

JAERI-Tech
2005-056



JP0550520



MOX粉末体系の臨界性に対する粒子粒径の影響

2005年9月

高橋 聰・奥野 浩・三好 慶典

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

MOX粉末体系の臨界性に対する粒子粒径の影響

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
高橋 聰*・奥野 浩・三好 慶典

(2005年8月11日受理)

ウランとプルトニウムの混合酸化物燃料（以下、MOX燃料）加工施設において取り扱われる燃料の粒子粒径 $20\mu\text{m}$ 以下では、非均質体系が均質系としてモデル化が可能であるか否かを検討した。まず、MOX燃料の均質体系で無限増倍率を計算して、各Pu富化度の最適減速条件を求めた。MOX燃料の非均質体系において水素対重金属原子個数比H/M固定条件下、立方体単位セル内の燃料球直径を変化させる臨界計算を実施して、 $100\mu\text{m}$ 以上の燃料球直径では共鳴を逃れる確率が高くなることを検証した。臨界条件等の解析は連続エネルギーモンテカルロコードMVP IIと評価済核データJENDL-3.3の組合せを用いて実施した。ここに、これらの計算の詳細を公開する。これらの計算結果は、「臨界安全ハンドブック」の改訂等に利用される予定である。

Effect of a Particle Diameter on the Criticality of a MOX Powder System

Satoshi TAKAHASHI*, Hiroshi OKUNO and Yoshinori MIYOSHI

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

(Received August 11, 2005)

In the heterogeneous system of the mixed oxide fuel of uranium and plutonium, hereafter, MOX fuel, it was investigated whether the system could be modeled as a homogeneous system on the conditions which dealt with the MOX fuel of particle diameter 20 μm or less in MOX fuel fabrication facilities in Japan. The infinite multiplication factor, k_{∞} , of the homogeneous system of the MOX fuel was first calculated, and the optimum moderation condition over the each of PuO_2 content was determined. The calculation of k_{∞} of the heterogeneous system of the MOX fuel was carried out in which the diameter of the spherical fuel in a cube unit cell was varied, and the atomic number ratio of hydrogen to heavy metal was fixed. It was verified that the probability became significant for neutrons to escape resonance by a spherical fuel diameter no less than 100 μm . Critical conditions etc. were analyzed by combining the MVP II code and JENDL-3.3 library. The details of these calculations are reported. These calculation results are expected to be quoted in a revised edition of "Nuclear Criticality Safety Handbook."

Keywords: MOX, Heterogeneous System, Fuel Particle Diameter, Optimal Moderation Conditions, Homogeneous System

* Cooperative Staff

目次

1.はじめに.....	1
2.計算対象.....	2
3.計算体系と計算方法.....	5
4.均質無限体系での最適減速条件サーベイ計算.....	7
5.H/M固定での中性子増倍率の粒径サーベイ計算.....	10
6.粉末粒径の影響評価.....	21
7.H/M原子個数比と非均質効果の関係.....	33
8.反応率の比較評価.....	39
9.おわりに.....	46
参考文献	47
付録A. MOX粉末の含水率と密度の関係.....	48

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation Model.....	2
3. Calculation Method.....	5
4. Survey Calculation Optimum Moderation Condition for Infinite Homogeneous System	7
5. Particle Diameter Survey k_{∞} Calculation with Fixed H/M Values.....	10
6. Influence Evaluation of Powder Particle Diameter	21
7. Relation of H/M Atom Number Ratio and the Heterogeneous Effect.....	33
8. Comparison Evaluation of Reaction Rate.....	39
9. Concluding Remarks	46
References	47
Appendix A Relations between Water Content and Density of MOX Powder	48

This is a blank page.

1. はじめに

MOX 燃料の臨界安全管理はウラン燃料よりも運用が厳格となる。ANSI/ANS-8.1 によると、未臨界質量が ^{235}U では 20.1kgU に対して ^{239}Pu では 5.0kgPu になっている。しかも、軽水炉燃料用ウラン加工施設のウラン濃縮度は 5wt% が上限であるのに対して MOX の Pu 富化度には制限がないため、さらに工程内の取扱制限質量が小さくなっている。MOX 粉末体系に対する臨界安全評価は重要である。

非均質体系において、燃料粒子間に減速材が存在する燃料については、均質系としてモデル化すると非安全となることがある。しかしながら、非均質体系の燃料粒子粒径が零に近くなるに従い、均質系として扱うことができる粒径の範囲が存在すると考えられる。なお、均質系とは溶液系のように物理的・化学的性質が全体系にわたって一定もしくは連続的に変化している体系とし、非均質系とは水中の燃料棒体系のように物理的・化学的性質が不連続に変化する体系とする。「臨界安全ハンドブック第 2 版⁽¹⁾」において、均質と見なしてよい燃料粒径が一部紹介されている。例えば、5wt%濃縮二酸化ウランでは、平均ウラン濃度 2gU/cm³ の二酸化ウラン-水の非均質体系では、無限増倍率について 0.3% の増加割合が無視できるとすると、無視できるウラン燃料の粒子粒径は約 200μm 以下としている。また、MOX 粉末燃料についてはプルトニウム富化度 10wt% の計算例から無視できる MOX 燃料の粒径を 80μm 以下としている。

MOX 粉末の臨界管理因子の中で、H/M 原子個数比 ((U+Pu) 原子に対する水素の原子個数比、M は重金属を意味する) は特に重要な臨界因子であることは知られている。また、ウラン濃縮度 5wt% 以下の二酸化ウラン-水の均質体系では、H/U 原子個数比が 5 から 20 の範囲で無限増倍率が極大となる最適減速条件が存在する。ここでは、H/M 原子個数比で 0.3 から 3000 という広範囲の MOX 粉末に対して、各 H/M 原子個数比の MOX 粉末中の粒子粒径を 1μm から 1cm に変化させて、MOX-水の非均質体系の無限増倍率を計算した。均質体系で最適減速条件の H/M 原子個数比以外の点の方が、粒子粒径を変化させた場合の無限増倍率が最大となつたため、計算体系の反応率の粒子粒径に対する変化も評価した。臨界解析にあたっては、日本原子力研究所で開発した連続エネルギーモンテカルロ MVP II⁽²⁾ コードと評価済核データ JENDL-3.3⁽³⁾ の組合せを使用し、無限増倍率を計算した。

2. 計算対象

国内 MOX 加工工場の粉末混合工程で取り扱われる MOX 燃料の臨界安全管理にとつて MOX 粉末の均一条件は重要である。「臨界安全ハンドブック第 2 版(JAERI-1340)」においては特定のプルトニウム富化度、MOX 粉末密度、燃料球直径 0.1mm について燃料－水を均質とみなした系からの無限増倍率の増加割合が掲載されている。ここでは、無限増倍率の増加割合が無視できる燃料球直径の範囲も含めて広汎なパラメータ範囲での評価を実施した。

(1) 核物質仕様

感度解析に使用した MOX 粉末の仕様を第 2-1 表に示す。プルトニウム組成は、六ヶ所再処理施設で設定している安全側の同位体組成とし、ウラン組成は天然ウランと同じとした。但し、現実の原料 MOX 粉末は使用済燃料から再処理回収された、プルトニウムとウランが 1 対 1 で固溶していて、Pu 富化度の希釈用には劣化ウランを使用するため、ウラン濃縮度は Pu 富化度により様々となる。

MOX 理論密度は Pu 富化度や Pu 組成によって変化する^{注1}。但し、ここでは Pu 富化度、Pu 組成によらず最大値となる $11.46\text{g}/\text{cm}^3$ で評価を実施する。原子個数比 H/M は水素対重金属の原子個数比として設定している。なお、非均質体系の H/M はセル中での水素対重金属の原子個数比で定義する。

乾燥 MOX 粉末粒子の原子個数密度を第 2-2 表に示す。なお、原子量データ等は「核データセンターホームページ」のデータベース⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾を使用する。均質体系の原子個数密度は、水と MOX 粉末の重量比、及び以下の定義式に基づき設定する。

$$\text{密度}[\text{g}/\text{cm}^3] : \text{全密度}[\text{g}/\text{cm}^3] = \text{MOX 密度}[\text{g}/\text{cm}^3] + \text{水密度}[\text{g}/\text{cm}^3]$$

(2) MOX 燃料パラメータ

MOX 粉末の粒子は理想的に球形として粒子内には空隙も水も含有されていないと仮定し、粒子の密度を理論密度とする(①)。MOX 加工施設内に存在する MOX 粉末の Pu 富化度代表値^{注2}として、1 次混合粉末の最大(33wt%)、2 次混合粉末の最大(18wt%)と平均(10wt%)の 3 種類を設定する(②)。

Pu 富化度毎に均質体系の最適減速の条件となる H/M 原子個数比を算出するために、以下の③-1 のパラメータサーベイを実施する。また、Pu 富化度毎に非均質体系で最適減速の条件となる H/M 原子個数比を網羅するように、以下の③-2 のパラメータサーベ

^{注1} MOX 理論密度 : MOX 理論密度 $[\text{g}/\text{cm}^3] = 4 \times (\text{UO}_2 \text{分子量}[\text{g/mol}] + \text{PuO}_2 \text{分子量}[\text{g/mol}]) / (a^3 [\text{\AA}^3] \times \text{アボガドロ数} [10^{24}/\text{mol}])$, 格子定数 $[\text{\AA}]$: $a[\text{\AA}] = (5.4700 - 7.40 \times 10^{-4} \times \varepsilon \text{PuO}_2 [\text{wt\%}]) [\text{\AA}]$ 但し、 εPuO_2 は、混合酸化物における PuO_2 の割合を個数比の百分率 $[\text{wt\%}]$ 、即ち $\varepsilon \text{PuO}_2 [\text{wt\%}] = \text{PuO}_2 \times 100 / (\text{UO}_2 + \text{PuO}_2) [\text{wt\%}]$ を表す。

^{注2} MOX 加工施設指針検討分科会配布資料 M 分第 7-3 号を参考に設定した。10wt% は 18wt% の約半分より設定した。

イを実施する。

MOX 粉末の粒度分布の測定値の一例として、 $1\mu\text{m} \sim 18\mu\text{m}$ ⁽⁷⁾（かさ密度 2.2g/cm^3 ）粒径が与えられている。これらを包絡する MOX 粉末の平均粒径を $1\mu\text{m}$ 以下から $50\mu\text{m}$ の範囲であると設定する(④)。

①乾燥 MOX 粉末密度～ $11.46[\text{g/cm}^3]$ の 1 ケース

②Pu 富化度～ $10[\text{wt}\%]$ と $18[\text{wt}\%]$ と $33[\text{wt}\%]$ の 3 ケース

③-1 均質体系の H/M～ $0.3, 1.58, 3, 15, 30, 60, 150, 300, 900, 1500, 3000$ の 11 ケース

③-2 非均質体系の H/M～ $10[\text{wt}\%]$: $0.3, 1.58, 6, 15, 20, 24, 30, 41, 59$ の 9 ケース

$18[\text{wt}\%]$: $0.3, 1.58, 6, 15, 21, 30, 45, 60, 75$ の 9 ケース

$33[\text{wt}\%]$: $0.3, 1.58, 6, 15, 21, 30, 60, 99, 120$ の 9 ケース

④MOX 粉末の平均粒径～ $1[\mu\text{m}], 10[\mu\text{m}], 50[\mu\text{m}], 100[\mu\text{m}], 1[\text{mm}], 1[\text{cm}]$ の 6 ケース

第 2-1 表 MOX 粉末の組成仕様

	MOX 粉末
Pu 組成 ; Pu-239/240/241[wt%]	71/17/12
U 組成 ; U-235/238[wt%]	0.71/99.29
MOX 理論密度	10wt% : 11.01g/cm ³ 18wt% : 11.05g/cm ³ 33wt% : 11.13g/cm ³
H/M 原子個数比	0.3~3000
平均粒径[μm]	1~30000
Pu 富化度[wt%]	10, 18, 33
備考	

第 2-2 表 MOX の原子個数密度

乾燥 MOX 粉末粒子の場合

核種	粉末密度 11.46g/cm ³		
	Pu 富化度 10wt%	Pu 富化度 18wt%	Pu 富化度 33wt%
O	5.10890E-2	5.10675E-2	5.10270E-2
²³⁵ U	1.65634E-4	1.50920E-4	1.23326E-4
²³⁸ U	2.28382E-2	2.08093E-2	1.70045E-2
²³⁹ Pu	1.80698E-3	3.25275E-3	5.96400E-3
²⁴⁰ Pu	4.30852E-4	7.75577E-4	1.42204E-3
²⁴¹ Pu	3.02865E-4	5.45188E-4	9.99618E-4

3. 計算体系と計算方法

計算体系を第 3-1 図に示す。計算は立方格子無限配列体系で実施する。

臨界計算は MVP II コードを使用した。計算ヒストリ数は、30 万（発生中性子数：1000 個／世代、計算世代数：330、スキップ世代数：30、初期中性子発生分布は燃料領域のみ）とし、計算結果の標準偏差は 0.1% 以下を判定条件とした。但し、計算 CPU 時間は 8000 分を最大としてヒストリ数を制限した。（大型計算機の場合は 12 時間）

(1)核物質

核物質は、球体系にモデル化する。球体の直径を $1[\mu\text{m}], 10[\mu\text{m}], \dots, 1[\text{mm}], 1[\text{cm}]$ に固定し、セル全体の体積を変化させて H/M 原子個数比を調整する。MOX 粉末は最大の理論密度 $11.46[\text{g}/\text{cm}^3]$ に固定する。

