



JAERI-Research

JP0350062

2002-002



MOX粉体燃料の臨界事故の簡易評価

2003年3月

三好 慶典・山本 俊弘・中島 健

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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

MOX 粉体燃料の臨界事故の簡易評価

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

三好 慶典・山本 俊弘・中島 健

(2003 年 1 月 30 日受理)

乾式の MOX 燃料加工工程における臨界条件を評価するとともに仮想的な臨界事故時の総核分裂数の評価を簡易モデルに基づいて行った。本報告書では、MOX 粉末の均一化混合を行うモデル容器を対象として、MOX 粉末と減速材として作用する添加剤との混合物が臨界となり得る条件を調べた。臨界を超過する場合には、添加剤であるステアリン酸亜鉛が高温になって蒸散することによる減速材の消滅を臨界停止条件として、総核分裂数を評価した。

また、簡易評価式を用いて初期パルス出力、初期パルスでの核分裂数、臨界停止までの総核分裂数の評価を行った結果、MOX 粉末系では中性子寿命が短いために初期パルス出力は低濃縮ウラン溶液系よりも大きくなる。また、MOX 粉末系での初期パルスでの核分裂数及び総核分裂数も、反応度温度係数が小さいことと密度が大きいことから低濃縮ウラン溶液系より大きくなることが分かった。

Simplified Estimation of Criticality Accident of MOX Powder Fuel

Yoshinori MIYOSHI , Toshihiro YAMAMOTO and Ken NAKAJIMA

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 January 30, 2003)

Criticality conditions in MOX fuel fabrication processes were studied and total fission yields in case of hypothetical criticality accident were estimated by using a simplified model. Criticality conditions of a mixture of MOX powder and additive, which acts as neutron moderator, in a model equipment for homogenization of MOX powder were investigated. Fission yields of MOX powder were estimated by assuming that the shutdown mechanism of a criticality accident is decomposition and annihilation of the additive, zinc stearate, due to the temperature rise.

First pulse power, fission yield during the first pulse and total fission yield till shutdown were estimated by using simplified evaluation models. Since MOX fuel powder has a shorter neutron life time, the first pulse power is larger than that of low-enriched uranium aqueous solution. Fission yield during the first pulse and total fission yield are also larger than those of low-enriched uranium aqueous solution due to the smaller reactivity temperature coefficient and larger density.

Keywords: MOX, Criticality Accident, Fission Yield, Enrichment, Simplified Model

目 次

1. 序.....	1
2. 臨界事故評価.....	1
2. 1 MOX 燃料の臨界事故の評価対象.....	1
2. 2 臨界事故評価方法.....	2
3. 臨界計算結果および総核分裂数評価.....	4
3. 1 臨界計算の結果.....	4
3. 2 総核分裂数の評価.....	6
4. 簡易評価式によるピーク出力及び核分裂数の推定.....	6
4. 1 Nordheim-Fuchs モデルによる初期出力パルスのピーク出力及び核分裂数評価.....	7
4. 2 反応度バランスモデルによる核分裂数評価.....	8
5. 結論.....	8
謝辞.....	9
参考文献.....	9
付録1 水を注入した場合の総核分裂数評価.....	25
付録2 MOX 粉末の臨界質量について.....	27

Contents

1. Introduction.....	1
2. Evaluation of Criticality Accident.....	1
2. 1 Object of Criticality Accident Evaluation for MOX Fuel.....	1
2. 2 Method of Criticality Accident Evaluation.....	2
3. Results of Criticality Calculations and Estimation of Total Fission Yield.....	4
3. 1 Results of Criticality Calculations.....	4
3. 2 Estimation of Total Fission Yield.....	6
4. Estimation of Peak Power and Fission Yield by Simplified Evaluation Models.....	6
4. 1 Estimation of First Pulse Peak Power and Fission Yield by Nordheim-Fuchs Model.....	7
4. 2 Estimation of Fission Yield by Reactivity Balance Model.....	8
5. Conclusions.....	8
Acknowledgment.....	9
References.....	9
Appendix 1 Estimation of Total Fission Yield in Case of Water Ingress.....	25
Appendix 2 Critical Mass of MOX Powder.....	27

This is a blank page.

1. 序

MOX 燃料加工施設は、プルトニウムの有効利用を図る上で使用済燃料の再処理施設と並んで燃料サイクル関連施設の中核的施設の一つであり、我が国においても当該施設の建設が将来計画されている。

MOX 燃料加工施設においては、ウランとプルトニウムの混合酸化物(MOX)の粉末から原子炉の燃料として使用できる形状、組成の燃料要素を製作する工程に対し、臨界安全管理の観点からは完全な乾式工程が採用されることが望ましい。溶液系のように通常時に水が共存することがなく、また故意による操作を除けば水が添加される可能性が無い設備機器においては、中性子の減速効果を有する物質の混入が排除されることから、燃料組成管理(プルトニウム富化度)及び減速度管理等が充分に行われている限り、各機器の臨界質量は通常時の燃料取扱量を大きく上回り、臨界事故の発生は技術的には想定しえない。しかしながら MOX 燃料加工施設において臨界事故の発生を想定するとした場合には、どの工程においてどのような条件で臨界に到達する可能性が生じるかを検討し、臨界を超過する程度(反応度)について評価するとともに、臨界に到達するケースに対しては、臨界事故の終息機構等を考慮して、臨界事故の規模としての総核分裂数を評価することが必要である。

本報告書においては、MOX 燃料加工工程の中でも一度に大量の MOX 粉末が扱われる均一化混合の容器を代表例として選択し、臨界解析により臨界となり得る条件を調べるとともに、臨界を超過するとした場合の総核分裂数を何らかの方法により評価することを目的とする。粉体系の臨界事故は、過去にスラリー状のものがあるだけで、実験も行われたこともないために、反応度フィードバック機構など臨界事故挙動に関する充分な知見が得られていない。そこで臨界事故評価において合理的かつ保守的な結果を与えることを主目的として、最終的な臨界事故終息のメカニズムに着目した単純な仮想モデルを採用した評価手法を提示することにする。

また、Nordheim-Fuchs モデル及び反応度バランスモデルなど、溶液体系と粉末体系のいづれにも適用できると考えられる簡易評価式を用いて、MOX 粉末体系と低濃縮ウラン溶液体系の主要特性について比較した。

付録には、臨界事故評価に関して、水が混入するケースについての評価例を参考として示した。また、参考データとして、MOX 粉末の基本的な臨界質量の評価例を示した。

2. 臨界事故評価

2. 1 MOX 燃料の臨界事故の評価対象

MOX 燃料の加工は様々な工程から成り立っている。図 1 には MOX 燃料加工工程における粉末調整工程フローの代表例を示す。国内では、MOX 粉末の最大プルトニウム富化度は 50 wt% であるが、劣化ウランと混合されることにより、何段階かの工程を経て最終的に高々 18 wt% 程度の製品ペレットの富化度となる。一般的に、体積、重量、密度が大きくてプルトニウム富化度が高く、減速度が最

適減速に近いほど臨界になりやすい。MOX 燃料の加工工程では全工程にわたって水が排除されているが、粉末を混合する過程で添加剤として有機剤であるステアリン酸亜鉛 ($Zn-st$ 、 $[CH_3(CH_2)_{16}CO_2]_2Zn$) が用いられ、この添加剤は水素、炭素などの軽元素を含むために中性子の減速効果を持つ。混合の最終工程では、大容量の均一化混合機において混合が行われるが、この混合機を対象として MOX 粉末が臨界となり得るかどうかについて臨界計算を行い、臨界になる場合の総核分裂数評価を行うこととする。

本報告書では、Westinghouse 社製の逆円錐形の UO_2 混合機⁽¹⁾をサンプルとして、それと相似形の図 2 に示すような混合機を想定した。臨界事故の規模は、最終的な終息機構まで含めて考えると、後述するように燃料の重量、すなわち一度に取り扱われる燃料の体積が大きいほど大きくなる。そこで混合機の容積は現実の混合機よりも充分大きい 1000 Lとした。この混合機において MOX 粉末のかさ密度を仮に 2.0 g/cm^3 とすると⁽²⁾ MOX 粉末の最大重量は 2000 kg となる。円錐の側面には、周辺の種々の構造材の中性子反射効果を模擬するため厚さ 25 mm の水反射体が設置されているものとする⁽³⁾。

均一化混合機に水が注入される場合には、より臨界になりやすいためと考えられるが、水が注入されることは想定外とし、添加剤としてステアリン酸亜鉛が添加され減速材として作用するとする。

2. 2 臨界事故評価方法

(1) 臨界停止のメカニズムと総核分裂数評価の考え方(水の注入を考えない場合)

臨界事故が発生した場合、燃料温度上昇時の負の温度係数による反応度抑制効果が期待されるが、最終的な終息メカニズムは、MOX 粉末中の添加剤が加熱されて分解・蒸散することによる消滅であると考えられる。そこで、臨界事故発生から終息までの放出エネルギーを添加剤の消滅に必要なエネルギーとして評価することにする。また、臨界事故が発生した場合には、MOX 粉末を排出することで臨界を停止させることができるが、ここでは安全側の評価とするため人為的な停止措置による臨界終息は考えないことにする。

添加剤として用いられるステアリン酸亜鉛の分子量は 632.34、融点は約 130°C である。粉末の状態でのかさ密度は 0.3 g/cm^3 程度である。添加剤は、ペレット焼結工程において高温により分解し消滅する。ステアリン酸亜鉛には、明確な分解温度は存在しないようであるが、 400°C 程度でほぼ分解する⁽⁴⁾。そこで MOX 粉末および添加剤の混合物が 400°C だけ加熱された時点ですべての添加剤が消滅し、減速材がなくなったことにより臨界が停止し、未臨界状態に落ち着くとする。臨界事故発生から終息までの過程を図 3 に模式的に示す。臨界事故発生から終息までの総核分裂数 F は、添加剤と MOX 粉末の混合物全体の温度を 400°C だけ上昇させるのに必要なエネルギーであることから、

$$F = (C_{pMOX}M + C_{pA}A)\Delta T/E \quad (1)$$

のように表すことができる。ここで

$$C_{pMOX} = MOX \text{ 粉末の比熱 (J/K·g)}$$

C_{pA} =	添加剤の比熱 (J/K·g)
M =	MOX 粉末の重量 (g)
A =	添加剤の重量 (g)
ΔT =	400°C (室温から添加剤が消滅するまでの温度差)
E =	1回の核分裂当たり発生するエネルギーで 3.2×10^{-11} (J/fission)

である。MOX 粉末の比熱は約 0.25 (J/K·g) であるが⁽⁵⁾、添加剤であるステアリン酸亜鉛の比熱は不明である。例えば有機化合物であるパラフィンは固体では約 2.5 (J/K·g) で MOX の 10 倍ほど大きい。ステアリン酸亜鉛はパラフィンと同じ有機化合物で固体での密度もほぼ同じである。比熱もパラフィンと同程度と仮定すれば MOX 粉末と添加剤の混合物においては、添加剤の混合割合に応じて総核分裂数も変わる。

ここでは、核分裂によって発生した熱は全て温度上昇に使われるとしている。熱の損失がある場合には、損失割合を L (%)とするのなら、そのときの総核分裂数は、損失がないときの総核分裂数を $(1-L/100)$ で割った値となる。

この方法以外にも、添加反応度と体系の温度上昇による負の反応度が釣り合った時点で臨界が停止するとして総核分裂数を求める方法がある。この方法では、添加反応度と釣り合う温度が 400°C 以下の場合には(1)式で求める総核分裂数のほうが大きくなるが、400°C を超える場合には、添加剤が消滅しても臨界が継続することはないので、両方法による総核分裂数は同じとなる。

なお、本報告書において含水率は、

$$\frac{\text{(混合物中での水または添加剤の単位体積あたりの重量)}}{\text{(混合物の単位体積あたりの重量)}}$$

で定義する。後述のようにステアリン酸亜鉛は同質量の水と核的にほぼ等価であり、混合物は水を含まないが、添加剤重量率を便宜的に含水率と呼ぶこととする。

MOX 粉末と添加剤との混合状態を厳密に議論するためには、MOX 粉末や添加剤の粒径に関するデータや粉体工学に基づく実験や解析が必要となる。しかし、本報告書では以下のように単純なモデルを仮定して MOX 粉末と添加剤が混合するものとする。

