の改良効果

DELIGHT-6の改良効果を調べるため、いくつかの計算を行ない、比較・検討した。

① 共鳴計算

(2.1.1)～(2.1.5)式のように共鳴核種だけに入パラメーターを導入し実効断面積は(2.1.6)式に従って求めた場合(DELIGHT-5相当)、共鳴核種だけに入パラメーターを適用するが実効断面積は(2.1.10)式のように中性子スペクトルの遮蔽効果を考慮して求めた場合、及び非共鳴核種に対しても入パラメーターを導入し実効断面積を(2.1.10)式に基づいて求めた場合、の3種類のケースについて燃料格子の無限増倍率をFig. 4.2.6に示す。

²³⁸Uの共鳴積分値は同じであっても実効断面積計算に中性子スペクトルの遮蔽効果を採用入れると、燃焼初期の格子無限増倍率は約2.4% Δk も低くなり、(2.1.10)式に基づいて実

効断面積を計算する必要性が分かる。

非共鳴核種（ここではC, O, Si, ^{235}U 等）にも入パラメーターを導入し、(2.1.7), (2.1.8)式により実効散乱断面積を表わした場合には、共鳴積分値で約1barnの減少、格子無限増倍率で約0.5% Δk の増加となり、改良の効果の大きいことが分かる。

燃料格子の2重非均質性を考慮した場合の格子無限増倍率もFig. 4.2.6に示した。共鳴吸収計算に燃料粒子構造を採り入れると、格子無限増倍率が約2.6% Δk 増加することは前に述べた通りである。

② 燃料格子計算

ポイントモデル（DELIGHT-5相当）と非均質燃料格子計算の格子無限増倍率もFig. 4.2.6に示す。燃焼初期では、非均質性を採り入れると、約0.6% Δk の増加となる。これは主に ^{238}U の共鳴領域での燃料棒自己遮蔽効果を非均質モデルで正確に扱ったため、共鳴を逃れる減速中性子が増したことによるものである。

③ 可燃性毒物格子計算

可燃性毒物領域と燃料領域の計算点を各1メッシュとした場合（DELIGHT-5相当）の格子無限増倍率とその燃焼変化が、毒物領域と燃料領域に多くの計算点をとった場合に較べて大きく異なることは前述の通りである。

Table 4.2.1 Comparison of double heterogeneity effect.

Calculation Code	DELIGHT-6		SRAC
Parameter	²³⁸ RI	K _∞	K _∞
Single heterogeneity	4 6.6 3(b)	1.4 4 1 1	1.4 4 2 5
Double heterogeneity	4 1.1 3(b)	1.4 6 6 9	1.4 6 3 1
Relative Difference	5.5 . (b)	0.0 2 5 8	0.0 2 0 6

Table 4.2.2 Comparison of fuel temperature coefficient.

Heterogeneity	Double		Single		
Calculation Code	DELIGHT-6	SRAC (PEACO)	DELIGHT-6	SRAC (IR)	SRAC (PEACO)
K _∞ (300°K)	1.4 6 6 9	1.4 6 3 1	1.4 4 1 1	1.4 3 9 1	1.4 4 2 5
K _∞ (1200°K)	1.4 0 8 3	1.4 0 5 8	1.3 7 5 7	1.3 7 5 7	1.3 7 9 2
ΔK _∞	0.0 5 8 6	0.0 5 7 3	0.0 6 5 4	0.0 6 3 4	0.0 6 3 3
ΔK _∞ /K _∞ (300K)	3.99 × 10 ⁻²	3.92 × 10 ⁻²	4.54 × 10 ⁻²	4.41 × 10 ⁻²	4.39 × 10 ⁻²

Table 4.2.3 Comparison of moderator temperature Coefficient.

Calculation Code	DELIGHT-6 (double)		DELIGHT-6 (Single)	SRAC (Single)
	Hetero	Homo	Hetero	Hetero
K_{∞} (300°K)	1.4669	1.4622	1.4411	1.4388
K_{∞} (1200°K)	1.4379	1.4323	1.4127	1.4101
ΔK_{∞}	0.0290	0.0299	0.0284	0.0287
$\Delta K_{\infty}/K_{\infty}(300^{\circ}\text{K})$	1.98×10^{-2}	2.04×10^{-2}	1.97×10^{-2}	1.99×10^{-2}

Table 4.2.4 Initial reactivity worth of burnable poison.

Number of meshes Parameters	8/12	6/14	3/15	1/15	1/1
	K_{∞} (without BP)	1.4669	←	←	←
K_{∞} (with BP)	1.2641	1.2645	1.2608	1.2508	1.2203
ΔK_{BP}	0.203	0.202	0.206	0.216	0.247
Relative difference (%)	-	-0.5	+1.5	+6.4	+21.7

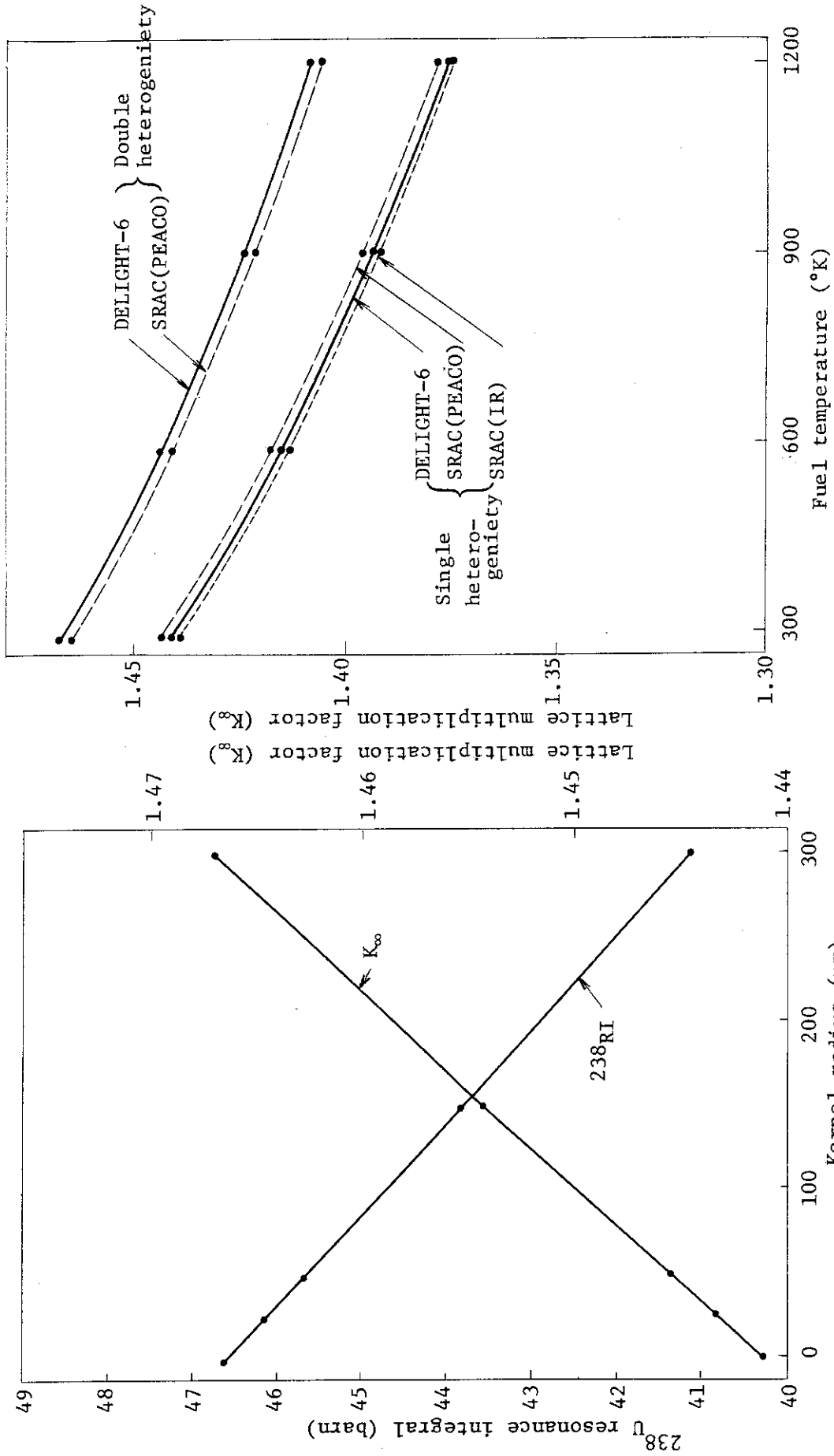


Fig. 4.2.1 ^{238}U resonance integral and lattice multiplication factor by DELIGHT-6.

Fig. 4.2.2 Reactivity change with fuel temperature.