(2)減速材

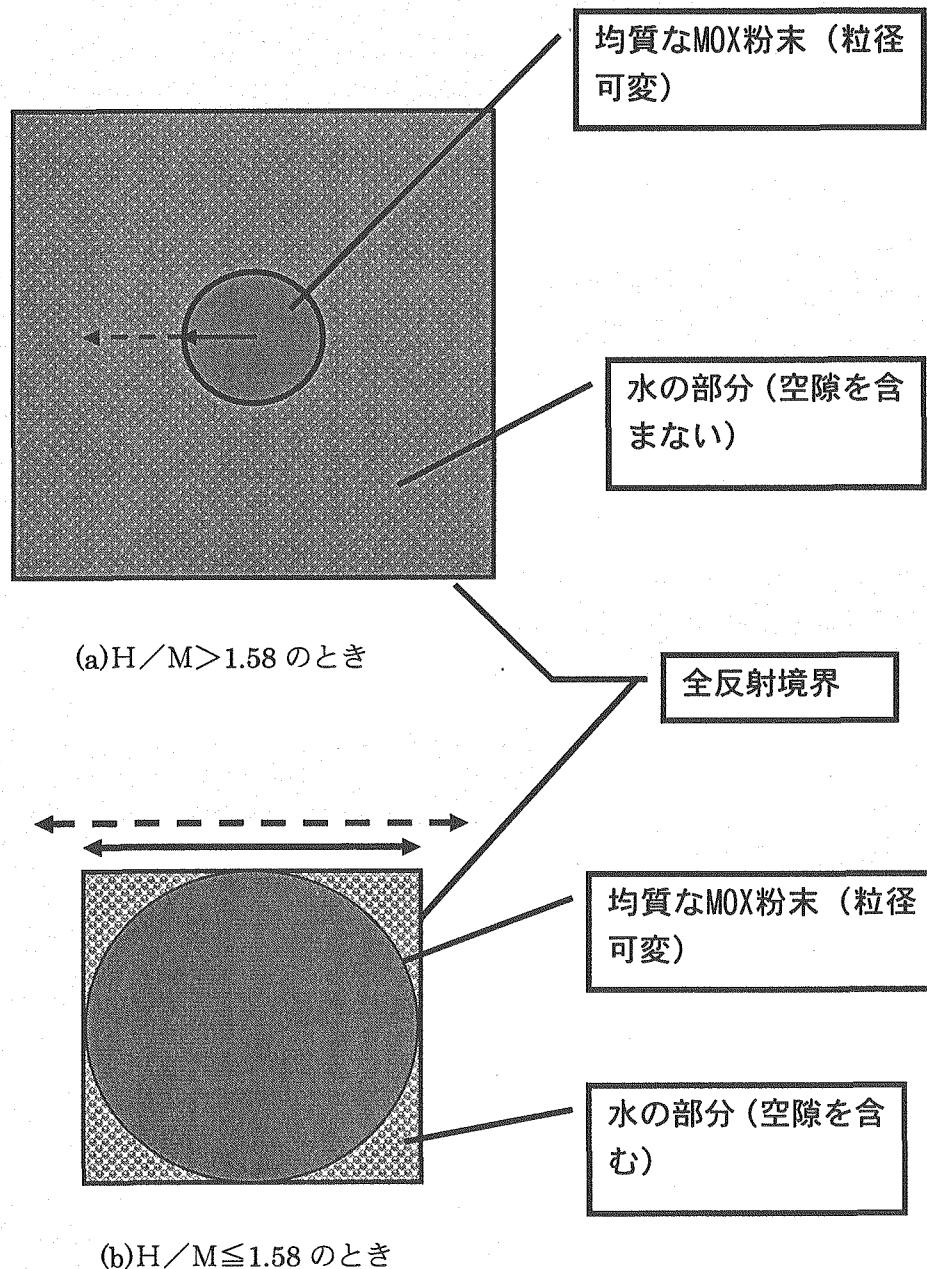
核物質の周りは密度 $1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$ の水領域とする。H/M=1.6 以下の範囲について、非均質体系では水領域の水密度を低下させて実施する（単純立方格子モデルでの実施が不可能となる、第 3-1 図及び付録 A 参照）。

(3)反射条件等

セル体系の外側は完全反射条件とする。

(4)ライブライ

JENDL-3.3 を用いた。



第3-1図 MOX粉末計算体系図（全体）

4. 均質無限体系での最適減速条件サーベイ計算

MOX 粉末粒子の粒径の非均質効果を比較するベースとなる均質体系での無限増倍率を各 Pu 富化度において計算した。結果を第 4-1 表及び第 4-1 図に示す。計算体系の MOX 密度は含水率が小さい方が高くなっている（付録 A 参照）。

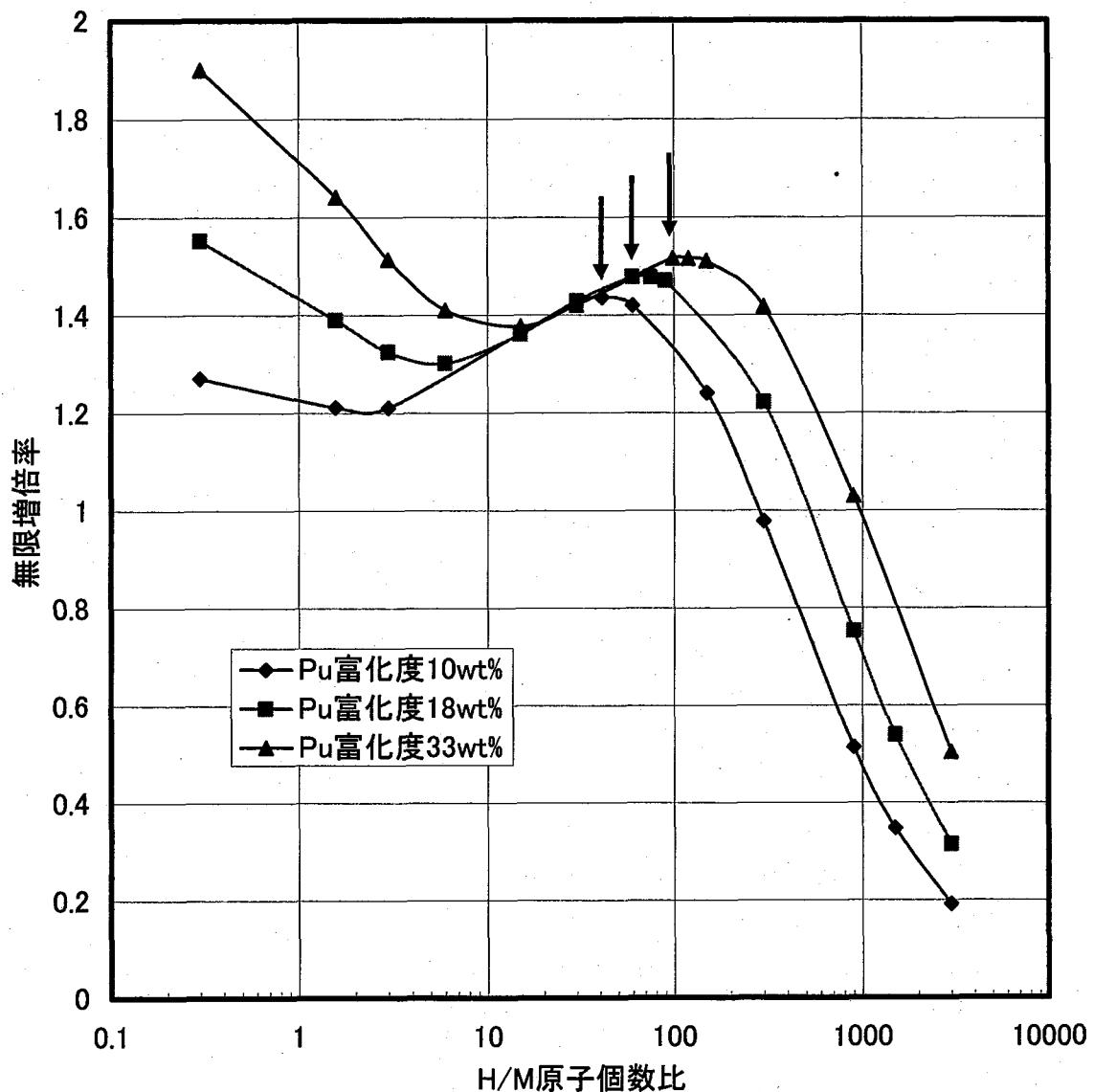
最適減速条件としては、Pu 富化度毎にそれぞれ、10wt% : H/M=41.1, 18wt% : H/M=60.0, 33wt% : H/M=99.1 となっている。但し、Pu 富化度 10wt%以外のケースでは、H/M=0.3 で無限増倍率が最大値を提示している。中性子の漏洩のない体系で減速材も殆ど存在しないことから、高速中性子での核分裂反応で中性子増倍率が高くなつたと思われる。

第 4-1 表 MVP II 計算結果

(MOX 粉末均質、U-235 濃縮度 0.71wt%)

Pu 富化度 (wt%)	H/M 原子個 数比	含水率 (wt%)	k_{eff}	σ
10	0.3	1.0	1.27054	0.00065
	1.58	5.0	1.21136	0.00089
	3.0	9.1	1.21074	0.00103
	6.0	16.7	1.25739	0.00102
	15.0	33.3	1.36265	0.00097
	20.0	40.0	1.39459	0.00085
	24.0	44.4	1.40954	0.00082
	30.0	50.0	1.42664	0.00074
	41.1	57.8	1.43619	0.00073
	60.0	66.7	1.41958	0.00065
	150.0	83.3	1.24106	0.00035
	299.9	90.9	0.97735	0.00018
	899.8	96.8	0.51396	0.00005
	1499.7	98.0	0.34757	0.00003
	2999.3	99.0	0.19181	0.00002
18	0.3	1.0	1.55217	0.00062
	1.58	5.0	1.40944	0.00193
	3.0	9.1	1.32474	0.00093
	6.0	16.7	1.30162	0.00099
	15.0	33.3	1.36071	0.00100
	21.0	41.2	1.39522	0.00094
	30.0	50.0	1.42910	0.00091
	45.0	60.0	1.46463	0.00084
	60.0	66.7	1.47763	0.00076
	75.0	71.4	1.47709	0.00068
	90.0	75.0	1.47049	0.00066
	300.1	90.9	1.22203	0.00027
	900.2	96.8	0.75209	0.00009
	1500.3	98.0	0.53893	0.00005
	3000.6	99.0	0.31460	0.00003
33	0.3	1.0	1.89969	0.00060
	1.58	5.0	1.64012	0.00082
	3.0	9.1	1.51341	0.00087
	6.0	16.7	1.41033	0.00099
	15.0	33.3	1.37734	0.00101
	21.0	41.2	1.39473	0.00101
	30.0	50.0	1.42050	0.00098
	60.1	66.7	1.48638	0.00073
	99.1	76.7	1.51578	0.00075
	120.1	80.0	1.51549	0.00065
	150.1	83.3	1.51022	0.00058
	300.3	90.9	1.41732	0.00039
	900.9	96.8	1.02951	0.00014
	3003.0	99.0	0.50379	0.00004

含水率の定義 : $R_{\text{水}} = \frac{M_{\text{水}} \times 100}{M_{\text{水}} + M_{\text{MOX}}}$ $M_{\text{水}}$: セル中の水の質量
 M_{MOX} : セル中の MOX 質量



第4-1図 H/M原子個数比対無限増倍率

5. H/M 固定での中性子増倍率の粒径サーベイ計算

第 3-1 図に示す計算体系図より核燃料領域に MOX 燃料球状粒子を設定して、各 Pu 富化度における 9 ケースの体系のセル平均原子個数比 H/M 原子個数比と MOX 球状粒子の平均粒径をパラメータとした無限増倍率の解析を実施した。H/M 原子個数比はセル体積の増減で調整した。但し、H/M=0.3, H/M=1.58 での無限増倍率の解析は、粉末粒子の直径がセルピッチより若干小さくなるように水密度を $1\text{g}/\text{cm}^3$ より減少(H/M=0.3: $0.125\text{g}/\text{cm}^3$, H/M=1.58: $0.658\text{g}/\text{cm}^3$) させて調整した。

(1) Pu 富化度 10[wt%]の場合の臨界計算結果

第 4-1 図より最適減速条件は、Pu 富化度 10wt% では H/M=41.1 であった。該当の値も含め H/M 原子個数比を固定して、粉末粒径を変化させた計算を第 5-1 表及び第 5-1 図に示す。

(2) Pu 富化度 18[wt%]の場合の臨界計算結果

第 4-1 図より最適減速条件は、Pu 富化度 18wt% では H/M=60 であった。該当の値も含め H/M 原子個数比を固定して、粉末粒径を変化させた計算を第 5-2 表及び第 5-2 図に示す。

(3) Pu 富化度 33[wt%]の場合の臨界計算結果

第 4-1 図より最適減速条件は、Pu 富化度 33wt% では H/M=99 であった。該当の値も含め H/M 原子個数比を固定して、粉末粒径を変化させた計算を第 5-3 表及び第 5-3 図に示す。

最適減速条件の無限増倍率は、Pu 富化度が高くなるにつれて、最大となる粉末粒径が小さくなっているが、H/M 原子個数比の低い方では無限増倍率の値は粉末粒径に影響は受けていない。H/M=1.58 以下の低減速条件では MOX 粒子が接近しており、MOX 粒子間の減速領域の幅が熱中性子の平均自由行程未満となってくることが理由として挙げられる。

無限増倍率が最大となる粒子粒径

Pu 富化度	最適減速条件	最大粒径条件	低減速条件(H/M≤1.58)
10wt%	3mm	7mm(H/M=24)	ピークなし
18wt%	2mm	5mm(H/M=30)	ピークなし
33wt%	1mm	2cm(H/M=6)	ピークなし

また、Pu 富化度 10wt% と 18wt% では粉末粒径 1mm から 1cm の間に無限増倍率のピークが存在するが、Pu 富化度 33wt% では粉末粒径 1mm から 1cm の間の無限増倍率のピークは差が小さくなり、H/M=6 が最大ピークを示す結果となっている。なお、減速材の少ない条件で粒子粒径 $10\mu\text{m}$ 未満の計算ケースの中には、最高設定時間内に計算ステップが

終了しない、または収束が悪く計算誤差が大きな結果しか得られていないケースがある。
それらの計算結果は表より除外している。

第 5-1 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 10[wt%])

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

体系の H/M	体系含水 率(wt%)	粉末粒径(μm)	計算結果	
			k inf	σ
0.3	1.0	1	1.27074	0.00312
		10	1.27017	0.00127
		50	1.26883	0.00069
		100	1.27096	0.00064
		1000	1.27027	0.00071
		2000	1.26964	0.00077
1.58	5.0	1	1.21195	0.00377
		10	1.21305	0.00169
		50	1.21366	0.00104
		100	1.21367	0.00098
		1000	1.21944	0.00099
		10000	1.27092	0.00105
6.0	16.7	10	1.25742	0.00099
		50	1.25597	0.00119
		100	1.25925	0.00132
		1000	1.28258	0.00113
		10000	1.43073	0.00101
		30000	1.50111	0.00088
		40000	1.48613	0.00086
15	33.3	1	1.36247	0.00191
		10	1.36239	0.00114
		50	1.36354	0.00117
		100	1.36734	0.00113
		1000	1.41400	0.00103
		10000	1.53892	0.00080
		20000	1.49753	0.00082
20	40.0	1	1.39288	0.00216
		10	1.39370	0.00113
		50	1.39918	0.00105
		100	1.40088	0.00098
		1000	1.44851	0.00106

		7000	1.54162	0.00081
		10000	1.53970	0.00083
24	44.4	1	1.41014	0.00167
		10	1.41118	0.00098
		50	1.41285	0.00102
		100	1.41827	0.00102
		1000	1.46963	0.00085
		7000	1.54261	0.00077
		10000	1.52596	0.00070
30	50.0	1	1.42406	0.00155
		10	1.42792	0.00096
		50	1.43012	0.00103
		100	1.43532	0.00089
		1000	1.48649	0.00089
		5000	1.53799	0.00077
		10000	1.49516	0.00079
41.1	57.8	1	1.43559	0.00096
		10	1.43697	0.00095
		50	1.43944	0.00082
		100	1.44356	0.00091
		1000	1.49267	0.00083
		2000	1.51248	0.00076
		3000	1.51897	0.00056
		5000	1.50793	0.00056
59.1	66.3	1	1.42389	0.00111
		10	1.42252	0.00081
		50	1.42684	0.00076
		100	1.43133	0.00078
		1000	1.46953	0.00071
		2000	1.47903	0.00069
		5000	1.43706	0.00071

第 5-2 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 18[wt%])

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

体系の H/M	体系含水 率(wt%)	粉末粒径(μm)	計算結果	
			k inf	σ
0.3	1.0	1	1.56540	0.00245
		10	1.55175	0.00102
		50	1.55454	0.00073
		100	1.55506	0.00072
		1000	1.55309	0.00069
		2000	1.55275	0.00067
1.58	5.0	1	1.40944	0.00193
		10	1.39238	0.00146
		50	1.39160	0.00093
		100	1.39132	0.00100
		1000	1.39446	0.00091
		2000	1.40198	0.00100
6.0	16.7	10	1.30144	0.00121
		50	1.30418	0.00109
		100	1.30508	0.00109
		1000	1.32933	0.00110
		10000	1.47798	0.00109
		30000	1.56041	0.00089
15.0	33.3	1	1.35543	0.00207
		10	1.35905	0.00116
		50	1.35976	0.00110
		100	1.36420	0.00106
		1000	1.41455	0.00117
		10000	1.57143	0.00088
		20000	1.53794	0.00087
21.0	41.2	1	1.39310	0.00190
		10	1.39534	0.00114
		50	1.39684	0.00113
		100	1.40365	0.00117
		1000	1.46236	0.00110
		7000	1.57931	0.00088

