

評価計算書

- A. 軽水減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書 2
- B. 軽水減速炉心用燃料要素の附加荷重に関する評価計算書 5
- C. 固体減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書 9
- D. 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 13
- E. 燃料要素貯蔵設備の未臨界性に関する評価計算書 16
- F. 燃料要素設工認申請における最大温度上昇に関する評価計算書 25

A. 軽水減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書

本計算書では、軽水減速炉心用燃料要素の緒特性のうち、圧力、温度、放射線に関する物理的及び化学的性質について説明する。なお、圧力に関すること以外は、原子炉設置変更承認に関する審査において確認された。

1. ウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料の概要

軽水減速炉心では、京都大学研究用原子炉KUR、日本原子力研究開発機構のJRR-3などの研究用原子炉で使用されているものと同じウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料 (U_3Si_2-Al) を使用する。形状は、現在KUCAの軽水減速炉心で使用している燃料要素（標準型燃料板）と同じで、 U_3Si_2-Al の燃料ミート部をKURと同じ[]のアルミニウムで被覆した構造をしている。燃料ミート部のU密度は、JRR-3と同じ[]である。

ウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料は、これまでに世界各国の多くの研究用原子炉において使用実績があり、高い燃焼度まで使用することができることが示されている（KURでは最大燃焼度35%）。

なお、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[]を使用する。KUCAでは[]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。

2. 圧力について

申請書本文に最高使用圧力が常圧と記載されている。また、下記に示すとおり、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時における温度変化の最大値が2℃のため、温度変化に伴う圧力の影響はない。なお、設置変更承認申請書の添付10の10-3-1には、設計基準事故として、「反応度の異常な投入」と「環境への放射性物質の異常な放出」を想定しているが、反応度の異常な投入となる可能性は極めて低いことから、温度上昇を伴う設計基準事故は発生しない（「環境への放射性物質の異常な放出」については、温度上昇には関連しない）。そのため、設計基準事故に温度上昇を伴うシナリオは除外されているため、温度上昇については、過渡変化時における評価が最大値となる。

3. 温度について

3.1. 熱応力

燃料要素の被覆材には、アルミニウム合金である[]を使用する。燃料要素の中心温度が高く被覆材表面温度が低い場合には燃料要素には熱応力が生じる可能性があるが、設置申請書の添付書類十に記載された運転時の異常な過渡変化の解析の結果によると、燃料要素の中心の温度上昇は最大でも2℃以下と非常に低い値であるため、燃料要素に異常をもたらすような熱応力は発生しない。

3.2. ブリスタ

ウランシリサイド燃料のブリスタ発生温度に関しては、米国 ORR 炉 (30MW) において照射したフルサイズ燃料要素を照射後に昇温してブリスタ発生温度を確かめた結果がある。そのデータによると、ブリスタ発生温度は 550°C 以上である 1)。また、ミニプレートによる他の実験結果をも参考にして、ブリスタ発生の下限温度を 515°C と評価している実験結果もある 2)。そのため、KUCA では、ブリスタ発生を防止するため、運転時の異常な過渡変化が発生した場合においても燃料最高温度は 400°C を超えないこととしている。

設置申請書の添付書類十に記載された解析の結果によると、燃料要素の中心の温度上昇は最大でも 2°C 以下と非常に低い値であるため、ブリスタが発生するおそれはない。

4. 放射線について

4.1. 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) 及び設工認申請書に記載した以下の値から、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 :	██████████ (設置申請書 添付書類八)
ウラン密度 :	██████████ (設工認申請書)
濃縮度 :	██████████ (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、

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

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

となる。一方、ウラン体積は、

$$\text{ウラン体積 : } (\text{██████████} (\text{g}) \div \text{██████████}) \div \text{██████████}$$

であるので、 F_d は、

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

となる。スウェリングによる体積増加率 dV/V は、 F_d に対して良い線形性を示すことが知

られており、 $F_d=1\times 10^{21}$ (fission/cm³)に対して、 dV/V は6.2%であることが報告されている
1)。従って、 dV/V は次式によって計算される。

$$dV/V=6.2\times 10^{-21}\cdot F_d$$

審査会合資料 p9 で参照

以上より、照射に伴うスウェリング量は無視することができるほど小さいことがわかる。すなわち、核分裂で生成したFPは燃板の形状に影響を与えることなく内部に保持されるといえる。

参考文献

- 1) U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Safety Evaluation Report related to the Evaluation of Low-Enriched Uranium Silicide-Aluminum Dispersion Fuel for Use in Non-Power Reactors," NYREG-1313 (1988).
- 2) G. H. Hansen et al., "ATR-ETR Rates of Oxide Film Formation on Alminum Fuel Plates," ANS Transaction, Vol.18, p.127 (1974).

B. 軽水減速炉心用燃料要素の附加荷重に関する評価計算書

1. 評価に関する設計条件

当該燃料要素は熱間圧延加工によりアルミニウム製板でウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料のコンパクトを挟み込んだ構造である。(図1)

当該燃料要素は標準型燃料板支持フレームに収納されて炉心格子板に固定され、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

燃料要素の下面に対して想定される附加荷重は炉心タンクに給水される軽水による水頭圧である。このため、燃料要素を標準型燃料板支持フレームに収納して炉心格子板に固定した後、炉心タンクへ軽水を炉心タンク構造上の最高水位(1600 mm)まで給水した際の燃料要素の最下部の面に加わる応力を計算する。

(2) 自重の評価

燃料要素を標準型燃料板支持フレームに収納して炉心格子板に固定した際に燃料要素底面に加わる荷重を計算する。また、荷重は、燃料板支持フレーム下部の[]のアルミ燃料支持部(図3、Pの矢印の箇所)と接触する燃料要素底面に作用すると考えられる。

2. 附加荷重に対する燃料要素の強度

(1) 燃料要素に加わる水圧

「図2 炉心タンク構造」より、燃料要素に加わる応力Paは、 $Pa=1000 \text{ kg/m}^3$ ⁽¹⁾(水の密度) $\times 9.8 \text{ m/s}^2$ (重力加速度) $\times 0.9 \text{ m}$ ⁽²⁾(高さ) $=8820$ 、 $Pa=8820 \text{ N/m}^2=8.8 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ (水の密度は常温での最大値は 0.9997 g/cm^3 であるが、ここでは安全側に 1.0 g/cm^3 とする)(高さは燃料要素下端位置である水位700 mm⁽²⁾から最高水位1600 mmまでの高さ)

(2) まとめ

63.7 N/mm^2 ⁽³⁾(燃料被覆耐力) $> 8.8 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$ (附加荷重)であるため、燃料要素は、附加荷重に耐えられる。

3. 自重に対する燃料要素の強度

(1) 燃料芯材部(ウランシリサイドコンパクト)

1) 体積

「図1 燃料要素構造」から求める。
[]

