

「試験研究の用に供する原子炉等の技術基準に関する規則」との適合性に関する説明書

評価計算書

- A. 固体減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書
- B. 固体減速炉心用燃料要素の附加荷重に関する評価計算書

A. 固体減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書

固体減速炉心用燃料要素の緒特性については、原子炉設置変更承認申請に関する審査において確認頂き、その結果をまとめ資料に記載している。本計算書では、その一部を抜粋する。

1. ウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料

研究炉においてLEUを使用するためには、ウラン密度を上げることが必要となる。そのため、これまで使用されてきたウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料よりさらにウラン密度が高い燃料の開発が求められるようになった。そのような中で、1990年代以降、米国、カナダ、フランス、韓国等で試験が行われた結果、照射特性に優れていることが判り、さらに研究が進められるようになったのがウランモリブデン燃料（以下、U-Mo燃料）である。以下に、U-Moの諸物理特性¹⁾を示す。

融点： 1130 °C (U-7Mo)

熱容量： 30.5 J/mol/K (U-10Mo、25°C)

熱伝導率： 14.2 W/m/K (U-8Mo、10~100°C)

(ここで、U-xMo 中の x は Mo の wt.%)

U-Mo燃料には、ウラン密度を高めるためにU-Mo単体 (U-Mo monolithic) で使用することも考えられるが、KUCA固体減速炉心では、アルミニウム中に分散させて使用するU-7Mo・アルミニウム分散型燃料 (Moを7 wt.%用いる) を制作する。

2. 照射特性

KUCA で使用する軽水減速炉心用燃料要素のスウェリング量を求めるために、まず、設置変更承認申請書 (以下、設置申請書) 及び設工認申請書等による以下の値から、核分裂密度 (F_d) が最も大きくなる最小臨界炉心で 50 年間使用したときの燃料要素の燃焼度に対応する F_d を求める。

年間積算出力： 1 kWh/年 (設置申請書 添付書類二)

最小臨界炉心： XXXXXXXXXX (設置申請書 添付書類八)

ウラン密度： XXXXXXXXXX (U-Mo ハンドブック)
(保守的に U-5Mo の値を採用)

濃縮度： XXXXXXXXXX (設工認申請書)

1 核分裂当たりの回収エネルギー： 200 MeV

これらより、50 年間使用したときの積算出力及び積算核分裂数は、

積算出力： $1 \times 10^3 (\text{Wh/年}) \times 3600 (\text{s/h}) \times 50 (\text{年}) = 1.80 \times 10^8 (\text{J})$

積算核分裂数： $(1.80 \times 10^8)(J) \div (200 \times 10^6)(eV) \div (1.60 \times 10^{-19})(J/eV)$
 $= 5.63 \times 10^{18}(\text{fissions})$

となる。一方、ウラン体積は、

ウラン体積： $(\text{質量})(g) \div (\text{密度})(g/cm^3) = (\text{体積})(cm^3)$

であるので、 F_d は、

$F_d = (5.63 \times 10^{18})(\text{fissions}) \div (\text{体積})(cm^3) = (\text{核分裂/cm}^3)$

となる。

U-Mo ハンドブック¹⁾に記載された U-Mo 燃料 (U-Mo monolithic) の燃料スウェリングのデータを図 1 に示す。KUCA で使用する燃料は U-Mo・アルミニウム分散型燃料であるが、個々の U-Mo 粒子の F_d は U-Mo 単体の燃料の場合と同じと考えられる。

