

JAERI - M
91-137

二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果
——連続エネルギーモンテカルロ法による計算——

1991年9月

桜井 良憲*・奥野 浩・内藤 倣孝

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。
入手の間合わせは、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, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)原子力資料サービス

二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果
— 連続エネルギーモンテカルロ法による計算 —

日本原子力研究所東海研究所燃料安全工学部

、桜井 良憲*・奥野 浩・内藤 俣孝

(1991年7月30日受理)

粉末あるいはスラリー燃料の反応度非均質効果を調べるため、小さな3次元セルについての臨界計算を実施した。計算対象は²³⁵U濃縮度5wt%の二酸化ウラン球状燃料無限格子配列-水体系で、水と燃料の体積比を一定のまま燃料球直径を0(均質)から6mmの間で変えた。中性子輸送方程式を連続エネルギーモンテカルロ法で解いて、反応率を計算した。さらに、無限増倍率、四因子及びそれらの均質系からの変化割合を得た。均質系から非均質系に移ると無限増倍率は増加した。この反応度増加が、主に共鳴を逃れる確率 p によるものであることを確認した。さらに、たとえば0.3%の反応度上昇が無視できるとすれば、均質と見なせる寸法は100 μ m程度になることが分った。

Effects of UO₂-fuel Grain Size on Reactivity
- Continuous Energy Monte Carlo Calculations -

Yoshinori SAKURAI*, Hiroshi OKUNO and Yoshitaka NAITO

Department of Fuel Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received July 30, 1991)

Heterogeneity effects on reactivity of powdered or slurry fuel were studied through criticality calculations of three-dimensional tiny cells, which were infinitely arrayed and consisted of a spherical fuel pellet of 5 wt% ²³⁵U-enriched uranium dioxide surrounded by water; the diameter of the fuel pellet was varied from 0 (homogeneous) to 6 mm, keeping constant the volume ratio of water to fuel. Reaction rates were calculated by solving the continuous energy transport equations by the Monte Carlo method. The infinite-medium multiplication factor and its four-factors, and their fractional changes from the homogeneous system were obtained. The infinite-medium multiplication factor increased when the system changed from homogeneous to heterogeneous. The results of calculations confirmed that the reactivity increase mainly came from the resonance escape probability p ; they also indicated that any uranium-fuel system of grain size less than 100 μm could be treated homogeneous if a 0.3 % increment of reactivity was regarded small enough to be negligible.

Keywords: Heterogeneity Effect, Grain Size, Uranium Dioxide, Cell Calculation, Continuous Energy, Monte Carlo Method, Resonance Escape Probability, Criticality Safety

* Kyoto University

目 次

1. はじめに	1
2. 燃料体系モデルと計算方法	2
3. 計算結果と検討	4
4. 結論と今後の課題	5
謝 辞	6
参考文献	6
付録 A 誤差の伝播	21
付録 B MCNP の計算結果と VIM の計算結果との比較	25
付録 C VIM 及び MCNP のジョブ制御文と入力データ	32

Contents

1. Introduction	1
2. Modelled Fuel System and Calculation Method	2
3. Results and Discussions	4
4. Conclusions and Future Problems	5
Acknowledgements	6
References	6
Appendix A Propagation of Errors	21
Appendix B MCNP Results Compared with VIM Results	25
Appendix C Job Control Cards and Input Cards for VIM and MCNP Codes	32

1. はじめに

燃料加工施設ではしばしば粉末の燃料を取り扱う。臨界安全性評価の際に、この粉末を均質とした方が一般的には取扱いが簡単である。中性子にとって粒子のくべつができない位に粒径が小さければ、この体系を均質とみなせるであろう。その非均質なウラン燃料を均質とみなしてよい燃料寸法は、フランスのハンドブック¹⁾によると熱中性子の平均自由行程の $1/5$ （濃縮度5 wt %の時で、約1.7 mm）であり、この長さはウラン濃縮度の増加とともに小さくなる。

臨界安全上の観点からは、非均質体系を均質とみなしてよい燃料寸法は、非均質系の方が均質系に比べて反応度的に低いか、高くてもその大きさが十分小さければよい。このような観点に立ち、棒状燃料の2次元配列及び球状燃料の3次元配列を対象に燃料寸法の変化に伴う反応度の変化を調べる計算が行われた²⁾。その結果、均質系から非均質系に移ったときの反応度上昇が主に共鳴を逃れる確率の増加によることが明らかになった。この計算には超多群の衝突確率法計算コードを用いたのだが、計算コードの精度が不十分なためか、燃料寸法を非常に小さくしていくと特に熱中性子利用率 f の値が均質系の計算結果と連続的につながらないという結果が得られた。上記の超多群の衝突確率法計算コードを用いた計算結果の確認と数値的な検討のため、米国立アルゴン研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロ計算コードVIM³⁾による計算を行うことにした。

評価する際に冠水状態を設定することが多いため、燃料配列の間は水で埋まっていると仮定した。また、簡単のため燃料片は規則的な無限配列をなしているとした。すなわち、計算においては、二酸化ウラン球状燃料無限格子配列-水の体系を対象に、減速材と燃料の体積比を一定として燃料寸法を変えると無限増倍率がどう変化するか、均質（すなわち燃料寸法が0）の場合と比較してどうかを数値的に調べた。以下、第2章には計算体系と計算方法について記す。第3章には計算結果とその検討について述べ、最後に第4章では結論と今後の課題についてまとめる。なお、計算上の補足事項として誤差伝播の計算を付録Aに記す。米国立ロスアラモス研究所で開発された連続エネルギーモンテカルロ計算コードMCNP⁴⁾を用いた計算も行った。その計算結果及びVIMコードの計算結果との比較を付録Bに示す。なお、MCNPコードを使用した計算ではセルの形状を立方体と球との2種類を選んだ。さらに、VIM及びMCNPのジョブ制御文と入力データを付録Cに示す。

2. 燃料体系モデルと計算方法

まず、計算体系について述べる。二酸化ウラン球状燃料無限配列-水の体系とし、単位セルは図1に示すように球状の燃料が立方体の水の中央に配置されているものとする。境界条件は鏡面反射条件を採用する。表1に対象系のウラン濃縮度、均質化ウラン濃度、減速材と燃料の体積比を示す。同時に、二酸化ウラン燃料、水及び両者の均質化燃料の組成と原子個数密度も表1に示す。文献2)では濃縮度を3wt%から40wt%へと変えた計算を実施したが、ここでは濃縮度は5wt%の場合だけを対象とする。燃料球直径は、いずれの場合も0(均質)、2, 4, 6mmとする。なお、濃縮度5wt%では均質化ウラン濃度が2.0gU/cm³の場合が最適減速となっている⁵⁾。この場合を基準とし、0.5mm, 1mmの計算も行う。

以上のような体系において、連続エネルギーモンテカルロ計算コードVIM³⁾によってセル計算を行う。計算の流れを図2.1及び図2.2に示す。評価済み核データファイルとしてはENDF/B-IV⁶⁾を用いる。また、ここではVIMユーザー用ライブラリーとしては既に用意されたものを用いる。また、初めの無視する世代数を5、実際の計算に勘定に入れる世代数を100、1世代当りの粒子数を2,000として計算を行う。

算出された中性子束を高速群 ($E \geq 1.85539 \text{ eV}$) と熱群 ($E \leq 1.85539 \text{ eV}$) の2群に分ける(ここで、高速群はMGCLライブラリー⁷⁾の92群以上のエネルギー、熱群は93群以下のエネルギーに対応している)。これらの中性子束を重みにして、微視的断面積を原子個数密度、エネルギー及び領域の体積について積分することにより、反応率を計算する。さらに、四因子及び無限増倍率 k_{∞} を算出する。すなわち、高速核分裂効果 ϵ 、再生率 η 、熱中性子利用率 f 及び共鳴を逃れる確率 p は、

$$\epsilon = \frac{[\nu \Sigma_f]^{F_{fast}} + [\nu \Sigma_f]^{F_{th}}}{[\nu \Sigma_f]^{F_{th}}}$$

$$\eta = \frac{[\nu \Sigma_f]^{F_{th}}}{[\Sigma_a^F]^{F_{th}}}$$

$$f = \frac{[\Sigma_a]^{F_{th}}}{[\Sigma_a]^{F_{th}} + [\Sigma_a]^{M_{th}}}$$

$$p = \frac{[\Sigma_a]^{F_{th}} + [\Sigma_a]^{M_{th}}}{[\Sigma_a]^{F_{fast}} + [\Sigma_a]^{M_{fast}} + [\Sigma_a]^{F_{th}} + [\Sigma_a]^{M_{th}}}$$

と表される。また、無限増倍率はこれら四因子の積で表される。即ち、

$$k_{\infty} = \epsilon \eta f p$$

である。ここで、

- $[\nu \Sigma_f]^{F_{fast}}$: 燃料での高速群の生成反応率、
- $[\nu \Sigma_f]^{F_{th}}$: 燃料での熱群の生成反応率、
- $[\Sigma_a]^{F_{fast}}$: 燃料での高速群の吸収反応率、
- $[\Sigma_a]^{F_{th}}$: 燃料での熱群の吸収反応率、
- $[\Sigma_a]^{M_{fast}}$: 減速材での高速群の吸収反応率、
- $[\Sigma_a]^{M_{th}}$: 減速材での熱群の吸収反応率。

なお、燃料及び減速材は領域で区別する。従って、 UO_2 中のOは燃料、 H_2O 中のOは減速材として取扱う。

3. 計算結果と検討

5 wt%濃縮の二酸化ウラン-水の非均質燃料で、均質化ウラン濃度（または水対燃料体積比）を表1に示したように3種類とり、それぞれ燃料球直径を変えて吸収及び生成反応率を計算した。その結果を表2.1から表2.3に示す。これらの表ではVIMコードで出力されている3つの推定法（アナログ、飛跡長、散乱）のうち飛跡長推定法(track length estimator)のデータを採用した。()中には相対誤差を示す。これらの各反応率より四因子を前節に記した式により計算した。その結果及び無限増倍率 k_{∞} の値をそれぞれの場合について表3.1から表3.3に示す。()で示したのは絶対誤差である。なおここでは、無限増倍率 k_{∞} の値は四因子の積ではなく、VIMコードで出力されている値（上記の3つの推定法で求めた値の平均値）を採用した。さらに、均質系からの変化割合を表4.1から表4.3に示す。()内に示したのは絶対誤差である。これらの誤差の伝播は付録Aに記した式により計算した。

水対燃料体積比3.83のときに、燃料球直径の変化による無限増倍率 k_{∞} 及び四因子の変化を図3に示す。この図より次のことが分る。無限増倍率 k_{∞} は燃料直径が大きくなるとともに1.45から1.52へと増大する。四因子のうち再生率 η は1.91、高速核分裂効果 ϵ は1.11で燃料直径に殆ど依存しない。共鳴を逃れる確率 p は均質から非均質に移ると急激に増大する。これに対して熱中性子利用率 f は、燃料球直径の増加に伴い単調に減少する。また、 k_{∞} に対する計算誤差は主に再生率 η の計算誤差に起因し、他の因子には殆ど計算誤差が現れない。

図4は、 k_{∞} 、 p 及び f の燃料球直径の変化に伴う均質に対する変化割合である。共鳴を逃れる確率 p の増加は熱中性子利用率 f の減少を上回る。結局、燃料の寸法を大きくしたときに k_{∞} が増加するのは主に共鳴を逃れる確率 p の増加によるものであることが分る。 k_{∞} にはかなり大きな計算誤差が現れるため、 p の増加割合で非均質効果を評価する。この図から、 p が0.3%上昇するときの燃料球直径の寸法は $100\mu\text{m}$ と読取られる。それゆえ、たとえば0.3%の反応度上昇が無視できるとすれば、均質と見なせる寸法は $100\mu\text{m}$ 程度になることが分る。この0.3%というのは、中性子増倍率をモンテカルロ法で計算する際の典型的な計算誤差の程度である。