添加剤の量が充分少ないとときは、添加剤は攪拌作用により MOX 粉末の隙間に入り込むとし、MOX 粉末のかさ密度、体積は変化しないものとする。この様子を図 4 に示す。また、MOX 粉末の隙間にに入った添加剤は、その MOX 粉末の隙間の空間内で元の密度 0.3 g/cm^3 を維持するものとする。図 5、表 1 に含水率と MOX 粉末中の空隙体積率を示すが、例えば MOX 粉末のかさ密度が 2.5 g/cm^3 とすると、添加剤がないときの空隙体積率は MOX の理論密度⁽⁶⁾ 11.06 g/cm^3 から $1-2.5/11.06=0.77$ となる。そして密度や体積が変化しない範囲での最大含水率は、粉末空隙が添加剤で充満したときで含水率約 8.8% である。なおここでは後述するように密度 0.3 g/cm^3 の添加剤は密度 0.31 g/cm^3 の水と核的に等価になるので、密度 0.31 g/cm^3 の水として含水率を計算している。添加剤の量がこれより多い場合、添加剤と MOX 粉末の混合体の体積は、MOX 粉末の体積と MOX 粉末の隙間に入りきらなかつた残りの添加剤の体積の和とする。そして MOX 粉末と添加剤はこの体積中に均一に混合されるとする。この場合、MOX 粉末が添加剤で希釈されることになり、減速度は上昇する一方で、MOX のかさ密度は低下することになる。このときの様子を図 6 に示す。また、本報告書では、MOX 粉末中の二

酸化ウラン、二酸化プルトニウム、ステアリン酸亜鉛ともすべて均一に混合されているものとし、混合途中の不均一な状態は考えないとする。

(2) 臨界計算の方法

臨界計算は図2の体系に対して行い、中性子実効増倍率の計算値が1.0を超える場合に臨界事故が発生するとする。ステアリン酸亜鉛のかさ密度は 0.3 g/cm^3 とするが、密度 0.31 g/cm^3 の水と置換すると核的に等価になることを別の計算で確認しているので、臨界計算においてはステアリン酸亜鉛とはせずに密度 0.31 g/cm^3 の水とした。また、MOX粉末や添加剤は現実には粒状であるために、非均質性が存在するがここでは完全な均質な混合物として扱うこととする。

臨界計算には図2のような円錐形状を考慮できるようにするために連続エネルギーモンテカルロコードMCNP 4B⁽⁷⁾を用い、核データにはポイントワイズのJENDL-3.2を用いた。熱中性子の散乱カーネルとしては水のそれを用いている。

プルトニウム同位体組成は重量比でPu-239/240/241=71/17/12⁽⁸⁾とする。核分裂性プルトニウムの同位体組成としては83 wt%となっており、軽水型原子力発電所の使用済燃料から抽出されるプルトニウムでは平均して63 wt%程度であることから臨界管理の観点からかなり保守側の同位体組成となっている。ウランは天然ウランを仮定し、同位体組成は重量比でU-235/238=0.71/99.29とした。

MOX粉末のかさ密度は、最小で 1.9 g/cm^3 、最大で 2.3 g/cm^3 程度である。本計算ではこれに余裕を持たせて 2.0 g/cm^3 、 2.5 g/cm^3 、 3.0 g/cm^3 の3点についてサーベイを行うこととする。

混合機内のMOX重量は320 kgおよびその2倍の640 kgとする。ここで考えている混合機の体積は1000 Lであるので、MOX粉末と添加剤の混合物の最大体積も1000 Lとする。含水率が0 %の状態から添加剤の注入を続けていくと、添加剤は細かい粒状になっているので、まずMOX粉末の空隙が添加剤で徐々に埋められていくが、全体の体積は変化しない。MOX粉末の空隙が添加剤で充填されると、体積は増えると同時に、含水率は上昇し、MOX燃料のかさ密度は逆に減少するようになる。最終的に混合機の容量の1000 Lになるまで添加剤が注入されていくとする。以上の過程においてMOX粉末と添加剤の混合物の中性子実効増倍率がどのように変化し、臨界になり得るかどうかを調べるものとする。

富化度については、混合脱硝時でプルトニウム富化度は50 wt%であり、劣化ウランとの混合により最終的には高くても18 wt%程度である。そのため、富化度はその間も含めて10 wt%、18 wt%、30 wt%、40 wt%、50 wt%の5点に対して計算するものとする。

なお、320 kgよりもさらに少量のMOX粉末が大量の添加剤で希釈されるような場合にも臨界になり得るが、添加剤よりも比重の大きいMOXがより多い方が、(1)式に基づく総核分裂数としては大きくなる。このため、本報告書ではこのような少量のMOXによるケースは想定しないこととする。

3. 臨界計算結果および総核分裂数評価

3. 1 臨界計算の結果

以下に臨界計算の結果について示す。

(1) 臨界計算の結果(MOX 重量 320 kg)

図 7 及び表 2 にかさ密度 2.5 g/cm^3 の MOX 重量が 320 kg のときの各プルトニウム富化度での中性子実効増倍率を示す。MOX 粉末の空隙が添加剤で充填されるまでは、含水率とともに実効増倍率は上昇を続けるが、空隙が充填された後は、富化度 30 wt%以上に関しては MOX 粉末が希釈されるために、実効増倍率が低下するようになる。さらに含水率が上昇すると、実効増倍率は上昇するようになるが、混合機が一杯になる 1000 L まで添加剤が投入されても実効増倍率は 1 を超えることはなく臨界には到らない。また、実効増倍率の富化度による差は、含水率が低いときは顕著であるが、含水率が高くなると差が小さくなっていく。

(2) 臨界計算の結果(MOX 重量 640 kg)

図 8 及び表 3 にかさ密度 2.5 g/cm^3 の MOX 重量が 640 kg のときの各プルトニウム富化度での中性子実効増倍率を示す。含水率に対する変化の傾向は、320 kg のときと同じであるが、富化度が 50 wt% のときは MOX 粉末の空隙が添加剤で充填される含水率 9% の前後で、実効増倍率が 1 を超える。含水率がさらに増えると実効増倍率がいったん減少して臨界未満になる。その後上昇するのは MOX 重量が 320 kg のときと同様であるが、容積が 1000 L であれば再び臨界を超えることはない。しかし、容積がさらに大きければ、臨界を超えることも考えられる。

MOX 重量 640 kg、富化度 50wt%での MOX 粉末のかさ密度が 2.0 g/cm^3 、 2.5 g/cm^3 、 3.0 g/cm^3 のときの実効増倍率の含水率による変化を図 9 及び表 4 に示す。MOX 粉末の空隙が添加剤で充填されるまでは富化度が高いほど実効増倍率が高いが、空隙が充填された後は当然ながら、元のかさ密度には依存しない。

(3) 臨界計算の結果(MOX 重量を変化させた場合)

MOX 重量が 320 kg および 640 kg 以外の場合についても計算を行った。上の(1)または(2)の結果から分かるように実効増倍率が最大になるのは、空隙が添加剤で充填された場合か、添加剤の投入量が多くなって、混合機が満杯となった場合のどちらかである。富化度 40 wt% および 50 wt% では、MOX 粉末重量 640 kg 以上では、MOX 粉末の空隙が充填されたときが最大となるので、この場合での実効増倍率を計算した。富化度が 30 wt% 以下では両方の状態での計算を行い、最大となる実効増倍率を求めた。

MOX 粉末が混合機一杯にはいった状態で、実効増倍率を最大にする含水率になるためには、添加剤の投入、攪拌の手順に工夫が必要なために普通では起こり得ないと考えられるが、ここでは敢えてそのような状態も考慮することとする。

かさ密度 2.0 g/cm^3 、 2.5 g/cm^3 、 3.0 g/cm^3 のときの結果をそれぞれ図 10、図 11、図 12 に示す。また表としてそれぞれ表 5、表 6、表 7 に示す。なお富化度 10 wt% のときはいずれの場合も臨界にはならないために図には示していない。富化度が高いほど実効増倍率が高く、より少ない重

量、体積で臨界になるが、現実の MOX 加工で均一化混合が行われる 18 wt%以下の富化度では、かさ密度 2.5 g/cm^3 以下では 1000 L まで MOX 粉末が投入されても臨界にはならないことがこれらの結果から分かる。従って均一化混合機では、富化度もしくはかさ密度が通常より高くなるような異常を想定しない限り仮に MOX 粉末や添加剤の過剰投入を想定しても臨界にはならない。

3. 2 総核分裂数の評価

MOX 粉末と添加剤との混合物が臨界を超過したとして、2章の(1)式に基づいて総核分裂数を評価する。MOX 粉末や添加剤の重量が多いほど総核分裂数が大きくなるが、これらが投入される混合機の容量を最大体積として制限を設けたときの総核分裂数の最大値を与える条件を考える。混合機の体積を V 、MOX 粉末の重量を M とすると、この MOX 粉末の空隙も含めた混合機の残り部分の最大体積は、MOX の理論密度を D_T とすると $V - M/D_T$ となる。この体積分だけの添加剤が投入されたときに、MOX 粉末の重量が M だけ投入されたときの最大の総核分裂数を与えることになる。従って、総核分裂数の最大値は D_A を添加剤のかさ密度とすると

$$\left(\{V - M/D_T\} \cdot D_A \cdot C_{pA} + M \cdot C_{pMOX} \right) \Delta T / E \quad (2)$$

となるが、これを MOX の重量 M で整理すると、

$$(V \cdot D_A \cdot C_{pA} + M \cdot (C_{pMOX} - C_{pA} \cdot D_A / D_T)) \Delta T / E \quad (3)$$

となる。(3)式の M にかかる括弧の中は、仮に添加剤の比熱 C_{pA} を大きく見積もって水の比熱 4.2 (J/K·g) としても、 $D_A=0.3 (\text{g}/\text{cm}^3)$ ならば正の値となり、MOX 重量が多いほうが総核分裂数は大きくなる。従って、MOX 重量や添加剤重量に制限を設けず、混合機体積だけを制限値とした場合には、少量の MOX 粉末が大量の添加剤で希釈されるような状況よりも、MOX 粉末がかさ密度のまま一杯まで混合機に投入されて、その隙間を添加剤が充填するような状況のほうが総核分裂数が大きくなる。そこで、MOX 粉末のかさ密度 $2.5 (\text{g}/\text{cm}^3)$ 、ステアリン酸亜鉛の比熱を仮に $2.5 (\text{J}/\text{K}\cdot\text{g})$ とした場合の、混合機の容量とその混合機での最大の総核分裂数との関係を図 13 及び表 8 に示す。また図 14 及び表 9 は、かさ密度 $2.5 (\text{g}/\text{cm}^3)$ の MOX 粉末が 1000 L の混合機に投入され、その後満杯まで添加剤が投入され均一に混ざったときの総核分裂数と MOX 粉末の重量との関係を示している。なお総核分裂数の評価にあたっては、MOX 富化度、プルトニウム同位体比などによってはグラフに示した条件では、臨界にならない場合もあるが、そのような場合も含めて臨界超過になるとした場合の総核分裂数として示している。

結局、総核分裂数は混合機の最大容量やその中に投入される MOX や添加剤の重量をどこまで想定するかに依存することになる。また、ステアリン酸亜鉛の比熱にも依存することから、別の比熱の値が与えられればまたこれとは異なる総核分裂数が得されることになる。

4. 簡易評価式によるピーク出力及び核分裂数の推定

MOX 粉末の臨界事故規模推定のために、Nordheim-Fuchs モデル⁽⁹⁾及び反応度バランスモデル⁽¹⁰⁾に基づく簡易評価式を用いて、初期出力パルスのピーク出力及び核分裂数、収束時(温度平衡時)の核分裂数を求ることを試みた。ここでは、前章における容量 1000 L の均一化混合機に密度 2.5 g/cm³、プルトニウム富化度 50 wt%の MOX 粉末 640 kg が投入されて、MOX 粉末の空隙が全て添加剤で充填された場合(含水率約 9%)を対象とする。

4.1 Nordheim-Fuchs モデルによる初期出力パルスのピーク出力及び核分裂数評価

このモデルでは即発臨界以上の反応度が瞬時に添加され、温度フィードバックのみが働くとする。ピーク出力: N_p (fission/s) は以下の式で表すことができる。

$$N_p = \frac{\epsilon C_p d}{2\alpha_T} \left(\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \right)^{-1} \omega_0^2 V, \text{ただし } \omega_0 = \frac{\beta_{eff}}{\Lambda} (\rho_0 - 1) \quad (4)$$