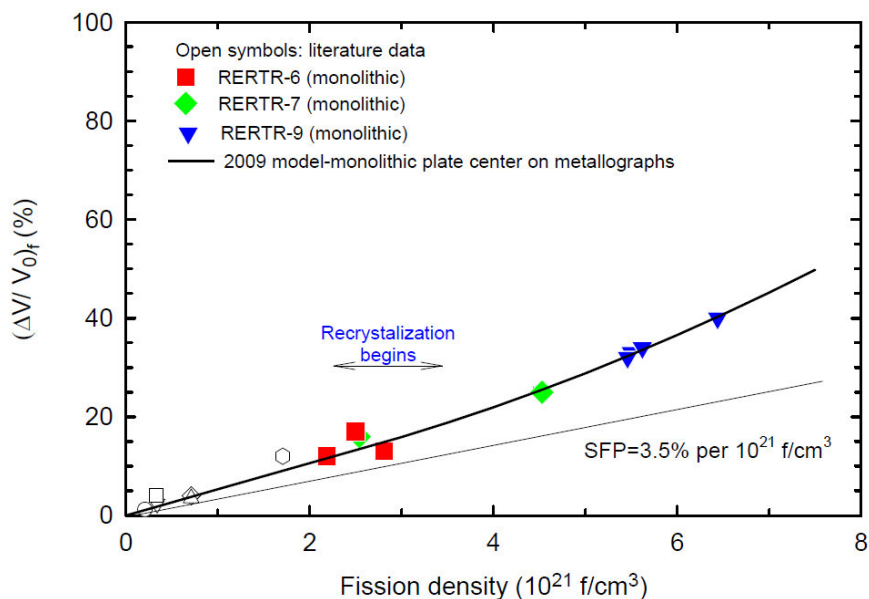


図 1 燃料スウェリングの実験値

これまでの照射実験データより、U-Mo 燃料のスウェリングについては、ガス以外の FP による寄与 (solid swelling) とガス状の FP による寄与 (gas bubble swelling) の線形和で表現される以下の実験式が示されている¹⁾。

$$(\Delta V/V)_{\text{total}}(\%) = (\Delta V/V)_{\text{solid swelling}} + (\Delta V/V)_{\text{gas bubble swelling}}$$
$$(\Delta V/V)_{\text{solid swelling}}(\%) = 3.5 \times 10^{-21} \cdot F_d$$
$$(\Delta V/V)_{\text{gas bubble swelling}}(\%) = 1.8 \times 10^{-21} \cdot F_d \quad \text{for } F_d \leq 3 \times 10^{21} \text{ fissions/cm}^3$$

KUCA の F_d を代入すると、スウェリング (solid swelling と gas bubble swelling の線形和) は約 [REDACTED] となる。x-y-z 方向に均等に膨張すると仮定すると、各方向のサイズ変化は燃料芯材の製作公差に比べても十分に小さい値であることから、照射に伴うスウェリング量は無視することができる。すなわち、核分裂で生成した核分裂生成物 (FP) は U-Mo 燃料の形状に影響を与えることなく U-Mo 燃料の内部に保持されるといえる。

U-Mo・アルミニウム分散型燃料の場合、FP の一部は U-Mo 粒子の表面から外部に放出されることになる。その放出率 F_r は、以下のように表される²⁾。

$$F_r = 3/4(\mu/R) - 1/16(\mu/R)^3$$

ここで μ は U-Mo 中での FP の平均飛程、 R は U-Mo 粒子の平均半径である。U-7Mo について μ は 5 μm 、 R は 35 μm とすると、 F_r は約 11% となる。 μ は UAl_x の場合で 10 μm 、 U_3Si_2 の場合で 8 μm であるため、同じ粒径であれば密度が高い U-Mo のほうが F_r は小さくなる。

この放出された FP はウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料の場合と同様に U-Mo 周囲のアルミニウム中に保持されることになるが、その FP の保持能力については、従来のウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料で十分に実績があり問題は無い。

3. 燃料板の強度

燃料要素は、アルミニウム製の額縁の内部に U-Mo・アルミニウム分散型燃料のコンパクトを入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接するという構造である。また燃料要素は、燃料さや管に収納されて炉心に設置されるため、燃料要素自体の耐震強度は必要ないため、燃料要素を積み重ねたときにアルミニウム製の額縁に掛かる圧縮荷重に対しての強度を検討した。計算結果については、次の附加荷重に関する評価計算書に示す。なお、U-7Mo 単体での降伏点は、700 N/mm^2 であり¹⁾、混合するアルミニウムパウダーについては強度が弱い [REDACTED] と同等の降伏点であるとしても耐力 (0.2%) は、25 N/mm^2 以上 [REDACTED] であるため、仮に燃料板上部の挿入物の重量が U-Mo 燃料に直接加わったとしても問題はない。

4. 腐食

燃料要素の被覆材には、耐食性の高いアルミニウム合金である [REDACTED] を使用する。KUCA 軽水減速架台では [REDACTED] の被覆材を用いた燃料要素を 1974 年の設置以来、約 45 年間使用してきたが、これまでに燃料要素の表面に腐食が認められたことは無い。従って、今回製作する燃料要素についても、腐食のおそれはほとんど無いと考えられる。

5. ブリスタ

今回制作する燃料要素は U-Mo 粒子をアルミニウムパウダーと混ぜて製作した燃料コンパクトを [REDACTED] のアルミニウム製の被覆材中に封入した構造をしており、これまで KUCA の軽水減速炉心で使用してきた標準型燃料板や KUR で使用している燃料平板 (共にアルミニウム製被覆材 [REDACTED])