2) 密度

ウランシリサイド分散型燃料の主成分は U_3Si_2 であるが、保守的に金属ウランの密度である 18.95 g/cm^3 ⁽¹⁾を使用する。

3) 質量

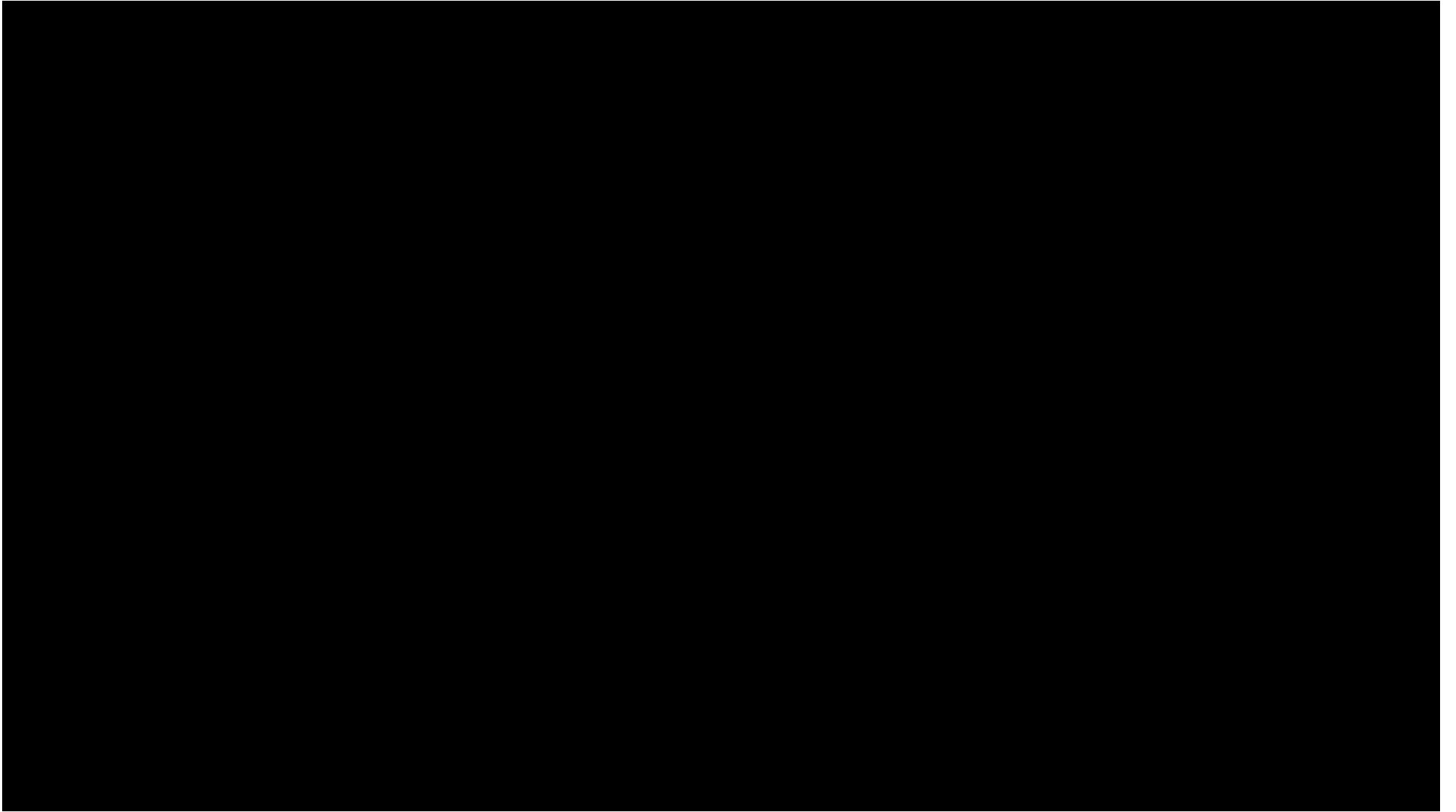


图 1 燃料要素构造 (单位 : mm)

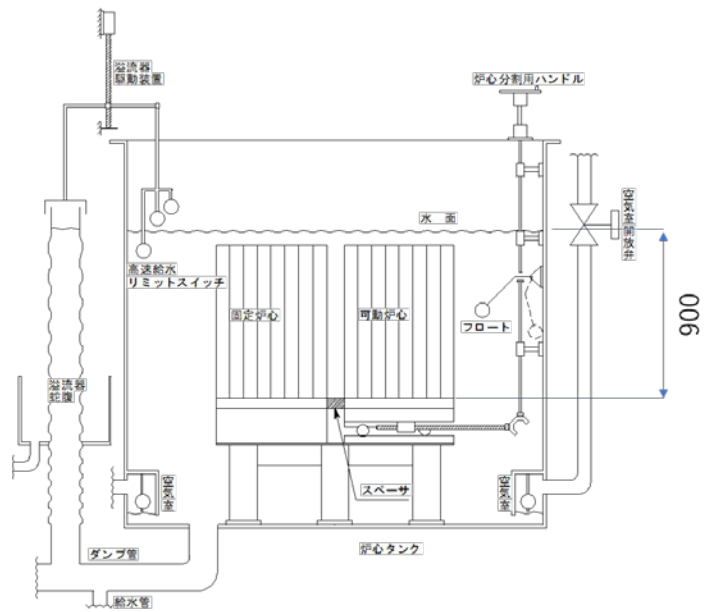


図2 炉心タンク構造 (単位: mm)

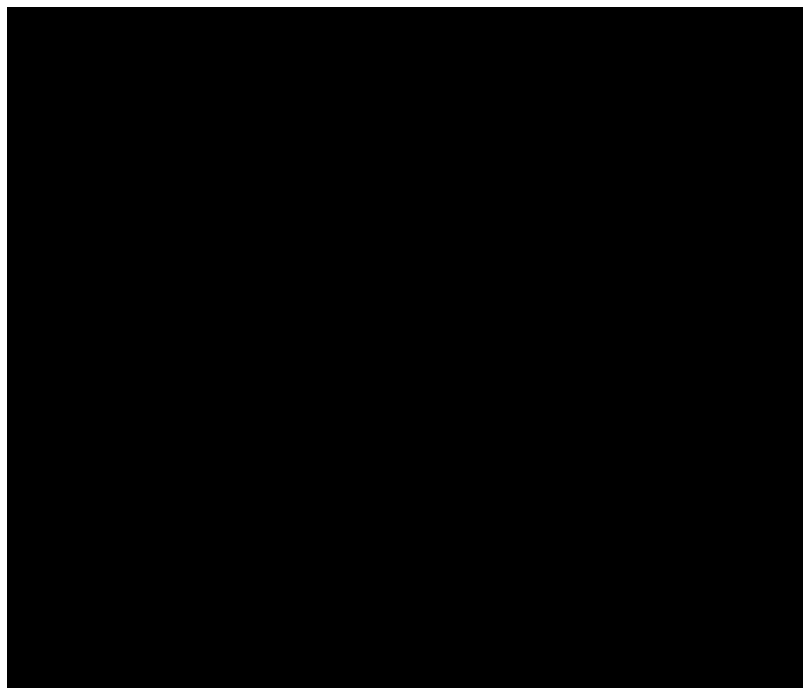


図3 標準型燃料板支持フレーム
(青色の箇所がアルミ燃料支持部)

C. 固体減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書

本計算書では、固体減速炉心用燃料要素の緒特性のうち、圧力、温度、放射線に関する物理的及び化学的性質について説明する。なお、圧力に関すること以外は、原子炉設置変更承認に関する審査において確認された。

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) を製作する。

なお、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 [] を使用する。KUCA 軽水減速架台では [] 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。

また、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/mm² 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 [] と同等の降伏点であるとしても耐力 (0.2%) は、25 N/mm² 以上 [] 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。

2. 圧力について

申請書本文に最高使用圧力が常圧と記載されている。また、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時における温度変化の最大値が 49.3℃のため、温度変化に伴う圧力の影響はない。なお、設置変更承認申請書の添付 10 の 10-3-1 には、設計基準事故として、「反応度の異常な投入」と「環境への放射性物質の異常な放出」を想定しているが、反応度の異常な投入となる可能性は極めて低いことから、温度上昇を伴う設計基準事故は発生しない（「環境への放射性物質の異常な放出」については、温度上昇には関連しない）。そのため、設計基準事故に温度上昇を伴うシナリオは除外されているため、温度上昇については、過渡変化時における評価が最大値となる。

3. 温度について

3.1. ブリスタ

今回製作する燃料要素は 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℃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℃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℃に安全余裕を見た温度である約 400℃）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℃以下であること、また U-235 の燃焼度としては最大でも約 $2.5 \times 10^{-4}\%$ 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への心配は無いと考えられる。

4. 放射線について

4.1. 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：	[REDACTED]（設置申請書 添付書類八）
ウラン密度：	[REDACTED]（U-Mo ハンドブック） （保守的に U-5Mo の値を採用）
濃縮度：	[REDACTED]（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： $1 \times 10^3 (\text{Wh}/\text{年}) \times 3600 (\text{s}/\text{h}) \times 50 (\text{年}) = 1.80 \times 10^8 (\text{J})$

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

となる。一方、ウラン体積は、

ウラン体積： $\text{[redacted]} (\text{g}) \div \text{[redacted]} (\text{cm}^3) = \text{[redacted]}$

であるので、 F_d は、

$F_d = (5.63 \times 10^{18}) (\text{fissions}) \div \text{[redacted]} (\text{cm}^3) = \text{[redacted]} \text{ fission}/\text{cm}^3$

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。

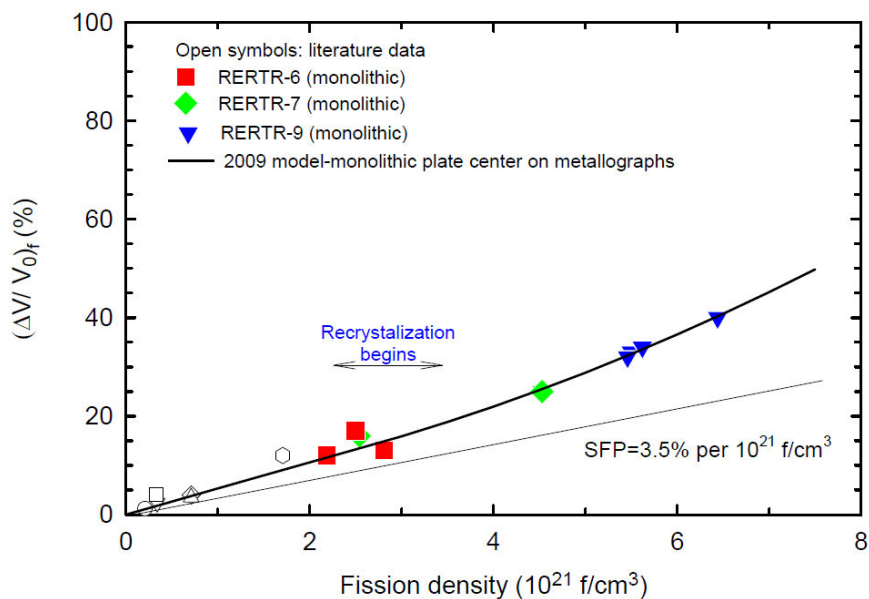


図 1 燃料スウェリングの実験値

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)。

$$(\Delta V/V)_{\text{total}}(\%) = (\Delta V/V)_{\text{solid swelling}} + (\Delta V/V)_{\text{gas bubble swelling}}$$

$$(\Delta V/V)_{\text{solid swelling}}(\%) = 3.5 \times 10^{-21} \cdot F_d$$

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

審査会合資料 p9 で参照

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 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。

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).

