

2021年11月30日
KUCA ヒアリング資料 2

京都大学臨界実験装置 (KUCA)
設置変更承認申請について

京都大学複合原子力科学研究所

実験物を装荷する炉心を構成する場合の運転管理の方法について、運転前に行う解析項目（核的制限値）とその評価方法、運転時の測定項目について説明すること。
低濃縮燃料の追加に係る解析項目の追加項目についても追加方針を説明すること。

新規炉心については原子炉施設保安規定（以下、保安規定）に従って審査を行った上で実験を行う。本事項に関連した原子炉施設保安規定（以下、保安規定）の記載内容は以下のとおりである。

（運転の計画）

第59条 所長は、臨界装置の1年間の利用計画（以下「年間利用計画」という。）を年毎に又は年度毎にたて、これを周知させるものとする。

2 臨界装置部長は、前項に定める年間利用計画に基づき、臨界装置の運転計画をたて、臨界装置に関しての保安の監督をする主任技術者（以下「臨界装置主任技術者」という。）の承認を受けなければならない。

3 （省略）

4 （省略）

5 臨界装置主任技術者は、第2項の承認を行うに当たり、別表第2に掲げる主要な核的制限値及び熱的制限値並びに別表第2の2に掲げる炉心配置その他の制限を満たしていることを確認する。

6 （省略）

（使用の許可）

第89条 臨界装置本体を使用して実験を行おうとする者及び第87条の特性測定、機器の調整又は検査のために運転を必要とする者は、KUCA 実験記録等の使用申込書を提出して、臨界装置主任技術者の承認を受けたのち、所長の許可を受けなければならない。

2 所長は、前項の許可を与えるに当たっては、安全委員会の審議を経なければならない。ただし、当該使用に係る実験が既に安全に実施された実験と比較して、より安全であるか、又は極めて類似した条件の実験であると臨界装置主任技術者が認めた場合は、この限りでない。

3 第1項の許可を与えるに当たっては、安全のため必要な使用上の制限条件を付することができる。

（新配置の炉心の特性測定）

第87条 臨界装置部長は、新配置の炉心を組んだときは、そのつど、その炉心に係る次の各号に掲げる事項について、特性測定を行わなければならない。ただし、第5号に掲げる

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

事項については、臨界装置主任技術者が安全上支障がないと認めるときは、この限りでない。

- (1) 臨界量
- (2) 過剰反応度
- (3) 制御棒及び非常用制御設備の反応度抑制効果
- (4) 反応度添加率
- (5) 遮蔽効果
- (6) その他臨界装置主任技術者の必要と認める事項

設置変更承認申請書（既承認）に記載されている高濃縮ウラン炉心構成に関する主要な核的制限値等を表 1-1（保安規定別表第 2）及び表 1-2（保安規定別表第 2 の 2）に示す。

また、低濃縮ウラン炉心構成に関して追加予定の主要な核的制限値等を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

この保安規定に従い、新規の炉心にて実験を行う場合の手順は以下のようになる。なお、既に特性実験を終えた炉心については 3) の項目のみを行う。炉心検討のフローを図 1、図 2 に示す。実験前の反応度等については SRAC コードシステム、またはモンテカルロ計算コード（MVP、または MCNP）を用いた核計算により確認している（最近ではほとんどがモンテカルロ計算）。

- 1) 実験を行うものは新規炉心の臨界予測枚数、制御棒反応度価値等の表 1-1、表 1-2 に示した核的制限値等を解析により確認し、それらの結果と実験手順（必要に応じて臨界近接の方法等）を記載した書類を KUCA 実験記録とともに臨界装置部長に提出する。（保安規定第 89 条）
- 2) 臨界装置部長は月に 1 回開催される研究所の原子炉安全委員会（学内外の学識経験者、主任技術者等により構成）にて実験内容について説明し審議に諮り、核的制限値等を満足しており安全上問題ないと判断された場合には所長は臨界装置部長に実験の許可を与える。（保安規定第 89 条）
- 3) 臨界装置部長は運転計画を立てて臨界装置主任技術者の承認を受ける。その際、臨界装置主任技術者は炉心の核的制限値等の予測値を確認する。（保安規定第 59 条）
- 4) 臨界装置部長は新しい炉心において臨界量測定、反応度測定実験等の特性実験を行い、表 1 に示した核的制限値等を満たしていることを確認する。（保安規定第 87 条）
- 5) 臨界装置部長は特性実験の結果を原子炉安全委員会にて報告する。（保安規定にこの報告に関する記載は無いが慣例として実施している）

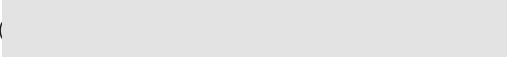
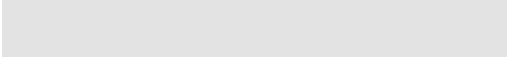
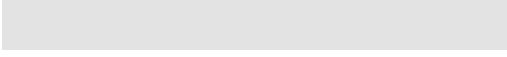

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

新しい炉心の特性実験では、臨界近接実験により臨界となる炉心を構築し、その後、以下のような項目について実験により測定を行う。(温度係数については実験を行うことが難しいので計算値のみで評価)

- ・ 過剰反応度 (正ペリオド法)
- ・ 最大反応度添加率 (正ペリオド法)
- ・ 各制御棒反応度 (積分法)
- ・ 中心架台、またはダンプ弁反応度 (積分法)

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 1-1 KUCA に関する主要な核的制限値等（現在の保安規定の別表第 2 より）

事 項	制 限 値 等
最大過剰反応度 固体減速炉心 軽水減速炉心	0.35 %Δk/k 0.5 %Δk/k
反応度制御能力 制御棒 中心架台 ダンプ弁	過剰反応度プラス1%Δk/k 以上 最大の 1 本は、全体の1/3以下 1 %Δk/k 以上 1 %Δk/k 以上
反応度添加率	0.02 %Δk/k/s 以下（臨界近傍において）
減速材対燃料の割合	固体減速炉心のH / ²³⁵ U（ポリエチレン減速炉心） 原子数比 4.0×10 ² 以下 固体減速炉心のC / ²³⁵ U（黒鉛減速炉心） 原子数比 1.6×10 ⁴ 以下 軽水減速炉心のH / ²³⁵ U 原子数比 4.0×10 ² 以下
反応度温度係数	2.0×10 ⁻⁴ Δk/k/°C 以下
挿入物の反応度 パイルオシレータ	0.1 %Δk/k 以下（絶対値として）
燃料体の最大挿入量	固体減速炉心 濃縮ウラン () 天然ウラン  トリウム  軽水減速炉心 濃縮ウラン 