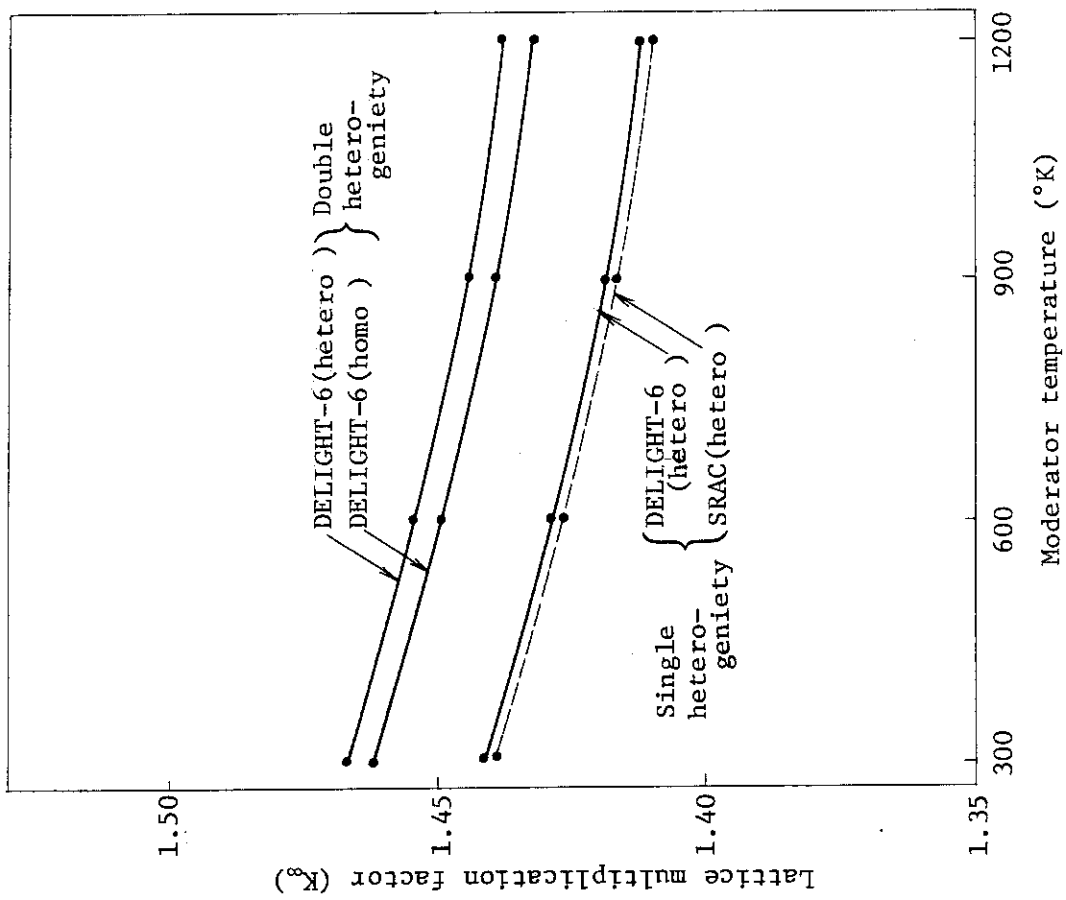


Fig. 4.2.3 Reactivity change with moderator temperature.

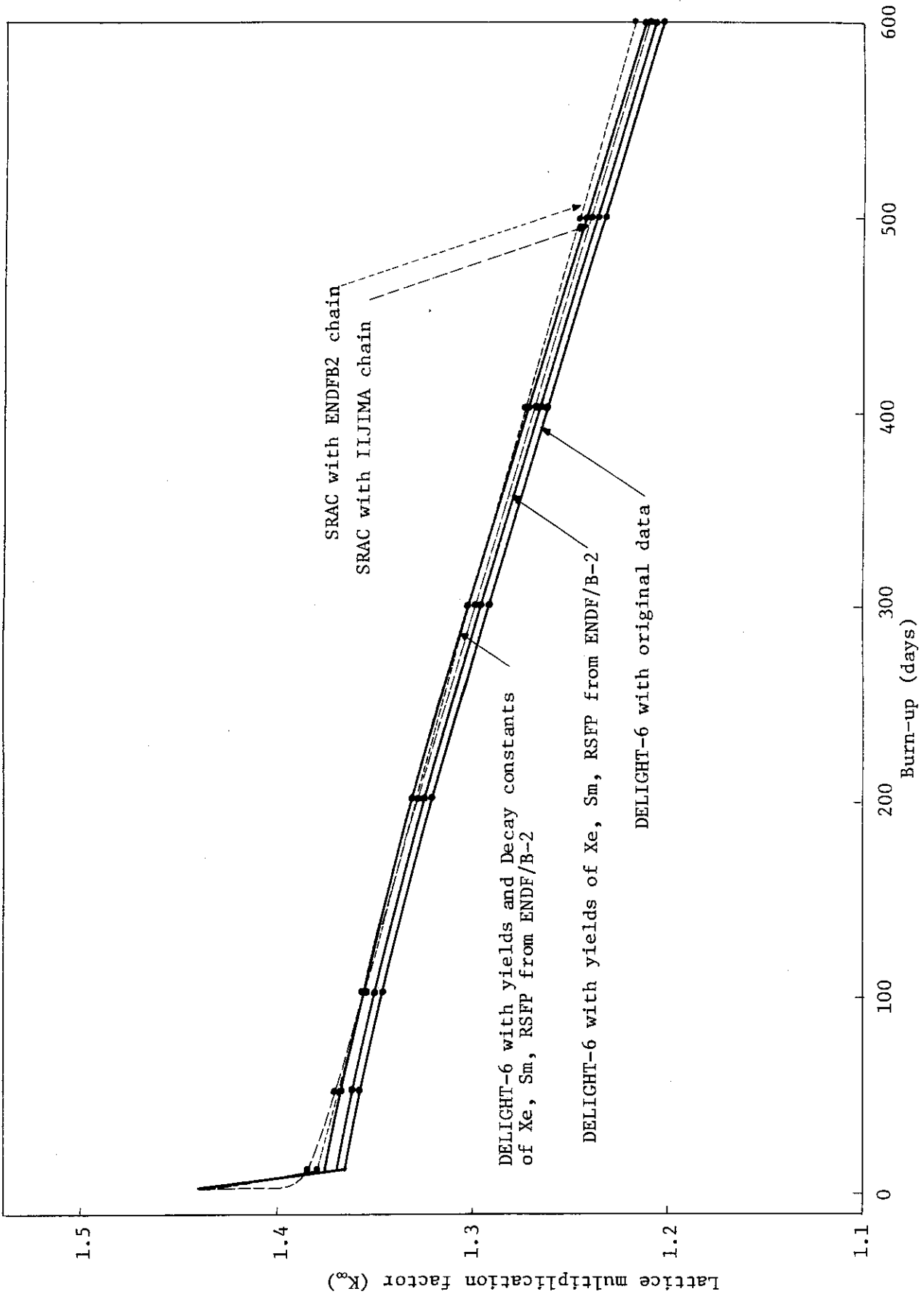


Fig. 4.2.4 Burn-up dependent multiplication factor of single heterogeneous fuel lattice.

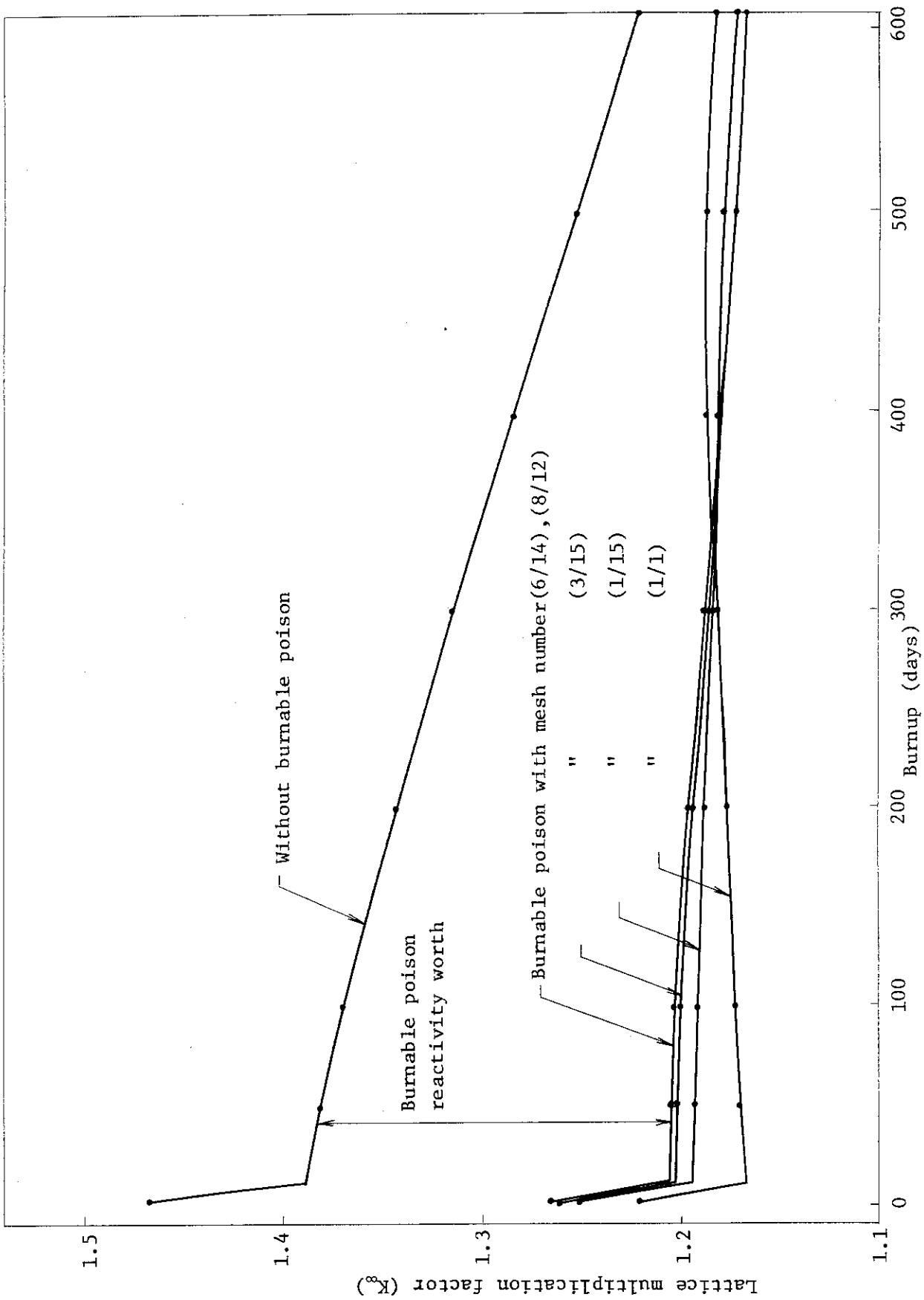


Fig. 4.2.5 Burnup-dependent multiplication factor with burnable poison.