図5は、燃料球直径に対する無限増倍率 k_{∞} の変化割合を各々の水対燃料体積比について比較したものである。燃料球直径が2mmのときには、変化割合は水対燃

料体積比にほとんど依存しない。しかし、水対燃料体積比が8.65の場合では、無限増倍率の変化割合が燃料球直径が4mmを越えたところで減少しており、水対燃料体積比の値による相異が現れてくることが分る。

図6に水対燃料体積比の各場合について、 ϵ 、 p 、 f 、 η 及び k_{∞} を比較したものを示す。この図より、いずれの場合も k_{∞} が増加するのは主に共鳴を逃れる確率 p の増加によるものであることが確認できる。さらに、水対燃料体積比8.65で燃料球直径が4mmを越えると k_{∞} が減少するのは熱中性子利用率 f の減少によることが分る。

4. 結論と今後の課題

低濃縮二酸化ウラン球状燃料と水からなる配列系では、燃料球直径が0.5mmとかなり小さいところでも、非均質系の方が均質系よりも無限増倍率 k_{∞} が大きいという結果が得られた。従って、フランスのハンドブックに記されているようなしきい値は存在しないか、あるいは存在したとしても非常に小さいところであると言える。均質系から非均質系に移ったときに無限増倍率が増大するのは主に共鳴を逃れる確率が増大することによることを確認した。これは水対燃料体積比に依存しない。共鳴を逃れる確率の均質系からの増加割合から、0.3%の反応度上昇が無視できるとすれば、均質と見なせる寸法は100 μ m程度になることが分った。

付録Bに記したように、寸法が半分になるとモンテカルロ法では計算CPU時間が約2倍になった。燃料球直径が0.5mmでは約2時間のCPU時間を要した。それゆえ、さらに燃料球直径を小さくしたときにこの方法で計算することは困難である。これを如何なる方法で行うかが今後の課題であろう。

料体積比にほとんど依存しない。しかし、水対燃料体積比が8.65の場合では、無限増倍率の変化割合が燃料球直径が4mmを越えたところで減少しており、水対燃料体積比の値による相異が現れてくることが分る。

図6に水対燃料体積比の各場合について、 ϵ 、 p 、 f 、 η 及び k_{∞} を比較したものを示す。この図より、いずれの場合も k_{∞} が増加するのは主に共鳴を逃れる確率 p の増加によるものであることが確認できる。さらに、水対燃料体積比8.65で燃料球直径が4mmを越えると k_{∞} が減少するのは熱中性子利用率 f の減少によることが分る。

4. 結論と今後の課題

低濃縮二酸化ウラン球状燃料と水からなる配列系では、燃料球直径が0.5mmとかなり小さいところでも、非均質系の方が均質系よりも無限増倍率 k_{∞} が大きいという結果が得られた。従って、フランスのハンドブックに記されているようなしきい値は存在しないか、あるいは存在したとしても非常に小さいところであると言える。均質系から非均質系に移ったときに無限増倍率が増大するのは主に共鳴を逃れる確率が増大することによることを確認した。これは水対燃料体積比に依存しない。共鳴を逃れる確率の均質系からの増加割合から、0.3%の反応度上昇が無視できるとすれば、均質と見なせる寸法は100 μ m程度になることが分った。

付録Bに記したように、寸法が半分になるとモンテカルロ法では計算CPU時間が約2倍になった。燃料球直径が0.5mmでは約2時間のCPU時間を要した。それゆえ、さらに燃料球直径を小さくしたときにこの方法で計算することは困難である。これを如何なる方法で行うかが今後の課題であろう。

謝 辞

本研究は、桜井が平成2年度の夏期休暇実習生として日本原子力研究所に滞在中行った計算に主に基づくものです。期間中、計算を行う上で適切なアドバイスを下さった燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室の小室雄一氏（現在、(財)核物質管理センター所属）を始め同室の皆様に感謝いたします。さらに、VIM及びMCNPの使用に際して御指導下さった原子炉工学部原子炉システム研究室の森貴正氏並びに中川正幸氏、MCNP用のJENDL-3の使用に際してアドバイス下さった原子炉工学部核融合炉物理研究室の小迫和明氏に御礼申し上げます。

また、計算結果については臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ（グループリーダー：仁科浩二郎 名古屋大学工学部教授）の下に設置された第二サブワーキンググループのもとで御検討いただきました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) "Guide de Criticité", CEA-R3114, Commissariat à l'Énergie Atomique(1967).
- 2) 奥野浩・奥田泰久、「二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果—超多群衝突確率法計算コードを用いた計算による検討—」、JAERI-M91-107(1991).
- 3) L.J.Milton, "VIM User's Guide", Argonne National Laboratory(1981).
- 4) J.F.Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A", Los Alamos National Lab., LA--7396-M-Rev.2, (1986).
- 5) W.Heinicke, H.Krug, W.Thomas, W.Weber and B.Gmal, "Handbuch zur Kritikalität", Gesellschaft für Reaktorsicherheit(1985).
- 6) "ENDF/B Summary Documentation", BNL-NCS-17541(ENDF-201), 2nd Edition (ENDF/B-IV)(1975).
- 7) Y.Naito, S.Tsuruta., T.Matsumura and T.Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396(1981).

謝 辞

本研究は、桜井が平成2年度の夏期休暇実習生として日本原子力研究所に滞在中行った計算に主に基づくものです。期間中、計算を行う上で適切なアドバイスを下さった燃料安全工学部核燃料施設安全評価研究室の小室雄一氏（現在、(財)核物質管理センター所属）を始め同室の皆様に感謝いたします。さらに、VIM及びMCNPの使用に際して御指導下さった原子炉工学部原子炉システム研究室の森貴正氏並びに中川正幸氏、MCNP用のJENDL-3の使用に際してアドバイス下さった原子炉工学部核融合炉物理研究室の小迫和明氏に御礼申し上げます。

また、計算結果については臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ（グループリーダー：仁科浩二郎 名古屋大学工学部教授）の下に設置された第二サブワーキンググループのもとで御検討いただきました。ここに記して謝辞といたします。

参考文献

- 1) "Guide de Criticité", CEA-R3114, Commissariat à l'Énergie Atomique (1967).
- 2) 奥野浩・奥田泰久、「二酸化ウラン燃料粒径の反応度に及ぼす効果—超多群衝突確率法計算コードを用いた計算による検討—」、JAERI-M91-107(1991).
- 3) L.J.Milton, "VIM User's Guide", Argonne National Laboratory (1981).
- 4) J.F.Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A", Los Alamos National Lab., LA--7396-M-Rev.2, (1986).
- 5) W.Heinicke, H.Krug, W.Thomas, W.Weber and B.Gmal, "Handbuch zur Kritikalität", Gesellschaft für Reaktorsicherheit (1985).
- 6) "ENDF/B Summary Documentation", BNL-NCS-17541 (ENDF-201), 2nd Edition (ENDF/B-IV) (1975).
- 7) Y.Naito, S.Tsuruta., T.Matsumura and T.Ohuchi, "MGCL-PROCESSOR: A Computer Code System for Processing Multigroup Constants Library MGCL", JAERI-M9396 (1981).

表1 計算対象の水対燃料体積比及び組成とその密度

物質	ウラン濃縮度 [wt%]	均質化ウラン濃度 [gU/cm ³]	水対燃料体積比	原子個数密度 [atoms/barn·cm]			
				¹ H	¹⁶ O	²³⁵ U	²³⁸ U
均質 燃料	5.0	1.0	8.65	5.9822×10^{-2}	3.4974×10^{-2}	1.2810×10^{-4}	2.4032×10^{-3}
	5.0	2.0	3.83	5.2910×10^{-2}	3.6580×10^{-2}	2.5621×10^{-4}	4.8065×10^{-3}
	5.0	3.0	2.22	4.5998×10^{-2}	3.8187×10^{-2}	3.8431×10^{-4}	7.2097×10^{-3}
UO ₂ 燃料	5.0	—	—	0.0	4.8880×10^{-2}	1.2368×10^{-3}	2.3203×10^{-2}
減速材 (水, 20°C)			—	6.6734×10^{-2}	3.3367×10^{-2}	0.0	0.0

表2.1 均質化ウラン濃度1.0 g U / c m³ (水対燃料体積比8.65) の場合の反応率の計算結果

燃料球直径	反応率 (誤差)							
	生成反応率				吸収反応率			
	高速群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] ^{F_{fast}}	熱群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] ^{F_{th}}	高速群・燃料 [Σ_a] ^{F_{fast}}	熱群・燃料 [Σ_a] ^{F_{th}}	高速群・減速材 [Σ_a] ^{M_{fast}}	熱群・減速材 [Σ_a] ^{M_{th}}		
0.0 (均質)	7.0432 × 10 ⁻² (0.150%)	1.3259 (0.233%)	1.5623 × 10 ⁻¹ (0.317%)	6.9179 × 10 ⁻¹ (0.217%)	5.9142 × 10 ⁻³ (0.341%)	1.5163 × 10 ⁻¹ (0.229%)		
2.0	7.1635 × 10 ⁻² (0.181%)	1.3610 (0.302%)	1.1939 × 10 ⁻¹ (0.477%)	7.1015 × 10 ⁻¹ (0.301%)	5.9460 × 10 ⁻³ (0.432%)	1.6527 × 10 ⁻¹ (0.313%)		
4.0	7.1970 × 10 ⁻² (0.210%)	1.3657 (0.220%)	1.0594 × 10 ⁻¹ (0.472%)	7.1270 × 10 ⁻¹ (0.220%)	5.9825 × 10 ⁻³ (0.483%)	1.7633 × 10 ⁻¹ (0.215%)		
6.0	7.2533 × 10 ⁻² (0.174%)	1.3589 (0.268%)	9.6922 × 10 ⁻² (0.428%)	7.0920 × 10 ⁻¹ (0.268%)	6.0050 × 10 ⁻³ (0.404%)	1.8681 × 10 ⁻¹ (0.226%)		

表2.2 均質化ウラン濃度2.0 g U/cm³ (水対燃料体積比3.83) の場合の反応率の計算結果

燃料球直径 [mm]	反応率 (誤差)					
	生成反応率			吸収反応率		
	高速群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{fast}	熱群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{th}	高速群・燃料 [Σ_a] F_{fast}	熱群・燃料 [Σ_a] F_{th}	高速群・減速材 [Σ_a] M_{fast}	熱群・減速材 [Σ_a] M_{th}
0.0 (均質)	1.4501 × 10 ⁻¹ (0.175%)	1.3034 (0.285%)	2.4662 × 10 ⁻¹ (0.255%)	6.8185 × 10 ⁻¹ (0.264%)	5.2259 × 10 ⁻³ (0.413%)	6.6994 × 10 ⁻² (0.277%)
0.5	1.4495 × 10 ⁻¹ (0.184%)	1.3198 (0.280%)	2.3845 × 10 ⁻¹ (0.252%)	6.9043 × 10 ⁻¹ (0.278%)	5.2628 × 10 ⁻³ (0.306%)	6.8794 × 10 ⁻² (0.253%)
1.0	1.4535 × 10 ⁻¹ (0.233%)	1.3267 (0.251%)	2.3190 × 10 ⁻¹ (0.364%)	6.9404 × 10 ⁻¹ (0.250%)	5.3331 × 10 ⁻³ (0.283%)	7.0115 × 10 ⁻² (0.235%)
2.0	1.4497 × 10 ⁻¹ (0.161%)	1.3419 (0.315%)	2.2063 × 10 ⁻¹ (0.363%)	7.0203 × 10 ⁻¹ (0.314%)	5.3051 × 10 ⁻³ (0.349%)	7.2856 × 10 ⁻² (0.305%)
4.0	1.4566 × 10 ⁻¹ (0.193%)	1.3622 (0.373%)	2.0400 × 10 ⁻¹ (0.259%)	7.1263 × 10 ⁻¹ (0.370%)	5.3686 × 10 ⁻³ (0.489%)	7.8173 × 10 ⁻² (0.344%)
6.0	1.4633 × 10 ⁻¹ (0.256%)	1.3730 (0.307%)	1.9268 × 10 ⁻¹ (0.425%)	7.1834 × 10 ⁻¹ (0.305%)	5.3700 × 10 ⁻³ (0.416%)	8.3103 × 10 ⁻² (0.309%)