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

表 1-2 KUCA の炉心配置その他の制限（現在の保安規定の別表第 2 の 2 より）

事 項	制 限 値 等
燃料集合体の装填位置	中心架台に 1 体以上の燃料集合体が装填されていること。ただし、炉心の過剰反応度が負の場合は除く
固体減速炉心の燃料集合体等の構成	燃料集合体、減速材及び反射材及びその他さや管は、さや管の上下に厚さ 5cm 以上の黒鉛若しくは金属が装填されていること。ただし、空さや管あるいは検出器等の挿入孔のある集合体等で設置できない場合は除く
固体減速炉心の炉心配置	炉心を囲む最低 1 層は黒鉛若しくは金属を装填したさや管で囲むこと。ただし、中性子発生装置のターゲット付近は除く
軽水減速炉心の炉心配置	検出器を挿入するための挿入管は管の内部に水が流入した場合であっても炉心に反応度が加わらない場所に設置すること。
照射物	燃料体に貼り付ける又は軽水減速炉心の燃料板の間に挿入する照射物は使用しないこと。

表 2-1 KUCA の低濃縮燃料炉心の主要な核的制限値等
(別表第 2 と統合する予定)

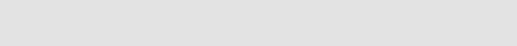
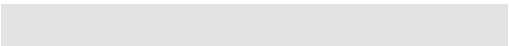
事 項	制 限 値 等
最大過剰反応度 固体減速炉心 軽水減速炉心	0.35 %Δk/k 0.5 %Δk/k
反応度制御能力 制御棒 中心架台 ダンプ弁	過剰反応度プラス1%Δk/k 以上 炉心装荷物（挿入管、照射物）を使用した炉心について、挿入管の破損や照射物の移動により正の反応度が添加される場合には、さらにその正の反応度も加えた値とする。 最大の 1 本は、全体の1/3以下 1 %Δk/k 以上 1 %Δk/k 以上
反応度添加率	0.02 %Δk/k/s 以下（臨界近傍において）
減速材対燃料の割合	固体減速炉心のH / ²³⁵ U（ポリエチレン減速炉心） 原子数比 4.0×10 ² 以下 軽水減速炉心のH / ²³⁵ U 原子数比 4.0×10 ² 以下
反応度温度係数	2.0×10 ⁻⁴ Δk/k/°C 以下
挿入物の反応度 パイルオシレータ	0.1 %Δk/k 以下（絶対値として）
燃料体の最大挿入量	固体減速炉心 濃縮ウラン  軽水減速炉心 濃縮ウラン 

表 2-2 KUCA の低濃縮燃料炉心配置その他の制限
(別表第 2 の 2 と統合する予定)

事 項	制 限 値 等
燃料集合体の装填位置	中心架台に 1 体以上の燃料集合体が装填されていること。ただし、炉心の過剰反応度が負の場合は除く
固体減速炉心の燃料集合体等の構成	燃料集合体、減速材及び反射材及びその他さや管は、さや管の上下に厚さ 5cm 以上の黒鉛若しくは金属が装填されていること。ただし、空さや管あるいは検出器等の挿入孔のある集合体等で設置できない場合は除く
固体減速炉心の炉心配置	炉心を囲む最低 1 層は黒鉛若しくは金属を装填したさや管で囲むこと。ただし、中性子発生装置のターゲット付近は除く
その他、固体減速炉心に対する制限	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心用燃料集合体を構成する場合、角板とポリエチレン板の組み合わせは、角板 1 枚と 11/16 インチ厚ポリエチレン板の組み合わせ (H/U-235 の原子数比の最も大きなもの) から、角板 2 枚と 1/8 インチ厚ポリエチレン板の組み合わせ (H/U-235 の原子数比の最も小さなもの) までの範囲とする。また、ポリエチレン板は、1/8 インチ厚と 1/16 インチ厚のもの以外は使用しない。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心用燃料集合体を構成する場合、角板とポリエチレン板の組み合わせは、1 種類のみとする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心用燃料集合体を構成する場合、角板とポリエチレン板が組み合わされる領域の高さは、31cm 以上、47cm 以下とする。ただし、過剰反応度調整のための燃料集合体では、それが 30cm 以下となるものも 2 体までは使用してもよいが、制御棒に隣接して配置しない。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心用燃料集合体を構成する場合、角板とポリエチレン板が組み合わされる領域の上部及び下部には、25cm 厚以上のポリエチレン反射材を装填する。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心を構築する場合、炉心は、1 種類の H/U-235 の原子数比の燃料集合体のみを使用する単一炉心とする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心を構築する場合、炉心周囲には、3 層以上のポリエチレン反射体を装荷する。ただし、検出器等の挿入のためにポリエチレン反射体が装荷できない場合を除く。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心を構築する場合、天然ウラン及びトリウムの燃料要素は使用しない。また、黒鉛は、減速材及び反射材として使用しない。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