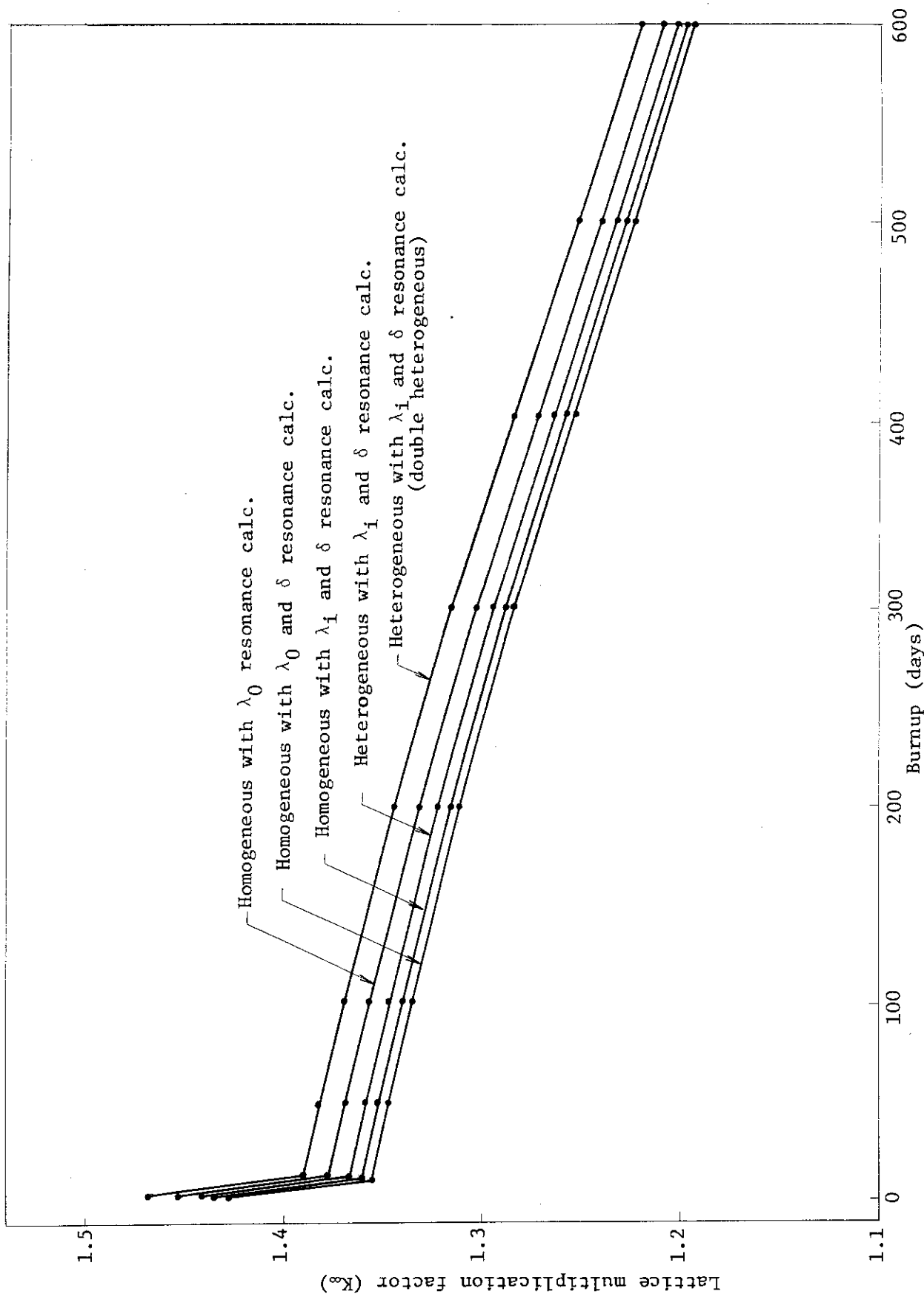


Fig. 4.2.6 Burnup-dependent multiplication factor with various calculational models.

4.3 ま と め

DELIGHT-6 (一部DELIGHT-5)とSRACコードを用いてVHTR燃料格子計算を行ない、解析結果を比較・検討した。なお、前節までに記述した解析結果についてその詳細な計算値をTable 4.3.1~4.3.3に示す。すなわち、DELIGHT-6による計算についてはTable 4.3.1に、SRACによる燃焼計算についてはTable 4.3.2に、SRACによる温度効果計算についてはTable 4.3.3に各々詳細な計算結果を示す。

解析項目は、燃料格子無限増倍率とその燃焼変化、燃料温度および減速材温度の反応度効果、共鳴吸収計算における2重非均質性、可燃性毒物反応度値等である。

格子無限増倍率の燃焼変化を除き、各解析項目ともDELIGHT-6とSRACで良い一致をみることがわかった。格子無限増倍率の燃焼変化では、Xe, Sm, RSFPの生成率と崩壊定数に両コードで共通なデータを用いると良く一致することが確かめられ、今後燃焼データの再評価は必要となるが、両コードとも基本的にはほぼ同程度の計算精度を持つといえよう。

炉心核設計の立場から見ると、特に注意を払わなくてはならないのは、従来効果が少ないと考えられていた共鳴吸収計算における2重非均質性の効果である。格子の無限増倍率で2% Δk 以上もあり、炉心計算の実効増倍率に及ぼす影響も1% Δk 以上になりうると推定される。設計計算ではこの2重非均質性を精度良く評価する必要があるといえよう。

また、共鳴吸収計算において、共鳴領域実効断面積の算出に中性子スペクトルの遮蔽効果を採り入れた影響も大きく、格子無限増倍率で2% Δk 以上の増加をもたらす。更に、非共鳴核種に対し入パラメーターを導入した効果も少なくはなかった。

一方、燃料格子計算は従来はポイント・モデルで行なって実効断面積を求めていたが、これも非均質モデルで行なう必要がある。

また、可燃性毒物格子計算でも、毒物領域のみならず燃料領域のメッシュ分割にも注意を払う必要のあることが分った。

概して、DELIGHT-6の改良の影響は、共鳴吸収計算法、燃料格子計算法及び可燃性毒物格子計算法のいずれにおいても大きかったといえよう。

Table 4.3.1 Burnup-dependent lattice multiplication factor (I).

Case No.	1	2	3	4	5	6	7	
^{238}U resonance calculation	λ_0	λ_0	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	
	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	
Heterogeneity	single	single	single	single	single	single	single	
Particle radius (μm)	--	--	--	--	--	--	--	
^{238}U RI (b)	4 7.6 2	4 7.6 2	4 6.6 3	4 6.6 3	4 6.6 3	4 6.6 3	5 1.2 8	
Heterogeneity	homo	homo	homo	hetero	hetero	hetero	hetero	
Burnable poison	--	--	--	--	--	--	--	
Fuel lattice calculation	Temperature	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	6 0 0	
	($^{\circ}\text{K}$)	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	
K_{∞}	0	1.4533	1.4297	1.4347	1.4411	1.4455	1.4417	1.4142
	10	1.3773	1.3551	1.3598	1.3659	1.3699	1.3664	1.3404
	50	1.3687	1.3469	1.3515	1.3575	1.3615	1.3581	1.3326
	100	1.3574	1.3360	1.3405	1.3465	1.3504	1.3470	1.3221
	200	1.3313	1.3109	1.3153	1.3211	1.3250	1.3216	1.2978
	300	1.3030	1.2835	1.2877	1.2934	1.2974	1.2940	1.2712
	400	1.2726	1.2543	1.2582	1.2639	1.2681	1.2645	1.2429
	500	1.2410	1.2239	1.2275	1.2332	1.2376	1.2337	1.2137
600	1.2085	1.1929	1.1963	1.2018	1.2064	1.2023	1.1840	

Table 4.3.1 Burnup-dependent lattice multiplication factor (2).