D. 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

2. 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■■■■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。

3. 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）

4) 体積

「図1 燃料要素」から求める。
■■■■

5) 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）

6) 質量

■■■■ $\times 18.4 \text{ g/cm}^3 =$ ■■■■

(2) 燃料要素被覆

4) 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
■■■■

・ 燃料要素被覆体積

- 5) 密度
 2.7 g/cm^3 ⁽³⁾ (アルミニウム) を使用する。
- 6) 質量
 $\text{[redacted]} \times 2.7 \text{ g/}$
- (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
 $\text{[redacted]} 0.96 \text{ g/}$
- (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 [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]
- [redacted]
- [redacted]
- (6) まとめ
 63.7 N/mm^2 ⁽⁴⁾ (燃料被覆耐力 [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。

審査会合資料 p12 で参照

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]

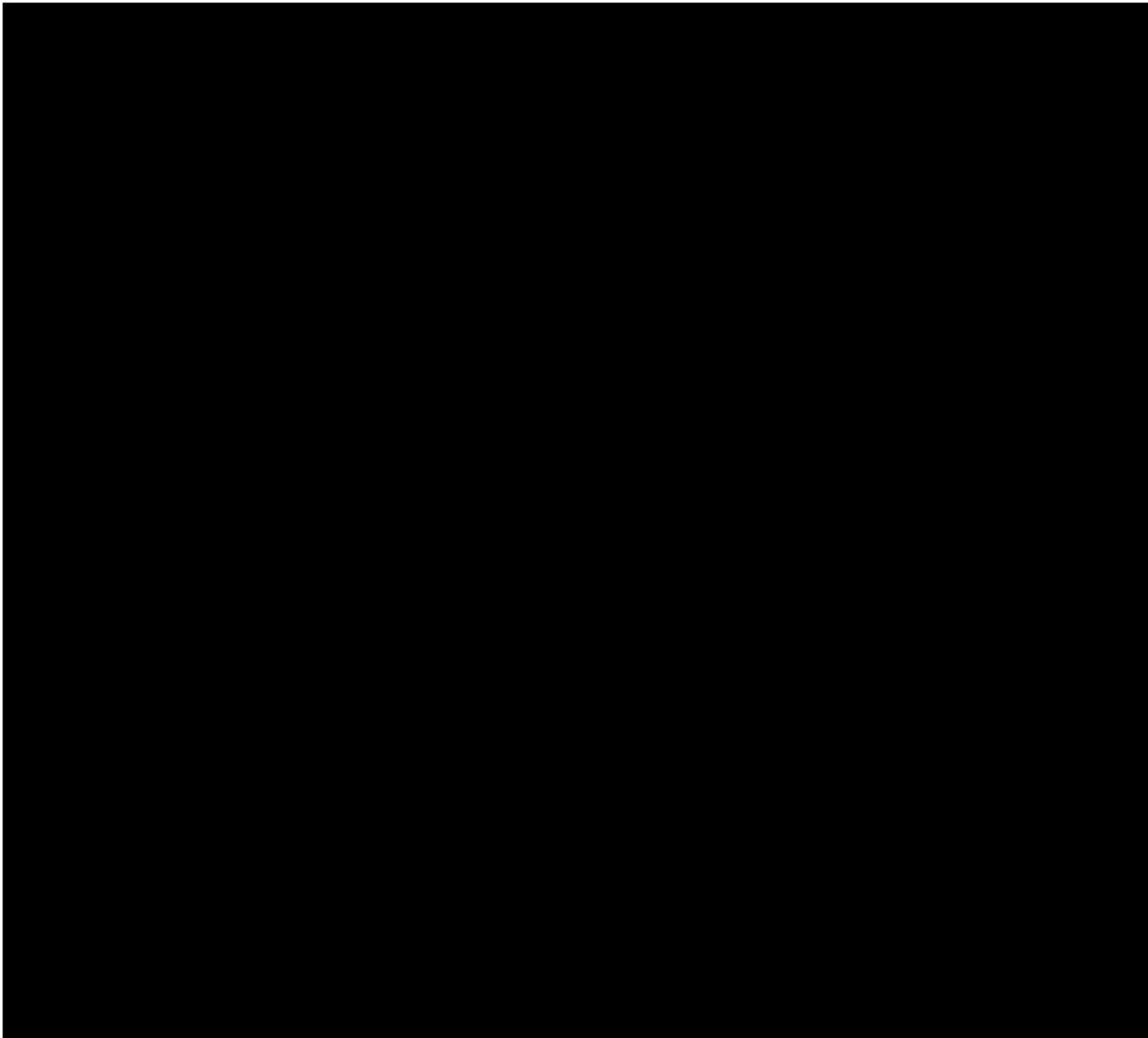


图 1 燃料要素 (单位:mm)



图 2 燃料要素构造 (断面图)

E. 燃料要素貯蔵設備の未臨界性に関する評価計算書

本申請によって追加される燃料要素は、過去に所有した高濃縮燃料要素と同様、浸水のおそれのない臨界集合体棟の2階に■■■■■■■■■■を設け、壁面に■■■■■■■■■■の棚をもつ貯蔵棚（最大で9■■■■■■■■■■まで拡張することが可能）が設置されており、これにバードケージに収納して貯蔵する（図1、図2参照）。