	低濃縮ウランの燃料要素を用いて固体減速炉心を構築する場合、炉心に対して水平方向に線対称となるように制御棒を配置する。
その他、軽水減速炉心に対する制限	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心用燃料集合体を構成する場合、支持フレームへの標準型燃料板装填ピッチは、約 3mm、約 3.5mm、約 4.5mm 及び約 6mm の 4 種類とする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心を構築する場合、炉心は、1 種類の標準型燃料板装填ピッチの燃料集合体のみを使用する。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて 2 分割軽水減速炉心を構築する場合、約 4.5mm 又は約 6.0mm の標準型燃料板装填ピッチの燃料集合体のみを使用する。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心を構築する場合、燃料集合体は、4 列又は 5 列に配列する。ただし、約 6.0mm の標準型燃料板装填ピッチの燃料集合体を使用する 2 分割炉心については、4 列のみとする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて 2 分割軽水減速炉心を構築する場合、燃料集合体は、分割面に対して対称に配置する。分割幅は、15cm 以下とする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心を構築する場合、各列の標準型燃料板の装填枚数の総数の差異は、2 枚以内とする。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心を構築する場合、重水は、反射材として使用しない。
	低濃縮ウランの燃料要素を用いて軽水減速炉心を構築する場合、炉心に対して水平方向に線対称となるように制御棒を配置する。ただし、2 分割炉心においては、分割面の中心点に対して点对称となるように制御棒を配置しても良いこととする。
パイロシレータに対する制限	実験物を装置の中で有意に動かないように固定する。
	実験物は固体とし、粉体や液体は用いない。
炉心装荷物に対する制限	挿入管は固体減速炉心用、軽水減速炉心用ともに、運転中に動くことがないように固定する。
	照射物を装荷しない軽水減速炉心用については、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で炉心の過剰反応度を 0.5%Δk/k 以下に制限する。
	照射物は運転中に反応度の有意な変動がないように燃料体にテープ等で貼付けて固定する。

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

	<p>【照射物を装荷することで炉心に負の反応度が加わる場合】</p> <p>低濃縮ウランの燃料要素を用いる固体減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態（照射物を取り除いた状態）での炉心の過剰反応度を $0.35\Delta k/k$ 以下に制限する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心では、照射物を取り付ける前の状態で、かつ、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を $0.5\Delta k/k$ 以下に制限する。</p> <p>【照射物を装荷することで炉心に正の反応度が加わる場合】</p> <p>低濃縮ウランの燃料要素を用いる固体減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある場合での炉心の過剰反応度を $0.35\Delta k/k$ 以下に制限する。低濃縮ウランの燃料要素を用いる軽水減速炉心では、照射物の装荷により反応度が最も大きくなる位置に照射物がある状態で、かつ、挿入管が破損して内部に水が流入することを考え、水流入の前後で過剰反応度を $0.5\Delta k/k$ 以下に制限する。</p>
--	--

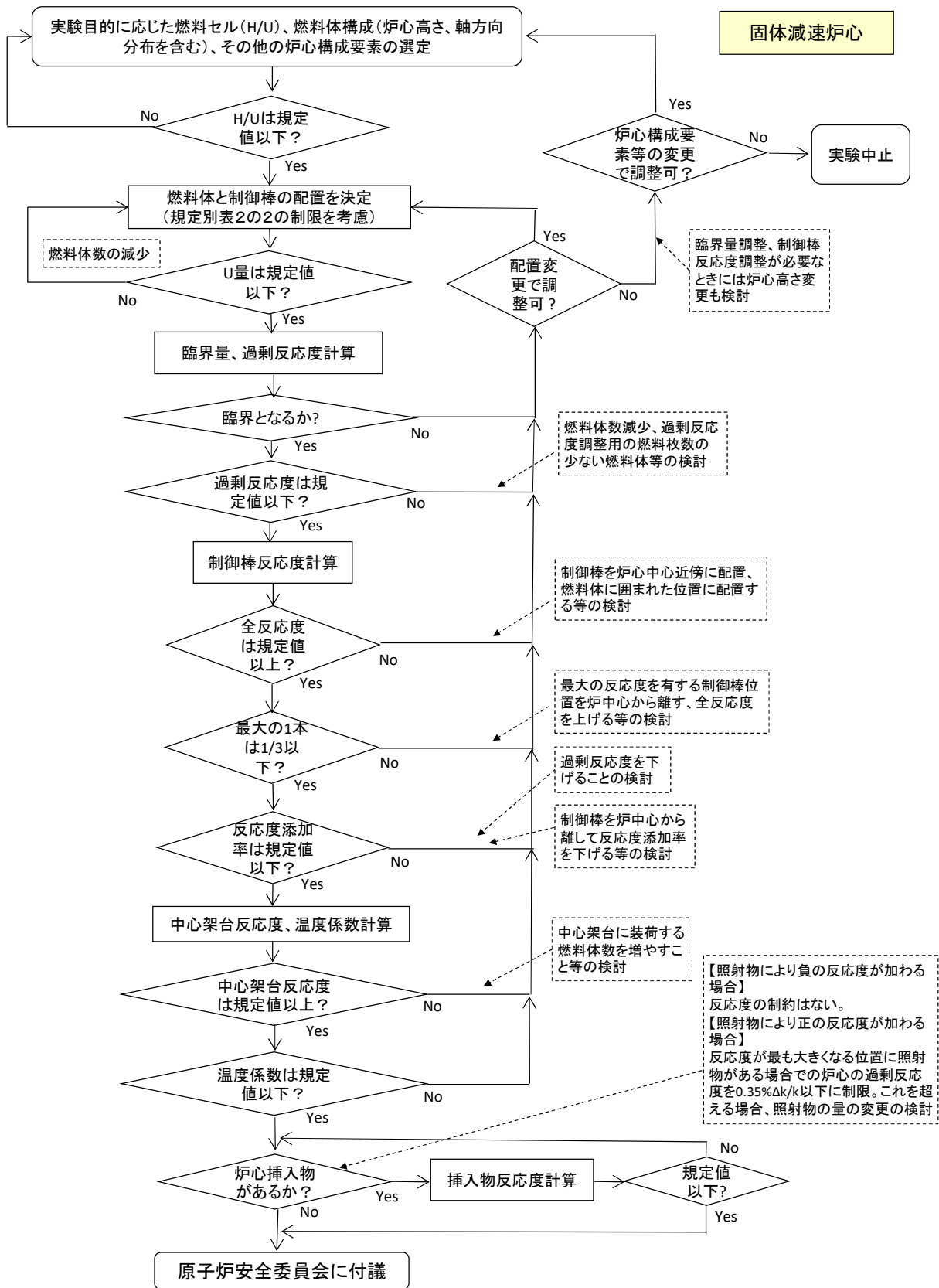


図1 炉心決定のためのプロセス (固体減速炉心)