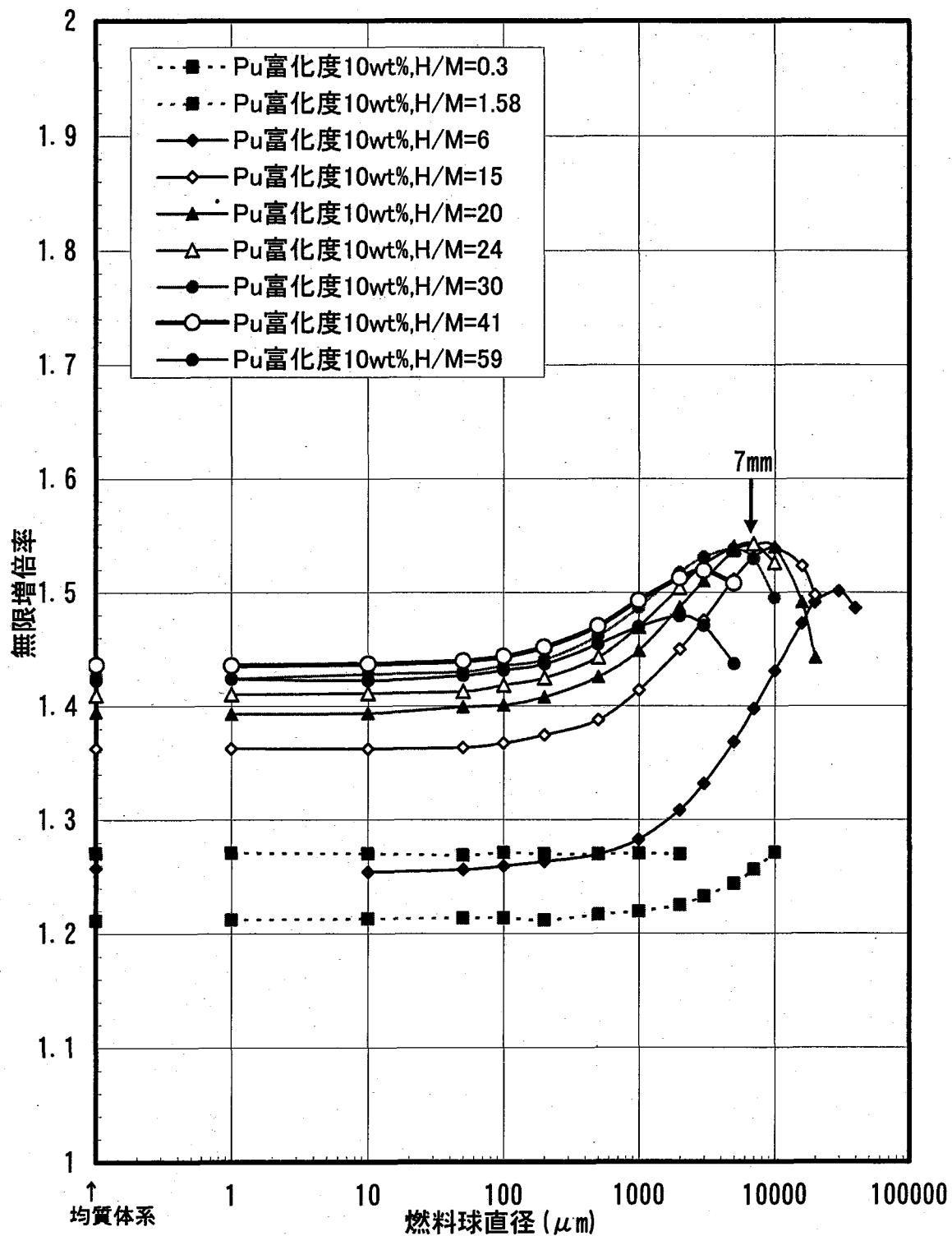
		10000	1.57711	0.00077
		20000	1.47501	0.00089
30.0	50.0	1	1.43427	0.00199
		10	1.42986	0.00105
		50	1.43613	0.00111
		100	1.44197	0.00106
		1000	1.50631	0.00099
		5000	1.58357	0.00080
		10000	1.54600	0.00079
45.0	60.0	1	1.46639	0.00114
		10	1.46622	0.00100
		50	1.47007	0.00096
		100	1.47613	0.00097
		1000	1.54117	0.00085
		3000	1.57868	0.00079
		10000	1.46324	0.00076
60.0	66.7	1	1.47794	0.00104
		10	1.47784	0.00087
		50	1.48435	0.00093
		100	1.48899	0.00088
		1000	1.54662	0.00078
		2000	1.56297	0.00066
		3000	1.55831	0.00057
75.0	71.4	1	1.47915	0.00085
		10	1.47989	0.00088
		50	1.48435	0.00083
		100	1.48849	0.00080
		1000	1.53850	0.00078
		2000	1.54237	0.00070
		5000	1.47279	0.00053

第 5-3 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 33[wt%])

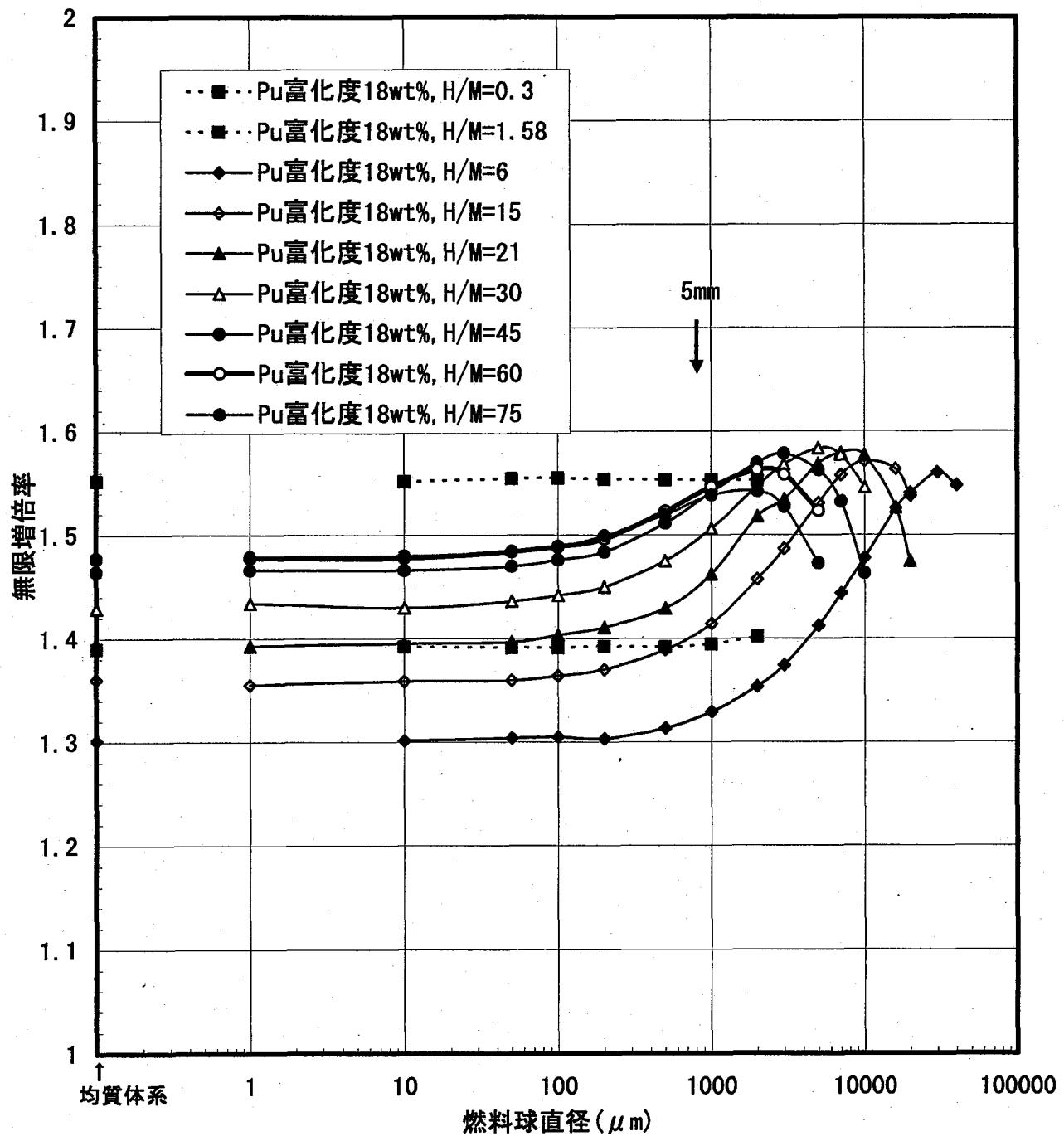
(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

体系の H/M	体系含水 率(wt%)	粉末粒径(μm)	計算結果	
			k inf	σ
0.3	1.0	1	1.92297	0.00324
		10	1.89967	0.00105
		50	1.90007	0.00060
		100	1.89987	0.00064
		1000	1.89942	0.00068
		2000	1.90106	0.00065
1.58	5.0	1	1.67206	0.00194
		10	1.64145	0.00142
		50	1.64014	0.00088
		100	1.64192	0.00090
		1000	1.64288	0.00098
		2000	1.64826	0.00090
6.0	16.7	10	1.41171	0.00126
		50	1.41227	0.00111
		100	1.40974	0.00112
		1000	1.43646	0.00105
		10000	1.56941	0.00105
		20000	1.65138	0.00090
		60000	1.57759	0.00084
15.0	33.3	1	1.37717	0.00198
		10	1.37824	0.00114
		50	1.37907	0.00112
		100	1.38083	0.00118
		1000	1.43614	0.00106
		10000	1.61285	0.00088
		20000	1.58995	0.00086
21.0	41.2	1	1.39119	0.00220
		10	1.39420	0.00124
		50	1.39716	0.00114
		100	1.40282	0.00114
		1000	1.46863	0.00110

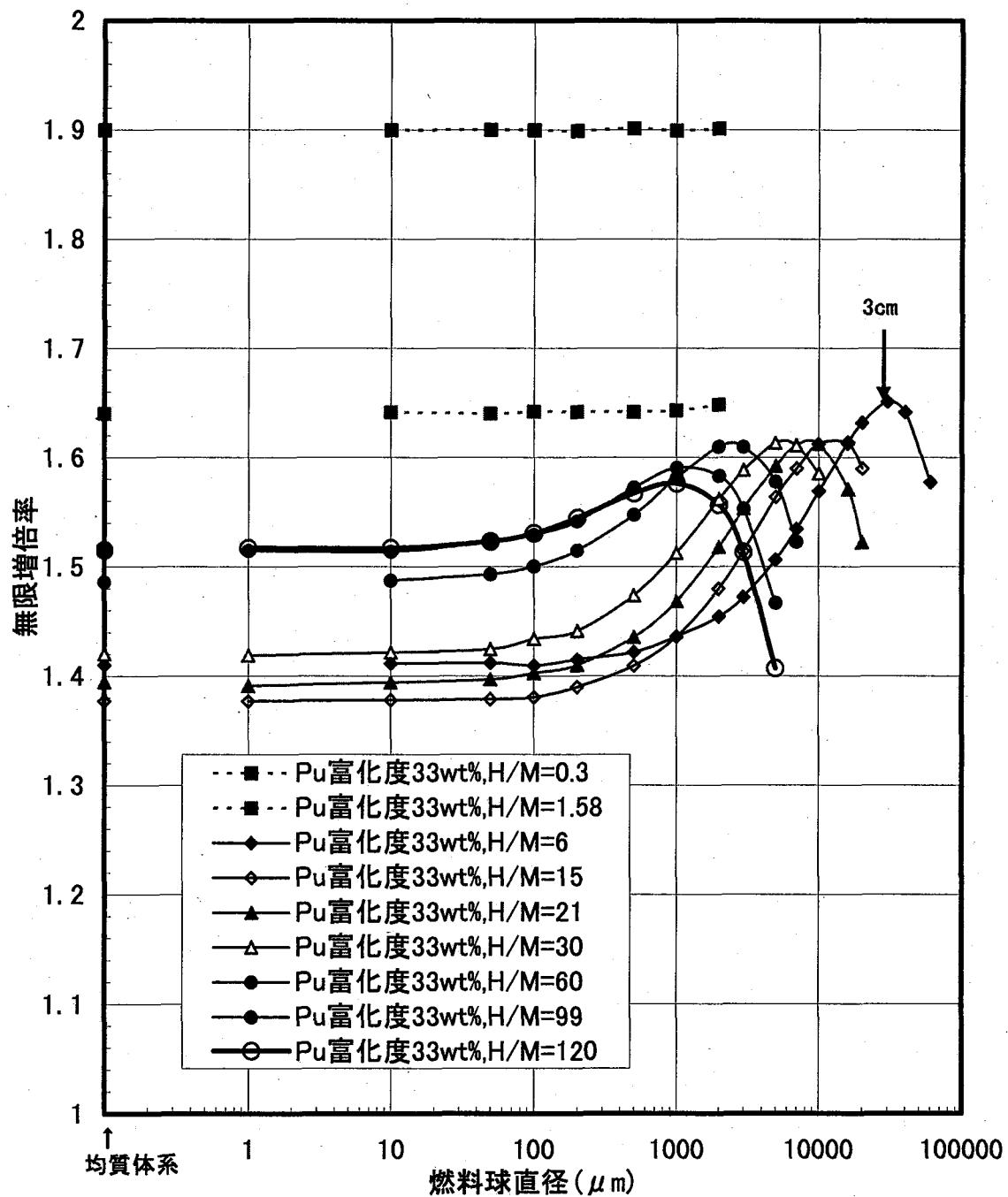
		10000	1.61234	0.00085
		20000	1.52240	0.00084
30.0	50.0	1	1.41914	0.00183
		10	1.42164	0.00111
		50	1.42477	0.00107
		100	1.43423	0.00112
		1000	1.51266	0.00108
		5000	1.61360	0.00083
		10000	1.58541	0.00074
		10	1.48753	0.00093
		50	1.49315	0.00097
60.1	66.7	100	1.50043	0.00098
		1000	1.58182	0.00087
		2000	1.60992	0.00076
		5000	1.57790	0.00076
		1	1.51481	0.00096
		10	1.51409	0.00087
99.1	76.7	50	1.52312	0.00093
		100	1.52915	0.00089
		1000	1.59068	0.00077
		2000	1.58319	0.00065
		3000	1.55342	0.00054
		5000	1.46703	0.00083
		1	1.51741	0.00088
		10	1.51713	0.00085
120.1	80.0	50	1.52342	0.00082
		100	1.53073	0.00084
		1000	1.57644	0.00071
		2000	1.55661	0.00065
		3000	1.51373	0.00057
		5000	1.40726	0.00065



第5-1図 燃料球直径対無限増倍率 (Pu 富化度 10wt%)



第 5-2 図 燃料球直径対無限増倍率 (Pu 富化度 18wt%)



第 5-3 図 燃料球直径対無限増倍率 (Pu 富化度 33wt%)