表 2.3 均質化ウラン濃度 $3.0 \text{ g U} / \text{cm}^3$ (水対燃料体積比 2.22) の場合の反応率の計算結果

燃料球直径	反応率 (誤差)							
	生成反応率				吸収反応率			
	高速群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{fast}	熱群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{th}	高速群・燃料 [Σ_a] F_{fast}	熱群・燃料 [Σ_a] F_{th}	高速群・減速材 [Σ_a] M_{fast}	熱群・減速材 [Σ_a] M_{th}		
0.0 (均質)	2.2626×10^{-1} (0.104%)	1.2008 (0.304%)	3.3551×10^{-1} (0.179%)	6.3007×10^{-1} (0.281%)	4.6448×10^{-3} (0.312%)	3.6431×10^{-2} (0.300%)		
2.0	2.2526×10^{-1} (0.162%)	1.2295 (0.274%)	3.1355×10^{-1} (0.295%)	6.4515×10^{-1} (0.272%)	4.6947×10^{-3} (0.354%)	3.9265×10^{-2} (0.247%)		
4.0	2.2638×10^{-1} (0.238%)	1.2341 (0.256%)	3.0073×10^{-1} (0.228%)	6.4761×10^{-1} (0.255%)	4.7592×10^{-3} (0.391%)	4.1367×10^{-2} (0.283%)		
6.0	2.2623×10^{-1} (0.225%)	1.2576 (0.289%)	2.8905×10^{-1} (0.264%)	6.5989×10^{-1} (0.288%)	4.7465×10^{-3} (0.446%)	4.4519×10^{-2} (0.286%)		

表3.1 均質化ウラン濃度 1.0 g U/cm^3 (水対燃料体積比8.65) の場合の四因子及び無限増倍率

燃料球直径 [mm]	ϵ	p	f	η	k_{∞}
0.0 (均質)	1.05312 (± 0.00015)	0.83875 (± 0.00048)	0.82022 (± 0.00047)	1.91662 (± 0.00610)	1.39503 (± 0.00239)
2.0	1.05263 (± 0.00019)	0.87476 (± 0.00057)	0.81121 (± 0.00067)	1.91650 (± 0.00817)	1.43329 (± 0.00222)
4.0	1.05270 (± 0.00016)	0.88818 (± 0.00048)	0.80166 (± 0.00049)	1.91623 (± 0.00596)	1.43839 (± 0.00199)
6.0	1.05338 (± 0.00017)	0.89696 (± 0.00042)	0.79151 (± 0.00058)	1.91610 (± 0.00726)	1.43124 (± 0.00200)

表3.2 均質化ウラン濃度 2.0 g U/cm^3 (水対燃料体積比3.83) の場合の四因子及び無限増倍率

燃料球直径 [mm]	ϵ	p	f	η	k_{∞}
0.0 (均質)	1.11125 (± 0.00037)	0.74833 (± 0.00065)	0.91054 (± 0.00031)	1.91156 (± 0.00743)	1.44874 (± 0.00290)
0.5	1.10983 (± 0.00037)	0.75700 (± 0.00065)	0.90939 (± 0.00031)	1.91156 (± 0.00754)	1.46149 (± 0.00204)
1.0	1.10956 (± 0.00038)	0.76310 (± 0.00076)	0.90825 (± 0.00029)	1.91156 (± 0.00677)	1.47198 (± 0.00208)
2.0	1.10803 (± 0.00038)	0.77425 (± 0.00080)	0.90598 (± 0.00037)	1.91146 (± 0.00850)	1.48611 (± 0.00241)
4.0	1.10693 (± 0.00045)	0.79067 (± 0.00069)	0.90115 (± 0.00045)	1.91151 (± 0.01004)	1.50732 (± 0.00245)
6.0	1.10658 (± 0.00043)	0.80185 (± 0.00079)	0.89631 (± 0.00040)	1.91135 (± 0.00827)	1.51831 (± 0.00209)

表3.3 均質化ウラン濃度 3.0 g U / cm^3 (水対燃料体積比2.22)の場合の四因子及び無限増倍率

燃料球直径 [mm]	ϵ	ρ	f	η	k_{∞}
0.0 (均質)	1.18842 (± 0.00061)	0.66209 (± 0.00071)	0.94534 (± 0.00021)	1.90582 (± 0.00789)	1.42357 (± 0.00251)
2.0	1.18321 (± 0.00058)	0.68260 (± 0.00084)	0.94263 (± 0.00020)	1.90576 (± 0.00736)	1.45294 (± 0.00231)
4.0	1.18344 (± 0.00064)	0.69281 (± 0.00070)	0.93996 (± 0.00021)	1.90562 (± 0.00689)	1.46675 (± 0.00219)
6.0	1.17989 (± 0.00066)	0.70568 (± 0.00078)	0.93680 (± 0.00024)	1.90577 (± 0.00778)	1.48720 (± 0.00198)

表4.1 均質化ウラン濃度 1.0 g U / cm^3 (水対燃料体積比8.65)の場合の四因子及び無限増倍率の均質系からの変化割合

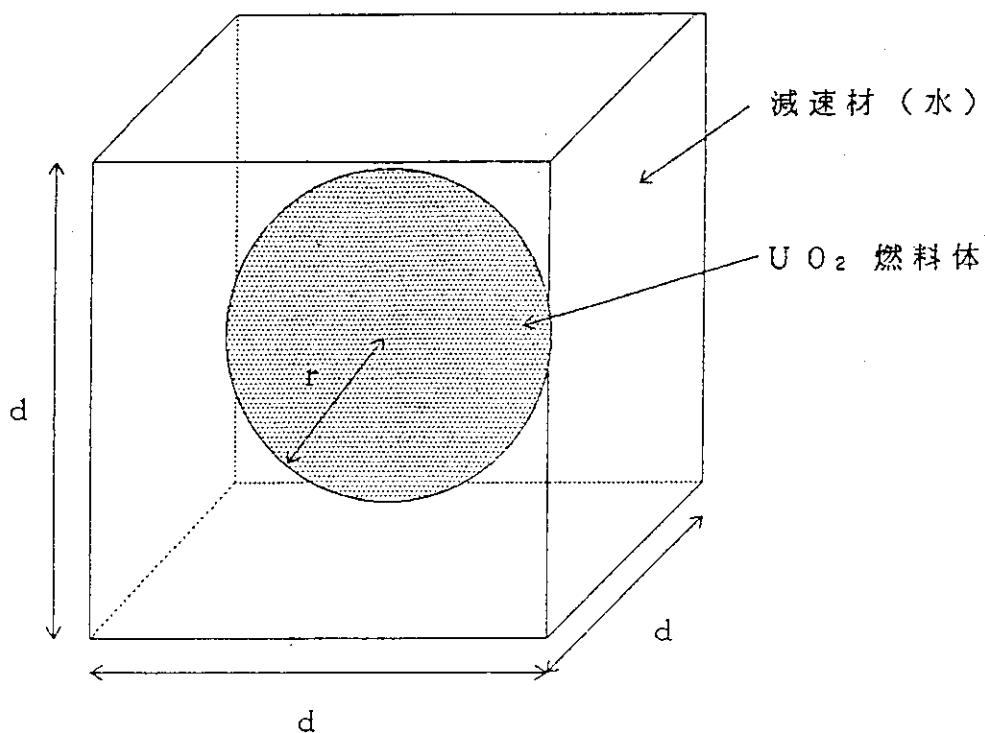
燃料球直径 [mm]	$\Delta \epsilon / \epsilon$	$\Delta \rho / \rho$	$\Delta f / f$	$\Delta \eta / \eta$	$\Delta k_{\infty} / k_{\infty}$
2.0	-0.00046 (± 0.00022)	0.04293 (± 0.00091)	-0.01098 (± 0.00099)	0.00007 (± 0.00532)	0.02742 (± 0.00237)
4.0	-0.00040 (± 0.00021)	0.05893 (± 0.00083)	-0.02263 (± 0.00081)	-0.00020 (± 0.00445)	0.03108 (± 0.00227)
6.0	0.00024 (± 0.00021)	0.06940 (± 0.00080)	-0.03500 (± 0.00089)	-0.00027 (± 0.00495)	0.02596 (± 0.00227)

表4.2 均質化ウラン濃度 2.0 g U / cm^3 (水対燃料体積比3.83) の場合の四因子及び無限増倍率の均質系からの変化割合

燃料球直径 [mm]	$\Delta \epsilon / \epsilon$	$\Delta \rho / \rho$	$\Delta f / f$	$\Delta \eta / \eta$	$\Delta k_{\infty} / k_{\infty}$
0.5	-0.00128 (± 0.00047)	0.01159 (± 0.00124)	-0.00126 (± 0.00048)	-0.00000 (± 0.00554)	0.00880 (± 0.00246)
1.0	-0.00153 (± 0.00048)	0.01973 (± 0.00136)	-0.00252 (± 0.00046)	-0.00000 (± 0.00526)	0.01604 (± 0.00249)
2.0	-0.00290 (± 0.00048)	0.03464 (± 0.00140)	-0.00501 (± 0.00053)	-0.00006 (± 0.00591)	0.02579 (± 0.00264)
4.0	-0.00389 (± 0.00052)	0.05658 (± 0.00131)	-0.01031 (± 0.00060)	-0.00003 (± 0.00653)	0.04043 (± 0.00268)
6.0	-0.00421 (± 0.00051)	0.07152 (± 0.00141)	-0.01563 (± 0.00056)	-0.00011 (± 0.00589)	0.04802 (± 0.00255)

表4.3 均質化ウラン濃度 3.0 g U / cm^3 (水対燃料体積比2.22) の場合の四因子及び無限増倍率の均質系からの変化割合

燃料球直径 [mm]	$\Delta \epsilon / \epsilon$	$\Delta \rho / \rho$	$\Delta f / f$	$\Delta \eta / \eta$	$\Delta k_{\infty} / k_{\infty}$
2.0	-0.00439 (± 0.00071)	0.03097 (± 0.00169)	-0.00287 (± 0.00031)	-0.00003 (± 0.00566)	0.02063 (± 0.00242)
4.0	-0.00420 (± 0.00074)	0.04639 (± 0.00155)	-0.00569 (± 0.00032)	-0.00010 (± 0.00549)	0.03033 (± 0.00238)
6.0	-0.00718 (± 0.00075)	0.06582 (± 0.00165)	-0.00903 (± 0.00034)	-0.00003 (± 0.00581)	0.04470 (± 0.00231)