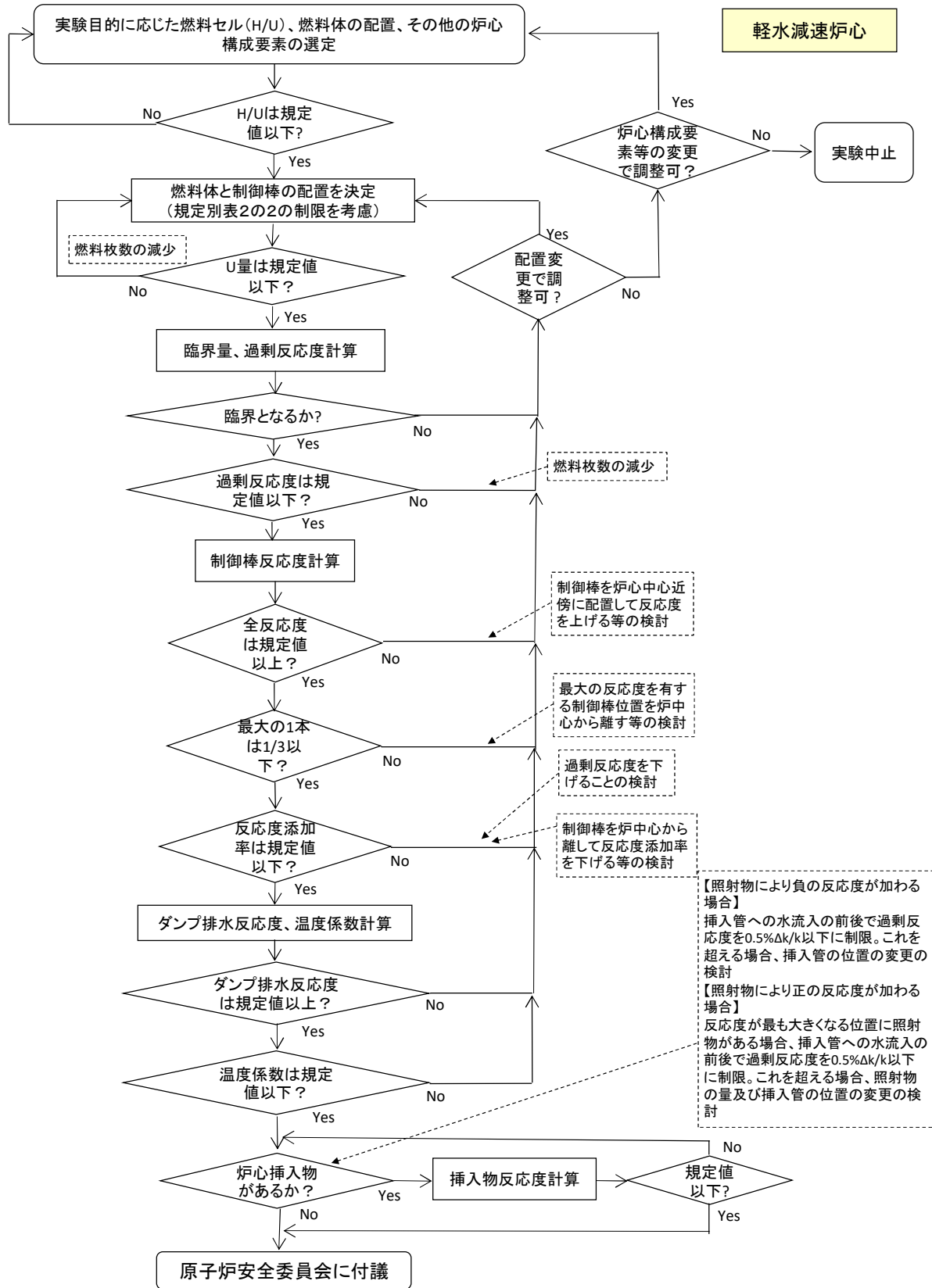


図2 炉心決定のためのプロセス (軽水減速炉心)

実験物を装荷する炉心の状況と異常な過渡変化が発生した場合の炉心反応度の推移について、制御棒パターンのポンチ絵を用いて説明すること。

図1-1に固体減速炉心で炉心に取り付けたカドミウムが落下した場合、図1-2、図1-3に固体減速炉心で炉心に取り付けたウラン箔が落下した場合を示す。また、図2-1に軽水減速炉心で炉心に取り付けたカドミウムが落下した場合、図2-2に軽水減速炉心で炉心に取り付けたウラン箔が落下した場合を示す。

どの場合も制御棒の反応度は核的制限値の最小値（【1 + 過剰反応度 + 実験物の移動に伴う反応度】%dk/k）、最大反応度を持つ制御棒の反応度は最大値（全体の1/3）とする。