燃料棚は、KUCA建設時に製作されたもので、昭和48年9月の設工認申請書に、以下のように記載されている。



詳細な寸法については、図3及び図4に示す（固体用棚は■■■■■■■■■■トを使用、軽水用棚は■■■■■■■■■■を使用）。

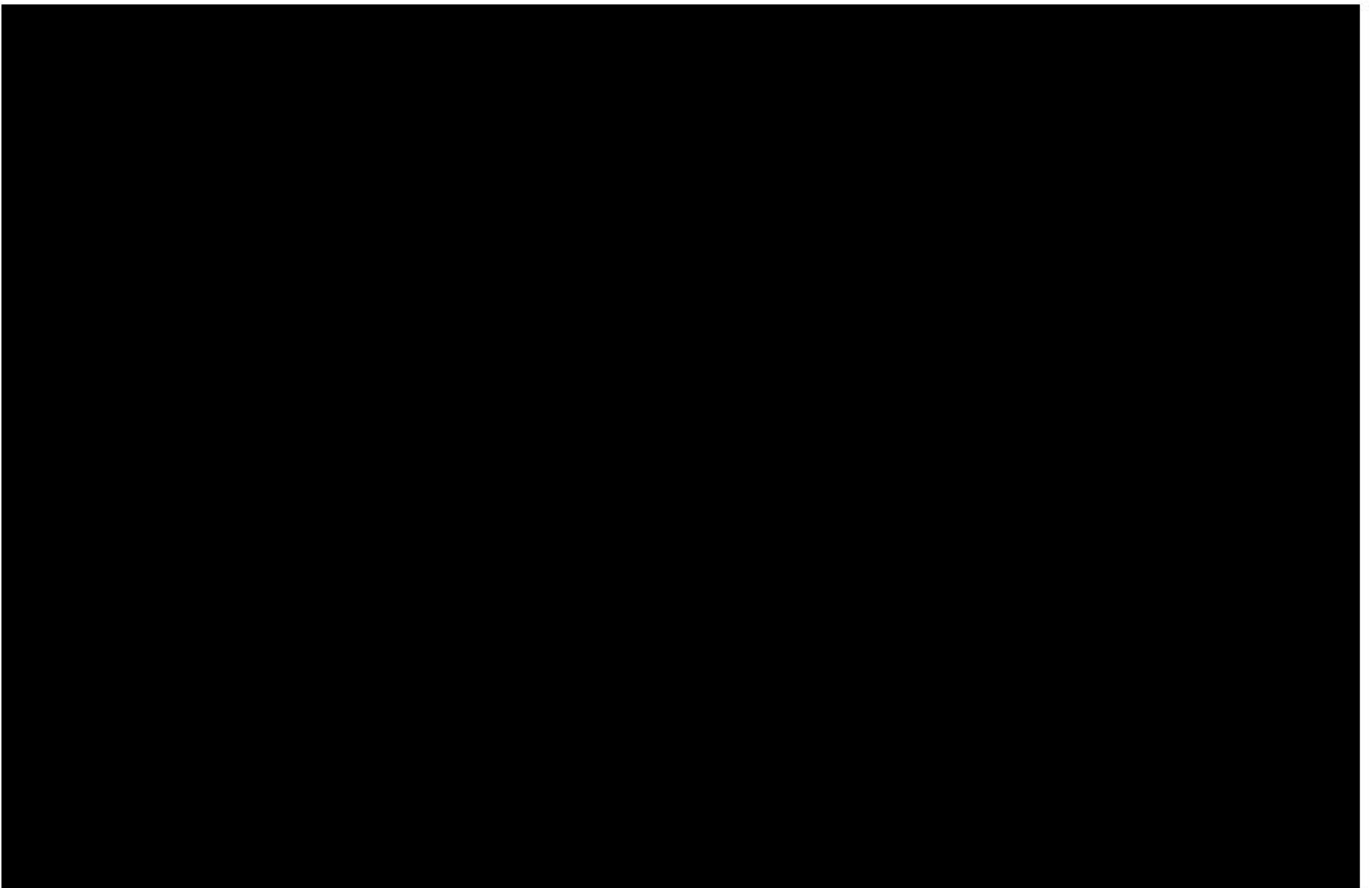


図1 臨界集合体棟 2階平面図

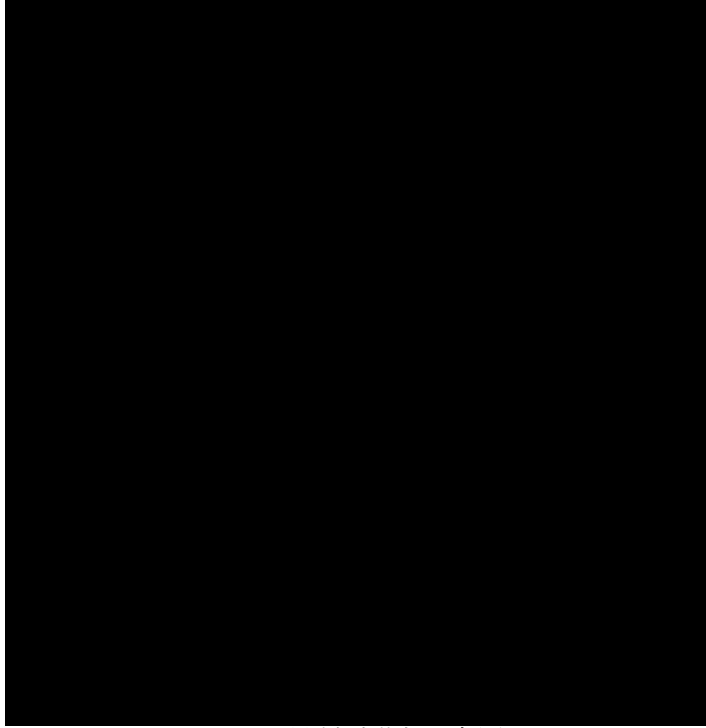


図 2 燃料貯蔵棚の概略図



図 3 固体減速炉心用燃料貯蔵棚

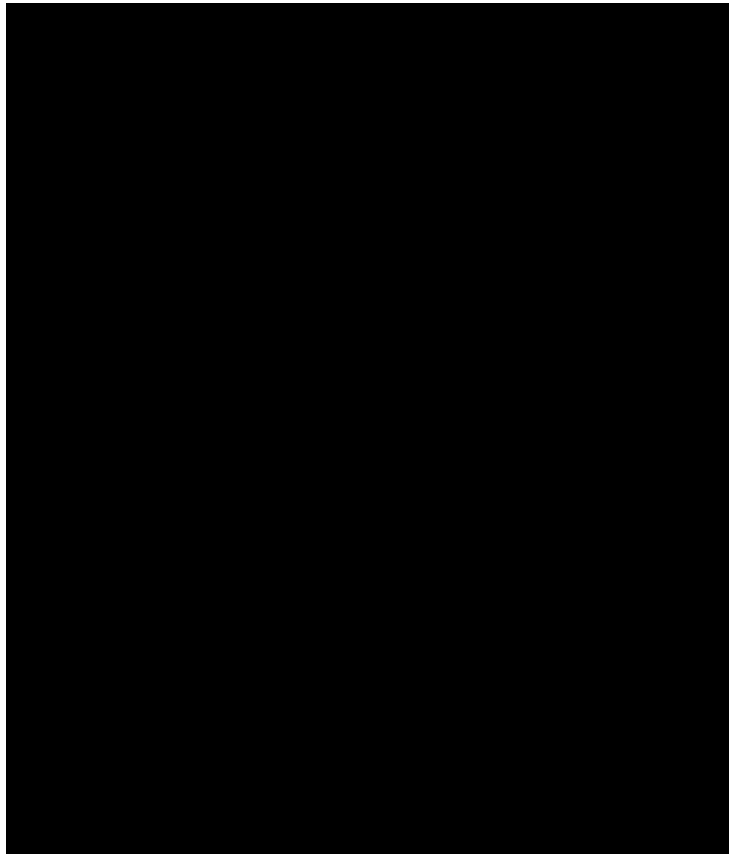


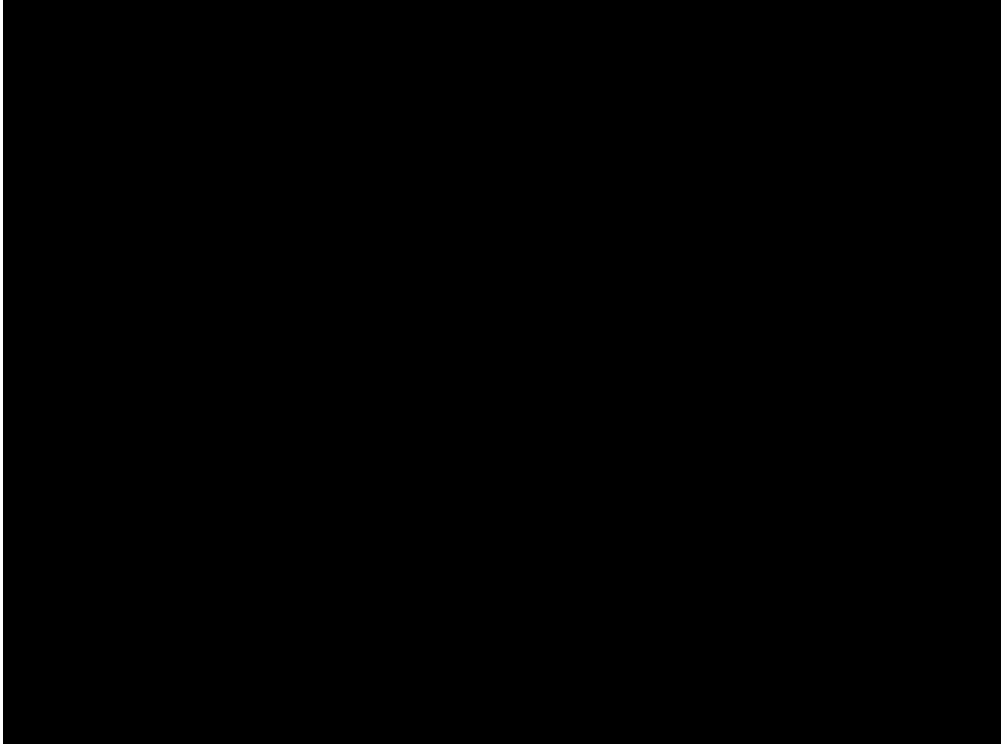
図4 軽水減速炉心用燃料貯蔵棚

使用前事業者検査では、外観検査（目視）、寸法検査（測定）、据付検査（目視+水平加速度 0.3g に相当する横向き荷重をかけてたわみ量を測定）を行った。燃料貯蔵棚は■■■■の枠組を組み合わせて作られており、燃料室床面の埋め込みボルトによって固定され、側壁にも埋め込みボルトによって固定されている。各ユニットの前面方向、横方向の枠にはバーが設置されており、バードケージが前面から落ちたり横ユニットに移動することを防ぐ構造となっている。

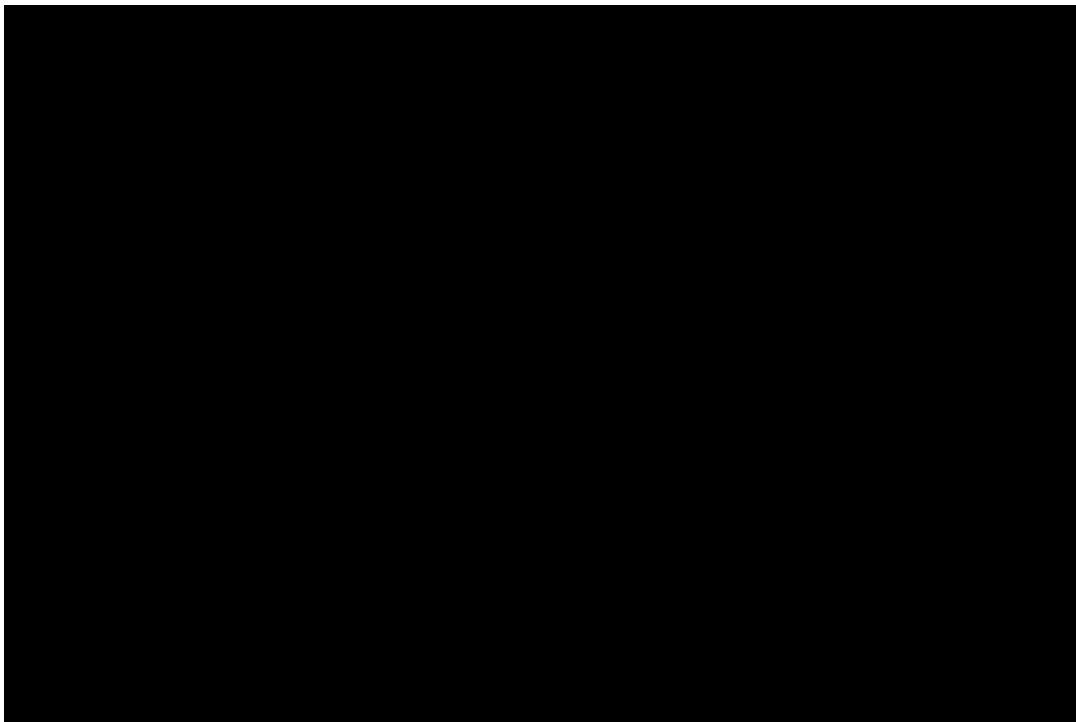
図5 にバードケージの概略図を、表1 にバードケージの仕様を示す。バードケージの材質は■■■■ ■■■■ ■■■■ ■■■■である（設工認申請書には記載無し）。