r : 燃料体半径
 V_{H_2O} / V_{UO_2} : 水对燃料体積比

$$d^3 = (V_{H_2O} / V_{UO_2} + 1) \frac{4}{3} \pi r^3$$

図1 計算体系図

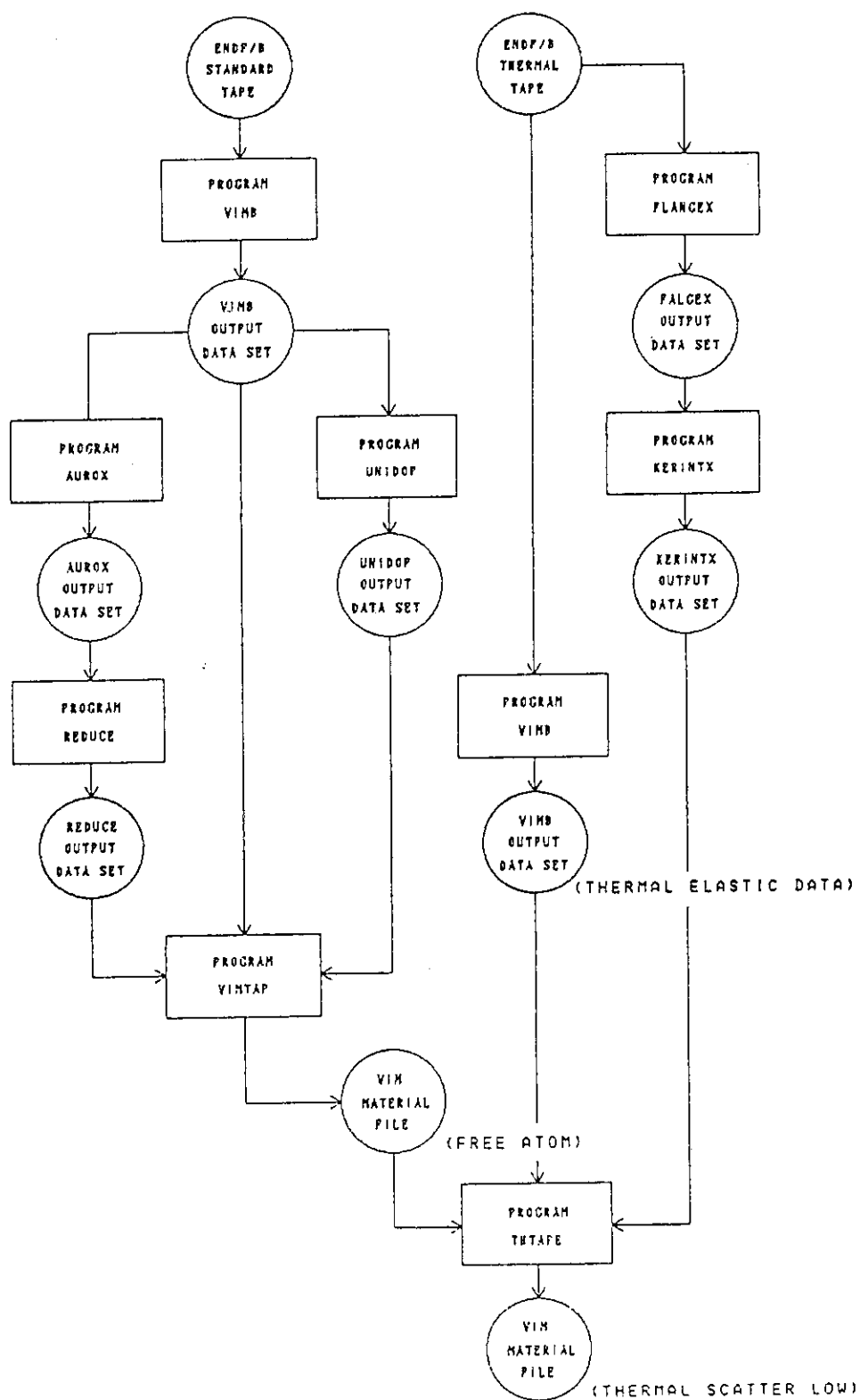


図2.1 ENDF/BファイルからVIMコード用の物質毎のデータ (VIM MATERIAL FILE) を準備するための計算流れ図

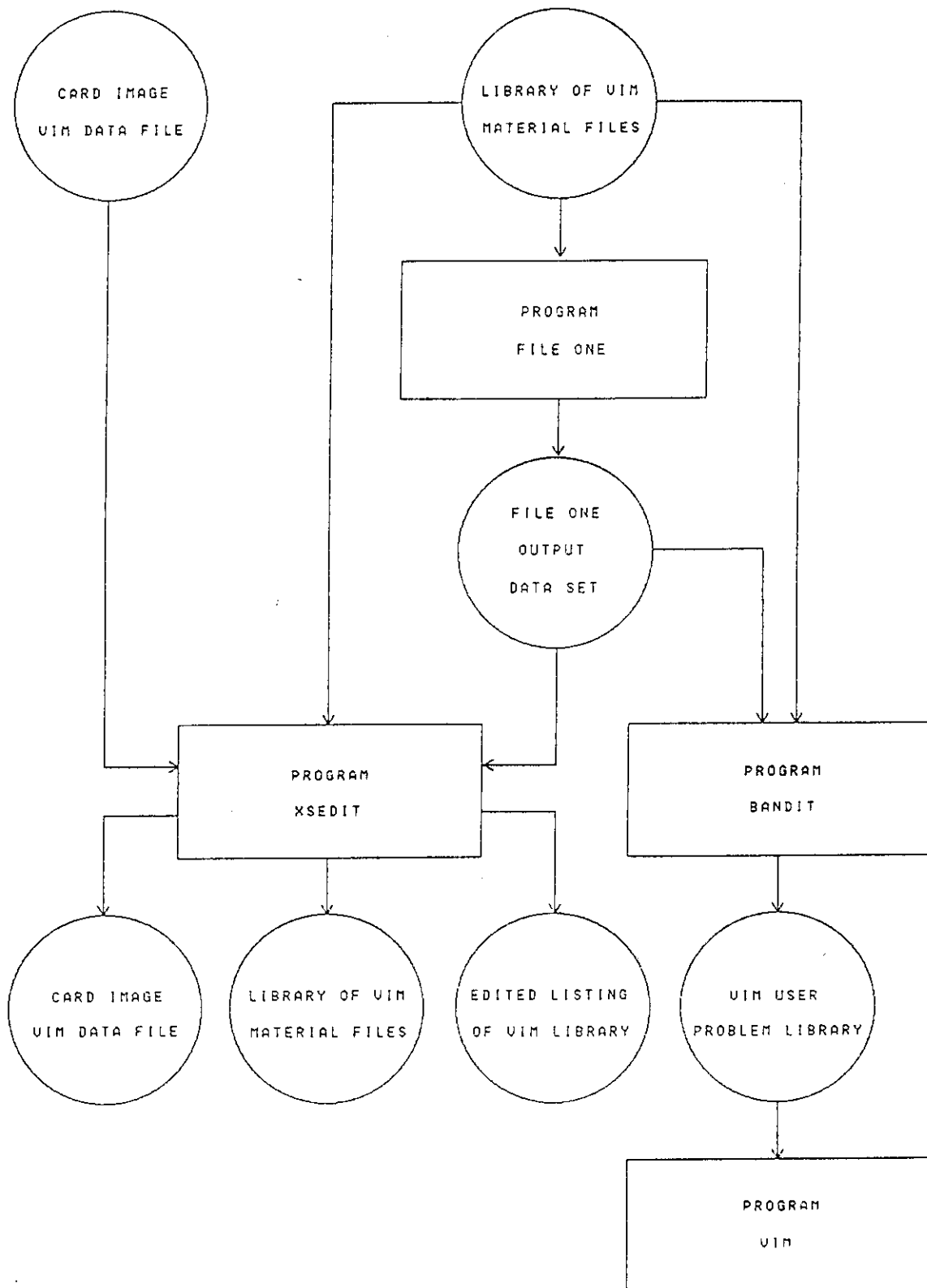


図2.2 物質毎のデータ (VIM MATERIAL FILE) 以降の計算流れ図

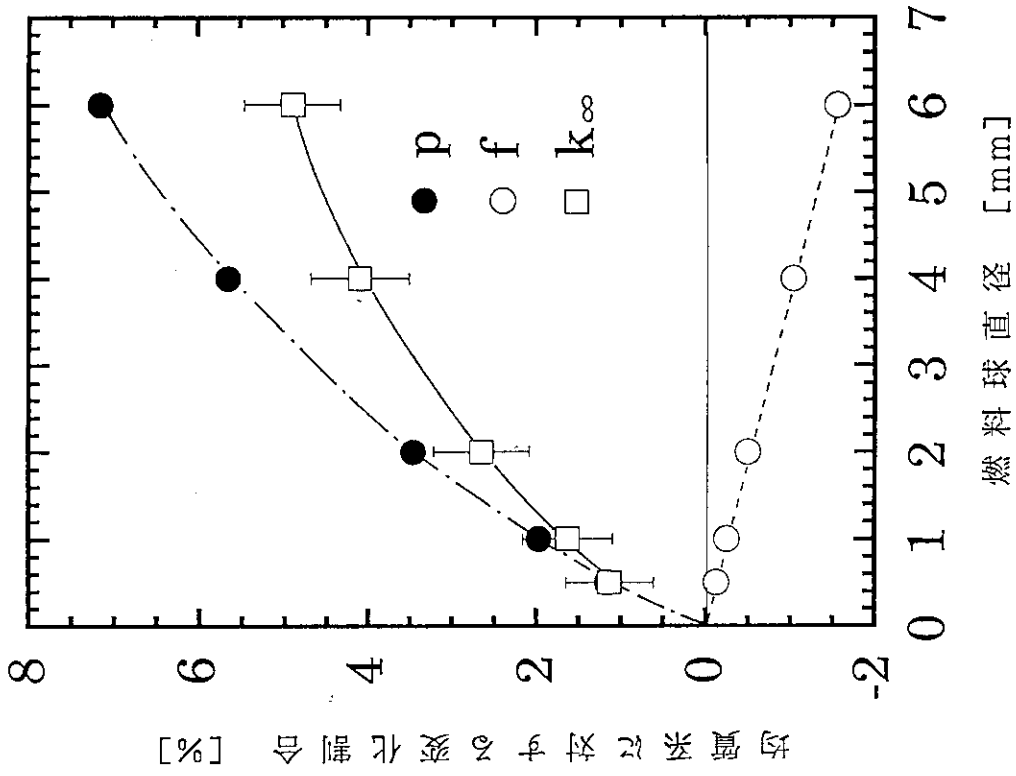


図4 燃料球直径の変化に伴う熱中性利用率 f 、共鳴を逃れる確率 p 及び無限増倍率 k_{∞} の均質系に対する変化割合

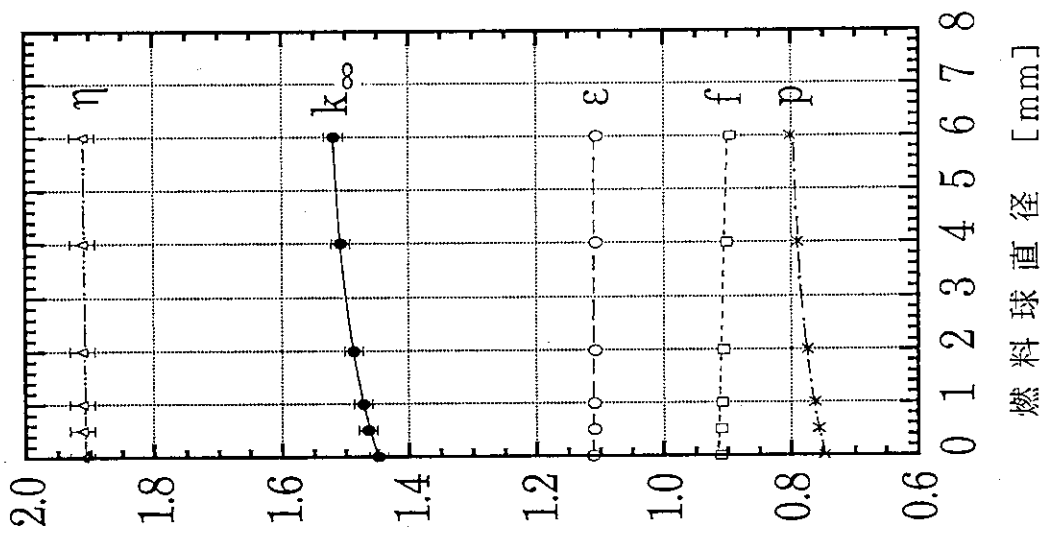


図3 燃料球直径の変化に伴う無限増倍率及び四因子の変化

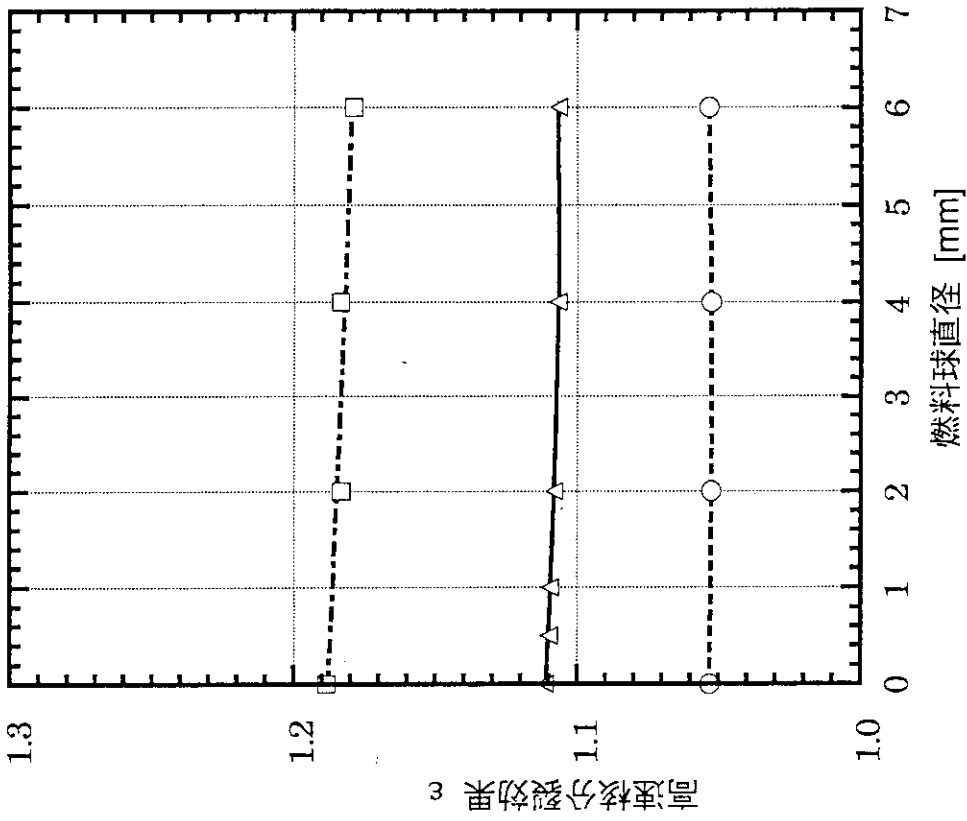


図6a 燃料球直径の変化に伴う高速核分裂効果 ϵ の変化

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

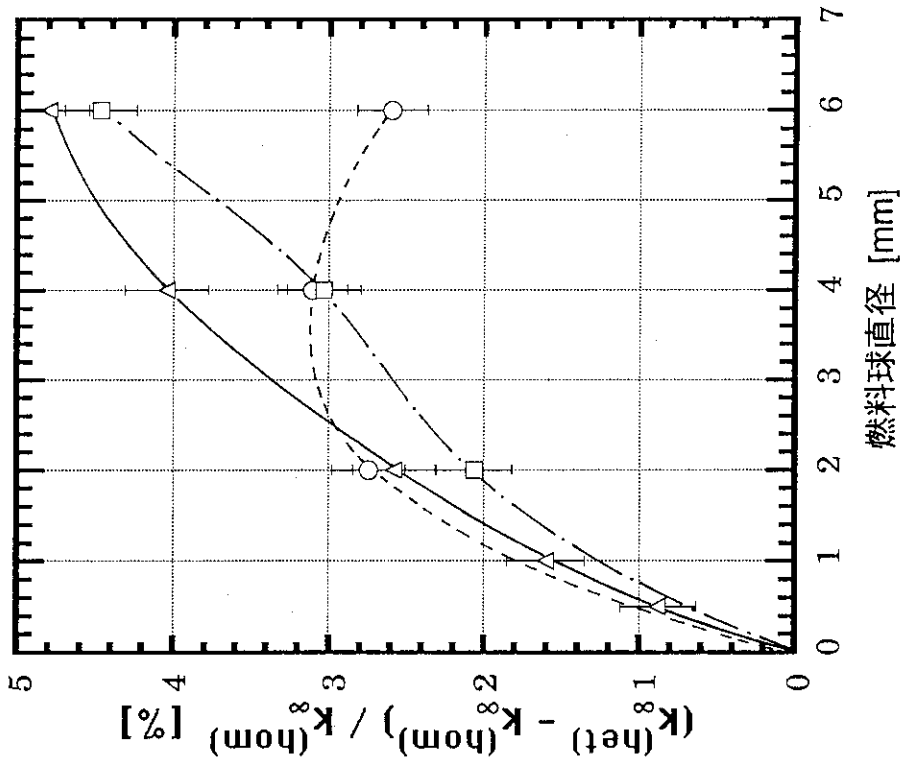


図5 燃料球直径の変化に伴う無限増倍率の均質系に対する変化割合

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

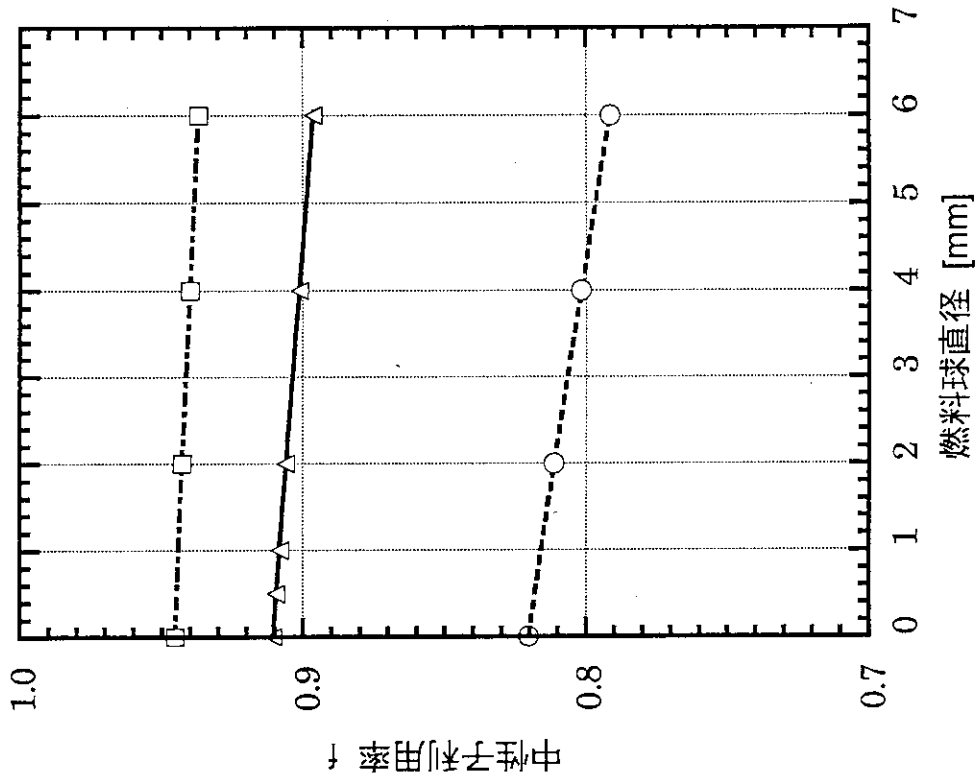


図6c 燃料球直径の変化に伴う熱中性子利用率 f の変化

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

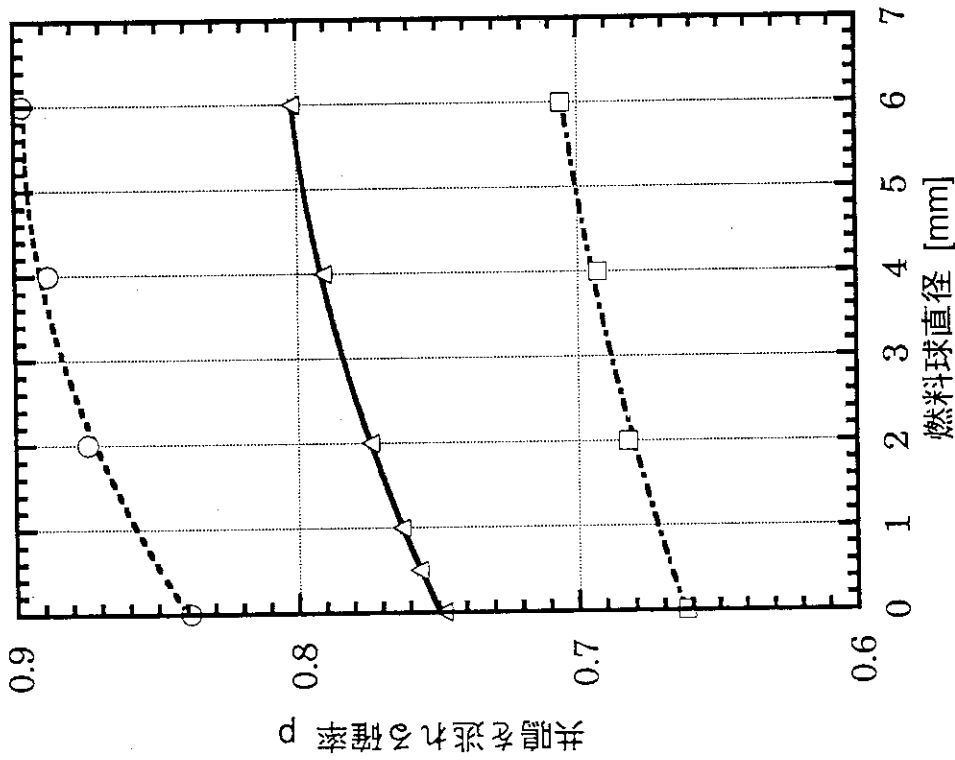


図6b 燃料球直径の変化に伴う共鳴を逃れる確率 p の変化

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

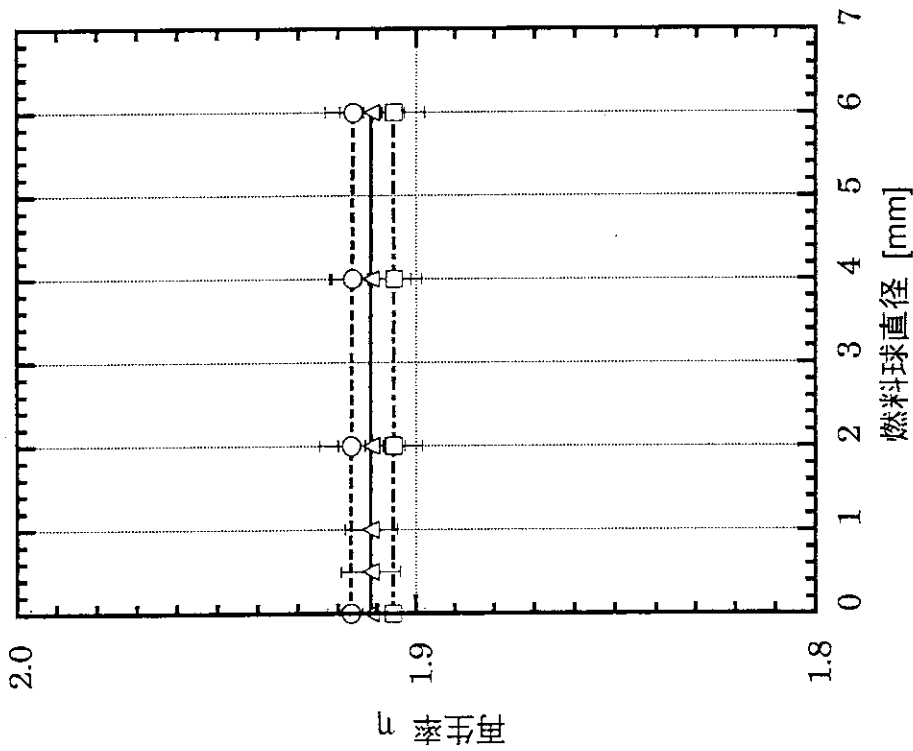


図6d 燃料球直径の変化に伴う再生率 η の変化

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

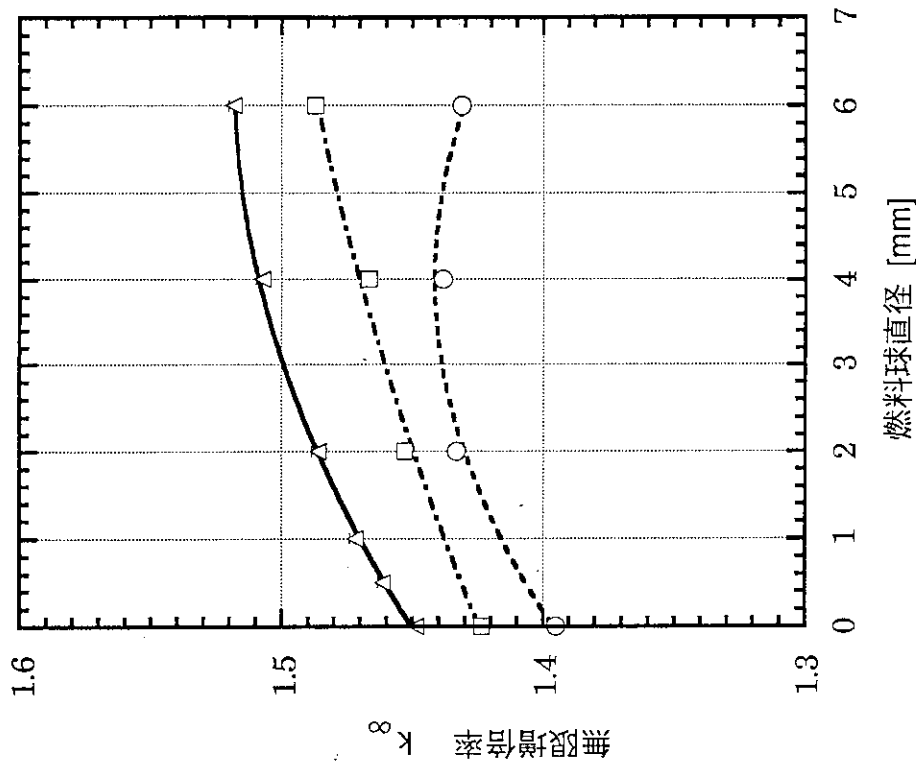


図6e 燃料球直径の変化に伴う無限増倍率 k_{∞} の変化

- 水対燃料体積比8.65
- △ 水対燃料体積比3.83
- 水対燃料体積比2.22

付録A 誤差の伝播

モンテカルロ計算を行うと計算値（平均値）には統計計算に伴う誤差が必然的に付随してくる。従って、その計算値を用いてさらに別な量を計算するときには、その誤差の伝播についても考慮しなければならない。基本的な四則演算では、誤差は以下の表式に従って伝播される。

x_1, x_2 : 計算値（平均値）

σ_1, σ_2 : 計算値の誤差（標準偏差）

とするとき

(a) 和、及び (b) 差は

$$y = x_1 \pm x_2$$

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}$$

となる。(c) 積は

$$y = x_1 \cdot x_2$$

$$\sigma = x_1 \cdot x_2 \sqrt{\left\{ \left(\frac{\sigma_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{x_2} \right)^2 \right\}}$$