Case No.	8		9		10		11		12		13		14	
	λ -parameter	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i
δ -parameter	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ
Heterogeneity	single	single	single	single	double	double	double	double	double	double	double	double	double	double
Particle radius (μm)	—	—	—	—	25	25	25	25	25	25	25	25	25	50
^{238}U RI(b)	5 4.9 4	5 8.0 2	5 8.0 2	4 6.1 7	5 0.7 5	5 0.7 5	5 0.7 5	5 4.3 6	5 4.3 6	5 4.3 6	5 7.4 0	5 7.4 0	5 7.4 0	4 5.7 0
Heterogeneity	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero
Burnable poison	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Temperature ($^{\circ}\text{K}$)	T_f	9 0 0	1 2 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
	T_m	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
K_{∞}	0	1.3932	1.3757	1.4433	1.4166	1.4166	1.4166	1.3957	1.3957	1.3957	1.3784	1.3784	1.3784	1.4454
	10	1.3206	1.3041	1.3679	1.3427	1.3427	1.3427	1.3230	1.3230	1.3230	1.3066	1.3066	1.3066	1.3699
	50	1.3131	1.2970	1.3595	1.3348	1.3348	1.3348	1.3155	1.3155	1.3155	1.2995	1.2995	1.2995	1.3615
	100	1.3030	1.2872	1.3484	1.3243	1.3243	1.3243	1.3054	1.3054	1.3054	1.2897	1.2897	1.2897	1.3503
	200	1.2796	1.2645	1.3229	1.2999	1.2999	1.2999	1.2819	1.2819	1.2819	1.2669	1.2669	1.2669	1.3248
	300	1.2538	1.2394	1.2952	1.2732	1.2732	1.2732	1.2560	1.2560	1.2560	1.2416	1.2416	1.2416	1.2970
	400	1.2265	1.2128	1.2656	1.2448	1.2448	1.2448	1.2285	1.2285	1.2285	1.2149	1.2149	1.2149	1.2672
500	1.1984	1.1856	1.2348	1.2154	1.2154	1.2154	1.2003	1.2003	1.2003	1.1875	1.1875	1.1875	1.2363	
600	1.1700	1.1582	1.2032	1.1856	1.1856	1.1856	1.1717	1.1717	1.1717	1.1600	1.1600	1.1600	1.2046	

Table 4.3.1 Burnup--dependent lattice multiplication factor (3)

Case No.	15	16	17	18	19	20	21
^{238}U resonance calculation	λ -parameter	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i
	δ -parameter	δ	δ	δ	δ	δ	δ
Heterogeneity	double	double	double	double	double	double	double
Particle radius (μm)	50	50	50	150	150	150	150
^{238}U RI (b)	5 0.0 2	5 3.7 9	5 6.8 0	4 3.7 9	4 8.0 5	5 1.4 4	5 4.3 1
Heterogeneity	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero
Burnable poison	--	--	--	--	--	--	--
Fuel lattice calculation	Temperature T_f	6 0 0	1 2 0 0	3 0 0	6 0 0	9 0 0	1 2 0 0
	Temperature ($^{\circ}\text{K}$) T_m	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
K_{∞}	0	1.4190	1.3983	1.3810	1.4543	1.4289	1.4089
	10	1.3449	1.3254	1.3091	1.3783	1.3543	1.3354
	50	1.3370	1.3179	1.3020	1.3697	1.3462	1.3277
	100	1.3264	1.3077	1.2921	1.3584	1.3354	1.3173
	200	1.3019	1.2840	1.2692	1.3325	1.3105	1.2932
	300	1.2752	1.2581	1.2439	1.3043	1.2834	1.2669
	400	1.2467	1.2305	1.2170	1.2742	1.2544	1.2388
	500	1.2172	1.2021	1.1895	1.2428	1.2244	1.2099
	600	1.1872	1.1734	1.1618	1.2105	1.1938	1.1805
Burnup (days)							

Table 4.3.1 Burnup-dependent lattice multiplication factor (4).

Case No.		22	23	24	25	26	27	28
^{238}U resonance calculation	λ -parameter	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i
	δ -parameter	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ
	Heterogeneity	double	double	double	double	double	double	double
Particle radius (μm)		3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
	^{238}U RI (b)	4 1.1 3	4 5.0 0	4 8.1 1	5 0.7 5	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3
	Heterogeneity	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero
	Burnable poison	-	-	-	-	-	-	-
Fuel lattice calculation	Temperature	3 0 0	6 0 0	9 0 0	1 2 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
	($^{\circ}\text{K}$)	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	6 0 0	9 0 0	1 2 0 0
K_{∞}		1.4669	1.4432	1.4243	1.4083	1.4543	1.4445	1.4379
		1.3901	1.3677	1.3499	1.3349	1.3790	1.3718	1.3678
		1.3813	1.3594	1.3419	1.3272	1.3697	1.3622	1.3579
		1.3697	1.3483	1.3312	1.3168	1.3569	1.3480	1.3423
		1.3433	1.3228	1.3065	1.2927	1.3278	1.3159	1.3075
		1.3146	1.2951	1.2796	1.2664	1.2961	1.2815	1.2709
		1.2839	1.2655	1.2508	1.2384	1.2632	1.2469	1.2351
		1.2518	1.2347	1.2211	1.2094	1.2297	1.2128	1.2007
		1.2187	1.2032	1.1908	1.1801	1.1961	1.1795	1.1678

Table 4.3.1 Burnup-dependent lattice multiplication factor (5).

Case No.		29	30	31	32	33	34	35
^{238}U resonance calculation	λ -parameter	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i
	δ -parameter	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ
	Heterogeneity	double	double	double	double	single	single	single
	Particle radius (μm)	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	—	—	—
	^{238}U RI (b)	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3	4 6.6 3	4 6.6 3	4 6.6 3
Fuel lattice calculation	Heterogeneity	homo	homo	homo	homo	hetero	hetero	hetero
	Burnable poison	—	—	—	—	—	—	—
Temperature ($^{\circ}\text{K}$)	T_f	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0
	T_m	3 0 0	6 0 0	9 0 0	1 2 0 0	6 0 0	9 0 0	1 2 0 0
K^{∞}	0	1.4622	1.4493	1.4392	1.4323	1.4288	1.4192	1.4127
	10	1.3857	1.3743	1.3667	1.3625	1.3549	1.3479	1.3439
	50	1.3769	1.3651	1.3573	1.3527	1.3461	1.3388	1.3345
	100	1.3654	1.3523	1.3431	1.3371	1.3338	1.3249	1.3193
	200	1.3390	1.3232	1.3110	1.3023	1.3056	1.2937	1.2852
	300	1.3103	1.2915	1.2765	1.2655	1.2749	1.2602	1.2494
	400	1.2796	1.2585	1.2418	1.2296	1.2432	1.2267	1.2148
	500	1.2475	1.2250	1.2076	1.1952	1.2111	1.1941	1.1819
600	1.2144	1.1915	1.1743	1.1624	1.1793	1.1625	1.1508	

Table 4.3.1 Burnup-dependent lattice multiplication factor (6).

Case No.		36	37	38	39	40	
^{238}U resonance calculation	λ -parameter	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	λ_i	
	δ -parameter	δ	δ	δ	δ	δ	
Heterogeneity	Heterogeneity	double	double	double	double	double	
	Particle radius (μm)	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	
^{238}U RI (b)	Heterogeneity	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3	4 1.1 3	
	Heterogeneity	hetero	hetero	hetero	hetero	hetero	
Fuel lattice calculation	Burnable poison	1 / 1	1 / 15	3 / 15	6 / 14	8 / 12	
	Temperature	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	
Temperature ($^{\circ}\text{K}$)	T_f	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	
	T_m	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	3 0 0	
K_{∞}	Burnup (days)	0	1.2203	1.2508	1.2608	1.2645	1.2641
		10	1.1682	1.1947	1.2036	1.2070	1.2067
		50	1.1700	1.1937	1.2021	1.2052	1.2050
		100	1.1724	1.1921	1.1997	1.2025	1.2024
		200	1.1761	1.1871	1.1925	1.1946	1.1945
		300	1.1808	1.1825	1.1851	1.1861	1.1862
		400	1.1848	1.1786	1.1779	1.1779	1.1780
		500	1.1852	1.1745	1.1671	1.1700	1.1701
		600	1.1785	1.1680	1.1631	1.1614	1.1614

Table 4.3.2 Burnup-dependent lattice multiplication factor by SRAC(1).
(with ENDFB2 model)

Burnup (days)	$\nu \Sigma_f^1$	Σ_a^1	Σ_r^1	$\nu \Sigma_f^2$	Σ_a^2	K_∞	note
0	2.5836-4	8.3552-4	3.0096-3	6.0966-3	3.4782-3	1.4391	Resonance Calc. by IR method
10	2.5718-4	8.3551-4	3.0096-3	6.0189-3	3.5834-3	1.3816	"
50	2.5246-4	8.3520-4	3.0089-3	5.9795-3	3.5930-3	1.3683	"
100	2.4650-4	8.3472-4	3.0084-3	5.8877-3	3.5690-3	1.3555	"
300	2.2281-4	8.3247-4	3.0067-3	5.5838-3	3.5089-3	1.3043	"
500	2.0030-4	8.3019-4	3.0052-3	5.2092-3	3.4170-3	1.2467	"

Table 4.3.2 Burnup-dependent lattice multiplication factor by SRAC (2).
(with IIJIMA model)

Burnup (days)	$\nu \Sigma_f^1$	Σ_a^1	Σ_r^1	$\nu \Sigma_f^2$	Σ_a^2	K_∞	note
0	2.5836-4	8.3552-4	3.0096-3	6.0966-3	3.4782-3	1.4391	Resonance Calc. by IR method
1	2.5826-4	8.3555-4	3.0096-3	6.0439-3	3.5560-3	1.3974	"
5	2.5779-4	8.3547-4	3.0096-3	6.0301-3	3.5726-3	1.3882	"
10	2.5719-4	8.3540-4	3.0095-3	6.0218-3	3.5785-3	1.3840	"
50	2.5246-4	8.3518-4	3.0089-3	5.9812-3	3.5898-3	1.3698	"
100	2.4650-4	8.3499-4	3.0080-3	5.8881-3	3.5668-3	1.3563	"
300	2.2280-4	8.3404-4	3.0051-3	5.5806-3	3.5137-3	1.3012	"
500	2.0033-4	8.3300-4	3.0024-3	5.2055-3	3.4286-3	1.2407	"

Table 4.3.3 Temperature -dependent lattice multiplication factor by SRAC.