表1 バードケージの仕様

	固体減速架台用	軽水減速架台用
サイズ (幅×高さ×奥行)	■■■■	
材料		
収納燃料板枚数 (制限値) HEU		
収納燃料板枚数 (制限値) LEU		



(a) 固体減速炉心用燃料板のバードケージ



(b) 軽水減速炉心用燃料板のバードケージ

図5 バードケージ概念図 (単位 : mm)

(数字はバードケージの外寸、内部ボックスは燃料板の入るボックスの内寸)

固体減速炉心用の高濃縮及び追加燃料要素は、U235 量でそれぞれ である。ユニット当たりの最大量は であるので、 が必要となる。

一方、軽水減速炉心用の現有及び追加燃料要素は、U235 量でそれぞれ である。従って) のバードケージが必要となる。

以上より、すべての燃料要素を収納するためには、合計で が必要であるが、燃料室に既設の貯蔵棚は があるため、十分な貯蔵容量を有する。

なお、現在、固体減速炉心用のバードケージ (図 5(a)参照) は、 所有している 。一方、軽水減速炉心用のバードケージ (図 5(b)参照) は、1 有している)。不足する場合は、必要に応じて製作する。

2.2 臨界管理について

バードケージを収納する燃料棚は、バードケージ毎に十分な隔離距離を設け、臨界に達するおそれのない配置となっている。また、バードケージは、燃料要素を物理的に収納可能な最大枚数まで燃料板を収納し、かつ、その状態のバードケージが完全に水没した状態で三次元的に無限に隣接した場合であっても、臨界に達するおそれはない設計となっている。

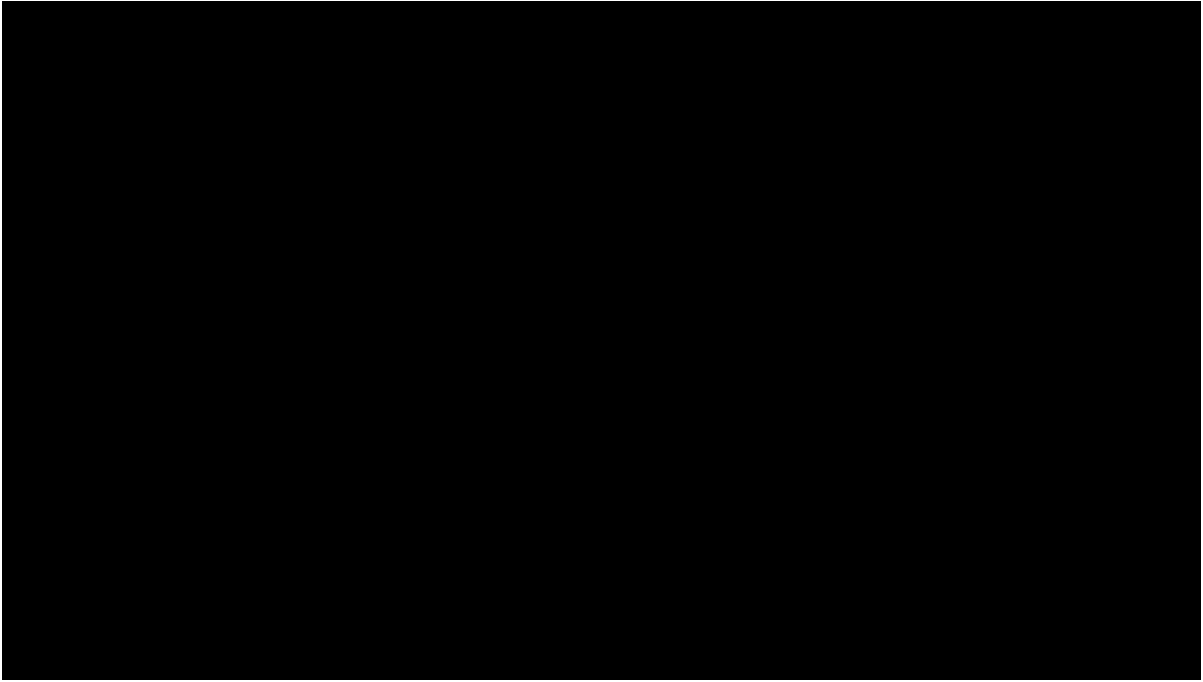
本申請で追加する燃料要素について、バードケージに最大数収納した状態で周囲を軽水で満たしてそれらを隣接させ、バードケージ内部ボックスの周囲の 反射境界条件を用いた場合の実効増倍率を MCNP6 (version 1.0) +JENDL-4.0 により計算した。その結果は、以下のとおりである。

審査会合資料 p37 で参照

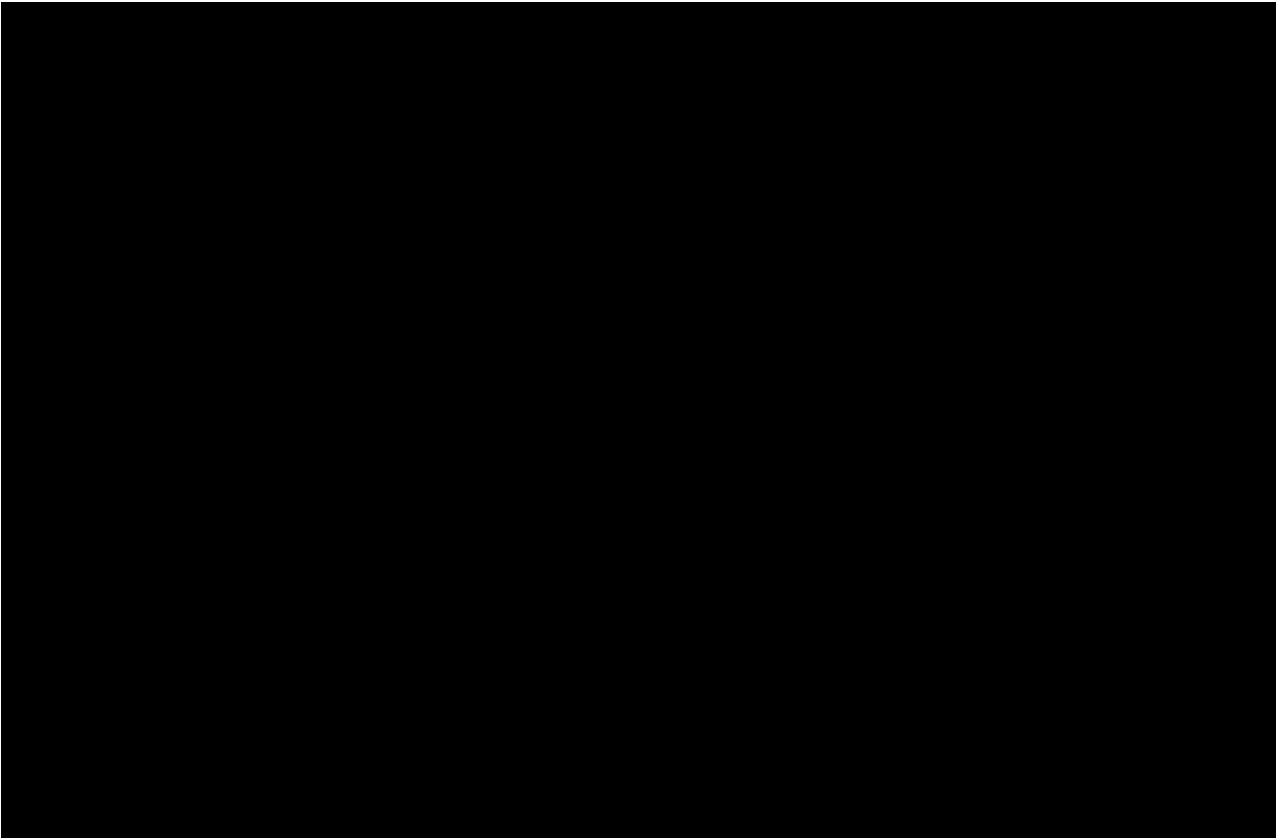
固体減速炉心用燃料要素： 0.46645 ± 0.00034

軽水減速炉心用燃料要素： 0.52072 ± 0.00036

実効増倍率は、0.95 より十分に小さな値となっており、本バードケージ及びそれを収納する燃料棚は、臨界に達するおそれのない設計となっている。なお、固体及び軽水減速炉心用燃料要素の概略図を図 6 に示す。また、計算体系の概略図を図 7 に示す。固体減速炉心用の計算体系は 立方の水の中心に、燃料角板 を積み重ねたスタック を束ねて設置したものとなっている。一方、軽水減速炉心用の計算体系は の水の中心に標準型燃料板 を並べたものを 2 段積み重ねたものとなっている。さらに、表 2~表 5 に燃料ミート部及び被覆の原子個数密度を示す。