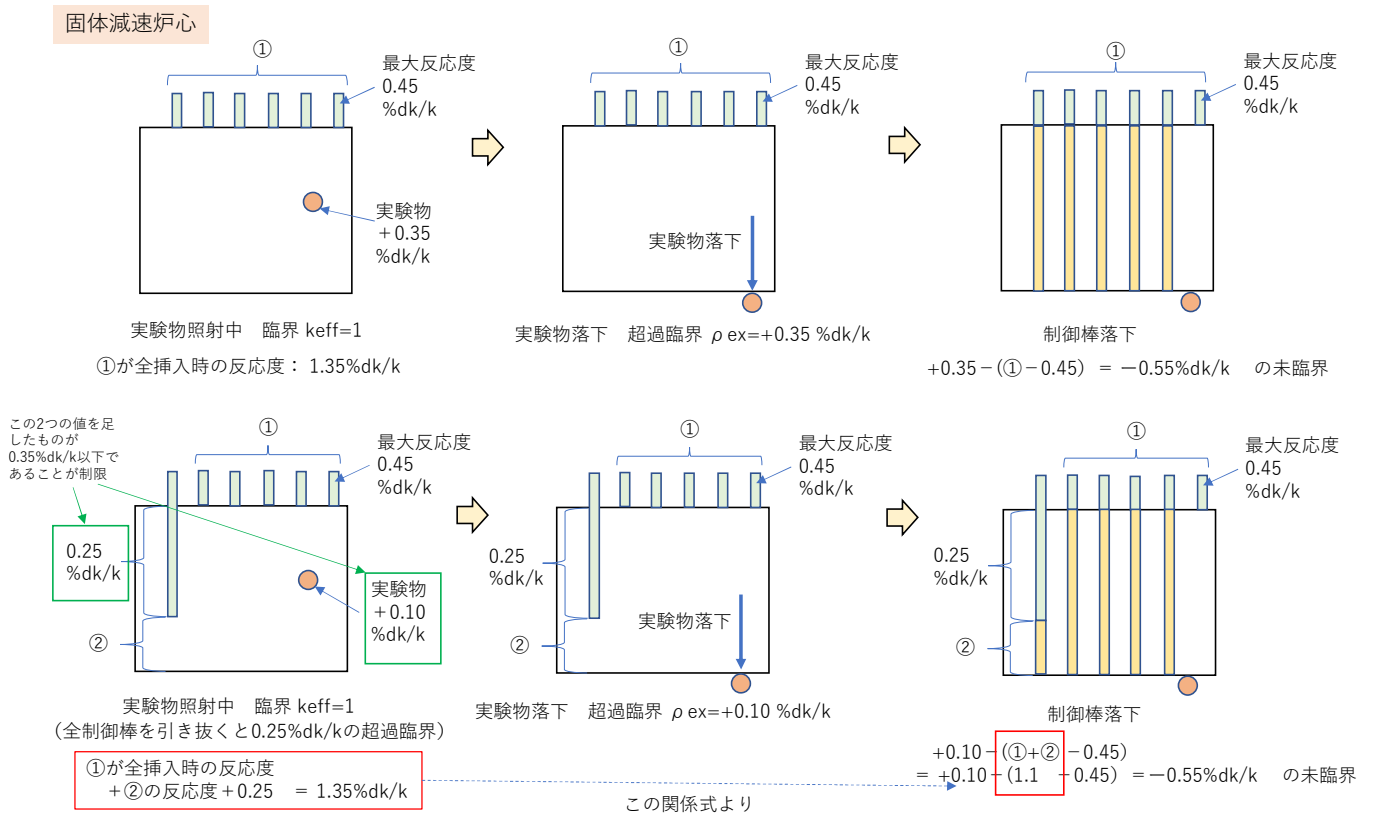


図1-1 固体減速炉心
 実験物の落下により正の反応度が印加される場合
 例えば炉中心に取り付けたカドミウムが炉外に落下

「グレーのマスクング範囲は不開示情報」

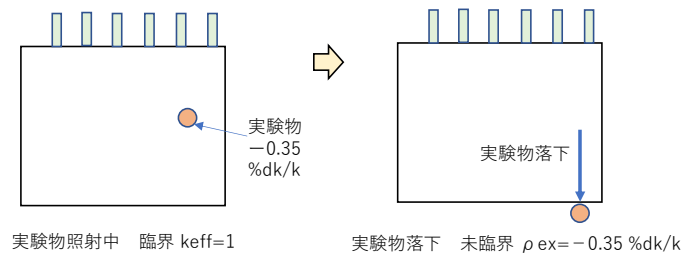


図 1-2 固体減速炉心

実験物の落下により負の反応度が印加される場合

例えば炉中心に取り付けたウラン箱が炉外に落下、すぐに未臨界となり炉停止する

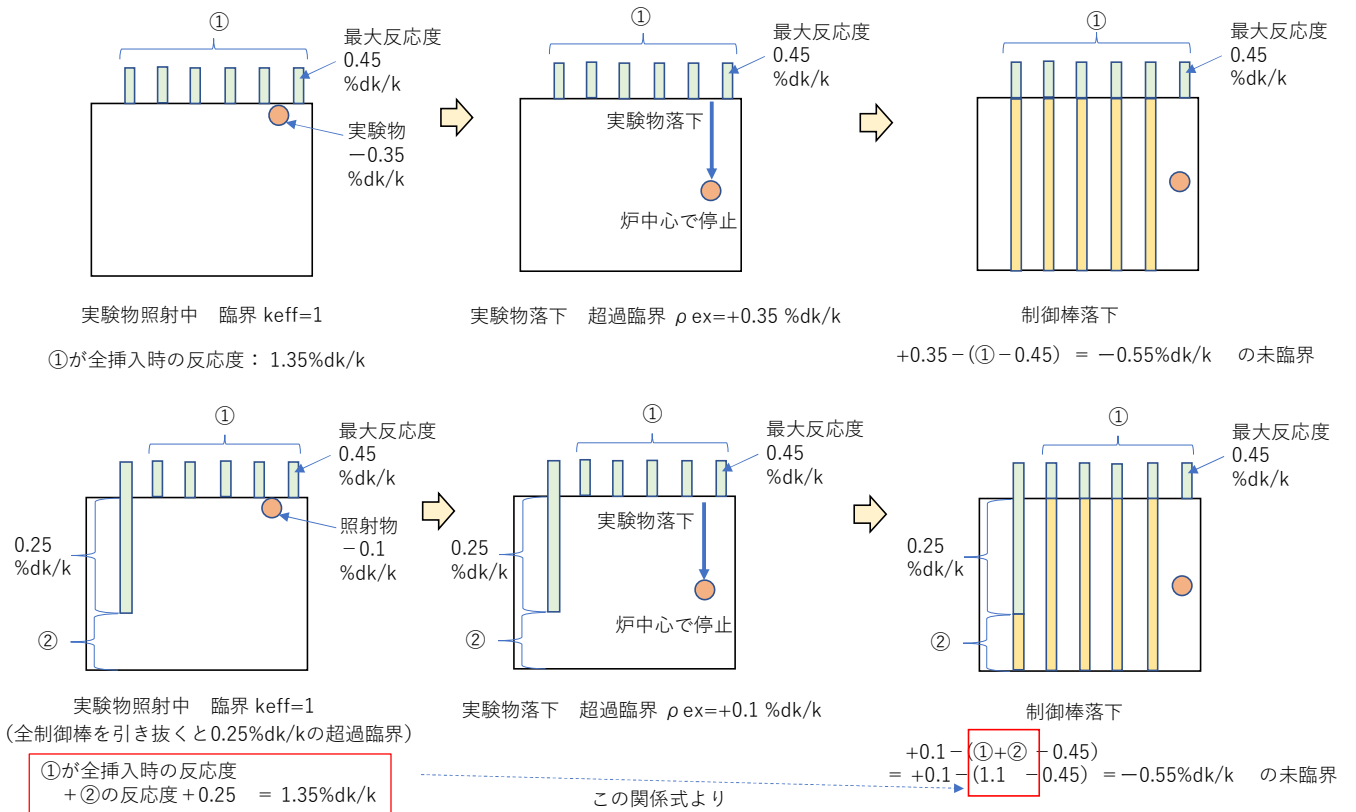