であり、(d) 商は

$$y = x_1 / x_2$$

$$\sigma = x_1 / x_2 \sqrt{\left\{ \left(\frac{\sigma_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{x_2} \right)^2 \right\}}$$

と表される。

本文では反応率から四因子を計算し、さらに有限の粒径を持つ体系（非均質体系）での四因子及び無限増倍率について均質系からの変化割合を計算する。この計算に使用した計算プログラムFFFを以下に示す。この計算プログラムはFORTRAN 77で書き表されている。

```

C****
C PROGRAM FOR CALCULATING THE 4-FACTORS AND THEIR ERRORS
C****
PARAMETER ( NRR=6, NME=2, NDI=5, NVR=3 )
PARAMETER ( NFC=5 )
DIMENSION RR(NRR), RER(NRR), AER(NRR)
DIMENSION FF(NFC,NME+1,0:NDI), RH(NFC,NME,NDI)
COMMON /VVVV/VRAT(NVR), NDIRV(NVR)
COMMON /RRRR/RRR(NRR,NME,0:NDI,NVR), FK(NME,0:NDI,NVR)

C****
C RR = REACTION RATES
C RER = RELATIVE ERROR OF THE REACTION RATE
C AER = ABSOLUTE ERROR OF THE REACTION RATE
C IRR = 1 : FISSION RATE IN FUEL IN FAST ENERGY GROUP
C       = 2 : FISSION RATE IN FUEL IN THERMAL ENERGY GROUP
C       = 3 : ABSORPTION RATE IN FUEL IN FAST ENERGY GROUP
C       = 4 : ABSORPTION RATE IN FUEL IN THERMAL ENERGY GROUP
C       = 5 : ABSORPTION RATE IN MODERATOR IN FAST ENERGY GROUP
C       = 6 : ABSORPTION RATE IN MODERATOR IN THERMAL ENERGY GROUP
C FF = FOUR FACTORS (EPS, P, F, ETA) AND KINF
C FK = KINF ( INPUT )
C RH = RELATIVE INCREMENTS DUE TO HETERONIZATION
C VRAT= RATIO OF MODERATOR VOLUME TO FUEL ONE
C
C NDI = MAXIMUM NUMBER OF DIAMETER VALUES
C NDIRV = NUMBER OF DIAMETER VALUES
C NDR = NUMBER OF VOLUME RATIOS OF MODERATOR TO FUEL
C****
DO 1000 IVR = 1, NVR
  IDIVR = NDIRV(IVR)
  VR = VRAT(IVR)
  DO 100 IDI = 0, IDIVR
    DO 10 IRR = 1, NRR
      RR(IRR) = RRR(IRR,1,IDI,IVR)
      RER(IRR) = RRR(IRR,2,IDI,IVR)
      AER(IRR) = RR(IRR) * RER(IRR)
    10 CONTINUE
C****
C CALCULATION OF MEAN VALUES OF THE FOUR FACTORS
C****