ここで、

ρ_0 = 添加反応度 (\$)

β_{eff} = 実効遅発中性子割合

Λ = 即発中性子世代時間(寿命)(s)

α_T = 反応度温度係数 (\$/°C)

C_p = 比熱 (J/K·g)

d = 密度 (g/cm³)

V = 体積 (cm³)

ϵ = 単位エネルギーあたりの核分裂数 (= 3.1×10^{10} fission/J) (W/cm³ 単位とする場合は、 $\epsilon = 1$ とする。)

である。また、パルス終了時の核分裂数 E_b (fission) は

$$E_b = 2 \frac{\epsilon C_p d}{\alpha_T} \left(\frac{\beta_{eff}}{\Lambda} \right)^{-1} \omega_0 V \quad (5)$$

となる。なお、温度上昇による相変化、それに必要な潜熱などは考慮していない。

簡易評価式に必要な反応度温度係数、即発中性子世代時間、実効遅発中性子割合は汎用核計算コードシステム SRAC-CITATION⁽¹¹⁾によって求めた。均一化混合機は円錐形であるが、CITATION の計算では円筒形状で近似している。ここで各定数の値は次のとおりである。なお添加剤と MOX 粉末の混合物の比熱は、ステアリン酸亜鉛の比熱を 2.5 (J/K·g) として求めている。また比較のために括弧内に低濃縮硝酸ウラニル水溶液の値も示す。

β_{eff} = 0.0038 (0.0076)

Λ = 1.2×10^{-6} (sec) (4.3×10^{-5} (sec))

α_T = -0.0096 (\$/K) (-0.04 (\$/K))

C_p = 0.44 (J/K·g) (2.63 (J/K·g))

$$\begin{aligned} d &= 2.73 \text{ (g/cm}^3\text{)} & (1.6 \text{ (g/cm}^3\text{)}) \\ V &= 2.56 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{)} & (2.0 \times 10^5 \text{ (cm}^3\text{)}) \end{aligned}$$

添加反応度と初期ピークにおける出力の関係を図 15 及び表 10 に示す。MOX 粉末と低濃縮硝酸ウラニル水溶液との比較では、MOX 粉末のほうがピーク出力が大きくなっているが、これは MOX 粉末のほうが中性子寿命が短いためである。図 16 及び表 11 はパルス終了後の核分裂数を示している。同じ添加反応度に対する核分裂数は MOX 粉末のほうが大きくなる。これは主として MOX 粉末は、比熱は小さいが温度係数が小さいこと、および密度が大きいのが原因である。この条件では、核分裂数が 3.8×10^{18} になると、温度上昇により添加剤が消滅して臨界が停止する。従って約 3\$以上添加されても総核分裂数はこれ以上増えることはない。

4.2 反応度バランスモデルによる核分裂数評価

投入された反応度が温度上昇に伴う負の反応度フィードバックで相殺され、臨界が収束するとする。この場合の核分裂数 E_E (fission) は

$$E_E = \frac{\epsilon C_p d}{\alpha_T} \rho_0 V \quad (6)$$

となる。各記号は(4)式と同じである。図 17 及び表 12 に添加反応度と温度平衡に到るまでの核分裂数を示す。この場合も MOX 粉末のほうがウラン溶液よりも核分裂数は大きくなる。また、MOX 粉末では添加反応度が約 4\$を超えると、核分裂数が 3.8×10^{18} になり温度上昇により添加剤は消滅し臨界は停止する。

5. 結論

乾式で行われる MOX 燃料の加工工程では、質量管理、減速度管理、富化度管理が厳重に担保されていれば、臨界事故の発生は技術的には想定し得ないが、本報告書では、臨界事故の発生を想定する設備として大量の MOX 粉末が一度に取り扱われる均一化混合機を取り上げ、臨界になり得る条件を調べた。均一化混合機としては通常のものよりも充分に大きい 1000 L のものを想定し、この容器に MOX 粉末や減速材として作用する添加剤が投入される場合について検討した。

均一化混合機で取扱う MOX 粉末燃料の富化度は通常の条件では高くても 18 wt%程度であるが、この程度の富化度では臨界には到らない結果となった。この均一化混合機に富化度 50 wt%程度の高富化度の MOX 粉末が投入されると臨界となり得る。1000 L 程度の容量で臨界になるような条件では、少量の MOX 粉末が大量の添加剤であるステアリン酸亜鉛で希釈される条件よりも、添加剤が、MOX 粉末の空隙を充填するようなときに中性子実効増倍率が最大になる。例えば、かさ密度 2.5 (g/cm³)、富化度 50 wt%の MOX 粉末の空隙を充填するような条件では、MOX 粉末が約 500 kg のときに臨界になるが、このときの添加剤重量は約 46 kg である。

総核分裂数の評価方法としては、添加剤であるステアリン酸亜鉛が、400°Cだけ加熱された場合に減速材の分解により臨界が停止するとして、それに必要なエネルギーから求めた。したがって、MOX 粉末および添加剤の比熱の値が総核分裂数に影響する。両者の比熱に差があるとすると、MOX 粉末と添加剤との混合割合によって総核分裂数の値が変わることになる。MOX の比熱はよく知られているが、ステアリン酸亜鉛の比熱は不明であるので、類似の有機化合物の比熱を値を用いたが、臨界事故の評価を行う上で非常に重要な物性値である。

均一化混合機の容量に制限を設けて、そこに MOX 粉末が所定のかさ密度で投入されるとすると、総核分裂数を最大にするのは、容器一杯まで MOX 粉末を投入し、空隙が添加剤で充填されたときである。仮に添加剤の比熱としてパラフィンの比熱 2.5 (J/K·g)を用いて、かさ密度 2.5 (g/cm³)の MOX 粉末が 200 L の容器一杯まで投入されるとすると、このときの最大の総核分裂数は約 3.8×10^{18} になる。

Nordheim-Fucks モデルおよび反応度バランスモデルを用いて MOX 粉末の臨界事故における初期パルス出力、初期パルスでの核分裂数、臨界収束までの総核分裂数を評価した。低濃縮ウラン溶液との比較では、MOX 粉末の方が、中性子寿命が短いために、初期パルス出力は同じ投入反応度に対して大きくなる。また、MOX 粉末の方が低濃縮ウラン溶液に比べて比熱は小さいが温度係数が小さいこと、および密度が大きいなどの理由により同じ投入反応度に対する核分裂数も大きくなる特性を有することが分かった。

本報告書での均一化混合機を対象とした臨界事故時の総核分裂数の評価方法は、MOX 燃料や添加剤の重量やこれらの物性値およびこれらが投入される機器の容量などに依存する。当然ながら現実の燃料加工工程では、臨界を防止する観点から重量や容量が制限されているので、総核分裂数の評価も異常事象をどこまで想定するかに依存することになる。

今後さらに、MOX 粉末と添加剤とが混合した場合の密度や均一性などに関する情報、添加剤の分解温度、比熱などの物性値に関してより詳細なデータを取得することで、より合理的な結果を得ることができると考えられる。

謝辞

本報告書の臨界計算については、燃料サイクル安全工学部臨界安全研究室の清住武秀氏(現(株)日本総合研究所)、高田友幸氏に協力頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) B.Basoglu, et al., "Simulation of hypothetical criticality accidents involving homogeneous damp low-enriched UO₂ powder system," *Nucl.Technol.*, **105**, 14 (1994).
- (2) 清水義雄他、MOX 取扱施設臨界安全ガイドブック、PNC TN1410 96-074 (1996).
- (3) 日本原子力研究所核燃料施設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).
- (4) The Dutch Institute for Working Environment and the Dutch Chemical Association, Chemical Safety Sheets: Working Safely With Hazardous Chemicals, Kluwer Academic Publishers (1991).
 - (5) 日本原子力学会、プルトニウム燃料工学、日本原子力学会、東京 (1998).
 - (6) 松岡理、プルトニウムの安全評価(科学技術庁、FBR 広報素材資料集第2版)、原子力文化振興財団、東京 (1990).
 - (7) Briesmeister, J.F. Ed., MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B, LA-12625-M (1997).
 - (8) (株)東芝、ウラン・プルトニウム混合脱硝設備の臨界安全解析, TLR-R003 (1991).
 - (9) Hetrick, D., Dynamics of Nuclear Reactors, University of Chicago Press, Chicago (1971).
 - (10) Nomura, Y. and Okuno, H., Simplified Evaluation Models for Total Fission Number in a Criticality Accident, *Nucl. Technol.*, **109**, 142 (1994).
 - (11) 奥村啓介、金子邦男、土橋敬一郎、SRAC95; 汎用核計算コードシステム、JAERI-Data/Code 96-015 (1996).

表1 含水率と空隙体積率(%)との関係

含水率(%)	MOX 粉末かさ密度 (g/cm ³)		
	2.0	2.5	3.0
0	81.9	77.4	72.9
1	75.4	69.3	63.1
2	68.8	60.9	53.1
3	62.0	52.5	42.9
4	55.0	43.8	32.6
5	48.0	35.0	21.9
6	40.7	25.9	11.1
7	33.3	16.7	0
7.5	29.6	12.0	-
8.76	20.0	0	-
9	18.1	-	-
10	10.2	-	-
11	2.2	-	-
11.27	0	-	-

表2 MOX 重量 320 kg, 1000 L 混合機での実効増倍率

含水率 (%)	富化度 (wt%)				
	10	18	30	40	50
0	0.278	0.349	0.443	0.514	0.582
3	0.375	0.452	0.552	0.625	0.689
5	0.455	0.535	0.635	0.706	0.773
7	0.534	0.612	0.710	0.782	0.850
8.8	0.601	0.676	0.771	0.843	0.906
9.6	0.607	0.677	0.766	0.836	0.895
10.3	0.614	0.676	0.768	0.831	0.889
11.3	0.620	0.679	0.762	0.827	0.881
12.8	0.633	0.685	0.758	0.820	0.873
13.9	0.641	0.691	0.761	0.815	0.867
15	0.652	0.694	0.764	0.817	0.863
19.8	0.696	0.726	0.773	0.814	0.855
25	0.740	0.761	0.793	0.827	0.857
31.3	0.796	0.809	0.827	0.853	0.874
34.3	0.820	0.832	0.849	0.867	0.886
40	0.871	0.879	0.885	0.897	0.913
45	0.906	0.916	0.920	0.928	0.941
48.5	0.929	0.941	0.948	0.953	0.959

表3 MOX 重量 640 kg, 1000 L 混合機での実効増倍率

含水率 (%)	富化度 (wt%)				
	10	18	30	40	50
0	0.330	0.417	0.535	0.621	0.705
3	0.458	0.557	0.674	0.761	0.834
5	0.553	0.650	0.769	0.853	0.928
7	0.642	0.729	0.847	0.926	1.000
8.8	0.711	0.792	0.900	0.982	1.052
9.6	0.714	0.793	0.896	0.976	1.044
10.3	0.721	0.795	0.896	0.970	1.031
11.3	0.728	0.791	0.889	0.960	1.021
12.8	0.739	0.799	0.884	0.951	1.010
13.9	0.752	0.803	0.882	0.945	1.002
15	0.764	0.809	0.883	0.941	0.998
19.8	0.808	0.839	0.890	0.938	0.984
25	0.857	0.878	0.910	0.943	0.982
31.3	0.914	0.924	0.943	0.968	0.995

表4 富化度 50 wt%、MOX 重量 640 kg, 1000 L 混合機での実効増倍率のかさ密度依存性

含水率 (%)	かさ密度 (g/cm ³)		
	2	2.5	3
0	0.620	0.705	0.777
3	0.738	0.834	0.922
5	0.824	0.928	1.015
7	0.901	1.000	1.084
8.8	0.955	1.052	1.052
9.6	0.979	1.044	1.044
10.3	1.001	1.031	1.031
11.3	1.021	1.021	1.021
12.8	1.010	1.010	1.010
13.9	1.002	1.002	1.002
15	0.998	0.998	0.998
19.8	0.984	0.984	0.984
25	0.982	0.982	0.982
31.3	0.995	0.995	0.995