図 1-3 固体減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合

例えば炉外に取り付けたウラン箱が炉中心に落下して停止

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

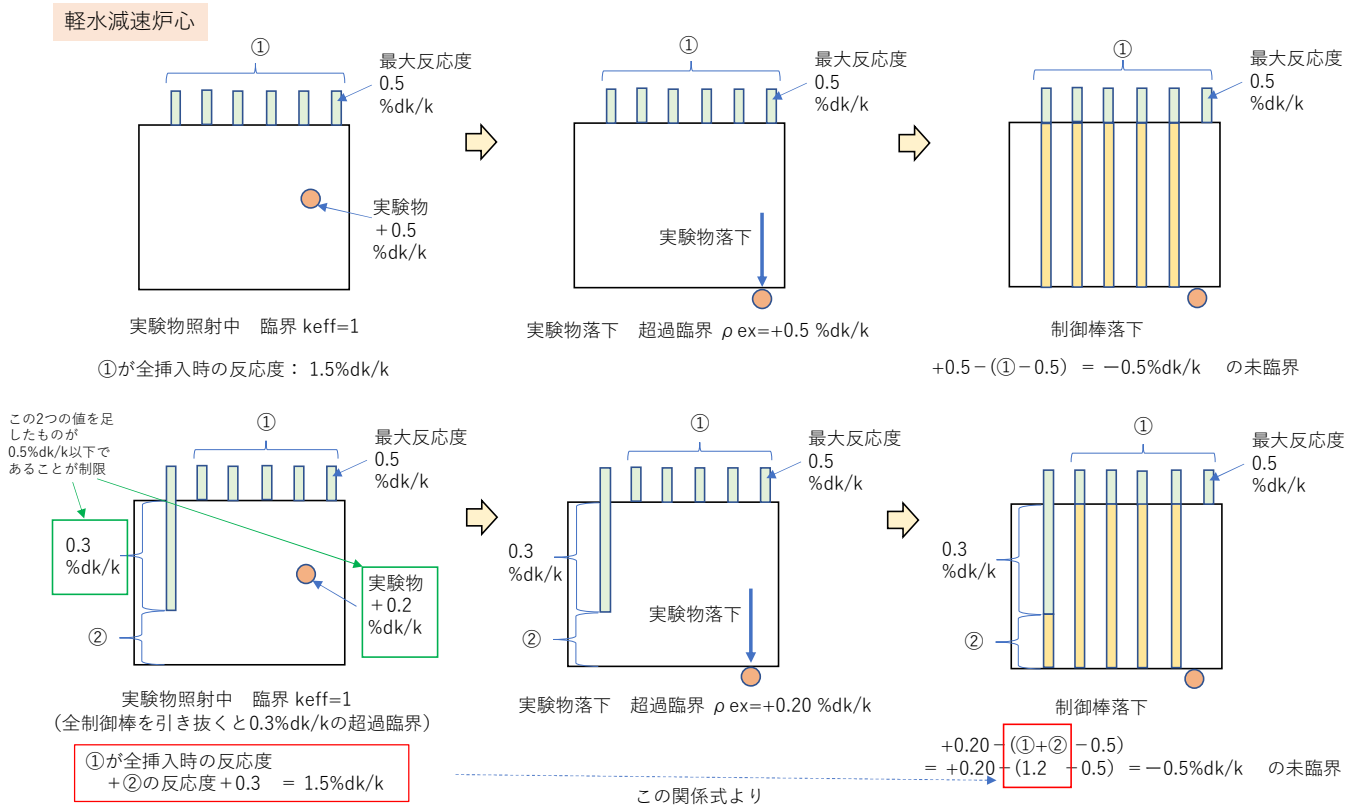


図 2 - 1 軽水減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合
例えば炉中心に取り付けたカドミウムが炉外に落下