Temperature (°K)		$\nu \Sigma_f^1$	Σ_a^1	Σ_r^1	$\nu \Sigma_f^2$	Σ_a^2	K_∞	note
Fuel	Moderator							
300	300	2.5332-4	8.0942-4	2.7326-3	6.0966-3	3.4782-3	1.4425	Resonance Calc. by PEACO
600	300	2.5210-4	8.6635-4	2.6860-3	↓	↓	1.4166	↓
900	300	2.5113-4	9.1113-4	2.6492-3	↓	↓	1.3963	↓
1200	300	2.5030-4	9.4858-4	2.6183-3	↓	↓	1.3792	↓
300	300	2.5836-4	8.3552-4	3.0096-3	6.0966-3	3.4782-3	1.4388	Resonance Calc. by IR method
600	300	2.5722-4	8.9615-4	2.9604-3	↓	↓	1.4123	↓
900	300	2.5635-4	9.4081-4	2.9240-3	↓	↓	1.3925	↓
1200	300	2.5557-4	9.7884-4	2.8927-3	↓	↓	1.3757	↓
300	600	2.5836-4	8.3552-4	3.0096-3	4.9116-3	2.8299-3	1.4266	
300	900	↓	↓	↓	4.1542-3	2.4118-3	1.4166	↓
300	1200	↓	↓	↓	3.7042-3	2.1595-3	1.4101	↓
300	300	2.5294-4	7.6318-4	2.7724-3	6.0375-3	3.4452-3	1.4631	Double heterogeneity by PEACO
600	300	-	-	-	-	-	1.4399	↓
900	300	-	-	-	-	-	1.4214	↓
1200	300	-	-	-	-	-	1.4058	↓

5. 燃料格子モデルの検討

前章までに、DELIGHT-6とSRACコードを用いて燃料格子計算を行なって来たが、計算モデルは平均格子間隔を持つ円柱に近似したものであり、そのモデルの妥当性を把握しておく必要がある。そこで、各種の形状モデル化法が核特性の解析結果に及ぼす影響をSRACコードを用いて検討した。また、同時にエネルギー群構造モデル化法の影響も検討した。

5.1 形状モデルの効果

(1) 計算モデル

燃料格子は従来のVHTRの設計計算では、燃料ブロック内の平均的な間隔を持つ円柱格子に近似され計算に用いられていたが、実際のVHTRの燃料ブロックの燃料棒配列を考慮に入れたモデルでの解析結果との比較を行ない、その円柱モデルの妥当性を検討しておく必要がある。そこで、Fig. 5.1.1に示すような5種類の計算モデルを設定して解析を行なった。

モデルAは、平均的な燃料棒間隔を持つ円柱化格子である。すなわち、燃料ブロックの軸方向余剰端黒鉛を径方向の黒鉛ブロックの一部と考え、黒鉛ブロックを均等に各燃料棒に振り分けた場合の黒鉛領域と燃料棒から構成される燃料格子である。但し、黒鉛スリーブ、He冷却材、黒鉛ブロックは均一に混合した。

モデルBは、モデルAと同様であるが、黒鉛スリーブ、He冷却材は黒鉛ブロックと均一混合せず、非均質に扱った円柱化格子である。

モデルCは、燃料ブロックの余剰端黒鉛は考慮せず、燃料ブロックの水平断面に対して、平均的な燃料棒間隔を考えた円柱化格子であり、格子外半径がモデルA、Bより若干小さい。また、中心燃料取り扱い孔は無視して、黒鉛が存在するとして扱った。このモデルは、VHTR燃料ブロックの燃料棒配列を正確に扱ったモデルCおよびモデルD(後述)と比較するためのものである。

モデルDは、燃料ブロックの水平断面の形状をモデルに採り入れたもので、黒鉛スリーブ、He冷却材は黒鉛ブロックと均一混合してある。中心の燃料取扱い孔は、モデルCと同様に黒鉛で詰めてある。計算では各燃料棒が核特性に及ぼす影響は同じであるとしている*。

モデルEは、モデルDと同じであるが、燃料棒を独立に扱ったものである**。

なお、SRACコードを用いた燃料格子モデルの検討では、解析対象とした燃料格子は、第4章の燃料格子の核特性において検討されたものと同一であるが、黒鉛ブロックの密度に若干異なる値を使用したため本章と第4章で述べられている核特性量で若干異なるものもある。

(2) 解析結果

Fig. 5.1.1に示した各種燃料格子モデルを用いて、格子の増倍率、 ^{238}U の共鳴積分、格子平均

* 具体的には燃料棒内の中性子束分布に位置依存性を無視する。

** 具体的には燃料棒内の中性子束分布に位置依存性を考慮する。

の1群および2群定数等をSRACコードにより求めた。その解析結果をTable 5.1.1のCASE1～9に示す。

表中には、燃料格子のダンコフ係数 C 、 ^{238}U の分離共鳴の130eV以下のエネルギー領域における共鳴積分値(RI^{238})、 P_1 近似に基づく中性子スペクトル計算による格子の K_{∞} 、 K_{eff} 、その中性子スペクトルを用いて縮約した2群定数、更には燃料格子の実効断面積を用いた拡散計算による格子実効増倍率および、その中性子スペクトルを用いて縮約した1群定数を示す。これらの比較から以下のことがわかる。

- ① 燃料格子のメッシュ効果はほとんどなく、3メッシュ・モデルで充分である(内側ポイド、燃料コンパクト、黒鉛ブロックの各領域を1メッシュで表わしたCASE1と、各領域を内側から2メッシュ、3メッシュおよび3メッシュの合計8メッシュで表わしたCASE2の比較から)。
- ② ^{238}U の共鳴吸収計算に、詳細群の数値計算を行なうPEACOを用いると、IR法を用いた場合より、 K_{∞} は0.25% ΔK 高く計算される(CASE1とCASE3の比較から)。
- ③ 円柱化格子で、黒鉛スリーブ、He冷却材、黒鉛ブロックを非均質に扱った場合と均一混合した場合の核特性の相違はほとんど無視出来る(CASE1とCASE4の比較から)。
- ④ VHTR燃料ブロックの断面モデル(モデルD)と円柱化モデル(モデルC)を比較すると、断面モデルではダンコフ係数は円柱化モデルの2倍以上の値を持ち、 RI^{238} は約0.5barn少ない。その結果、格子の K_{∞} は約0.4% ΔK 高くなる(CASE5とCASE6の比較)。
- ⑤ VHTR燃料ブロックの断面モデルにおいて、燃料棒を全て同一のものとして扱った場合(モデルD)と個別のものとして扱った場合(モデルE)の相違は、ほとんど無視出来る(CASE7とCASE8の比較から)。
- ⑥ 円柱化燃料格子(モデルC)において、断面モデル(モデルD)の計算から得られたダンコフ係数を用いると、核特性は断面モデルのものとはほとんど一致する(CASE6とCASE9の比較から)。

Table 5.1.1 Nuclear properties of VHTR fuel lattice (1/4).

CASE No.		1	2	3	4	5	
Parameters							
Fuel lattice		Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	
Geometry		Model A 3meshes	Model A 8meshes	Model A 3meshes	Model B 11meshes	Model C 3meshes	
Resonance calculation	Method	I R	I R	PEACO	I R	I R	
	C	2.6937-2	2.7270-2	2.6934-2	2.9655-2	3.2015-2	
	RI ²³⁸	36.260	36.256		36.229	36.187	
Fuel lattice calculation	Number of group FAST/THERMAL		61/46	61/46	61/46	61/46	
	P ₁ method	K _∞	1.4284	1.4284	1.4309	1.4290	1.4123
		K _{eff}	1.3515	1.3516	1.3538	1.3520	1.3390
Two group constants	D ₁		1.2796	1.2795	*	1.2816	1.2745
	D ₂		9.4553-1	9.4551-1	9.4553-1	9.4483-1	9.4229-1
	νΣ _f ¹		2.5835-4	2.5840-4	*	2.5812-4	2.7688-4
	νΣ _f ²		6.0927-3	6.0934-3	6.0927-3	6.0778-3	6.4582-3
	Σ _a ¹		8.3402-4	8.3407-4	*	8.3147-4	8.9248-4
	Σ _a ²		3.4756-3	3.4760-3	3.4756-3	3.4678-3	3.6744-3
	Σ _{rem}		3.0007-3	3.0008-3	*	3.0014-3	2.9687-3
Diffusion calculation	Geometry		Homogeneous media of fuel block with axial buckling 1×10 ⁻⁴	←	←	←	←
	K _{eff}		1.3541	1.3541	1.3564	1.3546	1.3419
	One group constants	D	1.1289	1.1289	1.1281	1.1295	1.1301
		νΣ _f	2.8702-3	2.8704-3	2.8692-3	2.8665-3	2.9535-3
		Σ _a	2.0072-3	2.0074-3	2.0030-3	2.0037-3	2.0885-3

Table 5.1.1 Nuclear properties of VHTR fuel lattice (2/4).