表5 かさ密度 2.0 g/cm³での実効増倍率の MOX 重量依存性

MOX 体積 (L)	MOX 重量 (kg)	富化度 (wt%)			
		18	30	40	50
100	200	0.602	0.678	0.734	0.789
200	400	0.716	0.803	0.869	0.928
300	600	0.783	0.877	0.944	1.011
400	800	0.832	0.930	1.000	1.067
500	1000	0.865	0.969	1.042	1.109
600	1200	0.895	1.001	1.075	1.142
700	1400	0.920	1.022	1.102	1.170
800	1600	0.939	1.045	1.124	1.197
900	1800	0.956	1.063	1.142	1.216
1000	2000	0.971	1.078	1.162	1.231

表6 かさ密度 2.5 g/cm³での実効増倍率の MOX 重量依存性

MOX 体積 (L)	MOX 重量 (kg)	富化度 (wt%)			
		18	30	40	50
100	250	0.635	0.727	0.794	0.859
200	500	0.752	0.858	0.935	1.002
300	750	0.819	0.932	1.013	1.086
400	1000	0.865	0.985	1.069	1.143
500	1250	0.903	1.023	1.111	1.186
600	1500	0.931	1.054	1.142	1.224
700	1750	0.954	1.080	1.170	1.251
800	2000	0.977	1.103	1.194	1.274
900	2250	0.991	1.120	1.212	1.295
1000	2500	1.007	1.136	1.232	1.311

表7 かさ密度 3.0 g/cm³での実効増倍率の MOX 重量依存性

MOX 体積 (L)	MOX 重量 (kg)	富化度 (wt%)			
		18	30	40	50
100	300	0.665	0.771	0.850	0.917
200	600	0.783	0.907	0.993	1.068
300	900	0.853	0.981	1.073	1.154
400	1200	0.903	1.038	1.131	1.217
500	1500	0.938	1.077	1.175	1.260
600	1800	0.966	1.106	1.207	1.292
700	2100	0.989	1.132	1.234	1.322
800	2400	1.009	1.153	1.260	1.349
900	2700	1.025	1.174	1.278	1.367
1000	3000	1.042	1.195	1.291	1.381

表8 MOX のかさ密度 2.5 g/cm³、ステアリン酸亜鉛の比熱を 2.5 (J/K·g)としたときの混合機体積に対する最大総核分裂数

混合機体積 (L)	MOX 重量 (kg)	総核分裂数
100	250	1.51E+18
150	375	2.26E+18
200	500	3.01E+18
300	750	4.52E+18
400	1000	6.03E+18
500	1250	7.53E+18
600	1500	9.04E+18
700	1750	1.05E+19
800	2000	1.21E+19
900	2250	1.36E+19
1000	2500	1.51E+19

表9 ステアリン酸亜鉛の比熱を 2.5 (J/K·g)として、混合機 1000 L に添加剤が満杯まで投入されたときの各 MOX 重量に対する最大総核分裂数

MOX 重量 (kg)	総核分裂数
300	1.01E+19
500	1.05E+19
750	1.11E+19
1000	1.17E+19
1250	1.22E+19
1500	1.28E+19
1750	1.34E+19
2000	1.39E+19
2500	1.51E+19

表10 初期ピークでの出力(MOX 重量 640 kg, 含水率 8.8%)

添加反応度 (\$)	ピーク出力 (W)	
	MOX 粉末	ウラン溶液
1	0.00E+00	0.00E+00
2	5.22E+10	1.86E+09
3	2.09E+11	7.44E+09
4	4.70E+11	1.67E+10
5	8.35E+11	2.97E+10
6	1.31E+12	4.65E+10

表 11 初期ピーク終了後の核分裂数(MOX 重量 640 kg, 含水率 8.8%)

添加反応度 (\$)	核分裂数	
	MOX 粉末	ウラン溶液
1	0.00E+00	0.00E+00
2	1.99E+18	1.30E+18
3	3.99E+18	2.61E+18
4	5.98E+18	3.91E+18
5	7.97E+18	5.22E+18
6	9.97E+18	6.52E+18

表 12 反応度バランスモデルによる核分裂数(MOX 重量 640 kg, 含水率 8.8%)

添加反応度 (\$)	核分裂数	
	MOX 粉末	ウラン溶液
0	0.00E+00	0.00E+00
1	9.97E+17	6.52E+17
2	1.99E+18	1.30E+18
3	2.99E+18	1.96E+18
4	3.99E+18	2.61E+18
5	4.98E+18	3.26E+18
6	5.98E+18	3.91E+18

MOX燃料加工施設の工程フロー

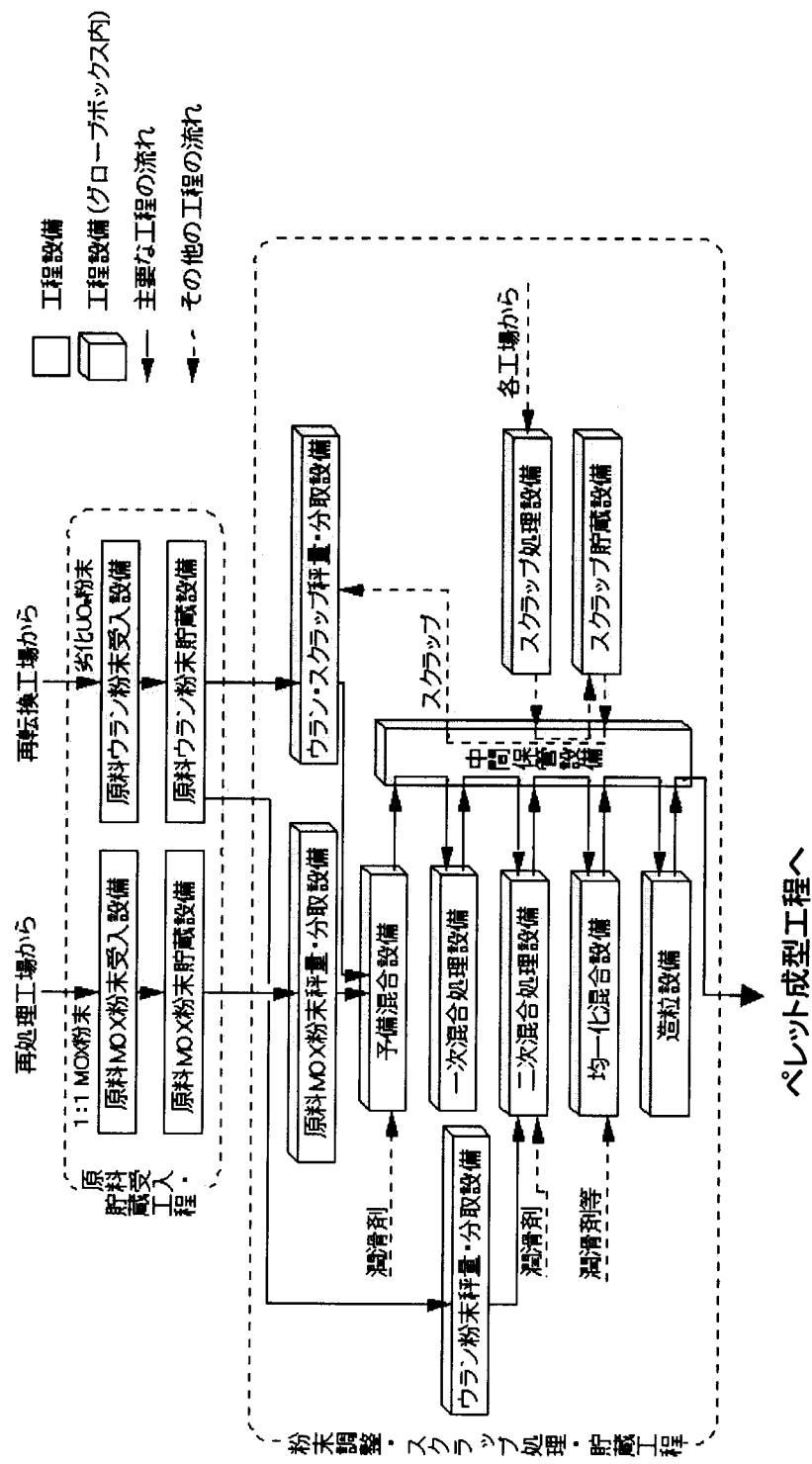


図 1 MOX 燃料加工工程での粉末調整工程でのフロー図

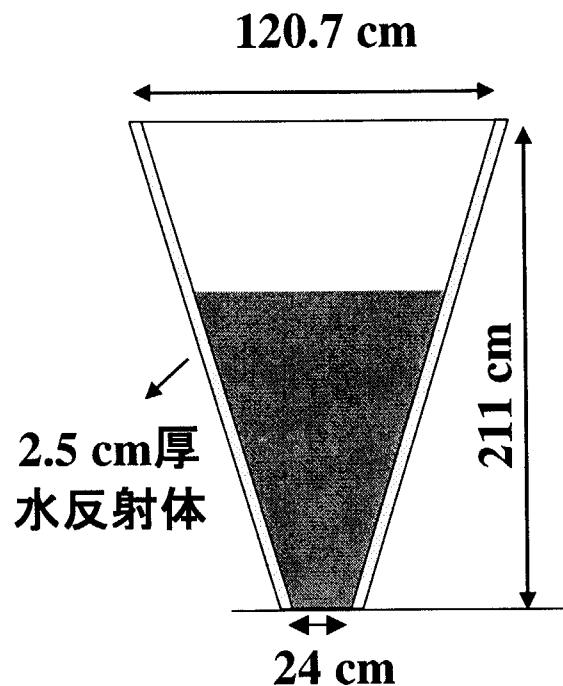


図2 臨界事故を想定する仮想的な均一化混合機

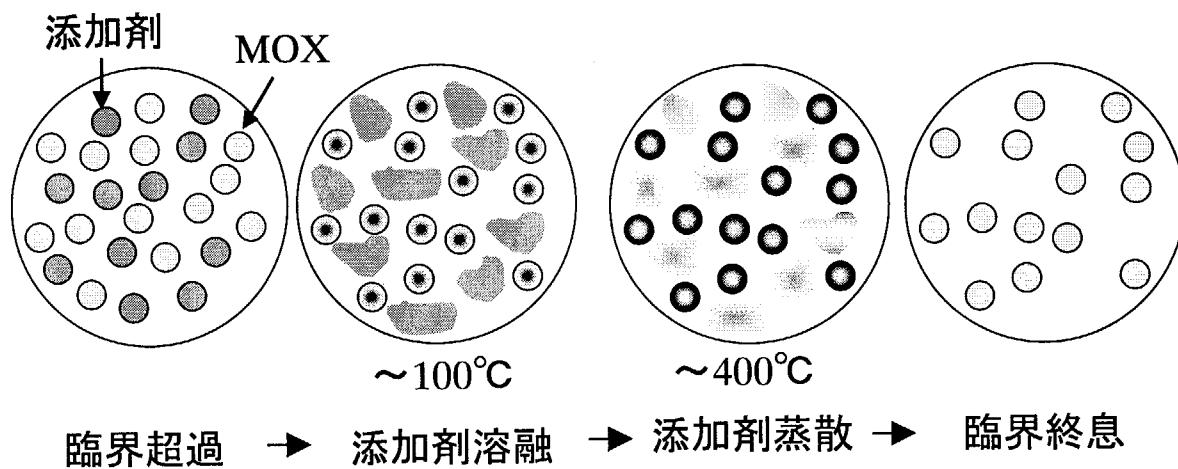


図3 仮想的な臨界事故発生から終息までの機構

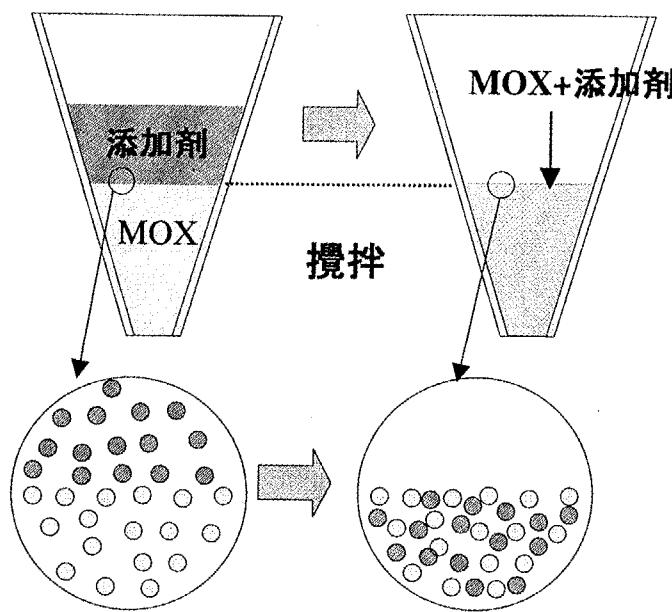


図4 MOX粉末と添加剤の混合状態(添加剤が少ないとき)