6. 粉末粒径の影響評価

5章で解析したPu富化度10wt%, 18wt%, 33wt%の結果を用いて、各H/MにおけるMOX粉末粒径変化による体系の無限増倍率の比較を実施した。結果はセル平均のH/M原子個数比を固定したときに、均質系としたときの無限増倍率に対する非均質系での無限増倍率の増加割合 $\Delta k/k$ として表した。Pu富化度毎に以下に示す。

(1) Pu富化度10[wt%]の場合のMOX粉末粒径の影響評価

Pu富化度10wt%, H/M原子個数比固定、粉末粒径変化の場合の無限増倍率変化を第6-1表及び第6-1図に示す。

(2) Pu富化度18[wt%]の場合のMOX粉末粒径の影響評価

Pu富化度18wt%, H/M原子個数比固定、粉末粒径変化の場合の無限増倍率変化を第6-2表及び第6-2図に示す。

(3) Pu富化度33[wt%]の場合のMOX粉末粒径の影響評価

Pu富化度33wt%, H/M原子個数比固定、粉末粒径変化の場合の無限増倍率変化を第6-3表及び第6-3図に示す。

第6-1図、第6-2図、第6-3図より、均質系で最適減速状態に近い範囲のH/M原子個数比では、粉末粒径が10μmを超えると均質計算に対して、無限増倍率が増加する傾向が見られる。但し、H/M=1.58のケース(含水率5wt%)では、500(μm)を超えると均質計算に対して、無限増倍率が増加する傾向が見られる程度で感度が小さく、H/M=0.3(含水率1wt%)のケースでは、粉末粒径に対して無限増倍率の感度がないことが確認できる。

最適減速条件ではPu富化度の高い方の $\Delta k/k$ が、粉末粒径の小さい方でピークを示しているが、無限増倍率変化量は0.05から0.06と比較的小さい。無限増倍率が最大となったケースの $\Delta k/k$ は最適減速条件よりH/Mの低い条件で約0.1増加、さらに最大粒径条件より低い条件のH/M=6付近では約0.2増加している。これは、Pu富化度に依存しない。

粒子粒径の変化に対する無限増倍率変化($\Delta k/k$)の最大値

Pu富化度	最適減速条件	最大粒径条件	低減速条件(H/M=6)
10wt%	0.058	0.094(H/M=24)	0.194
18wt%	0.058	0.108(H/M=30)	0.199
33wt%	0.049	0.136(H/M=30)	0.171

通常のMOX粉末の粒子粒径は2章で提示したように、20μm以下である。従って、臨界上厳しい減速系を対象とする場合でも、MOX粉末は均質系としてモデル化することが可能であると考えられる。また、MOX燃料加工施設は乾式工程のため、MOX粉末の含水率も1wt%(H/M=0.3)以下と想定され、粒子粒径変化による非均質効果を考慮する必要がないと考えられる。

第 6-1 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 10[wt%])

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

Pu 富化度 (wt%)	体 系 の H/M	粉末粒径(μ m)	計算結果	
			k inf+ σ	Δ k/k*
10	0.3	均質	1.27054±0.00065	0.0
		1	1.27074±0.00312	0.000157
		10	1.27017±0.00127	-0.00029
		50	1.26883±0.00069	-0.00135
		100	1.27096±0.00064	0.000331
		1000	1.27027±0.00071	-0.00021
		2000	1.26964±0.00077	-0.00071
	1.58	均質	1.21136±0.00089	0.0
		1	1.21195±0.00377	0.000487
		10	1.21305±0.00169	0.001395
		50	1.21366±0.00104	0.001899
		100	1.21367±0.00104	0.001907
		1000	1.21944±0.00099	0.006670
		10000	1.27092±0.00105	0.049168
	6.0	均質	1.25739±0.00102	0.0
		10	1.25408±0.00115	-0.00263
		50	1.25597±0.00119	-0.00113
		100	1.25925±0.00132	0.001479
		1000	1.28258±0.00113	0.020034
		10000	1.43073±0.00101	0.137857
		30000	1.50111±0.00088	0.193830
	15	均質	1.36265±0.00097	0.0
		1	1.36247±0.00191	-0.00013
		10	1.36239±0.00114	-0.00019
		50	1.36354±0.00117	0.000653
		100	1.36734±0.00113	0.003442
		1000	1.41400±0.00103	0.037684
		10000	1.53892±0.00080	0.129358
		20000	1.49753±0.00082	0.098984
	20	均質	1.39459±0.00085	0.0
		1	1.39288±0.00216	-0.00123

	20	10	1.39370 ± 0.00113	-0.00064
		50	1.39918 ± 0.00105	0.003291
		100	1.40088 ± 0.00098	0.004510
		1000	1.44851 ± 0.00106	0.038664
		7000	1.54162 ± 0.00081	0.105429
		10000	1.53970 ± 0.00083	0.104052
10	24	均質	1.40954 ± 0.00082	0.0
		1	1.41014 ± 0.00167	0.000426
		10	1.41118 ± 0.00098	0.001164
		50	1.41285 ± 0.00102	0.002348
		100	1.41827 ± 0.00102	0.006194
		1000	1.46963 ± 0.00085	0.042631
		7000	1.54261 ± 0.00077	0.094407
		10000	1.52596 ± 0.00070	0.082594
		均質	1.42664 ± 0.00074	0.0
10	30	1	1.42406 ± 0.00155	-0.00181
		10	1.42792 ± 0.00096	0.000897
		50	1.43012 ± 0.00103	0.002439
		100	1.43532 ± 0.00089	0.006084
		1000	1.48649 ± 0.00089	0.041952
		5000	1.53799 ± 0.00077	0.078051
		10000	1.49516 ± 0.00079	0.048029
		均質	1.43619 ± 0.00073	0.0
		1	1.43559 ± 0.00096	-0.00042
10	41.1	10	1.43697 ± 0.00095	0.000543
		50	1.43944 ± 0.00082	0.002263
		100	1.44356 ± 0.00091	0.005132
		1000	1.49267 ± 0.00083	0.039326
		2000	1.51248 ± 0.00076	0.053120
		3000	1.51897 ± 0.00056	0.057639
		5000	1.50793 ± 0.00056	0.049952
		均質	1.42249 ± 0.00061	0.0
		1	1.42389 ± 0.00111	0.000984
59.1	59.1	10	1.42252 ± 0.00081	0.000021
		50	1.42684 ± 0.00076	0.003058

		100	1.43133±0.00078	0.006214
10	59.1	1000	1.46953±0.00071	0.033069
		2000	1.47903±0.00069	0.039747
		5000	1.43706±0.00071	0.010243

* : 均質体系からの相対的増加割合

第 6-2 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 18[wt%])

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

Pu 富化度 (wt%)	体 系 の H/M	粉末粒径(μ m)	計算結果	
			k inf+ σ	Δ k/k*
18	0.3	均質	1.55217±0.00062	0.0
		1	1.56540±0.00245	0.008524
		10	1.55175±0.00102	-0.00027
		50	1.55454±0.00073	0.001209
		100	1.55506±0.00072	0.001862
		1000	1.55309±0.00069	-0.000593
		2000	1.55275±0.00067	-0.000374
		均質	1.38992±0.00083	0.0
1.58	1.58	1	1.40944±0.00193	0.0014044
		10	1.39238±0.00146	0.001770
		50	1.39160±0.00093	0.001209
		100	1.39132±0.00100	0.001007
		1000	1.39446±0.00091	0.003266
		2000	1.40198±0.00100	0.008677
		均質	1.30162±0.00099	0.0
		10	1.30144±0.00121	-0.00014
6.0	6.0	50	1.30418±0.00109	0.001967
		100	1.30508±0.00109	0.002658
		1000	1.32933±0.00110	0.021289
		10000	1.47798±0.00109	0.135493
		30000	1.56041±0.00089	0.198821
		均質	1.36071±0.00100	0.0
		1	1.35543±0.00207	-0.00388
		10	1.35905±0.00116	-0.00120
15	15	50	1.35976±0.00110	-0.00070
		100	1.36420±0.00106	0.002565
		1000	1.41455±0.00117	0.039568
		10000	1.57143±0.00088	0.154860
		20000	1.53794±0.00094	0.130248
		均質	1.39522±0.00094	0.0
		1	1.39310±0.00190	-0.00152

18	21	10	1.39534 ± 0.00114	0.000086
		50	1.39684 ± 0.00113	0.001161
		100	1.40365 ± 0.00117	0.006042
		1000	1.46236 ± 0.00110	0.048121
		7000	1.57931 ± 0.00088	0.131943
		10000	1.57711 ± 0.00077	0.130367
	30	均質	1.42910 ± 0.00091	0.0
		1	1.43427 ± 0.00199	0.003618
		10	1.42986 ± 0.00105	0.000532
		50	1.43613 ± 0.00111	0.004919
		100	1.44197 ± 0.00106	0.009006
		1000	1.50631 ± 0.00099	0.054027
		7000	1.58357 ± 0.00080	0.108089
		10000	1.54600 ± 0.00079	0.081800
	45	均質	1.46463 ± 0.00084	0.0
		1	1.46639 ± 0.00114	0.001202
		10	1.46622 ± 0.00100	0.001086
		50	1.47007 ± 0.00096	0.003714
		100	1.47613 ± 0.00097	0.007852
		1000	1.54117 ± 0.00083	0.052259
		3000	1.57868 ± 0.00079	0.077869
		10000	1.46324 ± 0.00076	-0.00095
	60	均質	1.47763 ± 0.00076	0.0
		1	1.47794 ± 0.00104	0.000210
		10	1.47784 ± 0.00087	0.000142
		50	1.48435 ± 0.00093	0.004548
		100	1.48899 ± 0.00088	0.007688
		1000	1.54662 ± 0.00078	0.04669
		2000	1.56297 ± 0.00078	0.057755
		5000	1.52327 ± 0.00065	0.030887
	75	均質	1.47709 ± 0.00068	0.0
		1	1.47915 ± 0.00085	0.001395
		10	1.47989 ± 0.00088	0.001896
		50	1.48435 ± 0.00083	0.004570
		100	1.48849 ± 0.00080	0.007718

75	1000	1.53850±0.00078	0.041575
	2000	1.54237±0.00070	0.044195
	5000	1.47279±0.00053	-0.00291

* : 均質体系からの相対的増加割合

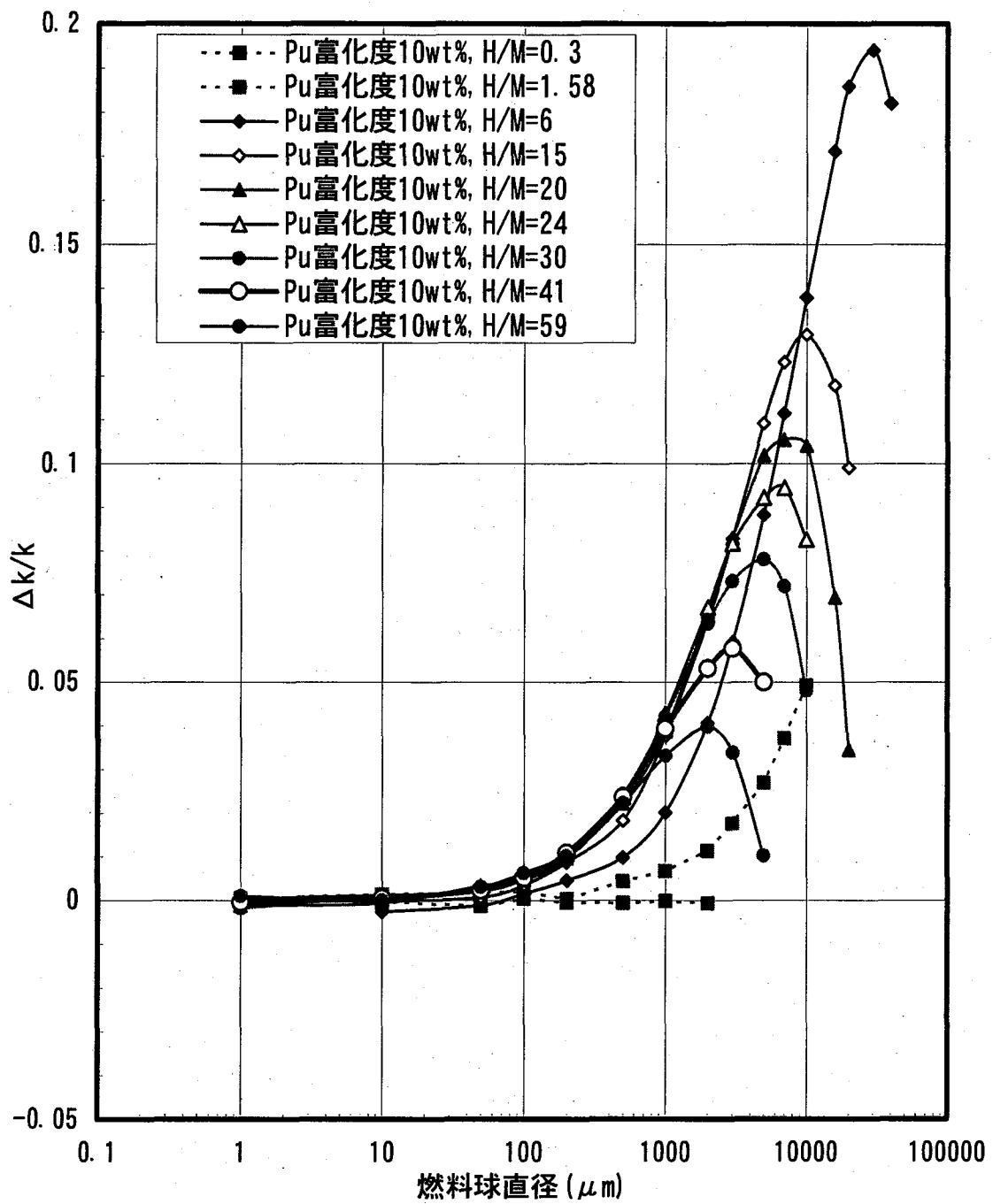
第 6-3 表 MVP II 計算結果(Pu 富化度 33[wt%])