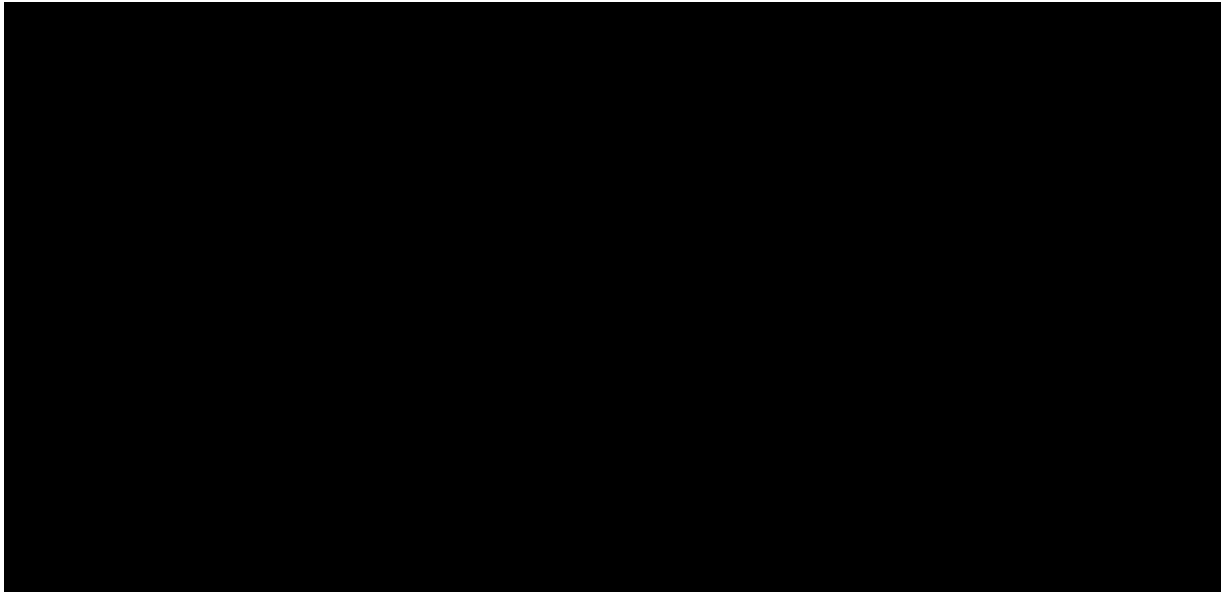


(a) 固体減速炉心用

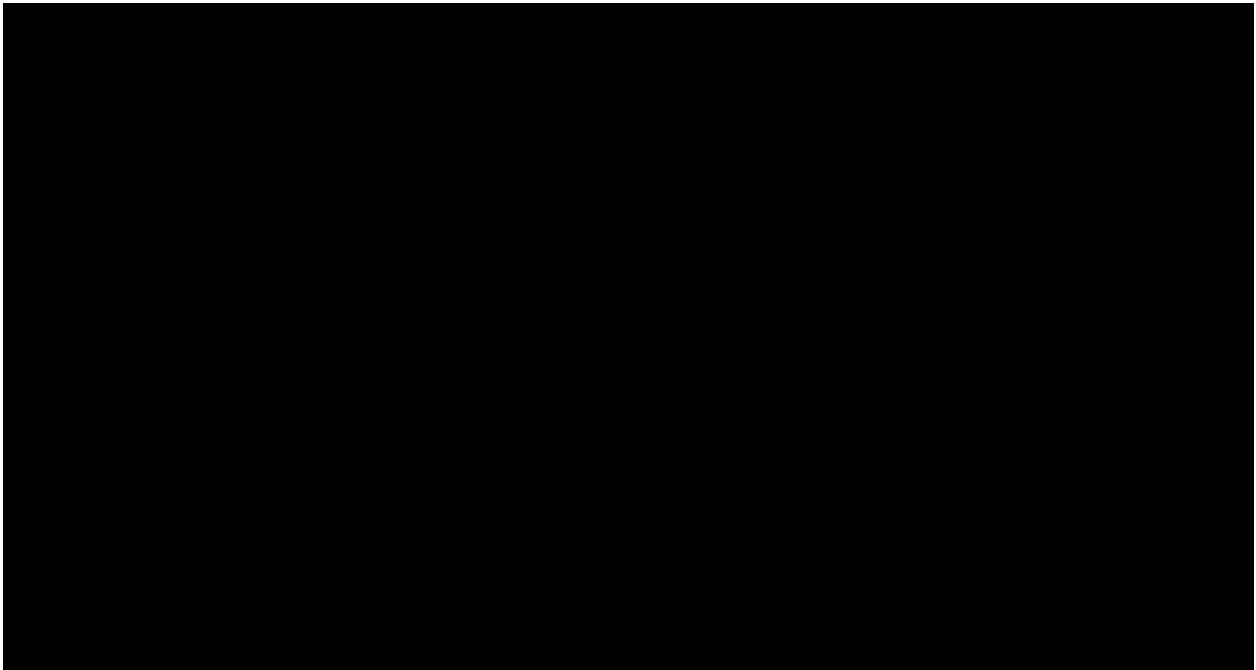


(b) 軽水減速炉心用

図 6 追加する燃料要素の概念図



(a) 固体減速炉心用



(b) 軽水減速炉心用

図7 計算体系の概念図

表 2 固体減速炉心用燃料角板 燃料コンパクト 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■



表 3 固体減速炉心用燃料角板 被覆材 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■

表 4 軽水減速炉心用燃料板 燃料ミート部 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■
■	■



表 5 軽水減速炉心用標準型燃料板 アルミニウム被覆材 原子個数密度.

Isotope	Number Density ($\times 10^{24}$ 1/cm ³)
■	■



F. 燃料要素設工認申請における最大温度上昇に関する評価計算書

低濃縮炉心における最大温度上昇を与える条件は、固体減速炉心において中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用する場合である。以下に、そのシナリオに従った解析を示す。

シナリオは以下のとおりである。

- (1) 固体減速炉心における過剰反応度は、制限値の最大値 ($0.35\% \Delta k/k$) とし、制御棒の全反応度は、制限値の最小値 ($1.35\% \Delta k/k$)、及び中心架台落下による反応度は、制限値の最小値 ($1\% \Delta k/k$) であるとする。反応度価値の最も大きな制御棒の反応度は制限値の最大値 $0.45\% \Delta k/k$ であるとする。

- (2) $0.01W$ の臨界状態を保っており、その際の線型出力計の指示値は、100%で出力が $100W$ となるレンジであったとする。

(3) 【ケース A】

臨界状態において、パルス状中性子発生装置又は中性子発生設備の最大中性子発生量で炉心に中性子の打ち込みを開始したとする。最大中性子発生量は、パルス状中性子発生装置については $5 \times 10^{10}n/s$ 、中性子発生設備については $10^{11}n/s$ であるので、この解析では、値の大きい $10^{11}n/s$ の中性子を発生させ、その半分である $5 \times 10^{10}n/s$ が炉心に投入されるとする。

【ケース B】

炉心ごとに中性子発生量を変化させて、燃料温度が最大となる中性子発生量を求めて解析を行う。

- (4) 出力が線型出力計の指示値の 120%である $120W$ を超えたとき、スクラム信号を発するとする。ただし、指示値の 110%以上のときに作動する一せい挿入には期待しないものとし、制御棒の最大の反応度を持つ 1 本が挿入できないとする。ただし、線型出力計の指示値が 120%に至らない場合には、出力上昇後 1 時間 (3600 秒) を経過した段階で、運転員が手動スクラムボタンを押してスクラム信号を発生させるとする。
- (5) スクラム信号が発生した 1 秒後に、制御棒挿入によりステップ状の負の反応度が加わるとする。中心架台は作動しないとする。

解析結果

【ケース A】

解析結果を第 1 表に示す。線型出力計の指示値が 120%を超えてスクラム信号が発生することにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $-0.00-(1.35-0.35-0.45)=-0.55 \text{ \% } \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。

最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は約 0.15℃である。出力及び温度変化を第 1 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量の変化は、最大でも+25%以下であり、判断基準を満足している。