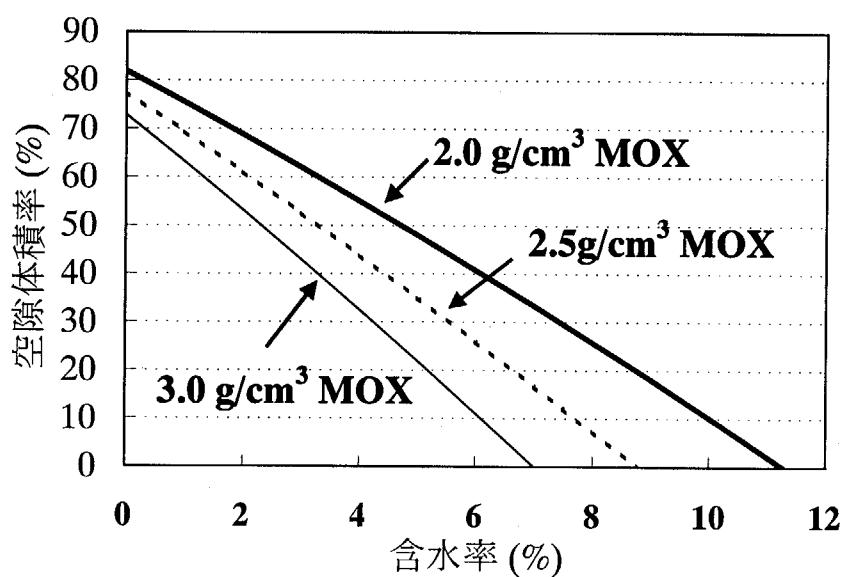


図5 MOX粉末と添加剤の混合物の含水率と空隙体積率の関係

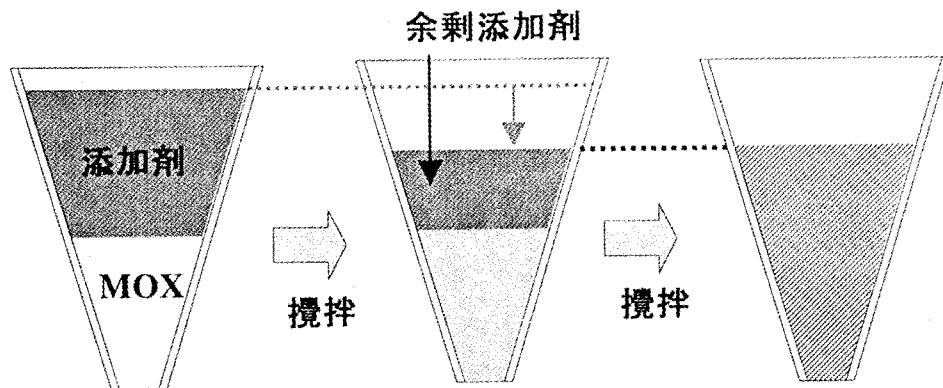
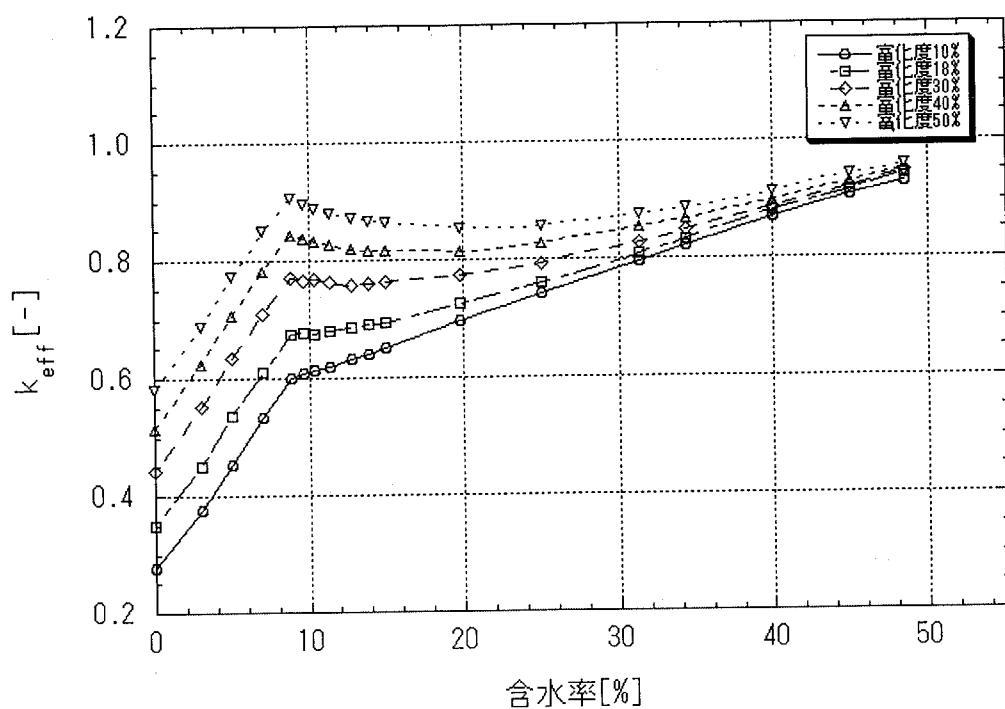


図6 MOX粉末と添加剤の混合状態(添加剤が多いとき)