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

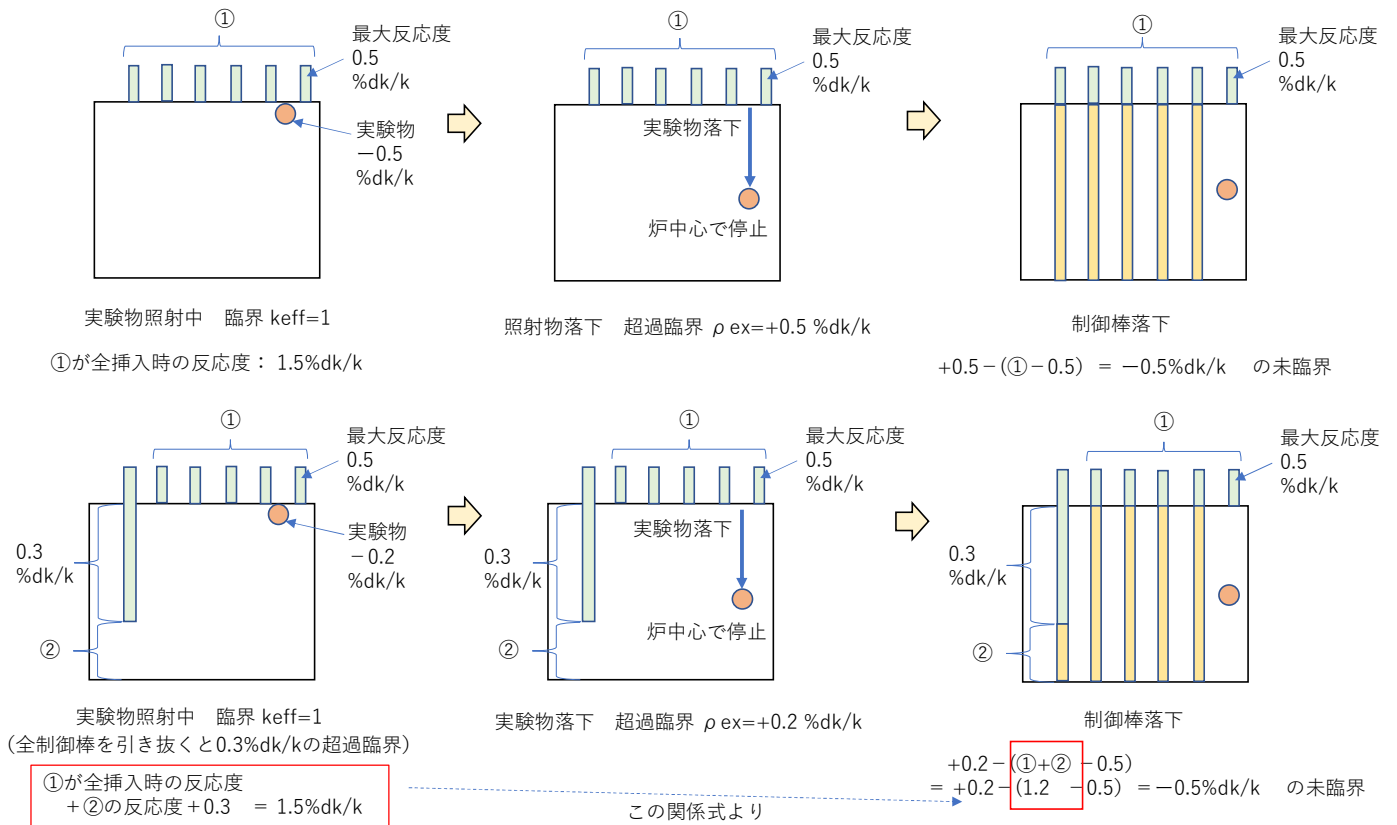


図 2 - 2 軽水減速炉心

実験物の落下により正の反応度が印加される場合
例えば炉外に取り付けたウラン箱が炉中心に落下して停止

「グレーのマスキング範囲は不開示情報」

KUCA で使用予定の燃料（ウランモリブテン燃料及びウランシリサイド燃料）の仕様を示すこと。また、モリブテンやシリサイドの密度に係る情報を示すこと。

表 1 U-Mo 燃料に関する仕様

項目	公差等
²³⁵ U 量	
ウラン濃縮度	
ウラン分布均一性	
Mo 量	
アルミニウム	
アルミニウム粒径	

U-7Mo の密度

(参考文献 (2.3) 式、Mo を 7wt% とすると 15.7at%)

$$10.2 \times 0.157 + 19.05 \times (1 - 0.157) = 17.7 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

U の密度

燃料コンパクトの体積は

なので、ウラン密度は

表 2 U-Si 燃料に関する仕様

項目	公差等
ウラン密度	
ウラン濃縮度	
²³⁵ U 量	
Si 量	
アルミニウム	
アルミニウム粒径	

参考文献

"U-Mo Fuels Handbook", ANL-09/31, Argonne National Laboratory (2006).



ANL-09/31

U-Mo Fuels Handbook

Nuclear Engineering Division

About Argonne National Laboratory

Argonne is a U.S. Department of Energy laboratory managed by UChicago Argonne, LLC under contract DE-AC02-06CH11357. The Laboratory's main facility is outside Chicago, at 9700 South Cass Avenue, Argonne, Illinois 60439. For information about Argonne, see www.anl.gov.

Availability of This Report

This report is available, at no cost, at <http://www.osti.gov/bridge>. It is also available on paper to the U.S. Department of Energy and its contractors, for a processing fee, from:

U.S. Department of Energy
Office of Scientific and Technical Information
P.O. Box 62
Oak Ridge, TN 37831-0062
Phone (865) 576-8401
Fax (865) 576-5728
reports@adonis.osti.gov

Disclaimer

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor UChicago Argonne, LLC, nor any of their employees or offices, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. References herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise, does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of document authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof, Argonne National Laboratory, or UChicago Argonne, LLC.

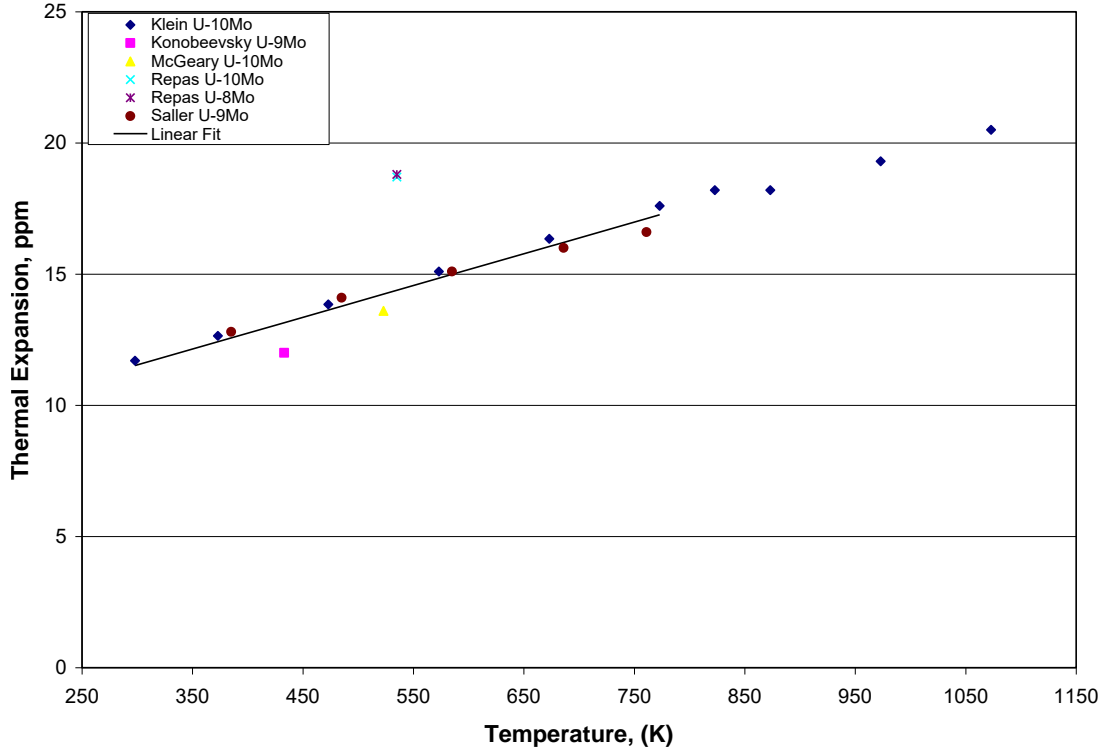


Fig. 2.2. Thermal expansion coefficient of U-Mo alloys. Line represents linear fit to data. Note that all data except that of Klein represent mean values of expansion reported over a temperature range. Data of Klein are ‘instantaneous’ values.