ETA = RR(2)/RR(4)
EPS = 1. + RR(1)/RR(2)
F = RR(4) / ( RR(4) + RR(6) )
P = ( RR(4) + RR(6) ) / ( RR(3) + RR(4) + RR(5) + RR(6) )
FF(1,1,IDI) = EPS
FF(2,1,IDI) = P
FF(3,1,IDI) = F
FF(4,1,IDI) = ETA
FF(5,1,IDI) = FK(1,IDI,IVR)

C****
C CALCULATION OF STANDARD DEVIATIONS OF THE FOUR FACTORS
C****
ERETA = ETA * SQRT ( RER(2)**2 + RER(4)**2 )
EREPS = ( EPS - 1. ) * SQRT ( RER(1)**2 + RER(2)**2 )
ERF = F * ( 1. - F ) * SQRT ( RER(4)**2 + RER(6)**2 )
RER35 = ( AER(3)**2 + AER(5)**2 ) / ( RR(3) + RR(5) )**2
RER46 = ( AER(4)**2 + AER(6)**2 ) / ( RR(4) + RR(6) )**2
ERP = P * ( 1. - P ) * SQRT( RER35 + RER46 )

```

```

      FF(1,2,IDI) = EREPS
      FF(2,2,IDI) = ERP
      FF(3,2,IDI) = ERF
      FF(4,2,IDI) = ERETA
      FF(5,2,IDI) = FK(2,IDI,IVR)
      DO 11 IFC = 1, NFC
      FF(IFC,3,IDI) = FF(IFC,2,IDI) / FF(IFC,1,IDI)
11 CONTINUE
100 CONTINUE
C****
C   INCREASE RATES OF HETEROGENEOUS SYSTEM TO THE HOMOGENEOUS SYSTEM
C   AND THEIR ASSOCIATED ERRORS
C****
      DO 200 IDI = 1, IDIVR
      DO 20 IFC = 1, NFC
      RH(IFC,1,IDI) = FF(IFC,1,IDI) / FF(IFC,1,0) - 1.
      RH(IFC,2,IDI) = ( RH(IFC,1,IDI) + 1. )
1          * SQRT( FF(IFC,3,0)**2 + FF(IFC,3,IDI)**2 )
20 CONTINUE
200 CONTINUE
      WRITE(6,6000) VR
      WRITE(6,6010) ( ( FF(IFC,IME,IDI), IFC=1,NFC ), IME=1,NME ),
1 IDI = 0, IDIVR )
      WRITE(6,6001)
      WRITE(6,6010) ( ( RH(IFC,IME,IDI), IFC=1,NFC ), IME=1,NME ),
1 IDI = 1, IDIVR )
1000 CONTINUE
      STOP
6000 FORMAT(1H1 ,10X, 'RATIO OF MODERATOR VOLUME TO FUEL VOLUME =',
&          F6.2/ 11X, 'EPS', 8X, 'P', 9X, 'F', 8X, 'ETA', 7X, 'KINF'//)
6001 FORMAT(1H0, 10X, 'EPS', 8X, 'P', 9X, 'F', 8X, 'ETA', 7X, 'KINF'//)
6010 FORMAT( 2(1H , 5X, 5F10.5/) )
      END