図7 かさ密度 2.5 g/cm³の MOX 粉末(320 kg)の実効増倍率の含水率への依存性

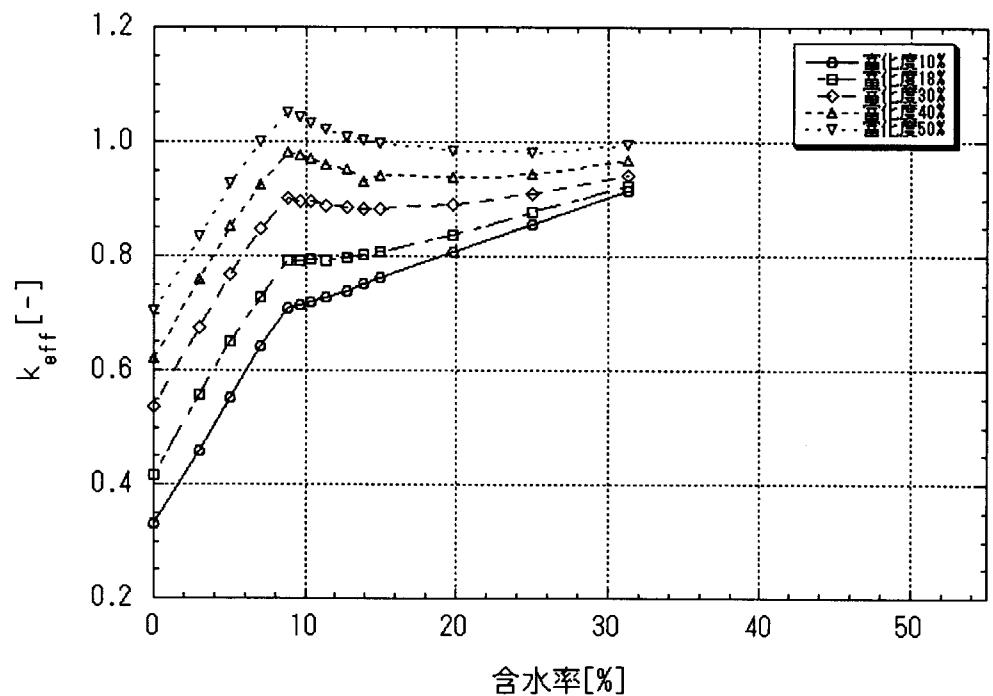
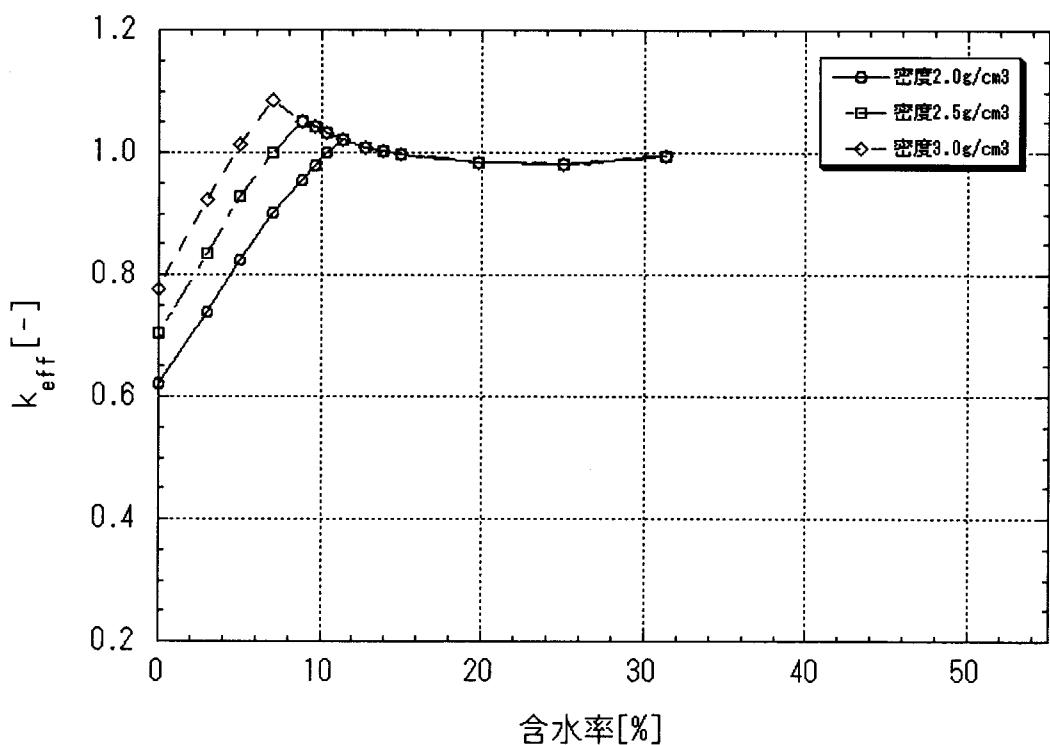
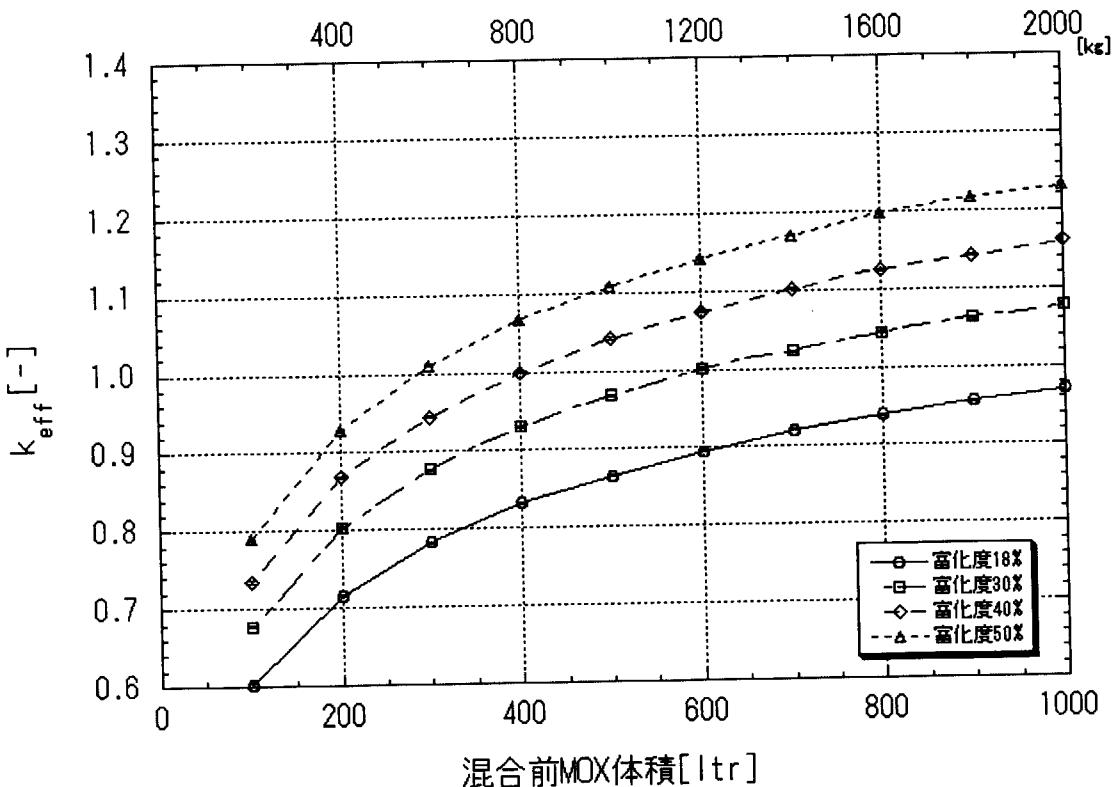
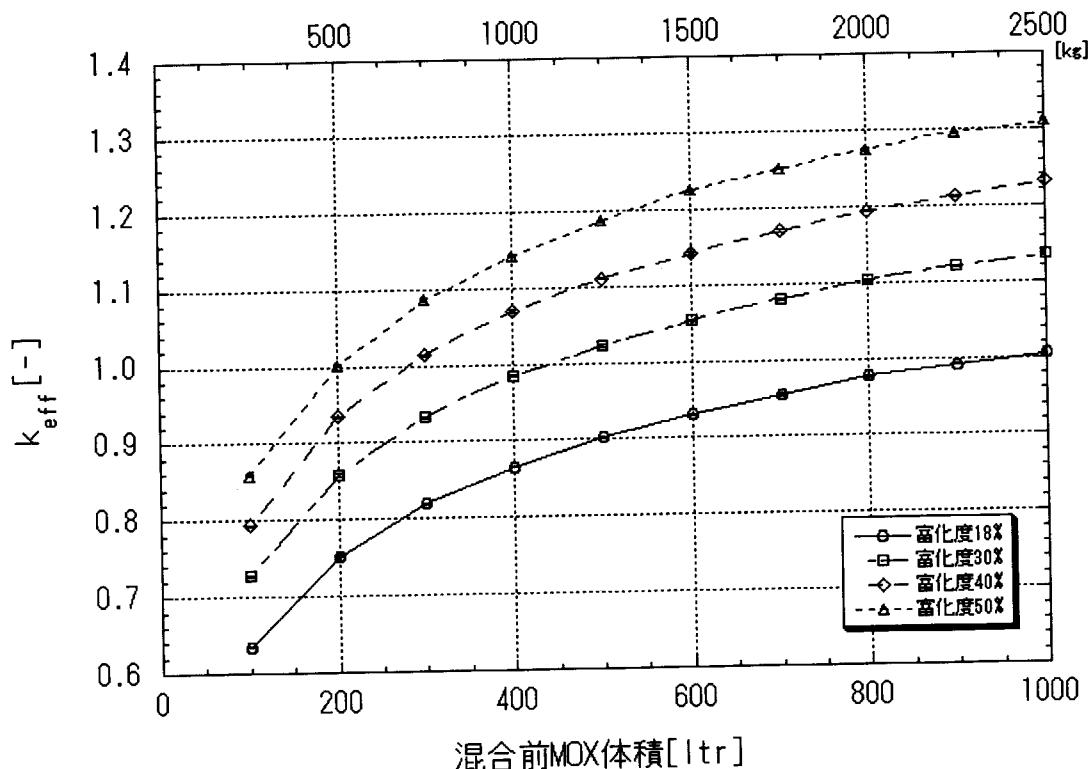
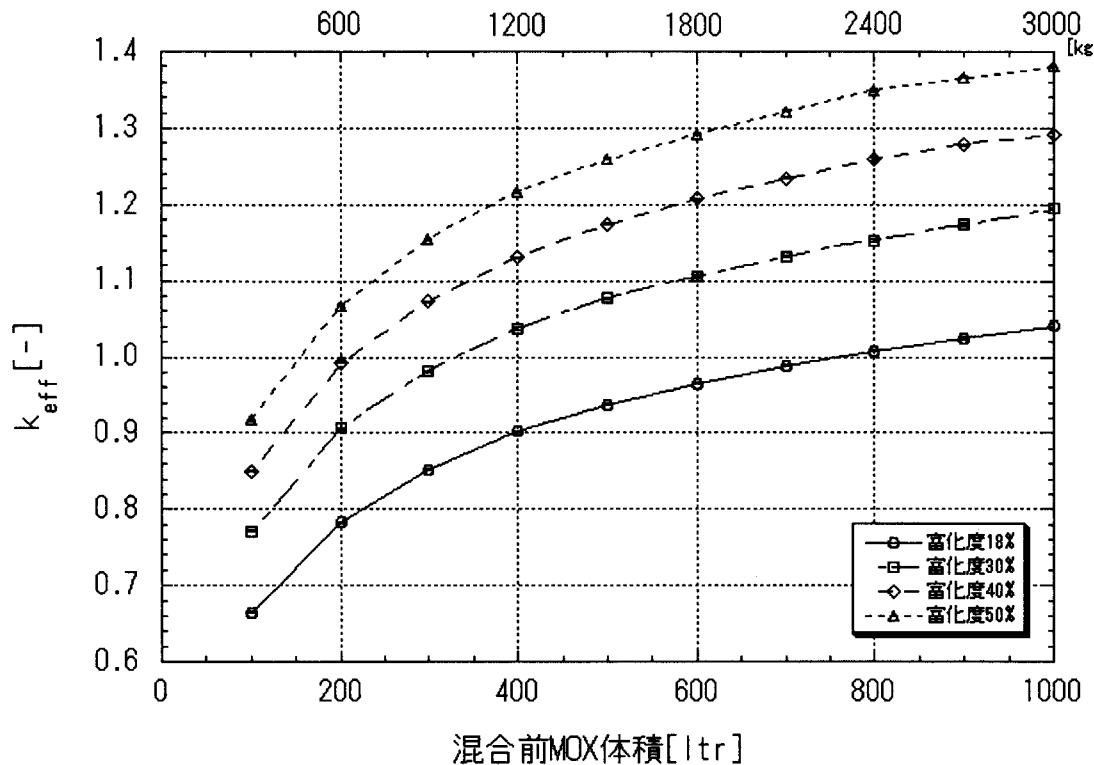
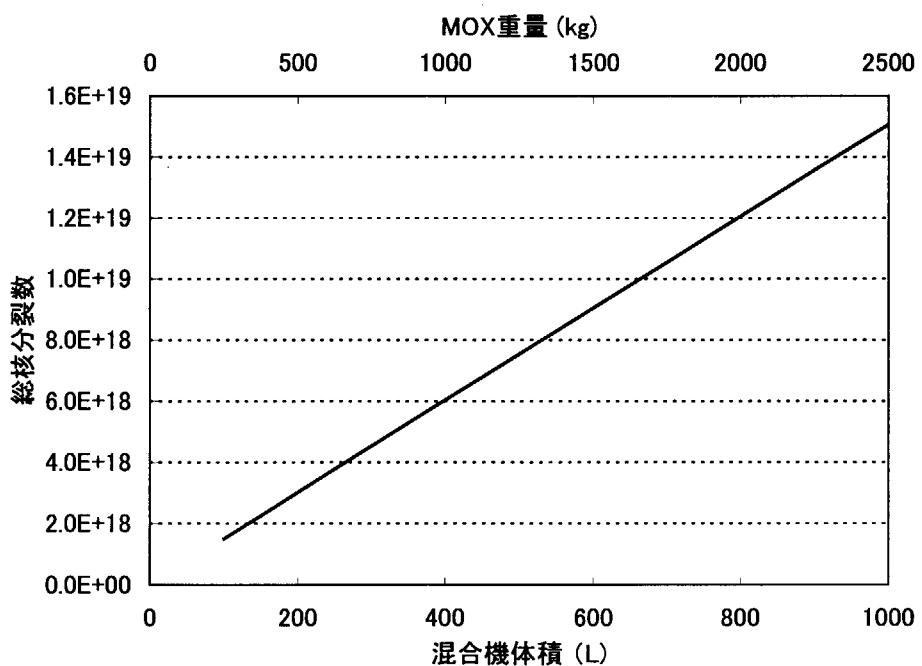
図 8 富化度 2.5 g/cm^3 の MOX 粉末(640 kg)の実効増倍率の含水率への依存性

図 9 富化度 50 wt%, 640 kg の MOX 粉末の実効増倍率のかさ密度依存性

図 10 MOX 粉末体積と実効増倍率の関係(かさ密度 2.0 g/cm^3)図 11 MOX 粉末体積と実効増倍率の関係(密度 2.5 g/cm^3)

図 12 MOX 粉末体積と実効増倍率の関係(密度 3.0 g/cm³)図 13 混合機体積に対するかさ密度 2.5 g/cm³ の MOX 粉末の最大総核分裂数の関係

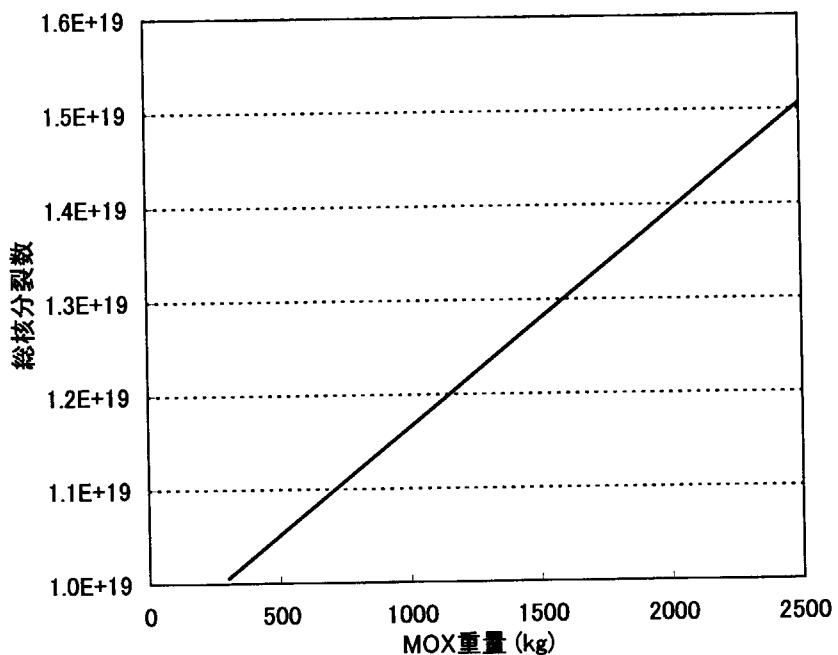


図 14 1000 L の混合機に対する最大総核分裂数(添加剤の混合機一杯まで投入を仮定)