と極めて類似した構造をしている。KUR 等において、ブリスタの発生を防止するために燃料芯材の最高温度は 400°C を超えないことを求めており、今回の U-Mo を用いた燃料要素についてもブリスタの発生を防止するために燃料芯材の最高温度は 400°C を超えないことを設計基準事故時の判断基準としている。これは、U-Mo・アルミニウム分散型燃料は、ウランシリサイド Mo・アルミニウム分散型燃料と同様に、アルミニウムパウダー中に融点の高い燃料粒子が分散した構造をしており、ブリスタの発生はこれまでの基準（燃料破損閾値としてブリスタ発生温度の約 500～600°C に安全余裕を見た温度である約 400°C）と同じとして良いと考えられるからである。しかし、設置申請書添付書類十の解析結果によると、燃料要素の最高温度は 100°C 以下であること、また U-235 の燃焼度としては最大でも約 2.5×10^{-4} % 程度であり、ほとんど燃焼は進まず、核分裂生成物の蓄積はほとんど無視できる。そのため、KUCA の U-Mo 燃料についてはブリスタの発生の心配は無いと考えられる。

参考文献

- 1) “U-Mo Fuels Handbook”, ANL-09/31, Argonne National Laboratory (2006).
- 2) D.W. White, A.P. Beard, A.H. Willis, Irradiation behavior of Dispersion fuels, USAEC Report KAPL-P-1849, Knolls Atomic Power Laboratory, (1957).

B. 附加荷重に関する評価計算書

1. 評価に関する設計条件

燃料要素はアルミニウム製の額縁の内部にウランモリブデン・アルミニウム分散型燃料のコンパクト（圧縮して成型したもの）を入れ、その上にアルミニウム製の板を置いて周囲を溶接している構造である。（図1、図2）

燃料要素は燃料さや管に収納されて炉心格子板に固定し、常圧の条件下で使用されるため、本評価では附加荷重及び自重を対象とする。

(1) 附加荷重の評価

現在の設置変更承認申請書においてKUCAで使用する最も重い燃料集合体は燃料要素2枚＋1/8inchポリエチレンを1セルとし、これを高さ約50 cmに積み重ねて（65セル）、その上にポリエチレン反射体を約50 cm（高さ25.4 cmのポリエチレンを2本）入れたものである。この際、一番下の燃料要素周囲の幅約[REDACTED]のアルミ枠（図2、Pの矢印の箇所）に作用する圧縮応力を計算する（保守的に一番下の燃料要素分も加えて計算を行う）。

(2) 自重の評価

燃料要素の自重による影響は(1)の附加荷重による影響に比べて明らかに小さいので(1)の評価結果に包含されると考えられる。

2. 附加荷重に対する燃料要素の強度

(1) 燃料芯材（ウランモリブデンコンパクト）

1) 体積

「図1 燃料要素」から求める。
[REDACTED]

2) 密度

ウランモリブデン（モリブデン 6.5%）の密度である 18.4 g/cm^3 ⁽¹⁾を使用する。（燃料芯材はU7Mo-A1であるが、ここでは安全側にU7Mo密度を使用する。）（モリブデン含有量は $7 \pm 0.5\%$ であるが、モリブデン量が少ないほど密度が高くなるので安全側に6.5%とする）

3) 質量

$$[REDACTED] \times 18.4 \text{ g/cm}^3 = [REDACTED]$$

(2) 燃料要素被覆

1) 体積

燃料要素の被覆体積は、被覆を含む燃料要素体積から燃料芯材体積を差し引くことで求める。（図1、図2）

- ・ 被覆を含む燃料要素体積
[REDACTED]

- ・ 燃料要素被覆体積

- 2) 密度
 2.7 g/cm^3 ⁽³⁾ (アルミニウム) を使用する。
- 3) 質量
 $\text{[redacted]} \times 2.7 \text{ g/cm}^3 = \text{[redacted]}$
- (3) ポリエチレン(1/8 インチ)
- 1) 体積
 [redacted]
- 2) 密度
 0.96 g/cm^3 ⁽²⁾ (ポリエチレン) を使用する。
- 3) 質量
 $\text{[redacted]} \times 0.96 \text{ g/cm}^3 = \text{[redacted]}$
- (4) ポリエチレン(25.4cm)
- 1) 体積
 [redacted]
- 2) 密度
 0.960 g/cm^3 ⁽²⁾ (ポリエチレン) を使用する。
- 3) 質量
 $\text{[redacted]} \times 0.960 \text{ g/cm}^3 = \text{[redacted]}$
- (5) 燃料集合体一番下の燃料要素周囲の幅約 [redacted] のアルミ枠に加わる応力
- ・ 合計質量 [redacted]
 - ・ 応力が加わる箇所の面積 [redacted]
 - ・ $\text{[redacted]} \times 9.8 \text{ m/s}^2 / \text{[redacted]}$
- (6) まとめ
 63.7 N/mm^2 ⁽⁴⁾ (燃料被覆耐力) $\times \text{[redacted]} \times \text{[redacted]}$ (附加荷重) であるため、燃料要素は附加荷重に耐えられる。