```

```

BLOCK DATA BLOCKC
PARAMETER ( NRR=6, NME=2, NDI=5, NVR=3 )
COMMON /VVVV/VRAT(NVR), NDIVR(NVR)
COMMON /RRRR/RRR(NRR,NME,0:NDI,NVR), FK(NME,0:NDI,NVR)
DATA VRAT /8.65, 3.83, 2.22/
DATA NDIVR/ 3, 5, 3/
DATA (((RRR(IRR,IME,IDI,1),IRR=1,NRR), IME=1,NME), IDI=0,NDI)/
1 7.0432E-2, 1.3259, 1.5623E-1, 6.9179E-1, 5.9142E-3, 1.5163E-1,
2 0.150E-2, 0.233E-2, 0.317E-2, 0.217E-2, 0.341E-2, 0.229E-2,
3 7.1635E-2, 1.3610, 1.1939E-1, 7.1015E-1, 5.9460E-3, 1.6527E-1,
4 0.181E-2, 0.302E-2, 0.477E-2, 0.301E-2, 0.432E-2, 0.313E-2,
5 7.1970E-2, 1.3657, 1.0594E-1, 7.1270E-1, 5.9825E-3, 1.7633E-1,
6 0.210E-2, 0.220E-2, 0.472E-2, 0.220E-2, 0.483E-2, 0.215E-2,
7 7.2533E-2, 1.3589, 9.6922E-2, 7.0920E-1, 6.0050E-3, 1.8681E-1,
8 0.174E-2, 0.268E-2, 0.428E-2, 0.268E-2, 0.404E-2, 0.226E-2,
& 24*0./
DATA (((RRR(IRR,IME,IDI,2),IRR=1,NRR), IME=1,NME), IDI=0,NDI)/
1 1.4501E-1, 1.3034, 2.4662E-1, 6.8185E-1, 5.2259E-3, 6.6994E-2,
2 0.175E-2, 0.285E-2, 0.255E-2, 0.264E-2, 0.413E-2, 0.277E-2,
3 1.4495E-1, 1.3198, 2.3845E-1, 6.9043E-1, 5.2628E-3, 6.8794E-2,
4 0.184E-2, 0.280E-2, 0.252E-2, 0.278E-2, 0.306E-2, 0.253E-2,
5 1.4535E-1, 1.3267, 2.3190E-1, 6.9404E-1, 5.3331E-3, 7.0115E-2,
6 0.233E-2, 0.251E-2, 0.364E-2, 0.250E-2, 0.283E-2, 0.235E-2,
7 1.4497E-1, 1.3419, 2.2063E-1, 7.0203E-1, 5.3051E-3, 7.2856E-2,
8 0.161E-2, 0.315E-2, 0.363E-2, 0.314E-2, 0.349E-2, 0.305E-2,
9 1.4566E-1, 1.3622, 2.0400E-1, 7.1263E-1, 5.3686E-3, 7.8173E-2,
A 0.193E-2, 0.373E-2, 0.259E-2, 0.370E-2, 0.489E-2, 0.344E-2,
B 1.4633E-1, 1.3730, 1.9268E-1, 7.1834E-1, 5.3700E-3, 8.3103E-2,
C 0.256E-2, 0.307E-2, 0.425E-2, 0.305E-2, 0.416E-2, 0.309E-2/
DATA (((RRR(IRR,IME,IDI,3),IRR=1,NRR), IME=1,NME), IDI=0,NDI)/
1 2.2626E-1, 1.2008, 3.3551E-1, 6.3007E-1, 4.6448E-3, 3.6431E-2,
2 0.104E-2, 0.304E-2, 0.179E-2, 0.281E-2, 0.312E-2, 0.300E-2,
3 2.2526E-1, 1.2295, 3.1355E-1, 6.4515E-1, 4.6947E-3, 3.9265E-2,
4 0.162E-2, 0.274E-2, 0.295E-2, 0.272E-2, 0.354E-2, 0.247E-2,
5 2.2638E-1, 1.2341, 3.0073E-1, 6.4761E-1, 4.7592E-3, 4.1367E-2,
6 0.238E-2, 0.256E-2, 0.228E-2, 0.255E-2, 0.391E-2, 0.283E-2,
7 2.2623E-1, 1.2576, 2.8905E-1, 6.5989E-1, 4.7465E-3, 4.4519E-2,
6 0.225E-2, 0.289E-2, 0.264E-2, 0.288E-2, 0.446E-2, 0.286E-2,
& 24*0./
DATA FK/
1 1.39503, 0.00239, 1.43329, 0.00222, 1.43839, 0.00199,
2 1.43124, 0.00200, 4*0.,
1 1.44874, 0.00290, 1.46149, 0.00204, 1.47198, 0.00208,
2 1.48611, 0.00241, 1.50732, 0.00245, 1.51831, 0.00209,
1 1.42357, 0.00251, 1.45294, 0.00231, 1.46675, 0.00219,
2 1.48720, 0.00198, 4*0./
END

```

付録B MCNPの計算結果とVIMの計算結果との比較

今回は、VIMと同様の連続エネルギーモンテカルロ計算コードであるMCNP¹⁾を用いた計算も行った。評価済み核データファイルとしては、JENDL-3²⁾を用いた。ここでは、水体燃料体積比3.83（均質化ウラン濃度2.0 gU/cm³の場合のみについて計算を行った。計算体系はセル全体の形状を図2に示したように立方体としたものと、球としたもの（水対燃料体積比は等しい）の二種類について行った（境界条件は共に鏡面反射である）。計算は、燃料球直径を0.0（均質）、2.0、4.0及び6.0 [mm]と4通りに変えて行った。反応率の計算結果を表B1及びB2に示す。四因子及び無限増倍率の計算結果を表B3、表B4及び図B1、図B2に示す。

まず、図3と図B1を比較してみる。四因子のうち ϵ 、 f 、 p の3つの値は、VIMとMCNPとで良く一致している。しかし η に関しては、MCNPによる値の方がVIMによるものより0.8%ほど大きい。従って、この η のために無限増倍率 k_{∞} もMCNPの方がVIMより大きくなっている。 η の違いはおそらく用いた評価済み核データファイル、すなわち、ENDF/B-IVとJENDL-3との違いによるものと考えられる（実際に本文参考文献3)の衝突確率法による計算はJENDL-3を用いたものであるが、その η はMCNPによるものと良く一致している）。

次に、図B1と図B2とを比較してみる。図B2は体系を球として計算したものであるが、均質の場合と非均質の場合とで η を除く四因子（及び無限増倍率 k_{∞} ）において、大きなギャップが現れている。また、非均質の場合において四因子はだいたい一定値を保っている。これらの原因としては、体系の一番外側を球面で鏡面反射にするときにはある程度の大きさが無いと計算が正確に行われなためであろうと考えられる。このことは他の計算方法や計算コードによって確かめてみる必要があるであろう（なお、VIMコードは球面の鏡面境界条件は使えない）。

なお、表B5にはVIMコード及びMCNPコードの計算で要した計算CPU時間を示す。MCNPコードはVIMコードに比べ、非均質体系で約4倍、均質体系では約10倍のCPU時間を要した。また、VIMコードでは燃料寸法にほぼ反比例して計算CPU時間が増加する傾向を示した。これは燃料寸法が小さくなると、境界での反射回数がそれだけ増加するためと考えられる。水対燃料体積比が3.83、燃料直径が0.5mmのときには2時間近いCPU時間がかかった。

参考文献

- 1) J.F.Briesmeister, "MCNP-A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport Version 3A", Los Alamos National Lab., LA--7396-M-Rev.2, (1986).
- 2) K.Shibata et al.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library, Version-3 - JENDL-3 -", JAERI-1319(1990).
- 3) 小迫和明, "JENDL-3 による MCNP 用断面積ライブラリーの整備", 核データニュースNo.36, 日本原子力研究所 核データセンター, (1990).

表B 1 立方体セルの場合の反応率の計算結果 (MCNP)

燃料球直径	反応率 (誤差)							
	生成反応率				吸収反応率			
	高速群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] ^{F_{fast}}	熱群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] ^{F_{th}}	高速群・燃料 [Σ_a] ^{F_{fast}}	熱群・燃料 [Σ_a] ^{F_{th}}	高速群・減速材 [Σ_a] ^{M_{fast}}	熱群・減速材 [Σ_a] ^{M_{th}}		
0.0 (均質)	1.4901×10 ⁻¹ (0.180%)	1.3181 (0.240%)	2.4461×10 ⁻¹ (0.300%)	6.8438×10 ⁻¹ (0.240%)	5.7774×10 ⁻³ (0.560%)	6.7334×10 ⁻² (0.240%)		
2.0	1.4961×10 ⁻¹ (0.200%)	1.3543 (0.240%)	2.2026×10 ⁻¹ (0.310%)	7.0334×10 ⁻¹ (0.240%)	5.8771×10 ⁻³ (1.202%)	7.3366×10 ⁻² (0.325%)		
4.0	1.4922×10 ⁻¹ (0.210%)	1.3765 (0.230%)	2.0406×10 ⁻¹ (0.320%)	7.1501×10 ⁻¹ (0.230%)	5.8801×10 ⁻³ (1.198%)	7.8548×10 ⁻² (0.325%)		
6.0	1.4968×10 ⁻¹ (0.220%)	1.3848 (0.230%)	1.9310×10 ⁻¹ (0.320%)	7.1945×10 ⁻¹ (0.230%)	5.9456×10 ⁻³ (0.430%)	8.3585×10 ⁻² (0.230%)		

表B2 球体セルの場合の反応率の計算結果 (MCNP)

燃料球直径	反応率 (誤差)							
	生成反応率				吸収反応率			
	高速群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{fast}	熱群・燃料 [$\nu \Sigma_f$] F_{th}	高速群・燃料 [Σ_a] F_{fast}	熱群・燃料 [Σ_a] F_{th}	高速群・減速材 [Σ_a] M_{fast}	熱群・減速材 [Σ_a] M_{th}		
0.0 (均質)	1.4889 $\times 10^{-1}$ (0.180%)	1.3136 (0.240%)	2.4429 $\times 10^{-1}$ (0.300%)	6.8934 $\times 10^{-1}$ (0.240%)	5.7527 $\times 10^{-3}$ (0.560%)	6.7111 $\times 10^{-2}$ (0.240%)		
2.0	1.9246 $\times 10^{-1}$ (0.250%)	1.3619 (0.230%)	1.9680 $\times 10^{-1}$ (0.320%)	7.0707 $\times 10^{-1}$ (0.230%)	6.2272 $\times 10^{-3}$ (1.176%)	8.9945 $\times 10^{-2}$ (0.318%)		
4.0	1.9196 $\times 10^{-1}$ (0.250%)	1.3706 (0.230%)	1.9346 $\times 10^{-1}$ (0.320%)	7.1169 $\times 10^{-1}$ (0.230%)	6.2165 $\times 10^{-3}$ (1.192%)	9.1939 $\times 10^{-2}$ (0.318%)		
6.0	1.9192 $\times 10^{-1}$ (0.250%)	1.3654 (0.230%)	1.9125 $\times 10^{-1}$ (0.320%)	7.0908 $\times 10^{-1}$ (0.230%)	6.2326 $\times 10^{-3}$ (1.183%)	9.3755 $\times 10^{-2}$ (0.318%)		

表B3 立方体セルの場合の四因子及び無限増倍率 (MCNP)

燃料球直径 [mm]	ϵ	p	f	η	k_{∞}
0.0 (均質)	1.1130 (± 0.0050)	0.7501 (± 0.0016)	0.9106 (± 0.0024)	1.9260 (± 0.0065)	1.4630 (± 0.0016)
2.0	1.1105 (± 0.0035)	0.7768 (± 0.0022)	0.9029 (± 0.0029)	1.9256 (± 0.0065)	1.5012 (± 0.0012)
4.0	1.1084 (± 0.0036)	0.7908 (± 0.0021)	0.9010 (± 0.0026)	1.9252 (± 0.0060)	1.5208 (± 0.0011)
6.0	1.1081 (± 0.0035)	0.8014 (± 0.0022)	0.8959 (± 0.0025)	1.9248 (± 0.0076)	1.5314 (± 0.0011)

表B4 球体セルの場合の四因子及び無限増倍率 (MCNP)

燃料球直径 [mm]	ϵ	p	f	η	k_{∞}
0.0 (均質)	1.1133 (± 0.0033)	0.7496 (± 0.0018)	0.9104 (± 0.0027)	1.9259 (± 0.0065)	1.4640 (± 0.0012)
2.0	1.1413 (± 0.0035)	0.7970 (± 0.0021)	0.8871 (± 0.0028)	1.9261 (± 0.0063)	1.5542 (± 0.0016)
4.0	1.1401 (± 0.0048)	0.8010 (± 0.0033)	0.8856 (± 0.0035)	1.9258 (± 0.0063)	1.5575 (± 0.0017)
6.0	1.1406 (± 0.0035)	0.8026 (± 0.0020)	0.8832 (± 0.0032)	1.9256 (± 0.0063)	1.5586 (± 0.0009)

表B5 VIMコード及びMCNPコードを用いた計算で要したCPU時間

(1) VIMコード

水対燃料体積比=2.22

燃料球直径	0.0	2.0	4.0	6.0
CPU時間	5M41S25	42M28S79	24M56S80	14M49S20

水対燃料体積比=3.83

燃料球直径	0.0	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0
CPU時間	6M16S79	1H54M11S08	1H 1M27S14	27M 1S68	16M50S09	13M23S60