CASE No.		6	7	8	9	10	
Parameters							
Fuel lattice		Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal	Cylindrical	Cylindrical	
Geometry		Model D 5regions	Model D 5regions	Model E 17regions	Model C 3meshes	Model A 3meshes	
Resonance calculation	Method	I R	PEACO	PEACO	I R	I R	
	C	7.8536-2	7.8536-2	7.8536-2	7.8536-2	2.6937-2	
	RI ²³⁸	35.657	*	*	35.657	36.260	
Fuel lattice calculation	Number of groups FAST/THERMAL		61/46	61/46	61/46	61/46	
	P ₁ method	K _∞	1.4163	1.4188	1.4189	1.4161	1.4284
		K _{eff}	1.3427	1.3449	1.3450	1.3424	1.3515
Two group constants	D ₁		1.2744	*	*	1.2745	1.2796
	D ₂		9.4225-1	9.4225-1	9.4723-1	9.4229-1	9.4553-1
	νΣ _f ¹		2.7859-4	*	*	2.7701-3	2.5835-4
	νΣ _f ²		6.4250-3	6.4249-3	6.2342-3	6.4582-3	6.0927-3
	Σ _a ¹		8.8442-4	*	*	8.8428-4	8.3402-4
	Σ _a ²		3.6566-3	3.6566-3	3.5552-2	3.6744-3	3.4756-3
	Σ _{rem}		2.9770-3	*	*	2.9755-3	3.0007-2
Diffusion calculation	Geometry		Homogeneous media of fuel block with axial buckling 1×10 ⁻⁴	←	←	←	1-dimensional reactor core with R geometry and axial buckling
	K _{eff}		1.3447	1.3469	1.3470	1.3463	1.2502
	One group constants	D	1.1311	1.1301	1.1300	1.1303	1.1327
		νΣ _f	2.9738-3	2.9722-3	2.9716-3	2.9742-2	2.9698-3
		Σ _a	2.0989-3	2.0941-3	2.0936-3	2.0967-2	2.0534-3

Table 5.1.1 Nuclear properties of VHTR fuel lattice (3/4).

CASE No.		11	12	13	14	15	
Parameters							
Fuel lattice		Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	
Geometry		Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	
Resonance calculation	Method	IR	IR	IR	IR	IR	
	C	2.6937-2	2.6937-2	2.6937-2	2.6932-2	2.6932-2	
	RI ²³⁸	36.260	36.260	36.260	36.260	36.260	
Fuel lattice calculation	Number of group FAST/THERMAL	61/30	61/22	61/16	61/24	54/24	
	P ₁ method	K _∞	1.4284	1.4285	1.4286	1.4284	1.4321
		K _{eff}	1.3515	1.3519	1.3520	1.3518	1.3553
Two group constants	D ₁	1.2796	1.2796	1.2796	1.2796	1.2771	
	D ₂	9.4664-1	9.4069-1	9.4256-1	9.4009-1	9.4009-1	
	$\nu \Sigma_f^1$	2.5835-4	2.5835-4	2.5835-4	2.5835-4	2.5557-4	
	$\nu \Sigma_f^2$	6.0337-3	6.0629-3	6.1146-3	6.0858-3	6.0858-3	
	Σ_a^1	8.3402-4	8.3402-4	8.3402-4	8.3402-4	8.2560-4	
	Σ_a^2	3.4440-3	3.4593-3	3.4883-3	3.4717-3	3.4717-3	
	Σ_{rem}	3.0007-2	3.0007-2	3.0007-2	3.0007-3	3.0148-3	
Diffusion calculation	Geometry	1-dimensional reactor core with R geometry and axial buckling	←	←	←	←	
	K _{eff}		1.2494	1.2509	1.2520	1.2502	1.2530
	One group constants	D	1.1328	1.1301	1.1312	1.1300	1.1284
		$\nu \Sigma_f$	2.9698-3	2.9744-3	2.9784-3	2.9728-3	2.9775-3
		Σ_a	2.0534-3	2.0560-3	2.0585-3	2.0551-3	2.0535-3

Table 5.1.1 Nuclear properties of VHTR fuel lattice (4/4).

CASE No.		16	17	18	19	20	
Parameters							
Fuel lattice		Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Hexagonal	
Geometry		Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	Model A 3 meshes	Model C 3 meshes	Model D 5 regions	
Resonance calculation	Method	IR	IR	IR	IR	IR	
	C	2.6932-2	2.6932-2	2.6932-3	3.2015-2	7.8536-2	
	RI^{238}	36.260	36.260	36.260	36.187	35.657	
Fuel lattice calculation	Number of group FAST/THERMAL	39/24	31/24	38/24	38/24	38/24	
	P_1 method	K_{∞}	1.4321	1.4323	1.4286	1.4126	1.4166
		K_{eff}	1.3554	1.3547	1.3511	1.3385	1.3422
Two group constants	D_1	1.2755	1.2918	1.2940	1.2888	1.2887	
	D_2	9.4009-1	9.4009-1	9.4009-1	9.3721-1	9.3715-1	
	$\nu \sum_f^1$	2.5574-4	2.5626-4	2.5902-4	2.7761-4	2.7933-4	
	$\nu \sum_f^2$	6.0858-3	6.0858-3	6.0858-3	6.4513-3	6.4610-3	
	\sum_a^1	8.2684-4	8.2057-4	8.2893-4	8.8702-4	8.7908-4	
	\sum_a^2	3.4717-3	3.4717-3	3.4717-3	3.6705-3	3.6769-3	
	\sum_{rem}	3.0193-3	2.9908-3	2.9768-3	2.9453-3	2.9534-3	
Diffusion calculation	Geometry	1-dimensional reactor core with R geometry and axial buckling	←	←	←	←	
	One group constants	K_{eff}	1.2531	1.2516	1.2489	1.3428	1.3462
		D	1.1273	1.1370	1.1386	1.1374	1.1366
		$\nu \sum_f$	2.9801-3	2.9684-3	2.9637-3	2.9674-3	2.9649-3
		\sum_a	2.0554-3	2.0467-3	2.0482-3	2.0966-3	2.0892-3