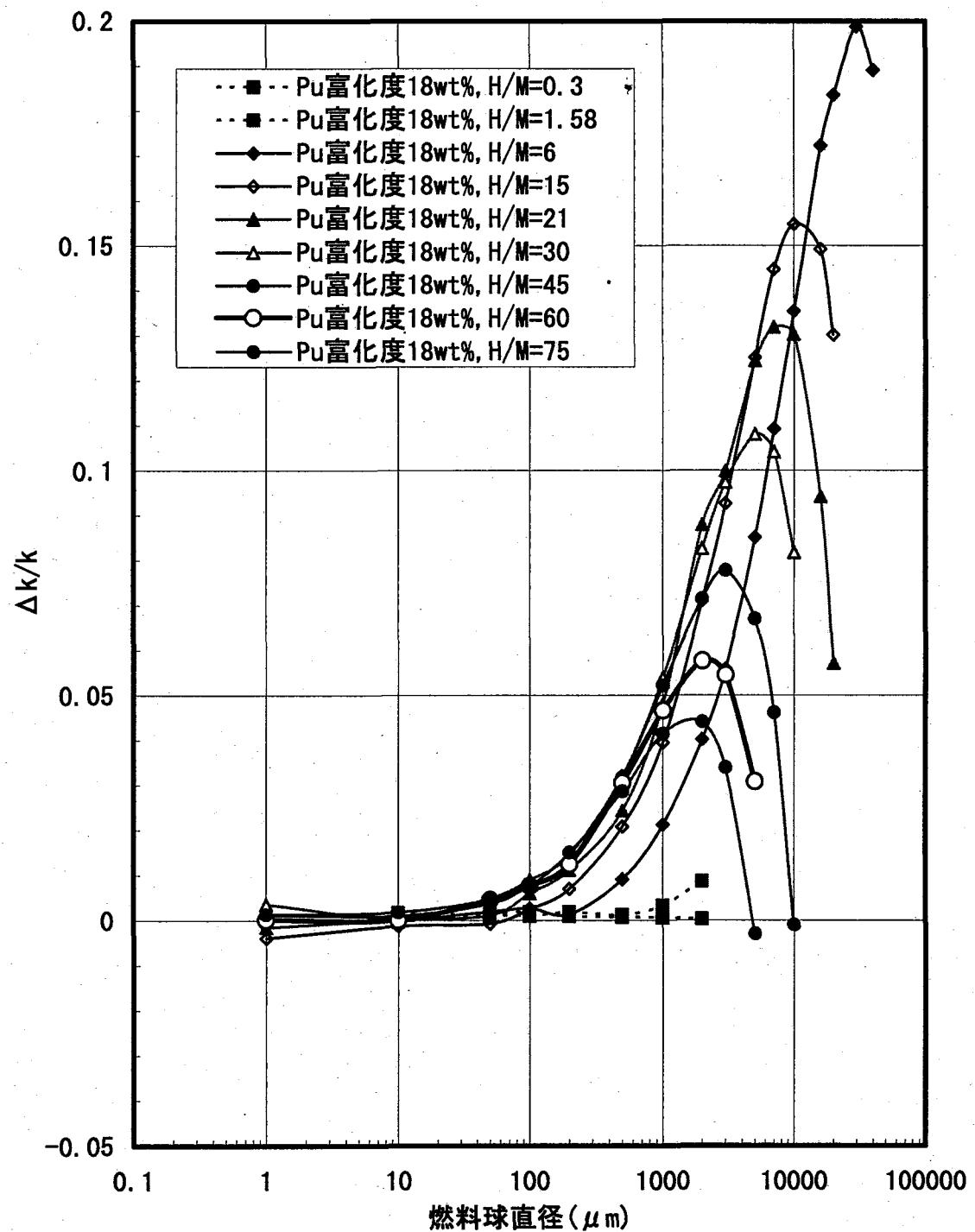
(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

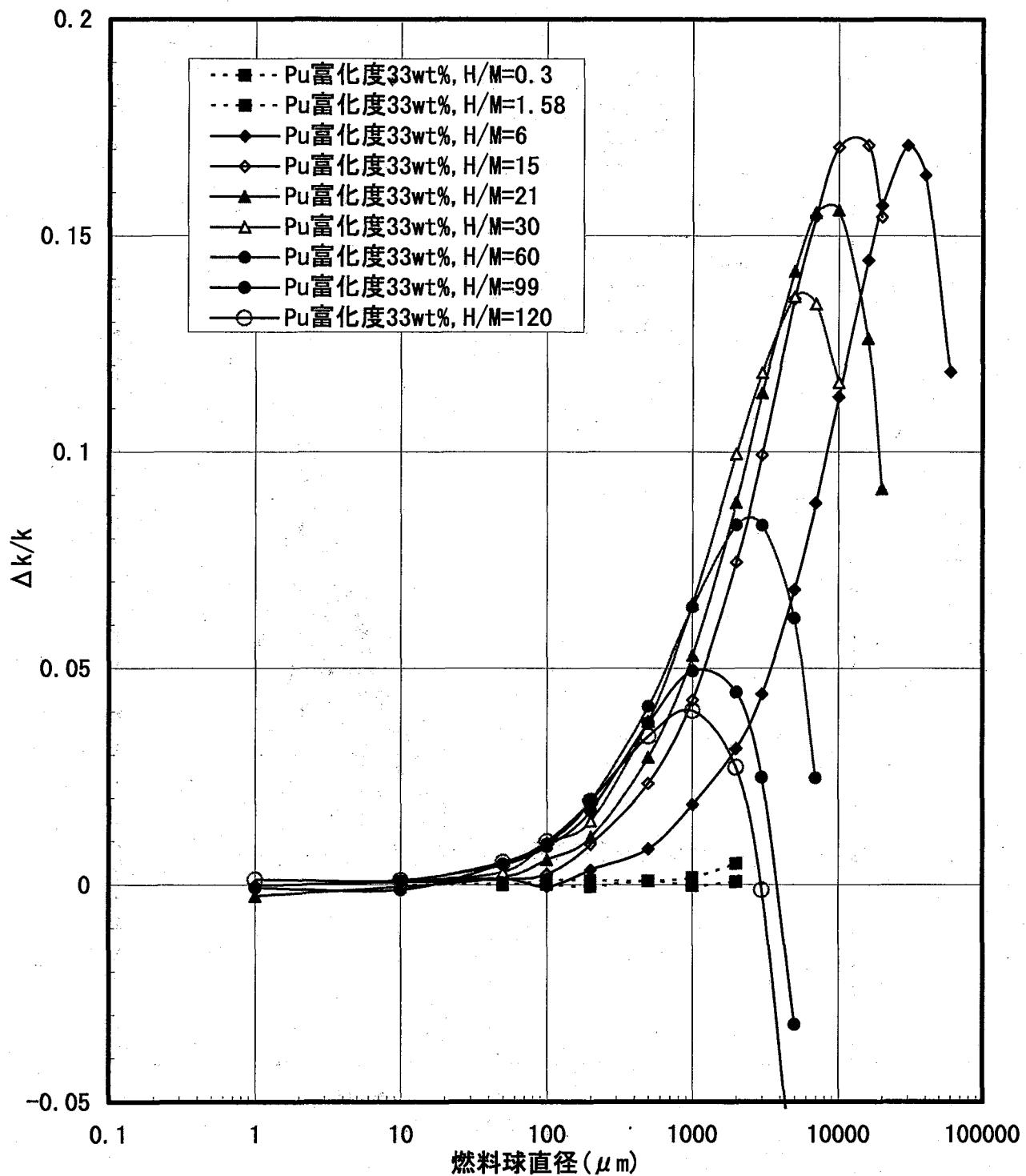
Pu 富化度 (wt%)	体 系 の H/M	粉末粒径(μ m)	計算結果	
			$k_{inf} + \sigma$	$\Delta k/k^*$
33	0.3	均質	1.89969±0.00060	0.0
		1	1.92297±0.00324	0.012255
		10	1.89967±0.00105	-0.000011
		50	1.90007±0.00060	0.000200
		100	1.89987±0.00064	0.0000948
		1000	1.89942±0.00068	-0.00014
		2000	1.90106±0.00065	0.000721
	1.6	均質	1.64012±0.00082	0.0
		1	1.67206±0.00194	0.019474
		10	1.64145±0.00142	0.000811
		50	1.64014±0.00088	0.000012
		100	1.64192±0.00091	0.001097
		1000	1.64288±0.00098	0.001683
		2000	1.64826±0.00090	0.014963
	6.0	均質	1.41033±0.00099	0.0
		10	1.41171±0.00126	-0.00014
		50	1.41227±0.00111	0.001376
		100	1.40974±0.00112	-0.00042
		1000	1.43646±0.00105	0.018528
		10000	1.56941±0.00105	0.112796
		30000	1.65138±0.00090	0.170917
	15	均質	1.37734±0.00084	0.0
		1	1.37717±0.00198	-0.00012
		10	1.37824±0.00114	-0.00122
		50	1.37907±0.00112	0.001256
		100	1.38083±0.00118	0.002534
		1000	1.43614±0.00106	0.042691
		10000	1.61231±0.00089	0.170597
		20000	1.58995±0.00086	0.154363
	21	均質	1.39473±0.00101	0.0
		1	1.39119±0.00220	-0.00254

33	21	10	1.39420 ± 0.00124	0.000086
		50	1.39716 ± 0.00114	0.001742
		100	1.40282 ± 0.00114	0.005800
		1000	1.46863 ± 0.00110	0.052985
		10000	1.61234 ± 0.00084	0.156023
		20000	1.52240 ± 0.00084	0.091537
	30	均質	1.42050 ± 0.00098	0.0
		10	1.42164 ± 0.00111	0.000532
		50	1.42477 ± 0.00107	0.003006
		100	1.43423 ± 0.00112	0.009666
		1000	1.51266 ± 0.00108	0.064879
		5000	1.61360 ± 0.00083	0.135938
		10000	1.58541 ± 0.00074	0.116093
	60.1	均質	1.48638 ± 0.00073	0.0
		10	1.48753 ± 0.00093	0.000774
		50	1.49315 ± 0.00097	0.004555
		100	1.50043 ± 0.00098	0.006452
		1000	1.58182 ± 0.00087	0.064210
		2000	1.60992 ± 0.00076	0.083115
		5000	1.57790 ± 0.00076	0.061572
	99.1	均質	1.51578 ± 0.00075	0.0
		1	1.51482 ± 0.00097	-0.00063
		10	1.51409 ± 0.00087	-0.00111
		50	1.52312 ± 0.00093	0.004842
		100	1.52915 ± 0.00089	0.008821
		1000	1.59068 ± 0.00077	0.049414
		3000	1.55342 ± 0.00054	0.024832
	120.1	均質	1.51549 ± 0.00065	0.0
		1	1.51741 ± 0.00088	0.001267
		10	1.51713 ± 0.00085	0.001082
		50	1.52342 ± 0.00082	0.005233
		100	1.53073 ± 0.00084	0.010056
		1000	1.57644 ± 0.00071	0.040218
		2000	1.55661 ± 0.00065	0.027133

* : 均質体系からの相対的増加割合

第 6-1 図 燃料球直径対 $\Delta k/k$ (対均質系, 10wt%)

第 6-2 図 燃料球直径対 $\Delta k/k$ (対均質系, 18wt%)

第 6-3 図 燃料球直径対 $\Delta k/k$ (対均質系, 33wt%)

7. H/M原子個数比と非均質効果の関係

6章では、各Pu富化度において、MOX粉末粒径変化の非均質効果を評価した。第6-1図、第6-2図及び第6-3図で非均質効果が現れた燃料球直径の範囲のうち、実際のMOX粉末粒径より大きな50μmから200μmにおいてH/M原子個数比の異なるケースについてもMOX-水非均質体系における無限増倍率の計算を実施した。その結果を以下の第7-1表、第7-2表、第7-3表及び第7-1図、第7-2図、第7-3図に示す。

第7-1図、第7-2図及び第7-3図より、H/M原子個数比の増加に従って均質系の無限増倍率に対する非均質系での無限増倍率の増加割合 $\Delta k/k$ は増加する傾向が確認できる。「臨界安全ハンドブック第2版(JAERI-1340)」の図3.6に示された計算点を第7-2図に参考のため示した。Pu富化度10wt%で比較すると、傾きはほぼ同様であるが、絶対値は今回の計算の方が約5割大きくなっていることが分かる。この違いは計算コードとライブラリの計算条件(JACSシステム、JENDL-3)の違いが影響していると思われる。Pu富化度の違いによる、 $\Delta k/k$ の影響はあまり無いように見られるが、最適減速状態のH/M原子個数比は第4-1図に示すようにPu富化度が高くなると大きくなるため、H/M=40~100の範囲ではPu富化度とともに $\Delta k/k$ が大きくなる傾向も見られる。また、MOX粒子粒径が大きくなるに従い、 $\Delta k/k$ のH/M原子個数比に対する増加割合が増えていく傾向も見られる。

第 7-1 表 MVP II 計算結果 (粒径 : 0.05mm)

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

Pu 富化度 (wt%)	MOX 密度 (gMOX/cm ³)	体系の H/M	計算結果	
			Δ k/k (%)	σ (%)
10	0.486	59.09	0.306	0.076
	0.686	41.09	0.226	0.082
	0.92	29.99	0.244	0.103
	1.326	20.01	0.329	0.105
	1.703	15.00	0.065	0.117
	3.481	6.00	-0.113	0.119
18	0.387	75.02	0.457	0.083
	0.479	60.01	0.455	0.093
	0.63	45.01	0.371	0.096
	1.27	21.00	0.116	0.113
	1.703	15.00	-0.070	0.110
	3.481	6.00	0.197	0.109
33	0.245	120.12	0.523	0.082
	0.295	99.10	0.484	0.093
	0.92	30.03	0.301	0.107
	1.27	21.00	0.174	0.114
	1.703	15.01	0.126	0.112
	3.481	6.01	0.138	0.111

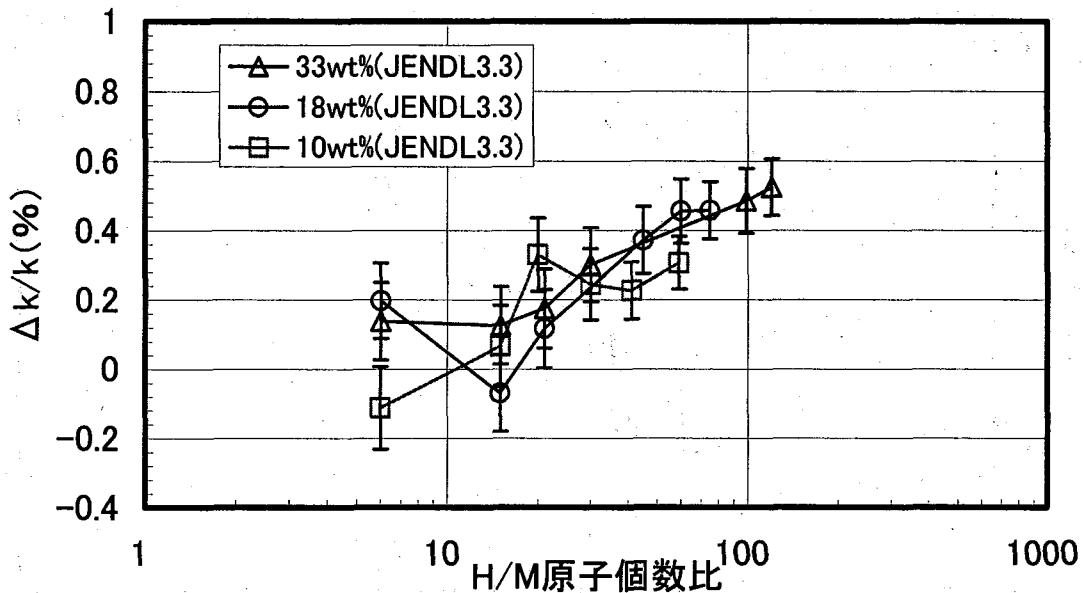
第 7-2 表 MVP II 計算結果 (粒径 : 0.1mm)

(MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

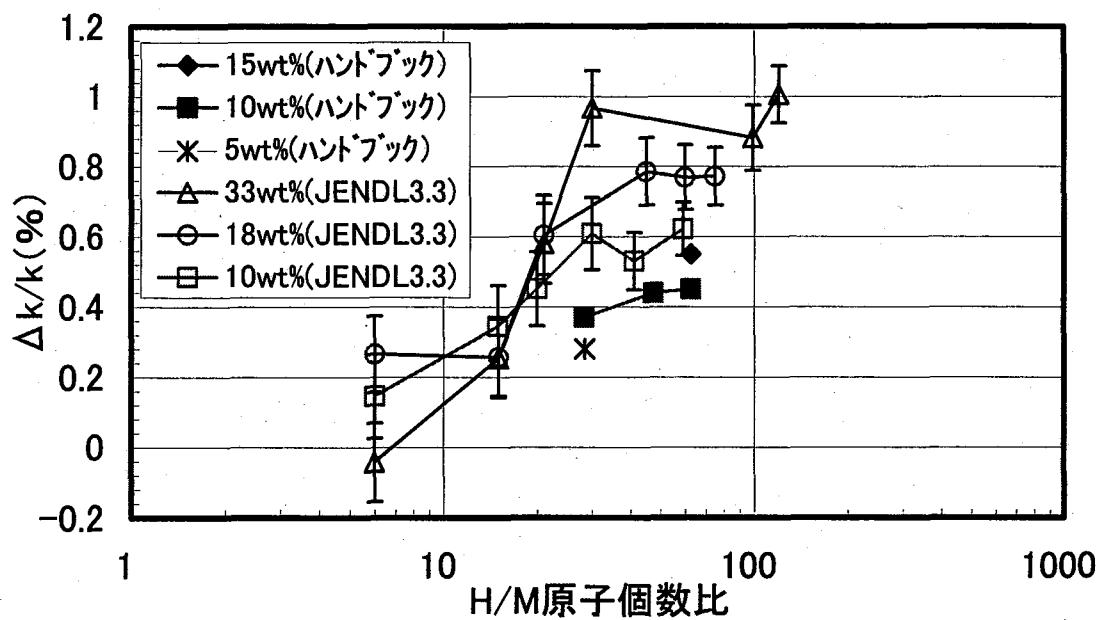
Pu 富化度 (wt%)	MOX 密度 (gMOX/cm ³)	体系の H/M	計算結果	
			Δk/k (%)	σ (%)
10	0.486	59.09	0.621	0.078
	0.686	41.09	0.530	0.091
	0.92	29.99	0.608	0.089
	1.326	20.01	0.451	0.098
	1.703	15.00	0.344	0.113
	3.481	6.00	0.148	0.132
18	0.387	75.02	0.772	0.080
	0.479	60.01	0.769	0.088
	0.63	45.01	0.785	0.097
	1.27	21.00	0.604	0.117
	1.703	15.00	0.256	0.106
	3.481	6.00	0.266	0.109
33	0.245	120.12	1.006	0.084
	0.295	99.10	0.882	0.089
	0.92	30.03	0.967	0.112
	1.27	21.00	0.580	0.114
	1.703	15.01	0.253	0.118
	3.481	6.01	-0.042	0.112

第 7-3 表 MVP II 計算結果 (粒径 : 0.2mm)
 (MOX 粉末密度 11.46g/cm³, U-235 濃縮度 0.71wt%)

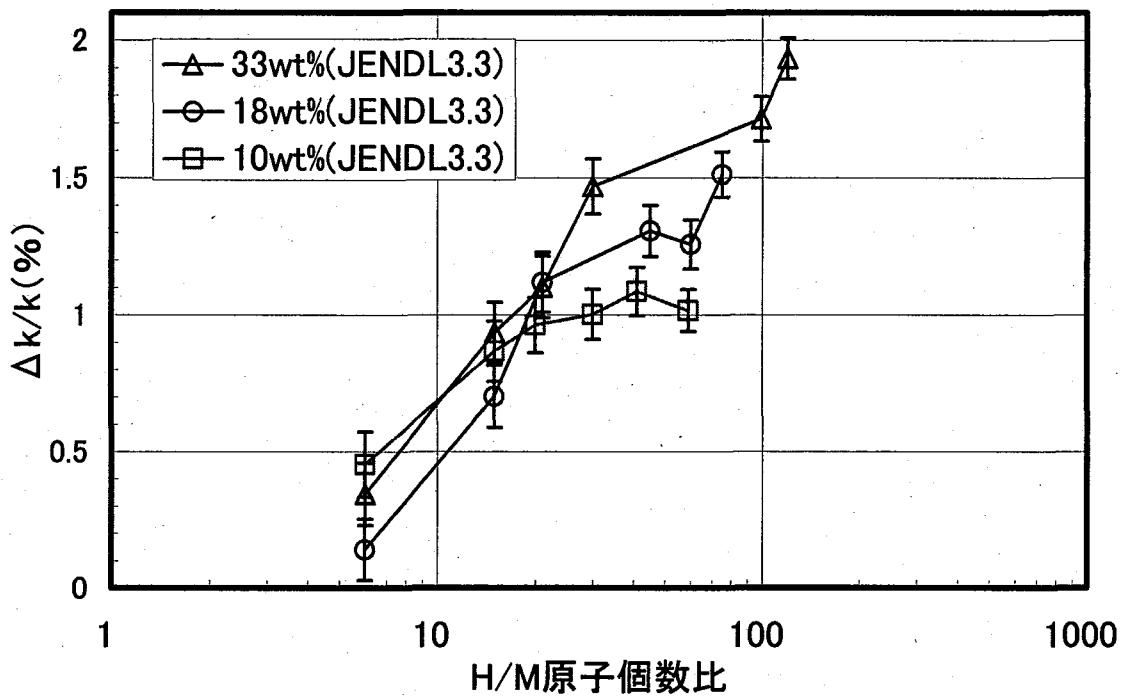
Pu 富化度 (wt%)	MOX 密度 (gMOX/cm ³)	体系の H/M	計算結果	
			Δk/k (%)	σ (%)
10	0.486	59.09	1.016	0.077
	0.686	41.09	1.086	0.088
	0.92	29.99	1.002	0.092
	1.326	20.01	0.962	0.102
	1.703	15.00	0.867	0.110
	3.481	6.00	0.456	0.120
18	0.387	75.02	1.512	0.083
	0.479	60.01	1.257	0.089
	0.63	45.01	1.307	0.093
	1.27	21.00	1.12	0.110
	1.703	15.00	0.701	0.114
	3.481	6.00	0.141	0.113
33	0.245	120.12	1.933	0.074
	0.295	99.10	1.715	0.081
	0.92	30.03	1.468	0.101
	1.27	21.00	1.101	0.113
	1.703	15.01	0.935	0.111
	3.481	6.01	0.344	0.114



第 7-1 図 MOX-水非均質体系における非均質効果（粒径 : 0.05mm）



第 7-2 図 MOX-水非均質体系における非均質効果（粒径 : 0.1mm）



第 7-3 図 MOX-水非均質体系における非均質効果（粒径：0.2mm）

8. 反応率の比較評価

4章及び5章でMOX粉末の均質体系、非均質体系の無限増倍率を解析した。同時に計算されている反応率から高速核分裂効果、共鳴を逃れる確率、熱中性子利用率と再生率を算出できる。Pu富化度(10wt%, 18wt%, 33wt%)の違い、H/M原子個数比の違い、燃料粒径の違いによる共鳴を逃れる確率及び熱中性子利用率の変化の傾向を明らかにするために、各計算ケースの反応率による四因子の比較を実施した。結果を以下に示す。なお、高速核分裂効果(ε)、共鳴を逃れる確率(p)、熱中性子利用率(f)と再生率(η)をMVP IIコード計算出力結果より集計する。定義式⁽⁸⁾は以下の通りとなっている。なお、1.855eV未満を熱群、1.855eV以上を高速群とした。

$$\varepsilon = \frac{Rf_{th}^F + Rf_{fast}^F}{Rf_{th}^F}$$

$$p = \frac{Ra_{th}^F + Ra_{th}^M}{Ra_{th}^F + Ra_{th}^M + Ra_{fast}^F + Ra_{fast}^M}$$

$$f = \frac{Ra_{th}^F}{Ra_{th}^F + Ra_{th}^M}$$

$$\eta = \frac{Rf_{th}^F}{Ra_{th}^F}$$

Rf_{fast}^F : 燃料での高速群の生成反応率

Rf_{th}^F : 燃料での熱群の生成反応率

Ra_{fast}^F : 燃料での高速群の吸収反応率

Ra_{th}^F : 燃料での熱群の吸収反応率

Ra_{fast}^M : 減速材での高速群の吸収反応率

Ra_{th}^M : 減速材での熱群の吸収反応率

(1) 均質体系の反応率比較評価

均質体系のH/Mサーベイ計算結果より、高速核分裂効果(ε)、共鳴を逃れる確率(p)、熱中性子利用率(f)と再生率(η)を算出した。結果を第8-1図、第8-2図に示す。高速核分裂効果はPu富化度とともに上昇し、H/M原子個数比が大きくなると減少し、さらにH/M原子個数比の小さい領域で極端に大きくなっている。これが第4-1図に示されている低減速領域で無限増倍率が高くなる原因と考えられる。再生率はH/M原子個数比の増加とともに増加しているが、値は2~4の間で変位は比較的小さい。また、H/M原子個数比の増加に伴い共鳴を逃れる確率が上昇し、熱中性子利用率が多少低下している。そして、Pu富化度の増加と共に共鳴を逃れる確率が低下し、熱中性子利用率が上昇している。

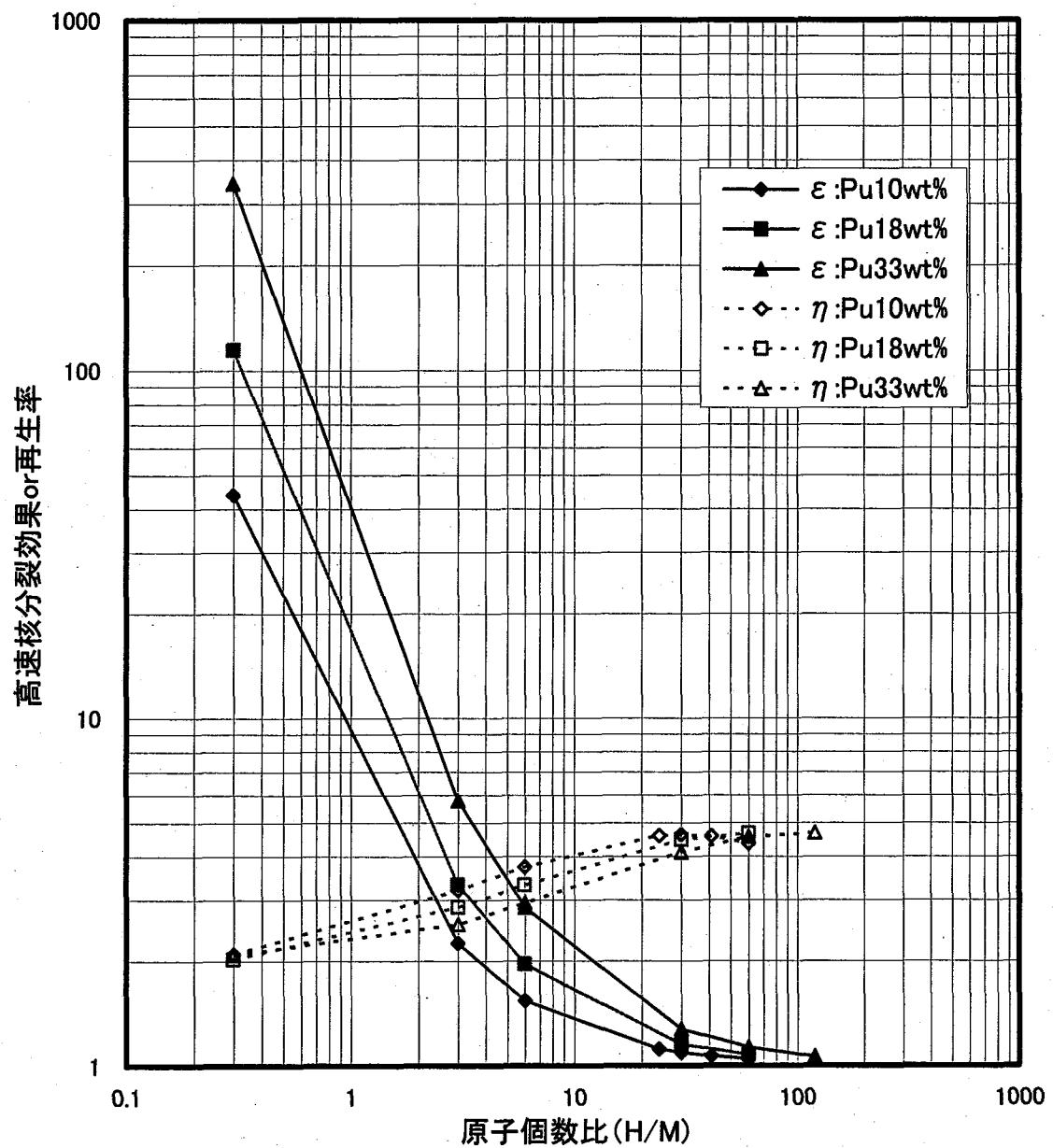
(2) MOX粉末粒径の反応率比較評価

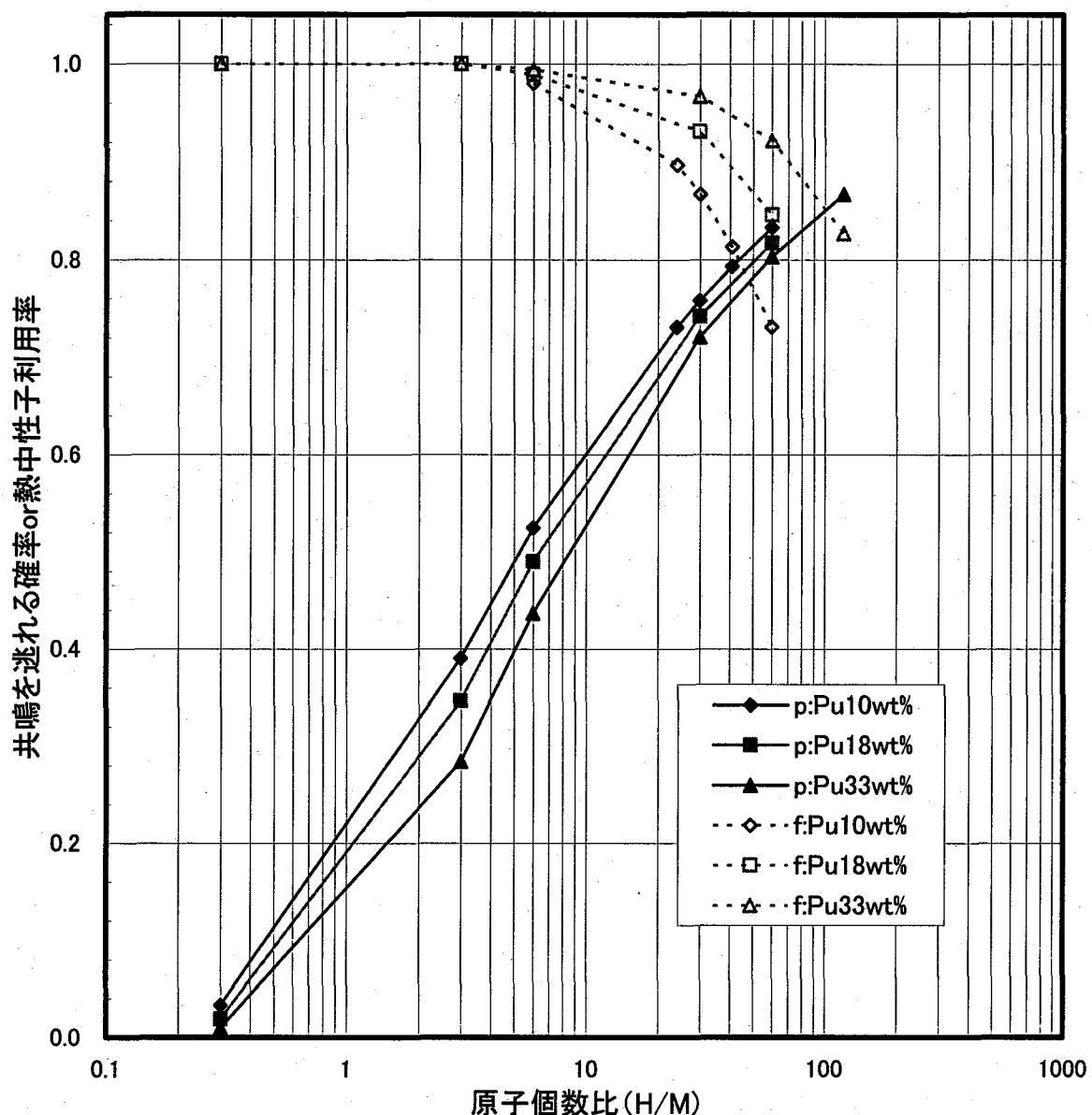
非均質体系の粒径サーベイ計算結果より、共鳴を逃れる確率(p)と熱中性子利用率(f)