2.3 Density of U-Mo Alloys

The density of U-Mo alloys has been reported by McGeary [2] as a function of composition for the composition range from 2.5 to 25 wt.% molybdenum. Klein [6] has reported density as a function of temperature for U-10 wt.% molybdenum from 25-550°C. More recently data have been reported by Lee [7] for ingots and Kim [8] for atomized powder. Data for U-Mo alloys from reference [2] are listed in Table 2.2 along with recommended density values for aluminum, uranium, and common fuel compound phases. The uranium density of the alloys falls rapidly with increasing molybdenum content.

The density of γ -phase U-Mo alloys is well represented by a molar rule of mixtures given by Eq. (2.3).

$$\rho_{U-Mo} = X_{Mo}\rho_{Mo} + (1 - X_{Mo})\rho_U \quad (2.3)$$

Here X_{Mo} is the molar fraction of Mo in U-Mo alloy and ρ is the density. On the basis of molar fraction, density values calculated using Eq. (2.3) are plotted with the density data from Table 2.2 in Fig. 2.3. It can be seen from Fig. 2.3 that the data of McGeary and Klein are well represented by the rule of mixtures formulation in the range of molybdenum contents from 11.5 at.% (5 wt.%) to at least 21.6 at.% (10 wt.%), encompassing nearly the entire range of

γ -phase (meta) stability. The data of Lee and Kim fall below the predicted values. In the case of Kim's data for powder, the lower than expected values are likely due to porosity present as a result of the powder atomization process. No analyzed chemical composition data are given in reference [7], however approximately 3 wt.% of additional molybdenum would have to be present for the data to fall on the calculated curve. Since it is unlikely that this is the case, no explanation for this discrepancy is available.

Beyond 30 at.% molybdenum, the single set of measured density values published by [2] is higher than those calculated from Eq. (2.3). In this compositional range, the ordered U_2Mo intermetallic phase forms, and Eq. (2.3) is not valid.

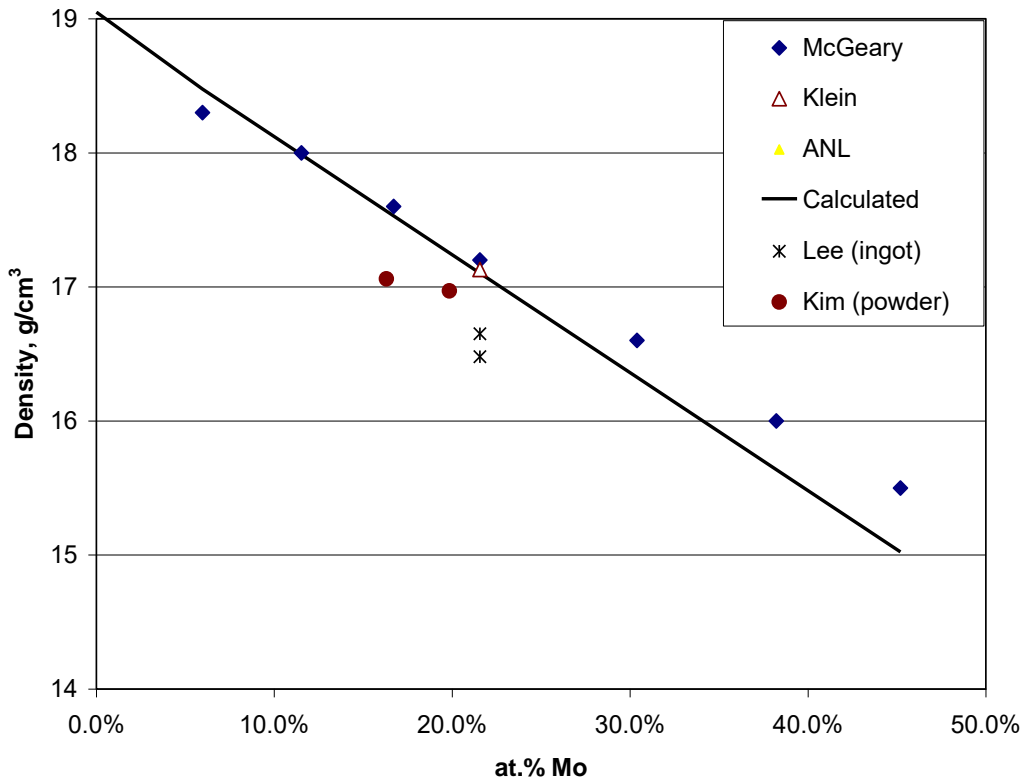


Fig. 2.3. Measured and calculated density data for U-Mo alloys.

Table 2.2. Density data for common fuel compounds, U-Mo alloys, and aluminum.

Material	Density (g·cm ⁻³)	Uranium density (g·cm ⁻³)
Al	2.70	-
Mo	10.2	-
UAl ₄	5.7	3.7
UAl ₃	6.8	5.1
UAl ₂	8.14	6.63
UAl _x ¹	6.4	4.6
U ₃ O ₈	8.3	7.0
UO ₂	10.96	9.67
U ₃ Si ₂	12.2	11.3
U ₃ Si	15.3	14.7
U ₆ Fe	17.4	16.7
U-25Mo	15.5	11.6
U-20Mo	16.0	12.8
U-15Mo	16.6	14.1
U-10Mo	17.2	15.5
U-7.5Mo	17.6	16.3
U-5Mo	18.0	17.1
U-2.5 Mo	18.3	17.8
U	19.05	19.05

¹ 10UAl₂+60UAl₃+30UAl₄

2.4 Lattice Parameter

The variation of the lattice parameter of U-Mo alloys with composition has been provided by Dwight [9] as follows:

$$a_0 = 3.4808 - 0.00314x_{Mo} \quad (2.4)$$

where x_{Mo} is the Mo content in U-Mo alloy in atom %.

Figure 2.4 shows the graph of lattice parameter of U-Mo alloys as represented by Eq. (2.4).