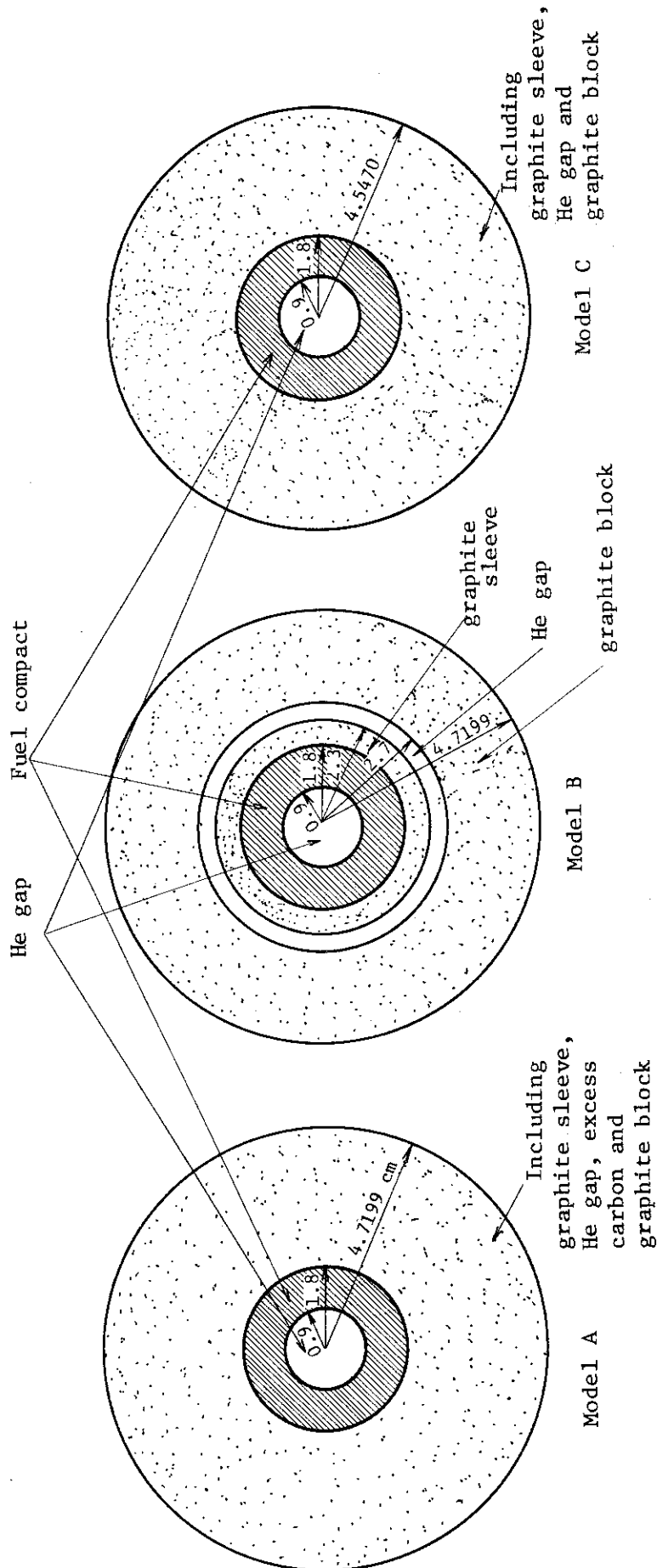
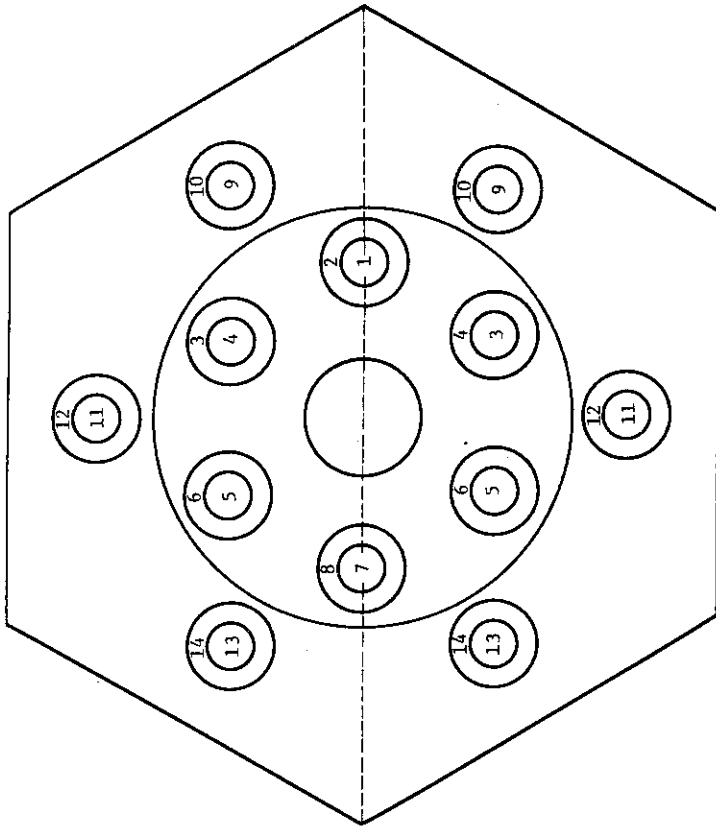
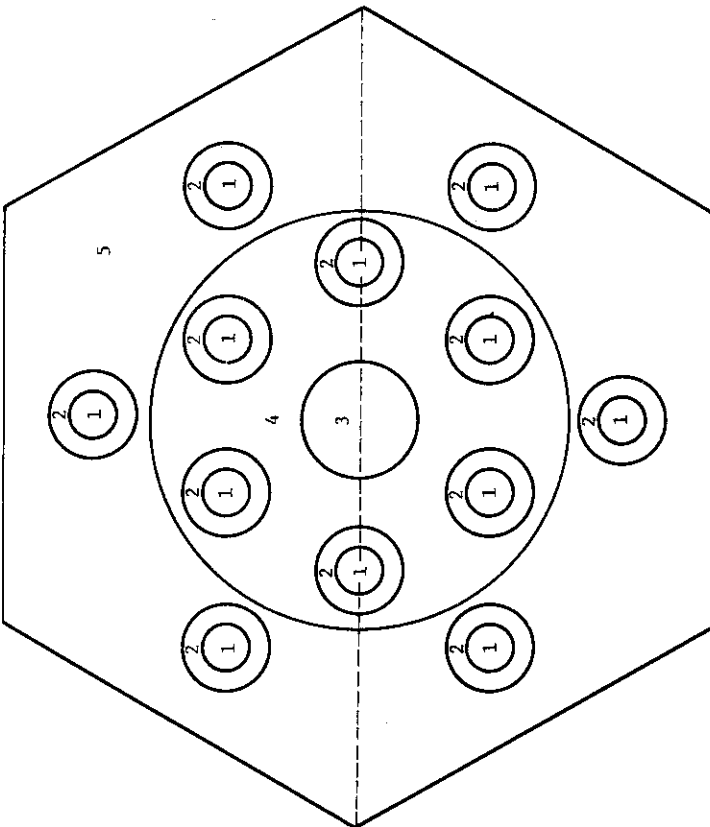


Fig. 5.1.1 Cylindrical model of VHTR fuel lattice (1/2).



Model E



Model D

Fig. 5.1.1.1 Hexagonal model of VHTR fuel block (2/2) .

5.2 エネルギー群構造モデルの効果

(1) 計算モデル

円柱化モデルAにIR法を用いた燃料格子計算、および燃料格子計算で得られた燃料体の実効断面積と反射体断面積を用いたVHTR炉心断面の拡散計算を、種々の群数エネルギーモデルについて行ない、得られた核特性の比較を行なった。

解析に用いたエネルギー群数とその構造をFig. 5.2.1に示す。SRACのオリジナル・ライブラリーには速中性子領域61群、熱中性子領域46群の断面積が用意されており、これらの断面積はSRACに内蔵された中性子スペクトルを用いて、速中性子領域は、54, 39, 38, 31群に、熱中性子領域は30, 24, 22, 16群に縮約して計算を行なった。

(2) 解析結果

燃料格子計算の結果と、1次元R座標炉心計算による実効増倍率ならびに炉心領域の1群定数をTable 5.1.1 CASE10~20に示す。

速中性子領域の群数を61群に固定し、熱中性子領域の群数を変えて行く場合、熱中性子領域46群をベースとして考えると、

- ① 燃料格子計算の段階で熱中性子領域の群数を30, 24, 22, 16と変えてもほとんど格子の K_{∞} 等の核特性量に相違は出ない(CASE10~14),
- ② 炉心計算では群数により実効増倍率が若干変わり、16群で約0.2% ΔK の相違となる。これは反射体領域の断面積の縮約に用いた中性子スペクトルと炉心計算の結果得られたものとずれが生じるためである。熱中性子領域は設計計算においては24群程度で十分である。次に、熱中性子領域の群数を24に固定し、速中性子領域の群数を61, 54, 39, 38, 31と変えた場合、61群をベースとして考えると、
- ③ ^{238}U の分離共鳴領域を広くとった54, 39, 31群の場合には、燃料格子計算の段階で格子の K_{∞} に約0.3% ΔK 程度の相違が生じ、炉心計算の K_{eff} も同程度異なっている(Case 14~17),
- ④ ^{238}U の分離共鳴領域をオリジナル・ライブラリーと同じ構造とした38群の場合には、燃料格子計算、炉心計算とも、61群の結果と相違は少ない。

以上のことから、速中性子領域では分離共鳴領域のエネルギー群幅を細かく取ることが重要であり、熱中性子領域では中性子スペクトルの相違により核特性計算結果が影響を受けにくい群構造とするよう注意を払う必要がある。