【ケース B】

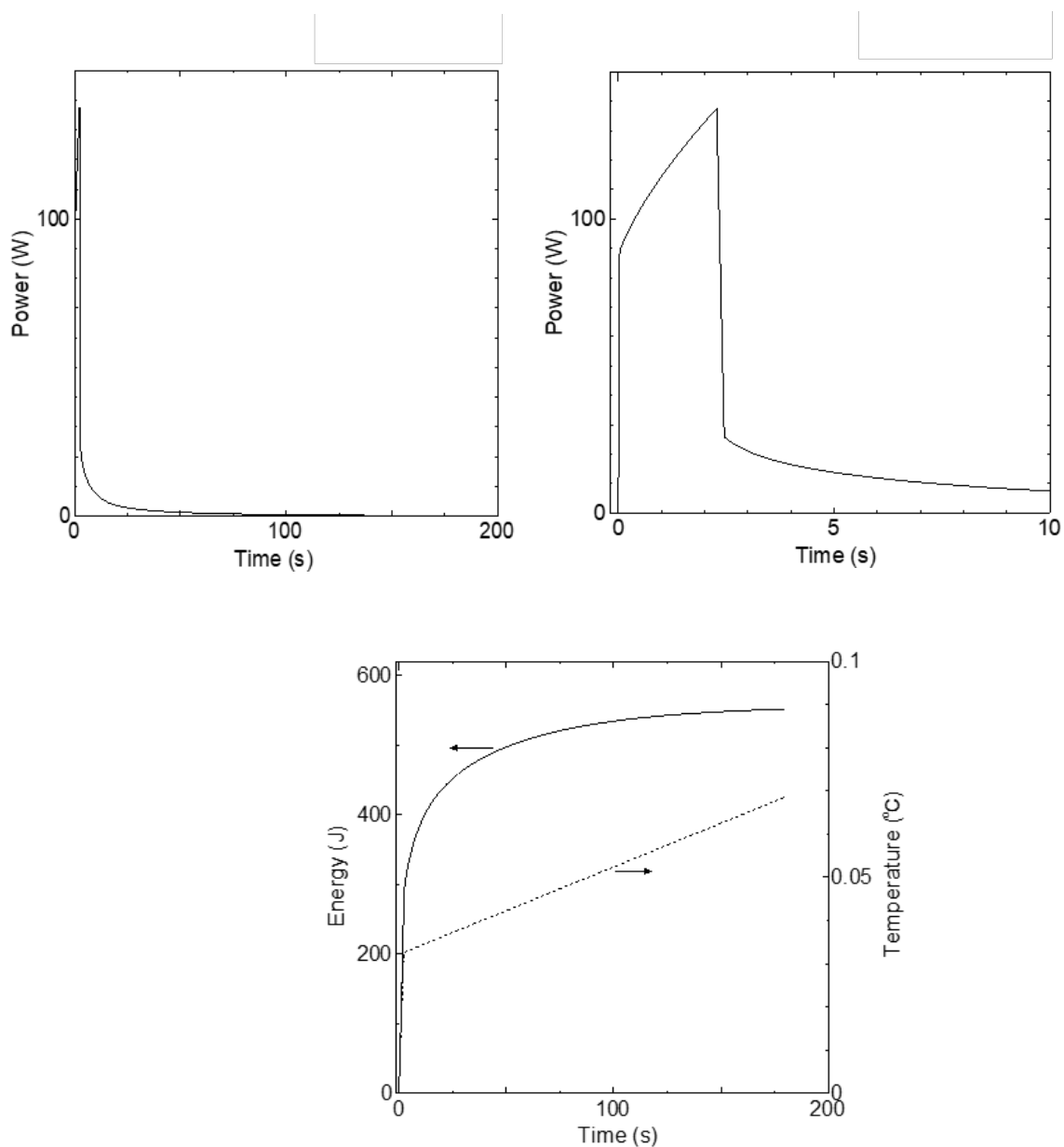
解析結果を第 2 表及び第 3 表に示す。最も燃料温度が高くなるのは L5.5P-30 炉心で、中性子発生量がケース A の 0.071 倍となったとき、初期温度を 25℃としたとき、燃料温度上昇は、約 49.3℃である。この場合、出力が上昇するにつれて燃料温度が上昇し、最大出力が 120W より少しだけ低くなり、その後、燃料の温度上昇に伴う負の反応度印加により出力が低下し、最終的には、3600 秒を経過したところで運転員が手動停止させるというケースである。手動スクラムにより最大反応度値を持つ制御棒 1 本以外の制御棒はすべて炉心に挿入されるとするので、「温度上昇による反応度－(全制御棒反応度－既に挿入されていた反応度－最大 1 本の反応度)」の未臨界状態となる。すなわち、「 $-0.2-(1.35-0.35-0.45)=-0.75 \text{ \% } \Delta k/k$ 」の未臨界状態となる。これより中性子発生量が少し増加して、ケース A の 0.072 倍となると、最大出力は 120W を超えてスクラムするため、積算出力は低くなる。出力及び温度変化を第 2 図に示す。減速材の温度上昇量は、それ以下の値となるため、運転時の異常な過渡変化に対する判断基準を満足している。また、各パラメータの誤差を考慮したときの燃料温度上昇量は、上記の結果より小さくなる。

第1表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において
中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース A）

炉心名称	120W 超までの時間 (s)	最大出力 (W)	0.1W までの時間 (s)	積算出力 (J)	温度上昇 ^a (°C)	温度上昇 ^b (°C)
L5. 5P-50	1. 3	137. 6	179. 3	$5. 31 \times 10^2$	$5. 89 \times 10^{-2}$	$1. 35 \times 10^{-1}$
L5. 5P-40	1. 3	137. 6	179. 2	$5. 31 \times 10^2$	$6. 42 \times 10^{-2}$	$1. 48 \times 10^{-1}$
L5. 5P-30	1. 3	137. 6	179. 2	$5. 31 \times 10^2$	$6. 60 \times 10^{-2}$	$1. 51 \times 10^{-1}$
L4P-50	1. 4	137. 2	182. 1	$5. 47 \times 10^2$	$5. 37 \times 10^{-2}$	$1. 20 \times 10^{-1}$
L4P-40	1. 4	137. 0	183. 3	$5. 54 \times 10^2$	$6. 52 \times 10^{-2}$	$1. 43 \times 10^{-1}$
L4P-30	1. 4	137. 0	183. 3	$5. 54 \times 10^2$	$6. 91 \times 10^{-2}$	$1. 51 \times 10^{-1}$
L3P-50	1. 4	136. 8	184. 8	$5. 63 \times 10^2$	$5. 15 \times 10^{-2}$	$1. 09 \times 10^{-1}$
L3P-40	1. 4	136. 7	185. 5	$5. 67 \times 10^2$	$5. 73 \times 10^{-2}$	$1. 23 \times 10^{-1}$
L3P-30	1. 4	136. 8	184. 8	$5. 63 \times 10^2$	$6. 25 \times 10^{-2}$	$1. 30 \times 10^{-1}$
L2P-50	1. 5	136. 6	186. 4	$5. 72 \times 10^2$	$3. 87 \times 10^{-2}$	$9. 92 \times 10^{-2}$
L2P-40	1. 5	136. 4	187. 3	$5. 78 \times 10^2$	$4. 59 \times 10^{-2}$	$1. 01 \times 10^{-1}$
L2P-30	1. 5	136. 5	186. 7	$5. 74 \times 10^2$	$4. 81 \times 10^{-2}$	$1. 12 \times 10^{-1}$
L1P-50	1. 5	136. 6	186. 1	$5. 70 \times 10^2$	$2. 23 \times 10^{-2}$	$7. 21 \times 10^{-2}$
L1P-40	1. 5	136. 4	187. 6	$5. 79 \times 10^2$	$2. 38 \times 10^{-2}$	$5. 98 \times 10^{-2}$
L1P-30	1. 5	136. 5	187. 3	$5. 77 \times 10^2$	$2. 49 \times 10^{-2}$	$7. 63 \times 10^{-2}$
LL1P-50	1. 4	136. 7	185. 4	$5. 66 \times 10^2$	$9. 34 \times 10^{-3}$	$3. 53 \times 10^{-2}$
LL1P-40	1. 5	136. 6	186. 3	$5. 71 \times 10^2$	$8. 45 \times 10^{-3}$	$3. 08 \times 10^{-2}$
LL1P-30	1. 5	136. 6	186. 0	$5. 70 \times 10^2$	$9. 76 \times 10^{-3}$	$3. 88 \times 10^{-2}$

a 燃料板のみの温度上昇を考慮

b 各炉心の「最大値／平均値」及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍、ただしLL1炉心についてのみ1.23倍）を掛けた値



第1図 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
(ケース A)

上図：出力変化 (スケールの違う 2 つの図)

下図：積算出力と温度変化 (実線は積算出力、点線は温度)

(固体減速炉心 (低濃縮ウラン炉心) : L5. 5P-30 炉心)

**第2表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において
中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケースB）（1/2）**