参考文献

- (1) U-Mo Fuels Handbook :Argonne
- (2) 京都大学複合原子力科学研究所の原子炉施設[KUCA]に係る使用前検査
(ポリエチレン反射材の製作) 使用前検査記録 (使用前検査申請番号 : 19 京大施環化第 2 3
6 号)
- (3) 理科年表平成 17 年 : 丸善株式会社
- (4) [redacted]

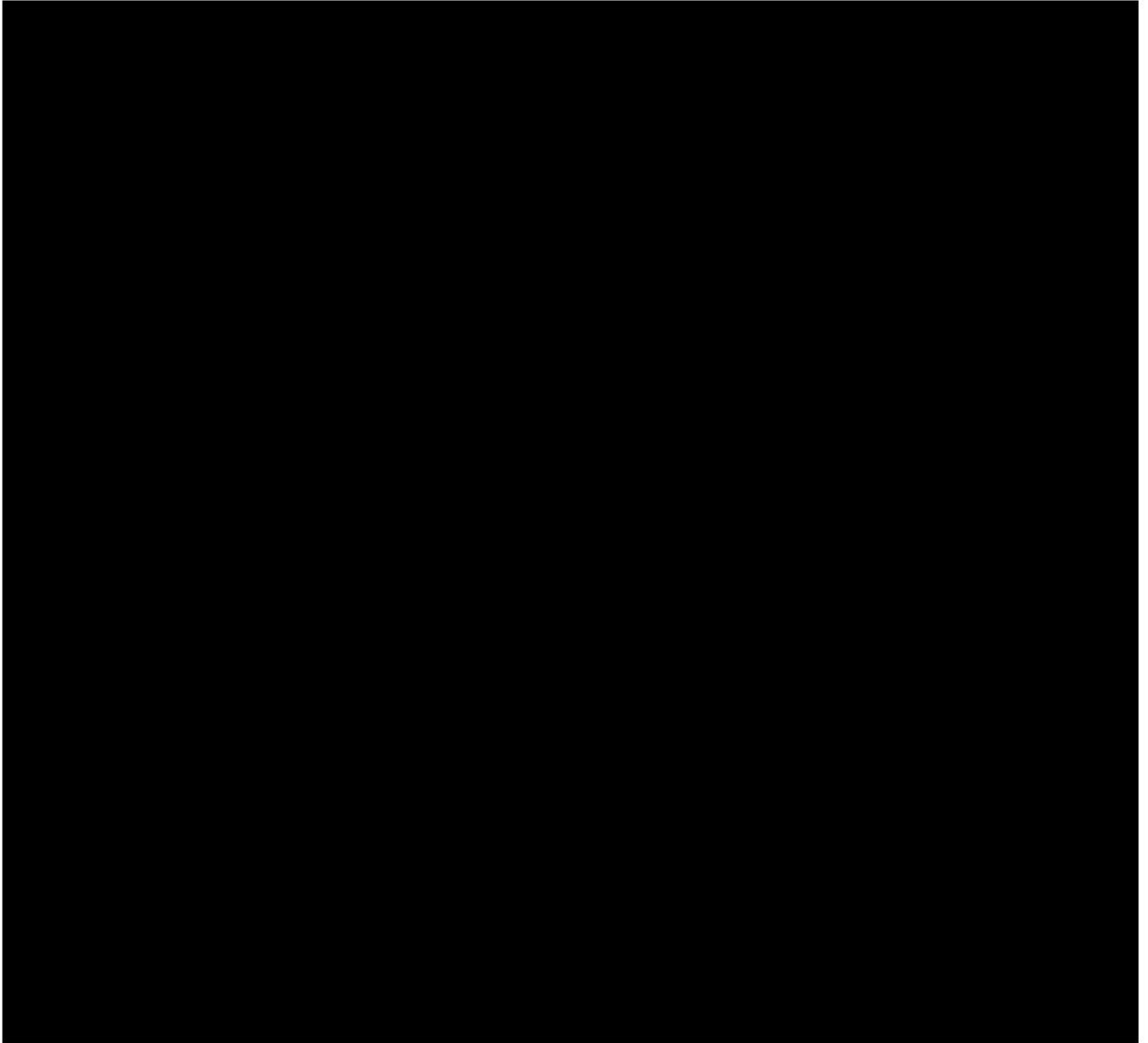


図1 燃料要素 (単位:mm)



図2 燃料要素構造 (断面図)