* 炉心内燃料体に対するものと同様の中性子スペクトルを想定した。

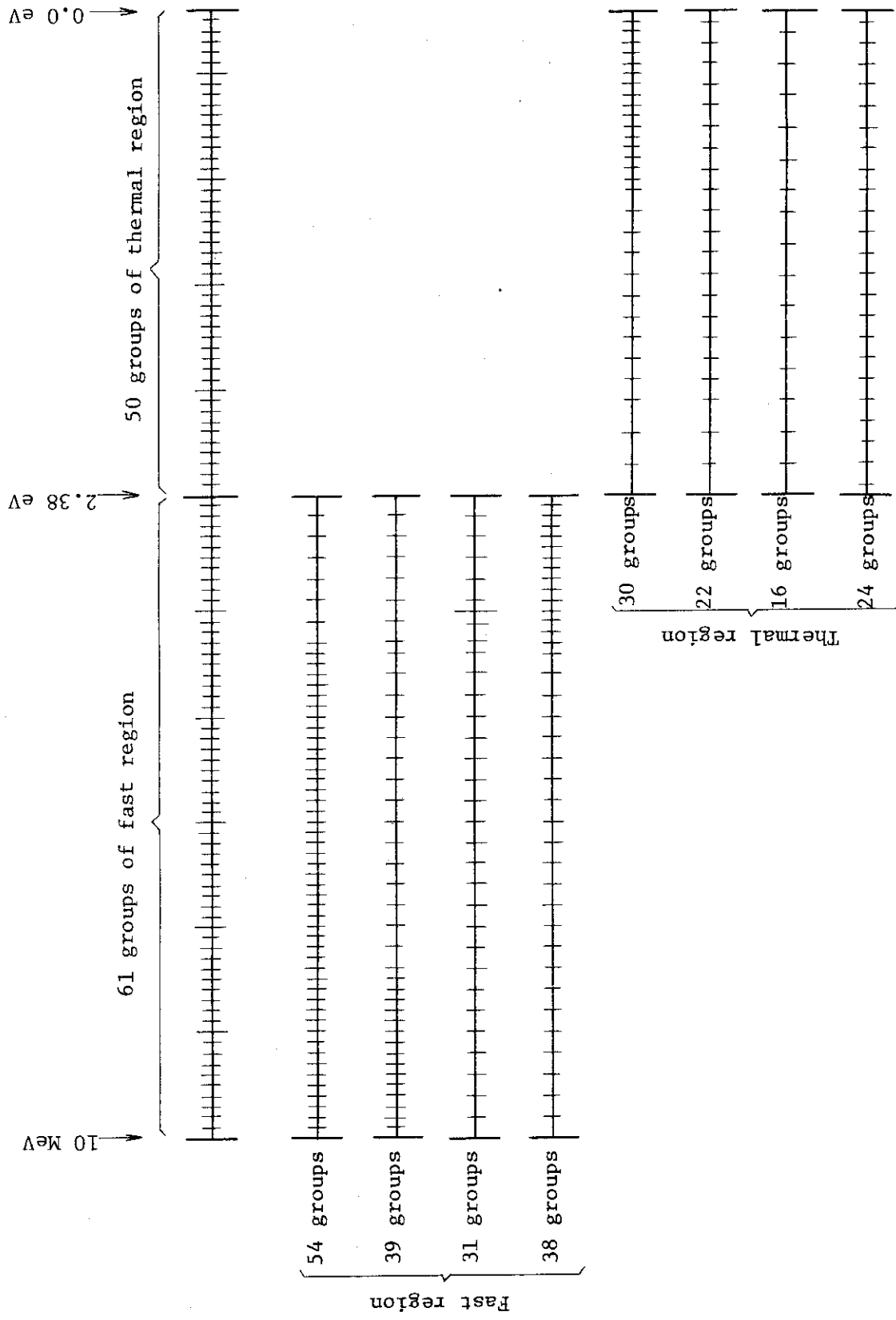


Fig. 5.2.1 Energy group structure of SRAC calculation.

5.3 ま と め

SRACコードを用いて、VHTR燃料格子の形状モデルの検討および群構造の検討を行なったが、これらの解析から計算上重要な点をまとめると、次のようになる。

- ① 六角形状のVHTR燃料ブロックの形状や燃料棒の配置をそのまま格子計算に採り入れる必要はなく、円柱にモデル化した燃料格子で充分である。但し、ダンコフ係数は六角形状の燃料ブロックに対応したものをを用いる必要がある。
- ② 円柱化格子では、黒鉛スリーブ、He冷却孔、黒鉛ブロックは区別する必要がなく、均質に扱っても良い。また、メッシュも必ずしも多くとる必要はない。
- ③ エネルギー群構造については、速中性子領域では分離共鳴領域のエネルギー群幅を細かく取ることが重要になるが、熱中性子領域では群構造は核特性計算結果に余り影響を与えないように注意する必要がある。

6. お わ り に

DELIGHT-6とSRACコードを用いたVHTRの燃料格子特性解析を通して、基本核特性量の把握、コード間の比較、モデル化上の留意点の明確化、DELIGHT-6の改良効果の確認、等を行なってきた。

DELIGHT-6は、SHE等を対象とした臨界実験解析により充分な計算精度を持つことが確認されてきているが、DELIGHT-6核特性計算量がSRACコードによる計算値とも良い一致を示したことからDELIGHT-6およびSRACコードの信頼性が確かめられたといえる。

解析モデルの点からも、格子計算の範囲ではあるが、計算時間が短かく精度の良いモデル化の手法を把握することが出来たといえる。これらの手法は今後の解析の標準的手法となり得るが、DELIGHT-6の使用実績を深める意味も含めて、更に検討が必要となるであろう。

最後に、本検討を進めるに当たり、動力炉開発・安全性研究管理部長原晶雄氏、同部次長安野武彦氏ならびに多目的高温ガス実験炉設計室の多くの方々にも多大なる御協力をいただき、深く感謝致します。また、SRACコードの使用法について、原子炉工学部土橋敬一郎氏、秋濃藤義氏に多くの助言をいただいたことに対して、心から感謝致します。

参考文献

- (1) 土井, 新藤他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6, JAERI-M 83-176(1983).
- (2) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT, JAERI-M 4449 (1971).
- (3) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-5, (未公開資料).
- (4) K.Tsuchihashi, et al, SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, JAERI 1285 (1983).

5.3 ま と め

SRACコードを用いて、VHTR燃料格子の形状モデルの検討および群構造の検討を行なったが、これらの解析から計算上重要な点をまとめると、次のようになる。

- ① 六角形状のVHTR燃料ブロックの形状や燃料棒の配置をそのまま格子計算に採り入れる必要はなく、円柱にモデル化した燃料格子で充分である。但し、ダンコフ係数は六角形状の燃料ブロックに対応したものをを用いる必要がある。
- ② 円柱化格子では、黒鉛スリーブ、He冷却孔、黒鉛ブロックは区別する必要がなく、均質に扱っても良い。また、メッシュも必ずしも多くとる必要はない。
- ③ エネルギー群構造については、速中性子領域では分離共鳴領域のエネルギー群幅を細かく取ることが重要になるが、熱中性子領域では群構造は核特性計算結果に余り影響を与えないように注意する必要がある。

6. お わ り に

DELIGHT-6とSRACコードを用いたVHTRの燃料格子特性解析を通して、基本核特性量の把握、コード間の比較、モデル化上の留意点の明確化、DELIGHT-6の改良効果の確認、等を行なってきた。

DELIGHT-6は、SHE等を対象とした臨界実験解析により充分な計算精度を持つことが確認されてきているが、DELIGHT-6核特性計算量がSRACコードによる計算値とも良い一致を示したことからDELIGHT-6およびSRACコードの信頼性が確かめられたといえる。

解析モデルの点からも、格子計算の範囲ではあるが、計算時間が短かく精度の良いモデル化の手法を把握することが出来たといえる。これらの手法は今後の解析の標準的手法となり得るが、DELIGHT-6の使用実績を深める意味も含めて、更に検討が必要となるであろう。

最後に、本検討を進めるに当たり、動力炉開発・安全性研究管理部長原晶雄氏、同部次長安野武彦氏ならびに多目的高温ガス実験炉設計室の多くの方々には多大なる御協力をいただき、深く感謝致します。また、SRACコードの使用法について、原子炉工学部土橋敬一郎氏、秋濃藤義氏に多くの助言をいただいたことに対して、心から感謝致します。

参考文献

- (1) 土井, 新藤他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6, JAERI-M 83-176(1983).
- (2) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT, JAERI-M 4449 (1971).
- (3) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-5, (未公開資料).
- (4) K.Tsuchihashi, et al, SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, JAERI 1285 (1983).

5.3 ま と め

SRACコードを用いて、VHTR燃料格子の形状モデルの検討および群構造の検討を行なったが、これらの解析から計算上重要な点をまとめると、次のようになる。

- ① 六角形状のVHTR燃料ブロックの形状や燃料棒の配置をそのまま格子計算に採り入れる必要はなく、円柱にモデル化した燃料格子で充分である。但し、ダンコフ係数は六角形状の燃料ブロックに対応したものをを用いる必要がある。
- ② 円柱化格子では、黒鉛スリーブ、He冷却孔、黒鉛ブロックは区別する必要がなく、均質に扱っても良い。また、メッシュも必ずしも多くとる必要はない。
- ③ エネルギー群構造については、速中性子領域では分離共鳴領域のエネルギー群幅を細かく取ることが重要になるが、熱中性子領域では群構造は核特性計算結果に余り影響を与えないように注意する必要がある。

6. お わ り に

DELIGHT-6とSRACコードを用いたVHTRの燃料格子特性解析を通して、基本核特性量の把握、コード間の比較、モデル化上の留意点の明確化、DELIGHT-6の改良効果の確認、等を行なってきた。

DELIGHT-6は、SHE等を対象とした臨界実験解析により充分な計算精度を持つことが確認されてきているが、DELIGHT-6核特性計算量がSRACコードによる計算値とも良い一致を示したことからDELIGHT-6およびSRACコードの信頼性が確かめられたといえる。

解析モデルの点からも、格子計算の範囲ではあるが、計算時間が短かく精度の良いモデル化の手法を把握することが出来たといえる。これらの手法は今後の解析の標準的手法となり得るが、DELIGHT-6の使用実績を深める意味も含めて、更に検討が必要となるであろう。

最後に、本検討を進めるに当たり、動力炉開発・安全性研究管理部長原晶雄氏、同部次長安野武彦氏ならびに多目的高温ガス実験炉設計室の多くの方々にも多大なる御協力をいただき、深く感謝致します。また、SRACコードの使用法について、原子炉工学部土橋敬一郎氏、秋濃藤義氏に多くの助言をいただいたことに対して、心から感謝致します。

参考文献

- (1) 土井, 新藤他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-6, JAERI-M 83-176(1983).
- (2) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT, JAERI-M 4449 (1971).
- (3) 新藤, 平野他, 高温ガス冷却炉・格子燃焼計算コード DELIGHT-5, (未公開資料).
- (4) K.Tsuchihashi, et al, SRAC: JAERI Thermal Reactor Standard Code System for Reactor Design and Analysis, JAERI 1285 (1983).