水対燃料体積比=6.85

燃料球直径	0.0	2.0	4.0	6.0
CPU時間	8M15S63	30M55S22	16M10S41	13M41S81

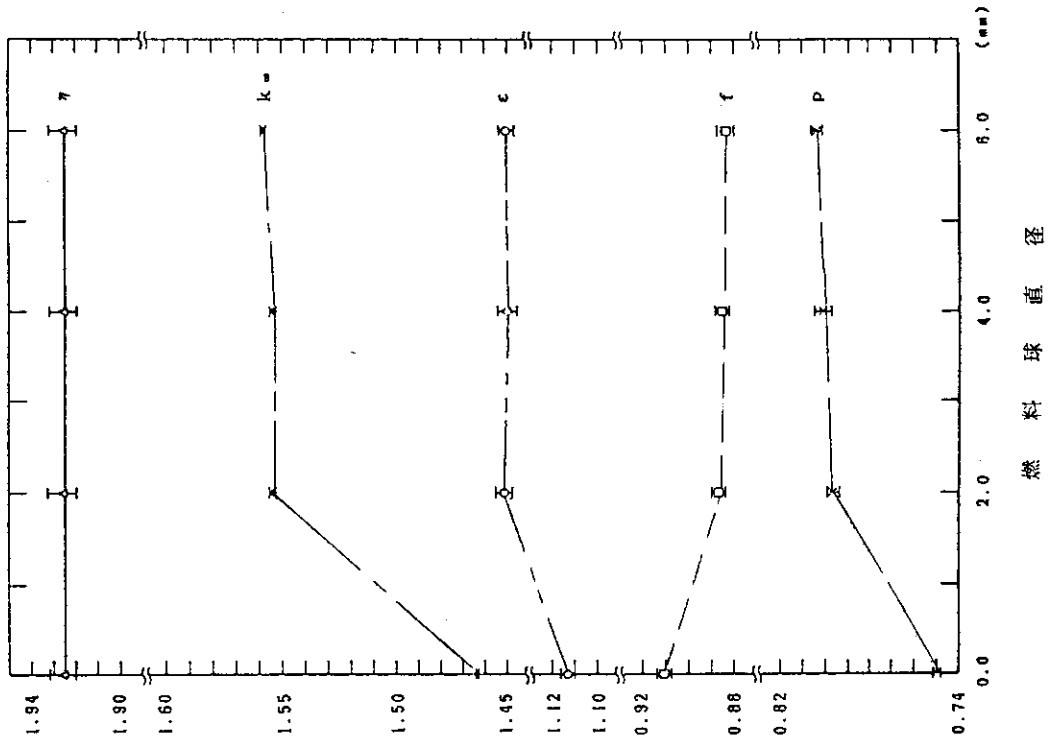
(2) MCNPコード

水対燃料体積比=3.83, 立方体セル

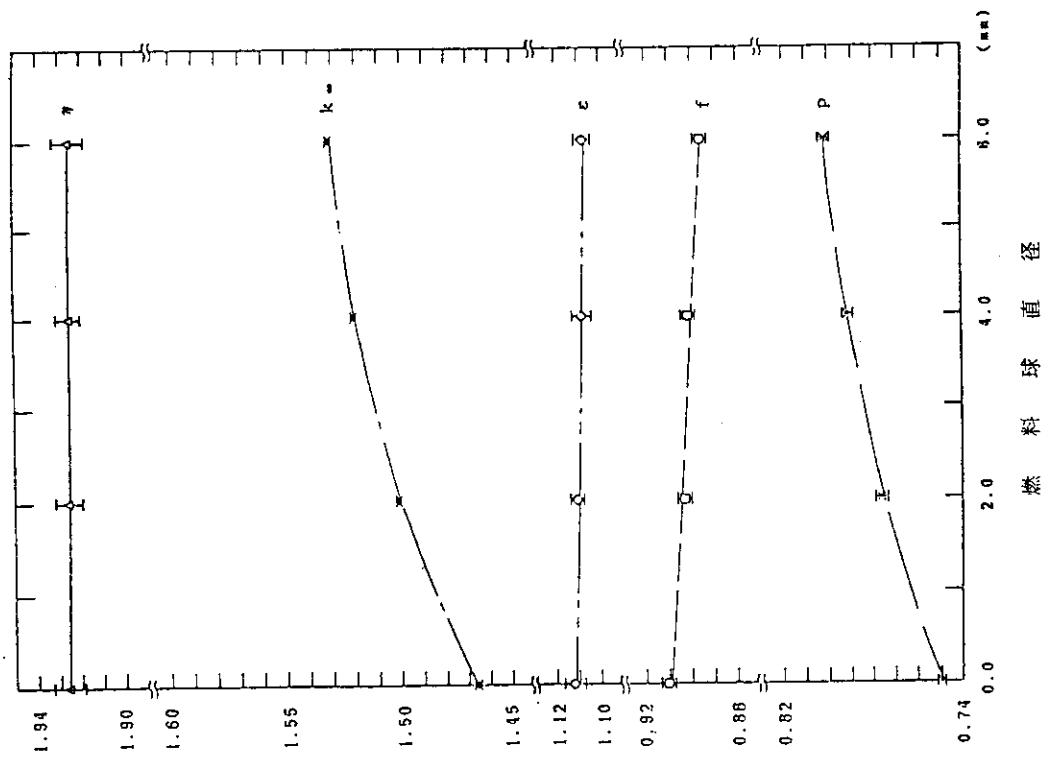
燃料球直径	0.0	2.0	4.0	6.0
CPU時間	1H 4M45S36	1H37M 8S24	1H 6M43S90	51M48S74

水対燃料体積比=3.83, 球体セル

燃料球直径	0.0	2.0	4.0	6.0
CPU時間	57M37S96	1H51M58S11	1H 7M 6S81	51M54S24



図B2 無限増倍率及び四因子の変化 (MCNP, 球体セル)



図B1 無限増倍率及び四因子の変化 (MCNP, 立方体セル)

付録C VIM及びMCNPのジョブ制御文と入力データ

(1) VIMのジョブ制御文と入力データ

水体燃料体積比3.83(均質化ウラン濃度2.0gU/cm³),燃料球直径2.0mmの場合について以下に示す。

```
//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 23349457,YO.SAKURAI,0943.01
// T.12 C.2 W.1 P.0 I.5 M20
// OPTP NOTIFY=J9457,PASSWORD=KURRI
//*****
//***** < J9457.JIB.CNTL(VIM) > *****
//*****
//***** FORT77 *****
// EXEC FORT77,SO=J3803.VPTEST.FORT77,Q=,A='NOSOURCE,ELM(PRINT)'
//FORT77.SYSRINT DD DUMMY
//***** LINK *****
// EXEC FLKEDIT77,CNTL=NO
//OLDLM DD DSN=J3803.VIMJAERI.LOAD,DISP=SHR
//SYSIN *DD
// ENTRY MAIN
// INCLUDE OLDLM(VIM)
// NAME TEMPNAME
// EXEC GO,OBSIZE=137
//FT07F001 DD SYSOUT=*
//*-----
// EXPAND DISK,DDN=FT10F001
//*-----
// FT11F001 DD UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(10,5))
//*-----
// FT12F001 DD UNIT=WK10,SPACE=(TRK,(100,50))
//*-----
// EXPAND DISK,DDN=FT13F001,SPC='100,10'
// EXPAND DISK,DDN=FT14F001,SPC='100,10'
// EXPAND DISK,DDN=FT15F001,SPC='100,10'
// EXPAND DISK,DDN=FT16F001,SPC='500,90'
// EXPAND DISK,DDN=FT17F001,SPC='150,10'
// EXPAND DISK,DDN=FT18F001,SPC='100,10'
//FT21F001 DD DSN=J3973.STAYB4C.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
//FT22F001 DD DSN=J3973.MOVEB4C.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
//SYSIN DD*
1987654321AB          5          0.2CM          (TYPE01)
      100          3          0          5          0          0          (TYPE02)
      2000          5          0          0          0          0          (TYPE03)
```

```

1          0          0          0          (TYPE04)
4          2          2          2          3          (TYPE05)
3500.      0.0        300.        1.0        1.E-5      1.E+7      (TYPE06A)
1.20      1.00      15.0        (TYPE06B)

1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  (TYPE07)
30300 40300260300350300 (TYPE08)
0 30300 40300260300 (TYPE09)
0260300350300 (TYPE10)
0 0 2 (TYPE20)
SPH 1 0. 0. 0. 0.1 (TYPE21)
RPP 2 -1.3624-1 1.3624-1 -1.3624-1 1.3624-1 -1.3624-1 1.3624-1
END
1 +1 (TYPE22)
2 -1 +2
3 -2
END
1 4.18880-03 2 1.60430-02 3 1.0 (TYPE23)
1 1 1 1 2 2 0 2 3 0 0 -2 (TYPE24)
30300 40300260300 (TYPE45)
260300350300
1.23680E-3 2.32030E-2 4.88800E-2 (TYPE46)
2.33670E-2 6.67340E-2
1.85540E+0 1.00000E-5
++
//
//*JOBPARM K=0
//COMPACT EXEC PGM=JRQCPR,PARAM='TYPE1'
//UTYIN DD DSN=&&WK1,DISP=SHR,DCB=RECFM=FB
//UTYNLP DD SYSOUT=M
//UTYLIST DD SYSOUT=M
//
/*

```


(2) MCNPのジョブ制御文と入力データ

水体燃料体積比3.83 (均質化ウラン濃度2.0 g U / c m³) , 燃料球直径2.0 mmの場合について以下に示す。

```
//JCLG JOB
// EXEC JCLG
//SYSIN DD DATA,DLM='++'
// JUSER 23349457,YO.SAKURAI,0943.01
    T.12 C.3 I.5 W.0 M20
    OPTP NOTIFY=J9457,PASSWORD=KURRI,MSGCLASS=X
//*****
//***** < J9457.JIB.CNTL(MCNP) > *****
//*****
// EXEC FORT77,SO=J2350.MCNP,A='ELM(SREAD)', 'NOSOURCE'
    EXEC LKEDIT77,LM=J3803.@.MCNP.CNTL=NO
//SYSIN *DD
    ENTRY MAIN
    INCLUDE OLDDLM(MCNP)
    NAME TEMPNAME(R)
/*
//*****
// EXEC GO,OBSIZE=137
/*
/**-----(( OUTPUT ))-----
//FT32F001 DD SYSOUT=*,DCB=(RECFM=FBA,LRECL=137,BLKSIZE=2740)
/*
/**-----(( X-SEC DIRECTORY ))-----
//FT35F001 DD DSN=J2773.FSXDIR.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
/*
/**-----(( X-SEC ))-----
//FT41F001 DD DSN=J2773.FSXLIB.DATA,DISP=SHR,LABEL=(,,IN)
//SYSIN DD*
*** CONDENSE=5 U-DENSITY=2.0 DIAMETER=0.2CM
1 1 7.33198E-2 -1
2 2 1.00101E-1 1 -2 3 4 -5 -6 7
3 0 2:-3:-4:5:6:-7

1 SO 0.1
2* PY 0.1362
3* PY -0.1362
4* PX -0.1362
5* PX 0.1362
6* PZ 0.1362
7* PZ -0.1362

IN 1 1 0
```

```

C
C      << TALLIES >>
C
F4      1
FM4     (2.44398E-2 3 (-6 -7) (-6:-3))
FQ4     F
F24     1
FM24    4.88800E-2 4 -3
FQ24    F
F44     2
FM44    1.00101E-1 2 -3
FQ44    F
C
C      << MATERIAL >>
C
M1      8016.33C 4.888 92235.33C 0.12368 92238.33C 2.3203
M2      1001.33C 2 8016.33C 1
M3      92235.33C 0.12368 92238.33C 2.3203
M4      8016.33C 1
C
C      << ENERGY >>
C
EO      1.85539E-06 2.0E+01
ERGN
C
C      << CUTOFF >>
C
CUTN
CTIME 180
C
C      << CRITICALITYF >>
C
KCODE 2000 1.0 5 100 4500
KSRC 0 0 0
/*
++
//

```