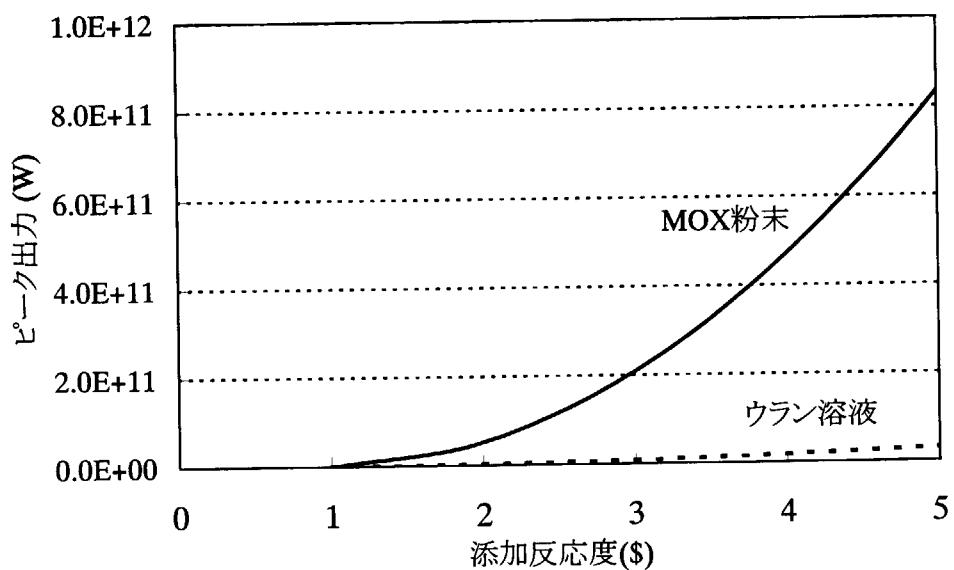


図 15 MOX 粉末 (富化度 50 wt%, 640 kg, 含水率 8.8%)と低濃縮ウラン溶液の初期ピーク出力

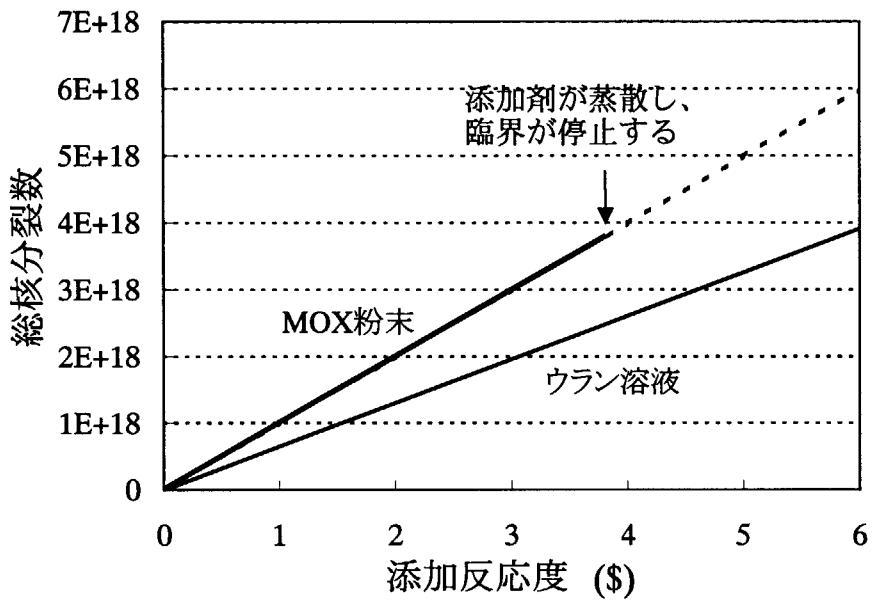


図16 MOX粉末(富化度50 wt%, 640 kg, 含水率8.8%)と低濃縮ウラン溶液の初期パルス終了後の核分裂数

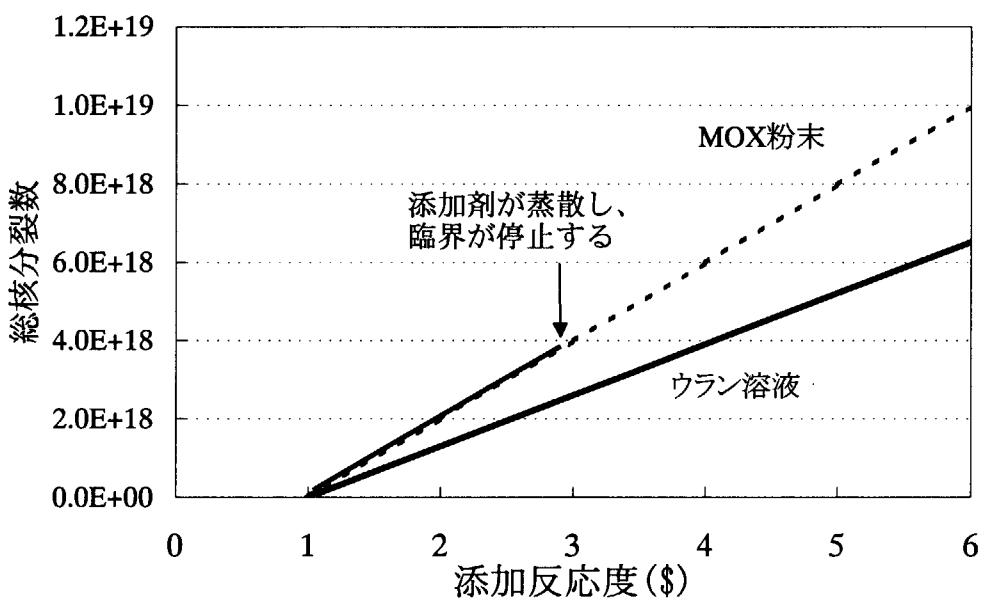


図17 反応度バランスモデルによるMOX粉末(富化度50 wt%, 640 kg, 含水率8.8%)と低濃縮ウラン溶液の総核分裂数

付録 1 水を注入した場合の総核分裂数評価

(1) 臨界停止のメカニズムと総核分裂数評価の考え方(水の注入を考える場合)

ここでは添加剤ではなく、水が注入され臨界事故に到る場合を考える。この場合にはまず MOX 粉末と水との混合物が水の沸点である 100°Cまで昇温され、次に水が蒸発によって失われるとする。この現象は、実効増倍率が 1.0 に相当する含水率になるまで継続するとする。このように考えれば、総核分裂数は次の式から求めることができる。

$$F = (C_p M \Delta T + C_E M_w) / E \quad (A1.1)$$

ここで

C_p = MOX 粉末と水の混合物の比熱

M = MOX 粉末と水の混合物の重量

ΔT = 80°C(室温から沸点までの温度差)

C_E = 水の蒸発潜熱(2259 J/gH₂O)

M_w = $k_{eff}=1$ を超えて注入された水の重量

E = 1回の核分裂当たり発生するエネルギーで 3.2×10^{11} (J/fission)

である。

(2) 核分裂数の評価結果

本文図 2 の均一化混合機において 640 kg の MOX 粉末(プルトニウム富化度 50 wt%、密度 2.5 g/cm³)中に水が注入された場合を想定する。水が約 49 kg(含水率で 7.1%)注入されると臨界になる。従って臨界事故が発生した場合には、49 kg を超えて注入された水が蒸発した時点で臨界が停止するとして総核分裂数を評価することになる。水がさらに多くなり、空隙が水で充填されて MOX 粉末が水で希釈されるようになっても実効増倍率は上昇しつづける。

総核分裂数は注入された水の重量とともに増加する。従って総核分裂数は、注入される水の重量をどこまで想定するかに依存することになる。図 A1.1 に水の重量と核分裂数との関係を示す。注入される水の重量を W (kg)(ただし W は 49 kg 以上)とすると総核分裂数 F は

$$F = 8.1 \times 10^{16} \cdot W - 3.1 \times 10^{18}$$

となる。また同図には同重量のステアリン酸亜鉛が投入され、400°Cまで加熱されて蒸散することで臨界が停止するとした場合の総核分裂数を示す。このときのステアリン酸亜鉛の比熱はパラフィンと同じ比熱の 2.5 (J/K·g)を用いている。

水のときとステアリン酸亜鉛のときとでは、異なる停止機構を考えているために、単純な比較はできないが、水は比熱も蒸発潜熱も大きいために、水がある重量より多く注入される場合では総核分裂数は添加剤が投入される場合よりも大きくなる。

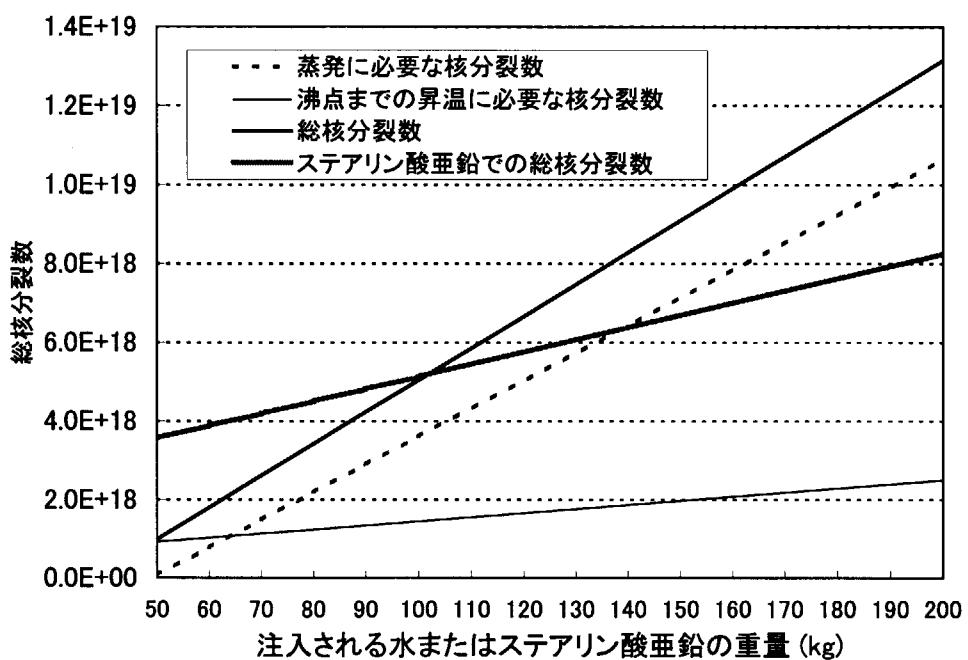


図 A1.1 注入される水またはステアリン酸亜鉛の重量と総核分裂数の関係

付録2 MOX 粉末の臨界質量について

(1) 概要

MOX 粉末の臨界量についての予備的評価を行うため、代表的な粉末密度、プルトニウム同位体組成に対して含水率をパラメータにして、MOX 粉末の臨界質量の導出を行った。また、これらの条件における水分量についての検討を行った。

(2) MOX 粉末の臨界質量の計算

① 計算条件

連続エネルギーモンテカルロコードであるMVP及びJENDL-3.3ベースのライブラリを用いて計算を行った。体系は球体系とし、外周は2.5 cm厚さまたは30 cm厚さの水反射体とした。なお、このときのモンテカルロ計算のバッチあたりヒストリー数やバッチ数、初期スキップバッチ数は以下のとおりとした。計算対象の燃料形態、組成等を表 A2.1 に示す。

初期スキップバッチ数: 20

バッチ当たりヒストリー: 1000

バッチ数: 300

② 計算方法

粉末の各条件において実効増倍率が1.0近傍となるような球体系の計算を行い、実効増倍率1.0に対応するMOX質量を内挿により求めた。

③ 計算結果

水反射体厚さが2.5 cmのMOX粉末の球体系について、プルトニウム富化度が18、30、50 wt%の場合の含水率と臨界質量および水分量の関係を表A2.2に示す。また、含水率に対する臨界質量および水分量の変化を、各々図A2.1、図A2.2に示す。

MOX臨界質量は含水率が増大するにしたがって減速効果が大きくなるため単調に減少するのが分かる。また富化度は18 wt%から30 wt%に増大すると臨界質量が急激に減少するが、それ以上の富化度の増大は臨界質量にあまり大きな影響を及ぼさない。

臨界時の水分量については最初、含水率が増加するにつれて水分量も増大していくが、体系全体の臨界質量が減少しているため、水分量もやがて減少するようになる。なお、水分量についてもMOXの臨界質量と同じく富化度が18 wt%から30 wt%に増大すると急激に減少するが、それ以上の富化度の増大はあまり大きな影響を及ぼさない。

同様に水反射体厚さが 30 cm の MOX 粉末の球体系についてプルトニウム富化度が 18、30、50 wt%の場合の含水率と臨界質量及び水分量の関係を表 A2.3 に示す。また、含水率に対する臨界質量の変化および水分量の変化を、各々図 A2.3、図 A2.4 に示す。