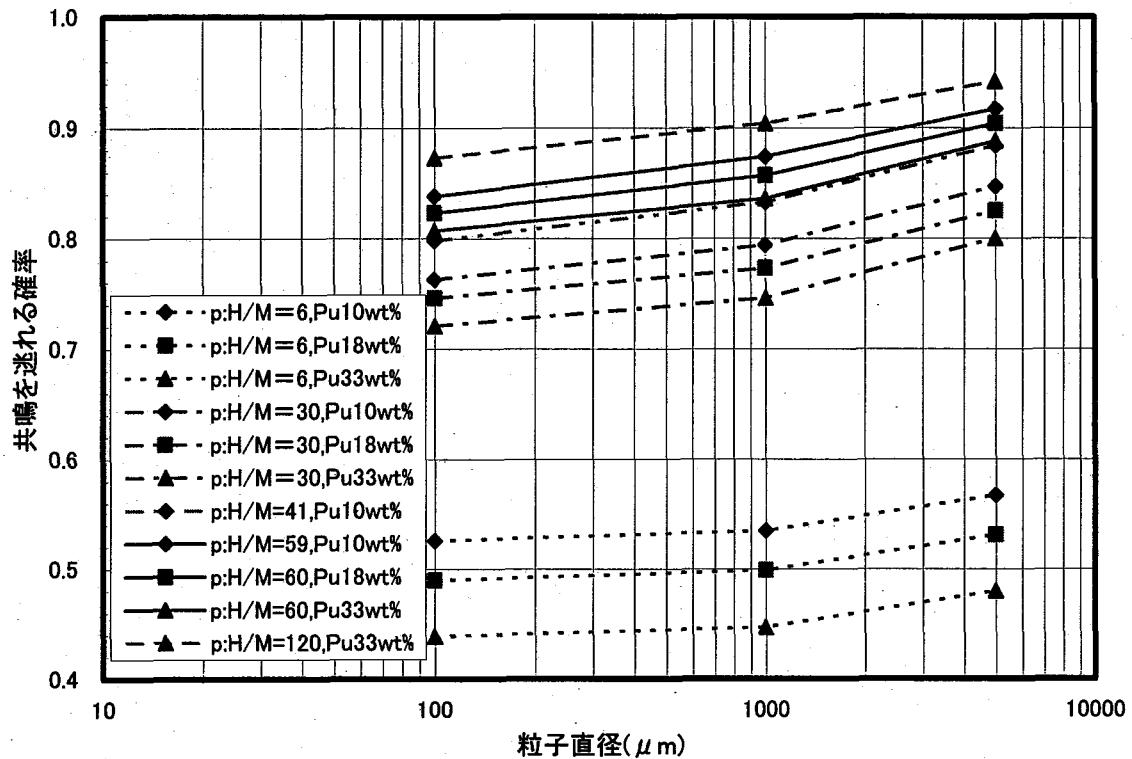
を算出した。結果を第 8-3 図に示す。Pu 富化度と H/M 原子個数比に対する傾向は均質体系と同様であった。粒径増大に伴い共鳴を逃れる確率が上昇し、熱中性子利用率が低下している。但し、共鳴を逃れる確率の変化割合は Pu 富化度と H/M 原子個数比により大きな差異はないが、熱中性子利用率の変化割合は H/M 原子個数比の高い方が大きくなる傾向が見られる。

H/M 固定条件で燃料球の直径を $100\mu\text{m}$ から 5mm と変化させた場合、第 8-4 図に示すように無限配列セル内の連続した減速領域体積が増加するため、共鳴吸収を逃れる中性子が増加して体系の熱中性子割合が上昇する。この非均質効果により熱中性子領域では中性子束が増加する結果を示す例として Pu 富化度 18wt\% 、H/M=30 の場合の燃料直径変化による中性子束（レサジー当り）の変化を第 8-5 図に示す。最適減速条件より H/M の低い条件では、熱中性子領域の中性子束ピークが小さいため、非均質効果による熱中性子側の中性子束の上昇が大きい。しかし、最大粒径条件より低い条件の H/M=1.58 では燃料球間の距離が接近しており、熱外中性子の平均自由行程以上のパスを確保できなかったため非均質効果が顕在化しなかったと思われる。

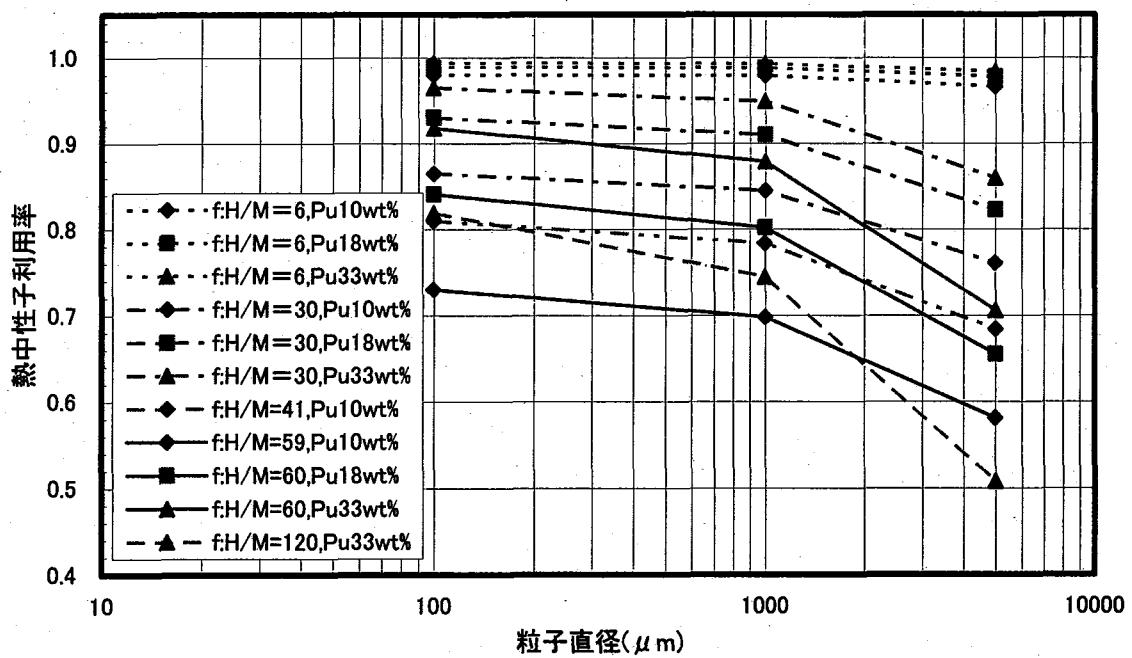
例えば、水中の中性子平均自由行程を計算する。密度 1g/cm^3 の水の熱中性子断面積のマクロ散乱断面積と吸収断面積を $\Sigma s=3.45^{(9)}$ 、 $\Sigma a=0.022$ とすると、全段面積は $\Sigma t=3.45 \sim \Sigma s$ 、従って平均自由行程は $\lambda = 1 / \Sigma t = 0.29\text{cm}$ となる。H/M ≤ 1.58 の場合、燃料球体の直径が 1cm 以上となって初めて燃料球間の最大距離が約 0.5cm 以上となる（第 3-1 図参照）。

第 8-1 図 高速核分裂効果(ε)と再生率(η)対 H/M (均質体系)

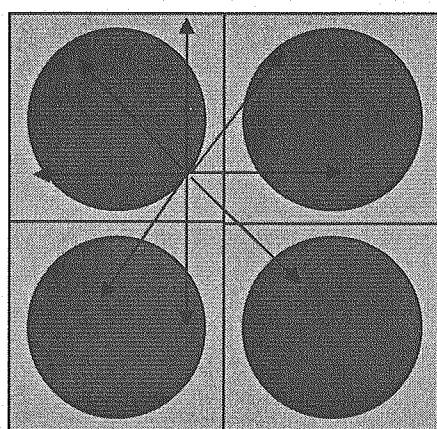
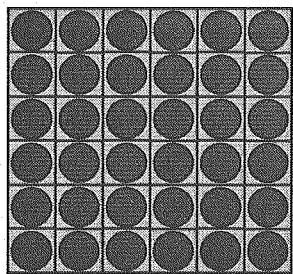
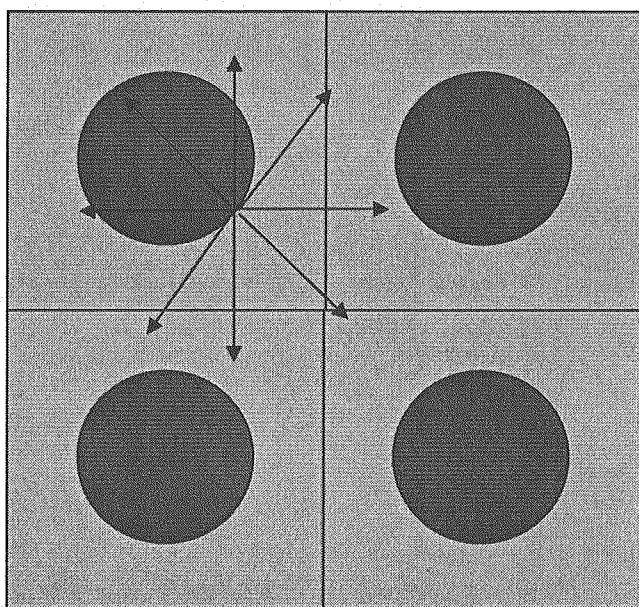
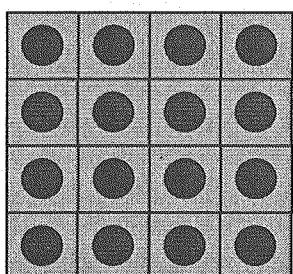
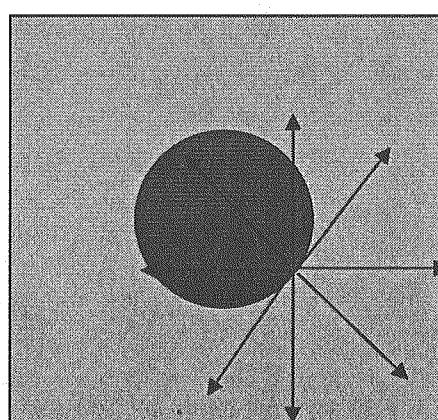
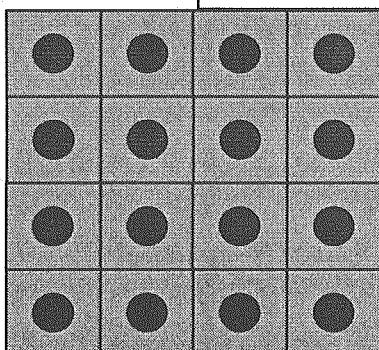
第 8-2 図 共鳴を逃れる確率(p)と熱中性子利用率(f)対 H/M (均質体系)



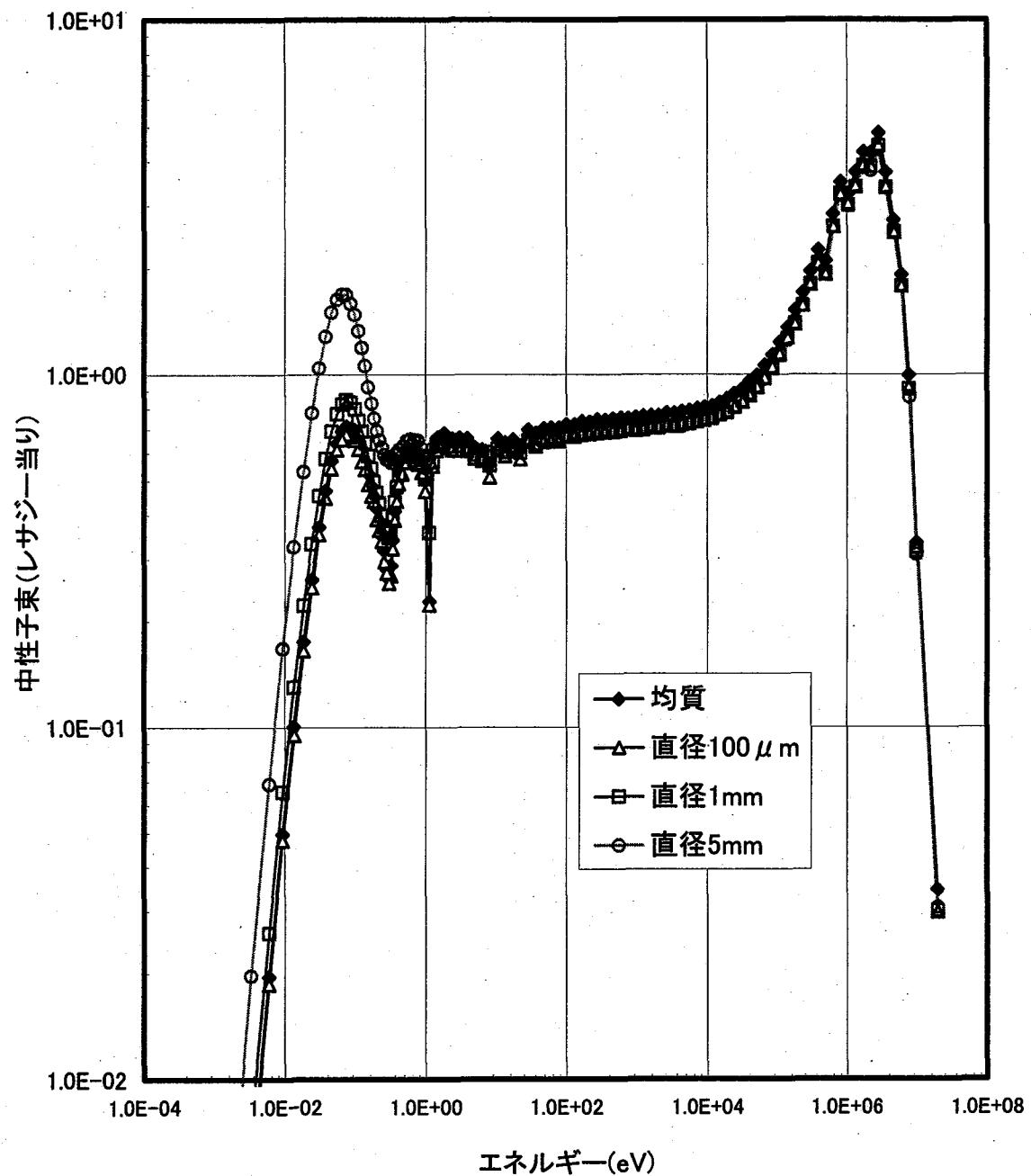
第 8-3 図(1) 共鳴を逃れる確率(p)対粒子粒径 (非均質体系)