炉心名称	中性子発生量(倍率) ^a	120W超までの時間(s)	最大出力(W)	最大となる時間 ^d (s)	最大出力 ^e (W)	手動スクラム時出力 ^f (W)	0.1Wまでの時間(s)	積算出力(J)	温度上昇 ^b (°C)	温度上昇 ^c (°C)
L5.5P-5 0	0.070	—	—	355.0	119.0	23.2	3818.8	1.73×10 ⁵	1.92×10 ¹	4.39×10 ¹
	0.071	295.5	120.1	—	—	—	660.9	2.52×10 ⁴	2.80×10 ⁰	6.41×10 ⁰
L5.5P-4 0	0.072	—	—	347.1	119.7	23.1	3817.6	1.72×10 ⁵	2.08×10 ¹	4.78×10 ¹
	0.073	312.4	120.1	—	—	—	678.8	2.72×10 ⁴	3.28×10 ⁰	7.55×10 ⁰
L5.5P-3 0	0.071	—	—	352.1	119.7	23.3	3818.6	1.73×10 ⁵	2.15×10 ¹	4.93×10 ¹
	0.072	312.1	120.1	—	—	—	678.5	2.69×10 ⁴	3.34×10 ⁰	7.66×10 ⁰
L4P-50	0.065	—	—	392.3	119.9	24.2	3825.9	1.84×10 ⁵	1.80×10 ¹	4.03×10 ¹
	0.066	344.6	120.1	—	—	—	714.3	2.92×10 ⁴	2.86×10 ⁰	6.40×10 ⁰
L4P-40	0.067	—	—	380.8	119.7	23.9	3824.3	1.81×10 ⁵	2.13×10 ¹	4.67×10 ¹
	0.068	339.0	120.1	—	—	—	709.2	2.89×10 ⁴	3.40×10 ⁰	7.46×10 ⁰
L4P-30	0.067	—	—	377.8	118.9	23.6	3823.3	1.79×10 ⁵	2.24×10 ¹	4.88×10 ¹
	0.068	357.2	120.0	—	—	—	728.2	3.10×10 ⁴	3.87×10 ⁰	8.44×10 ⁰
L3P-50	0.061	—	—	420.2	118.8	24.7	3831.0	1.87×10 ⁵	1.71×10 ¹	3.64×10 ¹
	0.062	393.7	120.0	—	—	—	767.1	3.37×10 ⁴	3.08×10 ⁰	6.54×10 ⁰
L3P-40	0.060	—	—	428.5	118.9	25.0	3832.4	1.89×10 ⁵	1.91×10 ¹	4.09×10 ¹
	0.061	397.7	120.0	—	—	—	771.4	3.38×10 ⁴	3.42×10 ⁰	7.34×10 ⁰
L3P-30	0.061	—	—	423.9	119.5	25.0	3832.2	1.89×10 ⁵	2.10×10 ¹	4.36×10 ¹
	0.062	379.6	120.1	—	—	—	752.8	3.20×10 ⁴	3.55×10 ⁰	7.39×10 ⁰

- a ケースAの中性子発生量に対する倍率
- b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇
- c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍）を掛けた値
- d 出力が120Wに達しない場合に出力が最大となるまでの時間
- e 出力が120Wまで上昇しない場合の最大出力
- f 出力が120Wに達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力

**第3表 固体減速架台炉心（低濃縮ウラン炉心）において
中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用（ケース B）（2/2）**

炉心名称	中性子発生量(倍率) ^a	120W超までの時間(s)	最大出力(W)	最大となる時間 ^d (s)	最大出力 ^e (W)	手動スクラム時出力 ^f (W)	0.1Wまでの時間(s)	積算出力(J)	温度上昇 ^b (°C)	温度上昇 ^c (°C)
L2P-50	0.045	—	—	579.5	119.3	29.0	3853.6	2.12×10 ⁵	1.44×10 ¹	3.68×10 ¹
	0.046	520.3	120.0	—	—	—	898.2	4.24×10 ⁴	2.87×10 ⁰	7.35×10 ⁰
L2P-40	0.048	—	—	544.3	119.5	28.3	3850.4	2.07×10 ⁵	1.65×10 ¹	3.64×10 ¹
	0.049	488.7	120.0	—	—	—	866.5	4.00×10 ⁴	3.18×10 ⁰	7.04×10 ⁰
L2P-30	0.047	—	—	550.9	118.6	28.2	3850.3	2.07×10 ⁵	1.73×10 ¹	4.03×10 ¹
	0.048	511.5	120.0	—	—	—	889.4	4.23×10 ⁴	3.55×10 ⁰	8.23×10 ⁰
L1P-50	0.029	—	—	914.6	118.9	37.3	3882.5	2.52×10 ⁵	9.85×10 ⁰	3.19×10 ¹
	0.030	793.8	120.0	—	—	—	1175.0	6.12×10 ⁴	2.39×10 ⁰	7.74×10 ⁰
L1P-40	0.029	—	—	926.3	119.7	37.8	3884.6	2.55×10 ⁵	1.05×10 ¹	2.63×10 ¹
	0.030	784.0	120.0	—	—	—	1166.0	5.99×10 ⁴	2.46×10 ⁰	6.19×10 ⁰
L1P-30	0.028	—	—	949.5	117.8	37.7	3885.5	2.53×10 ⁵	1.09×10 ¹	3.35×10 ¹
	0.029	869.2	120.0	—	—	—	1252.7	6.83×10 ⁴	2.95×10 ⁰	9.03×10 ⁰
LL1P-50	0.014	—	—	1884.3	118.4	73.1	3945.0	3.15×10 ⁵	5.20×10 ⁰	1.96×10 ¹
	0.015	1511.7	120.0	—	—	—	1895.5	1.09×10 ⁵	1.80×10 ⁰	6.80×10 ⁰
LL1P-40	0.013	—	—	2039.1	118.3	80.4	3953.8	3.17×10 ⁵	4.69×10 ⁰	1.71×10 ¹
	0.014	1622.7	120.0	—	—	—	2007.4	1.17×10 ⁵	1.73×10 ⁰	6.29×10 ⁰
LL1P-30	0.012	—	—	2139.5	114.6	83.4	3956.8	3.09×10 ⁵	5.30×10 ⁰	2.10×10 ¹
	0.013	1873.5	120.0	—	—	—	2258.4	1.40×10 ⁵	2.39×10 ⁰	9.50×10 ⁰

a ケース A の中性子発生量に対する倍率

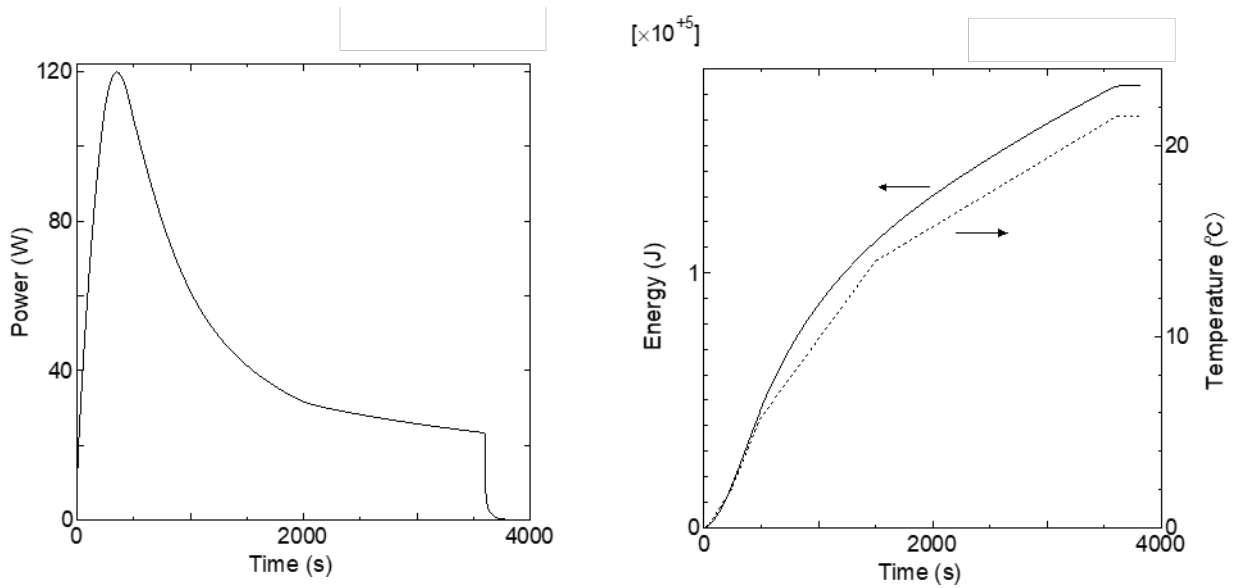
b 温度上昇が炉心全体で均一であるとしたときの温度上昇

c 各炉心の「最大値／平均値」（2.6倍）及び燃料板内の出力分布を考慮する係数（1.09倍）を掛けた値

d 出力が120Wに達しない場合に出力が最大となるまでの時間

e 出力が120Wまで上昇しない場合の最大出力

f 出力が120Wに達しない場合に手動スクラムで反応度が印加される直前での出力



第 2 図 中性子発生設備又はパルス状中性子発生装置を臨界状態において利用
(ケース B)

左図：出力変化、右図：積算出力と温度変化（実線は積算出力、点線は温度）
(固体減速炉心（低濃縮ウラン炉心）：L5. 5P-30 炉心、中性子発生量はケース A の 0. 071 倍)