含水率とMOXの臨界質量の関係は水反射体厚2.5 cmの場合と大体同じであるが、絶対値が反射体2.5 cmの場合と比較して3分の2から5分の2となっている。

表 A2.1 計算対象の燃料形態、組成等

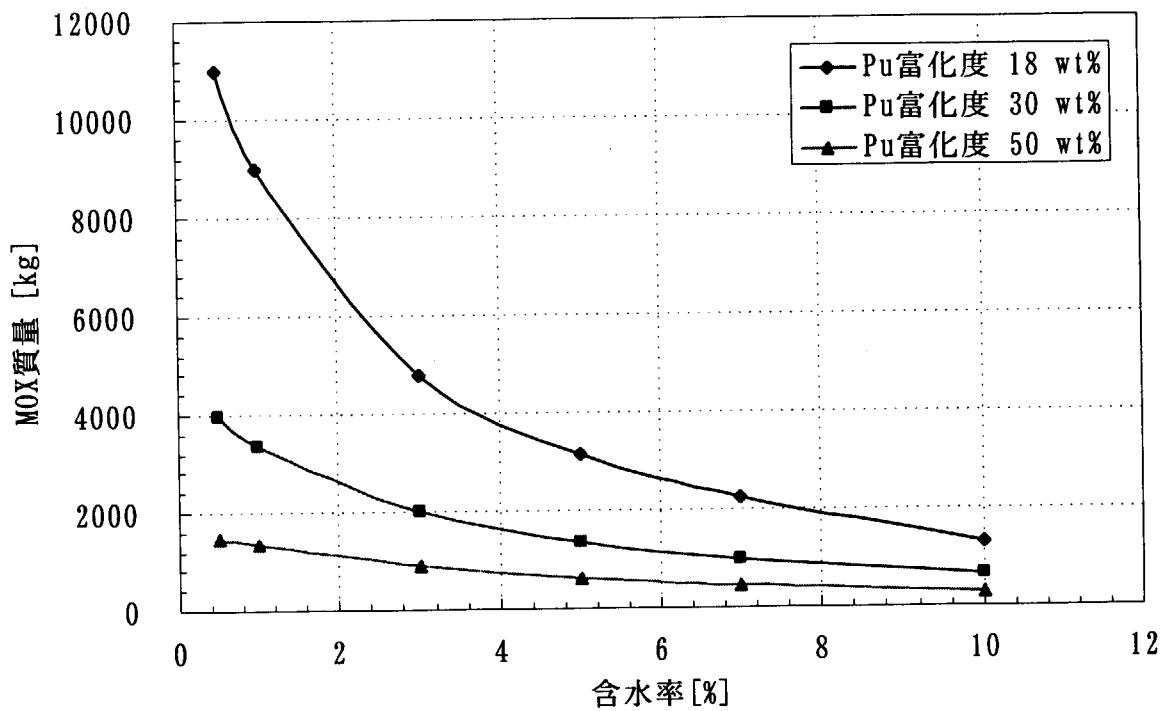
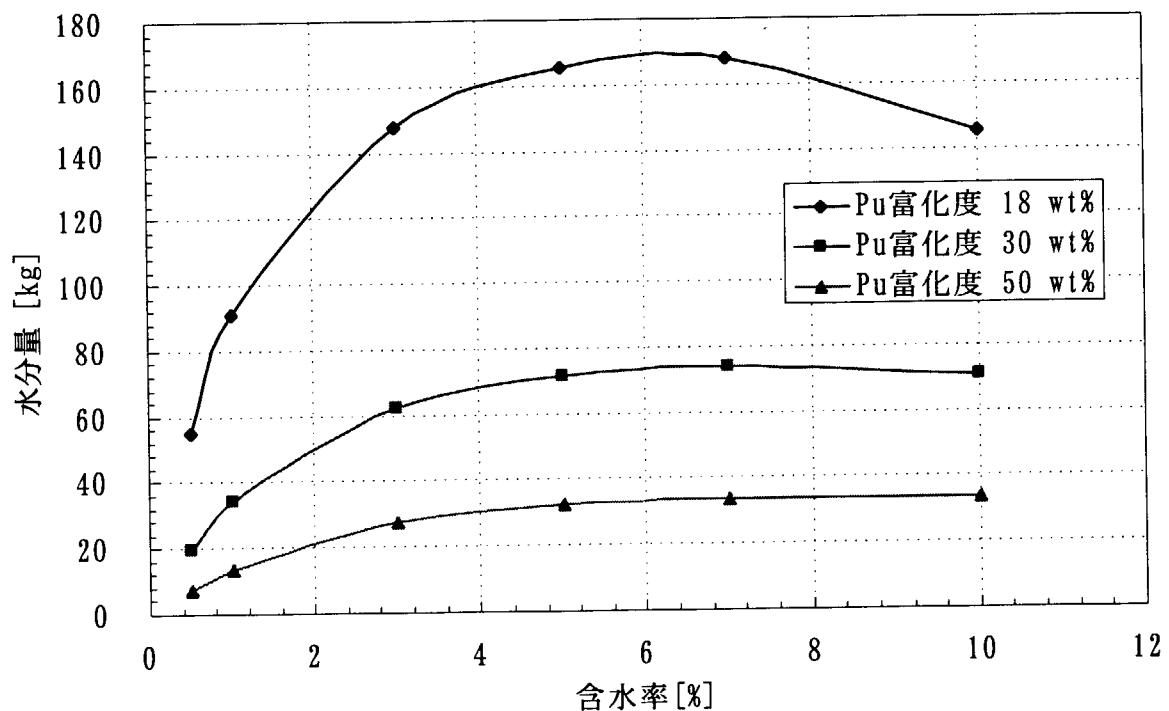
パラメータ	範囲
燃料形態	粉末
燃料密度 [g/cm ³]	2.5
PuO ₂ 富化度 [wt%]	18,30,50
Pu 組成[wt%]	
Pu238	0.0
Pu239	71.0
Pu240	17.0
Pu241	12.0
Pu242	0.0
Am241	0.0
反射体厚[cm]	2.5, 30.0
含水率[wt%]	0.5,1.0, 3.0, 5.0,7.0,10.0

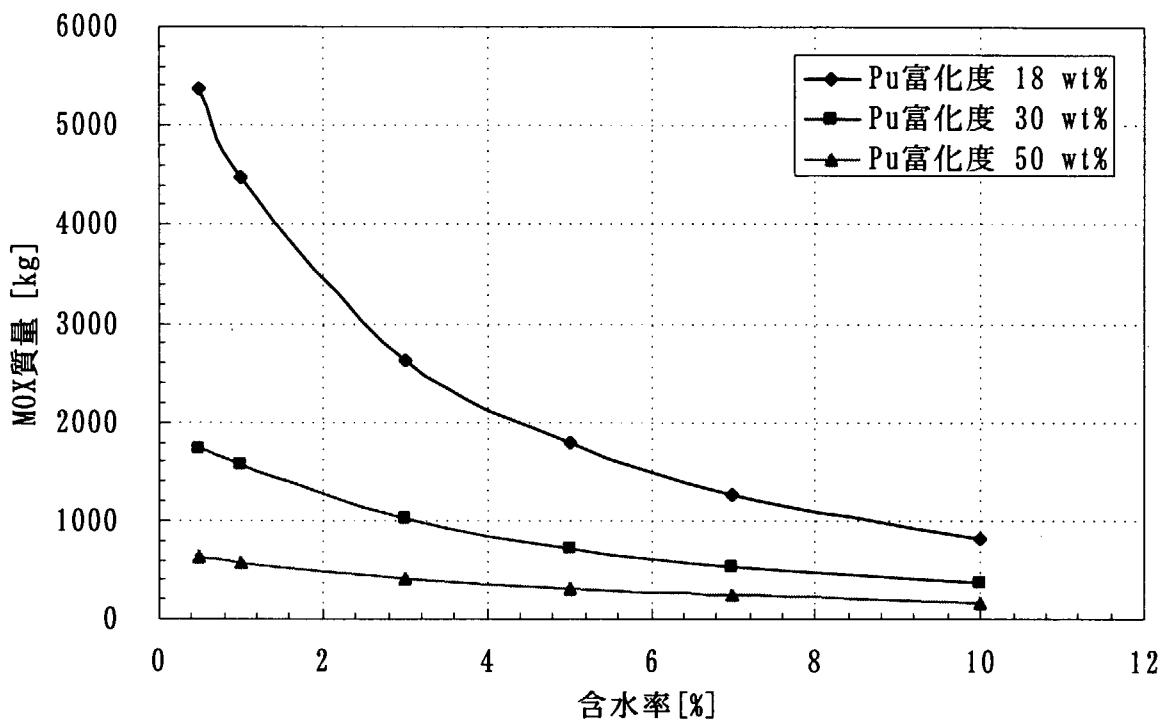
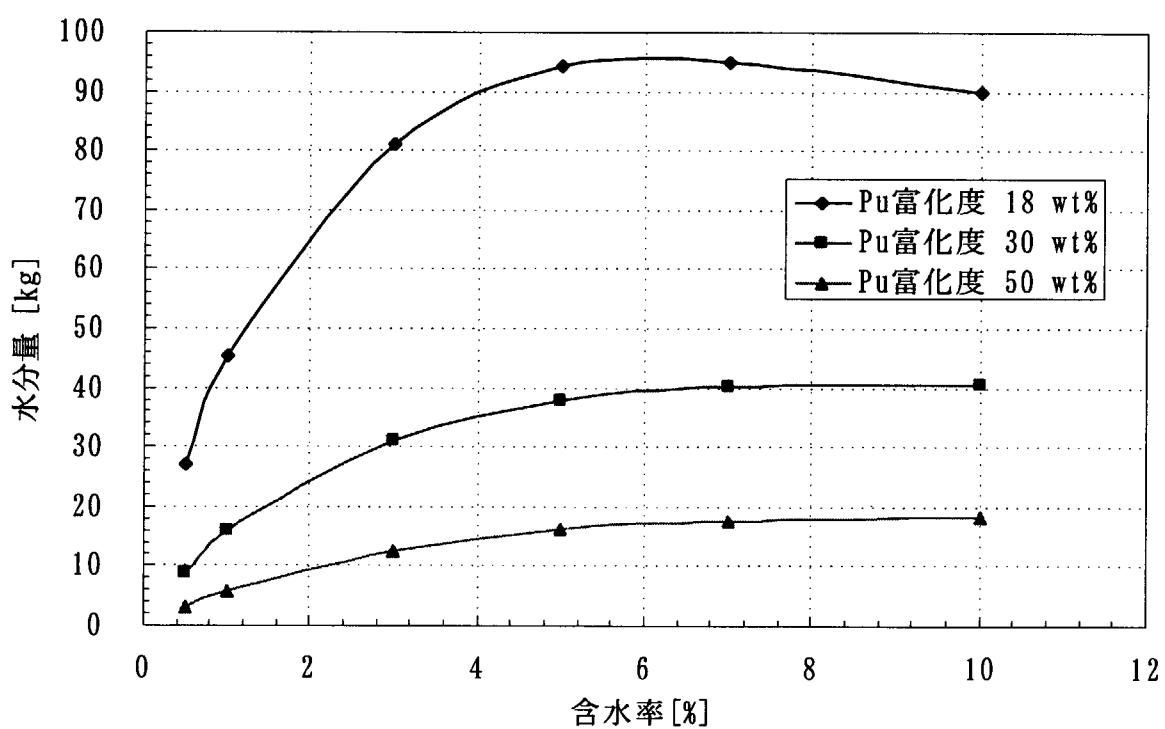
表 A2.2 MOX 粉末体系での MOX 臨界質量と水分量(kg)
($k_{\text{eff}}=1.0$ 、密度 2.5g/cm³、反射体厚 2.5 cm)

含水率 [%]	Pu富化度 18wt%		Pu富化度 30wt%		Pu富化度 50wt%	
	MOX質量	水分量	MOX質量	水分量	MOX質量	水分量
0.5	10983	55	3941	20	1485	7
1.0	8978	91	3366	34	1353	14
3.0	4781	148	2012	62	880	27
5.0	3147	166	1357	71	611	32
7.0	2229	168	980	74	449	34
10.0	1309	145	636	71	304	34

表 A2.3 MOX 粉末体系での MOX 臨界質量と水分量(kg)
($k_{\text{eff}}=1.0$ 、密度 2.5g/cm³、反射体厚 30cm)

含水率 [%]	Pu富化度 18wt%		Pu富化度 30wt%		Pu富化度 50wt%	
	MOX質量	水分量	MOX質量	水分量	MOX質量	水分量
0.5	5362	27	1723	9	626	3
1.0	4471	45	1559	16	575	6
3.0	2618	81	1010	31	404	12
5.0	1790	94	722	38	306	16
7.0	1262	95	533	40	236	18
10.0	810	90	366	41	166	18

図 A2.1 含水率-MOX 粉末臨界質量相関(密度 2.5 g/cm³、反射体厚 2.5 cm)図 A2.2 MOX 粉末臨界時の水分量(密度 2.5 g/cm³、反射体厚 2.5 cm)

図 A2.3 含水率-MOX 粉末臨界質量相関(密度 2.5 g/cm³、反射体厚 30 cm)図 A2.4 MOX 粉末臨界時の水分量(密度 2.5 g/cm³、反射体厚 30 cm)

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、放熱束	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	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、ヘクター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では液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閣僚理事会指令では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	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

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

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
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 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
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		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1	

(86年12月26日現在)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。