第 8-3 図(2) 热中性子利用率(f)対粒子粒径 (非均質体系)

$H/M = 6$ 直径 1mm \rightarrow 5mm $H/M = 30$ 直径 1mm \rightarrow 5mm $H/M = 60$ 直径 1mm \rightarrow 5mm

第 8-4 図 粒径変化と減速材領域の関係



第 8-5 図 中性子束の粒径比較 (Pu 富化度 18wt%, H/M=30)

9. おわりに

MOX 燃料加工施設において取り扱われる MOX 粉末燃料について、粒子粒径 $20\mu\text{m}$ 以下では、非均質体系と見なされる粉末燃料が均質系としてモデル化が可能であるか否かを検討した。まず、MOX 燃料の均質体系で水素対重金属原子個数比 (H/M) に対する無限増倍率を計算した。MOX 燃料の非均質体系において水素対重金属原子個数比 H/M 固定条件で、立方体単位セル内の燃料球直径を変化させる臨界計算を実施して、粒子粒径 $50\mu\text{m}$ 以下では対均質体系の無限増倍率の変化が小さく、 $100\mu\text{m}$ 以上の燃料球直径では共鳴を逃れる確率が高くなることを確認した。

通常の MOX 粉末の粒径は約 $20\mu\text{m}$ 程度までであることから、臨界上厳しい減速系を対象とする場合でも、MOX 粉末は均質系としてモデル化することが可能であることを確認した。

また、核分裂性核種の割合が少ない MOX 燃料では ^{240}Pu , ^{238}U による中性子の共鳴吸収の効果が大きい。しかし、非均質体系では、燃料間に介在する水による中性子の減速のためにこのような共鳴を逃れる確率が増加する。従って、 ^{238}U の割合の少ない Pu 富化度の高い MOX 燃料の方が、H/M 増加に伴い無限増倍率の $\Delta k/k$ (変化割合) が増加し、H/M 固定条件で粒子粒径の増大に伴い $\Delta k/k$ が増加していた。但し、粒子粒径が 1mm を超えると、熱中性子利用率の減少により、無限増倍率の $\Delta k/k$ の減少傾向が出てくる。

MOX 粉末の含水率の影響については、含水率 5wt% (H/M=1.58) 以上の MOX 粉末体系において、MOX 燃料の Pu 富化度及び Pu 組成に対する最適な H/M を設定すると、粒子粒径の変化による非均質効果が約 10% $\Delta k/k$ 以上となるという結果になった。但し、平常時の MOX 粉末の含水率 (1 %未満) の範囲では、粒子粒径の変化による $\Delta k/k$ が 0.2% $\Delta k/k$ 未満であり、非均質体系モデルと均質体系モデルで臨界安全性解析を実施しても結果の差異が小さいことも示した。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所核燃料安全性研究委員会臨界安全性専門部会:臨界安全性実験データ検討ワーキンググループ,臨界安全ハンドブック第2版, JAERI-1340, 1999
- (2) 長家康展・奥村啓介・森貴正・中川正幸, MVP/GMVP II :General Purpose Monte Carlo Codes for Neutron and Photon Transport Calculations based on Continuous Energy and Multigroup Methods, JAERI-1348(2005)
- (3) Shibata K., Kawano T., Nakagawa T., Iwamoto O., Katakura J., Fukahori T., Chiba S., Hasegawa A., Murata T., Matsunobu H., Ohsawa T., Nakajima Y., Yoshida T., Zukeran A., Kawai M., Baba M., Ishikawa M., Asami T., Watanabe T., Watanabe Y., Igashira M., Yamamuro N., Kitazawa H., Yamano N. and Takano H.: "Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-3: JENDL-3.3", J. Nucl. Sci. Technol., 39, 1125 (2002).
- (4) J.K.Tuli, "Nuclear Wallet Cards (fifth edition)" (1995) [Ref.Tuli95] which was based on N.E.Holden, CRC Handbook of Chemistry and Physics, 76th edition, (1995)
- (5) Audi et al., The Ame2003 atomic mass evaluation (II), Nuclear Physics A729 pp. 337-676(2003)
- (6) Rosman and Taylor, Isotopic Compositions of the Elements 1997 (II.1): Pure Appl. Chem. 70(1), pp.217-235, (1998)
- (7) JNC, プルトニウム転換技術開発施設の運転実績, PNC-TN1410 91-042(1991)
- (8) 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-衝突確率法計算コードを用いた超多群計算による検討-, JAERI-M-91-107(1991)
- (9) James J.Duderstadt, Louis J.Hamilton, 原子炉の理論と解析(上), 現代工学社, 1982(2版)

付録A. MOX 粉末の含水率と密度の関係

含水率の定義は水の質量と MOX の質量で定義する。空隙割合の定義は単位体積中の水の体積と MOX の体積を除いた残りの体積で定義した。

- 含水率の定義: $R_{\text{水}} = \frac{M_{\text{水}} \times 100}{M_{\text{水}} + M_{\text{MOX}}}$

$M_{\text{水}}$: セル中の水の質量

M_{MOX} : セル中の MOX 質量

- 空隙割合の定義: $1 - \frac{V_{\text{水}} + V_{\text{MOX}}}{V_{\text{全}}}$

$V_{\text{水}}$: セル中の水の体積

V_{MOX} : セル中の MOX 体積

$V_{\text{全}}$: セル体積

上記定義に基づく計算の前提条件となった MOX 粉末のパラメータを第 A-1 表に示す。

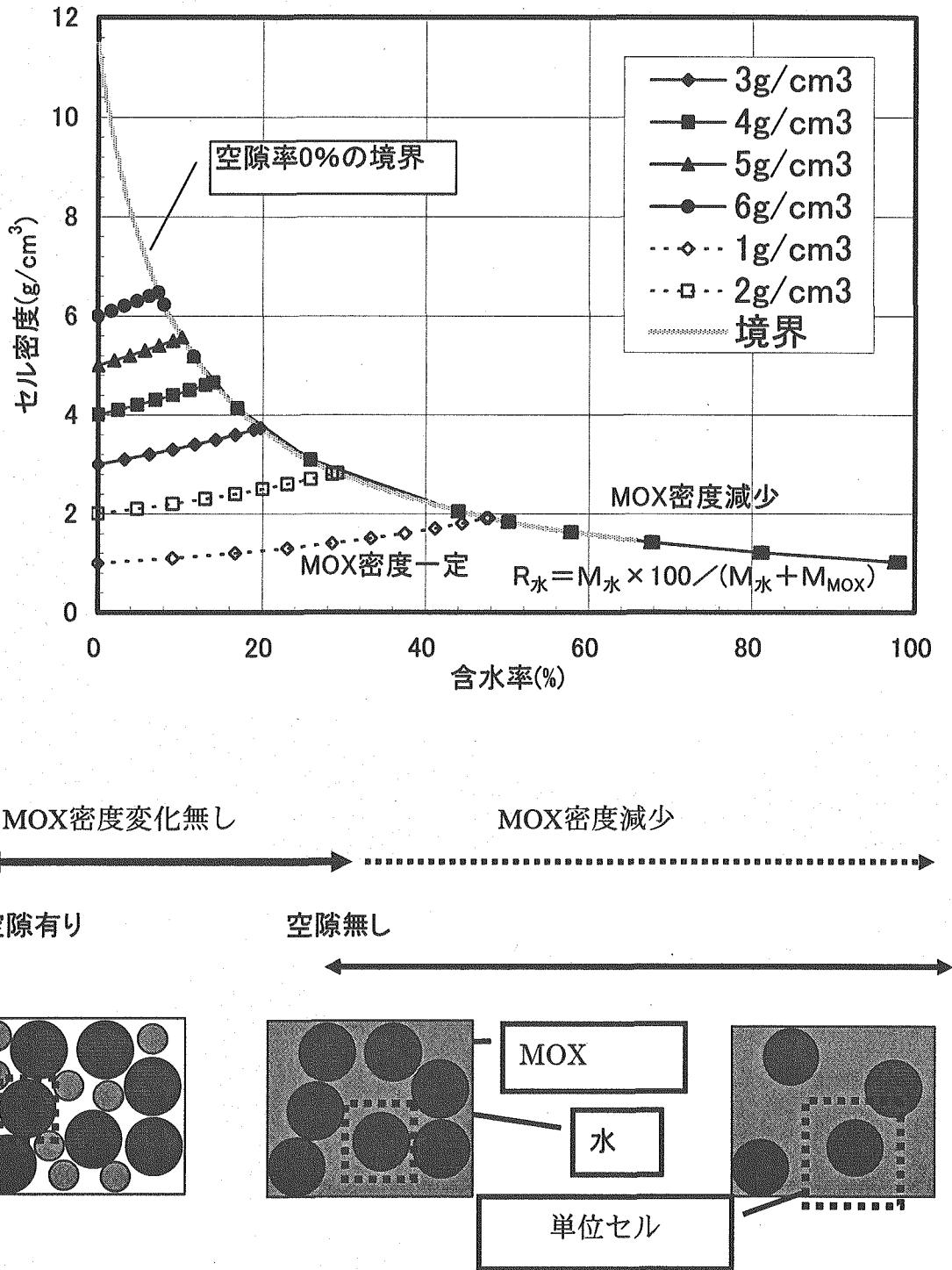
上記パラメータ範囲以外を含めた MOX 粉末の含水率と密度の関係を第 A-1 図に示す。1 つの単位体積中に乾燥 MOX 粉末が一定の密度で詰まっており、その隙間に水が浸入すると、理想的に空隙のなくなる状態がある。さらに水を浸入させると MOX 粒子が排除されるというモデルを設定する。

MOX 粉末の含水率と H/M の関係を第 A-2 図に示す。基準となる MOX 部分密度（セル平均 MOX 密度）により体系含水率と H/M 原子個数比は異なるが、体系含水率と H/M 原子個数比は 1 義的に設定が可能である。

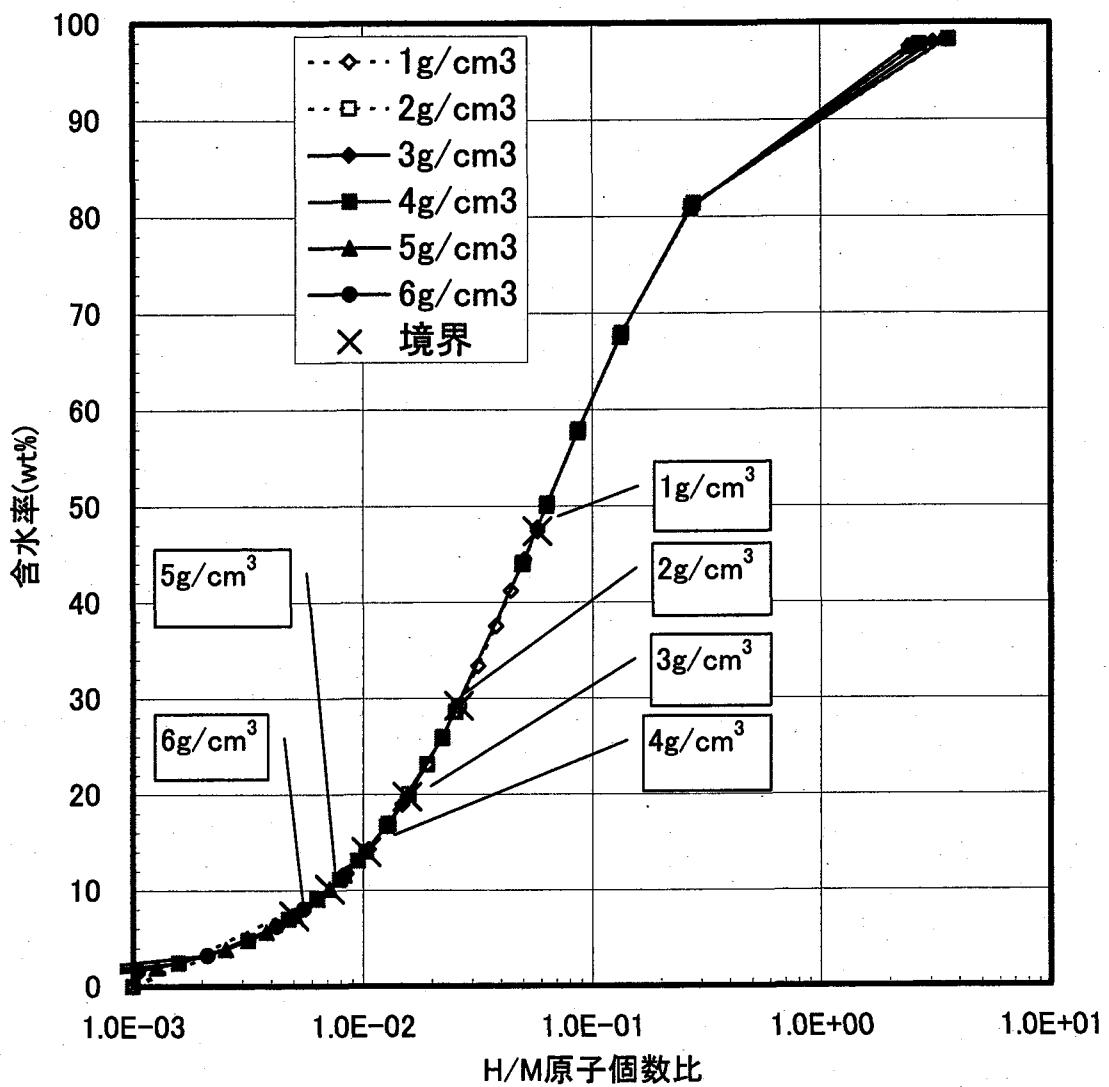
第 A-1 表 MOX 粉末の計算前提条件

Pu 富化度(wt%)	H/M 原子個数比	水密度(g/cm ³)	体系含水率(wt%)	空隙率(%)	体系全密度(g/cm ³)	MOX 部分密度(g/cm ³)
10	0.30	0.125	1.0	41.9	6.037	5.978
10	1.58	0.658	5.0	16.4	6.294	5.979
10	41.09	1.000	57.8	0.0	1.626	0.686
18	0.30	0.125	1.0	41.9	6.039	5.979
18	1.58	0.658	5.0	16.4	6.294	5.979
18	60.01	1.000	66.7	0.0	1.437	0.479
18	75.02	1.000	71.4	0.0	1.353	0.387
33	0.30	0.125	1.0	41.9	6.039	5.979
33	1.58	0.658	5.0	16.4	2.294	5.979
33	99.10	1.000	76.8	0.0	2.269	0.295
33	120.1	1.000	80.0	0.0	1.223	0.245

注 : MOX 部分密度 = MOX 質量 / 体系全体積



第 A-1 図 MOX 粉末の含水率と密度の関係



第 A-2 図 含水率と H/M の関係

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトアルも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC関係理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁶
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1

$$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J (計量法)}$$

$$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$$

$$= 4.1855 \text{ J (15 °C)}$$

$$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$$

$$\text{仕事率 } 1 \text{ PS (仏馬力)}$$

$$= 75 \text{ kgf·m/s}$$

$$= 735.499 \text{ W}$$

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

MOX粉末体系の臨界性に対する粒子粒径の影響

R100

古紙混合率100%
白化液70%衛生紙を使用しています。