

「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. 軽水減速炉心用燃料要素の緒特性に関する評価計算書
- 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

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

軽水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に関する審査において確認を頂き、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. ウランシリサイド・アルミニウム分散型燃料

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%）。

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、

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

となる。一方、ウラン体積は、

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

であるので、 F_d は、

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

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、 $F_d = 1 \times 10^{21}(\text{fission}/\text{cm}^3)$ 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。

$$dV/V = 6.2 \times 10^{-21} \cdot F_d = \text{[redacted]}(\%)$$

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。

3. 熱応力

燃料要素の被覆材には、アルミニウム合金である [redacted] [redacted] 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°C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。

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] [redacted] を使用する。KUCA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

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℃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。

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

$$\blacksquare \times 18.95 \text{ g/cm}^3 = \blacksquare$$

(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部体積を差し引くことで求める。(図 1)

$$\blacksquare$$

2) 密度

2.7 g/cm^3 ⁽¹⁾ (アルミニウム) を使用する。

3) 質量

$$\blacksquare \times 2.7 \text{ g/cm}^3 = \blacksquare$$

(3) アルミ燃料支持部と接触する燃料要素底面に加わる応力

- ・ 合計質量(\blacksquare 燃料芯材部) + \blacksquare 被覆) = \blacksquare
- ・ 応力が加わる箇所の面積 : \blacksquare (図 3)
- ・ \blacksquare

(4) まとめ

63.7 N/mm^2 ⁽³⁾ (燃料被覆材耐力) > \blacksquare (自重による) であるため、燃料要素は自重に耐えられる。

参考文献

- (1) 理科年表平成 17 年 : 丸善株式会社
- (2) 原子炉物理実験 : 京都大学学術出版会 (20106)
- (3) \blacksquare

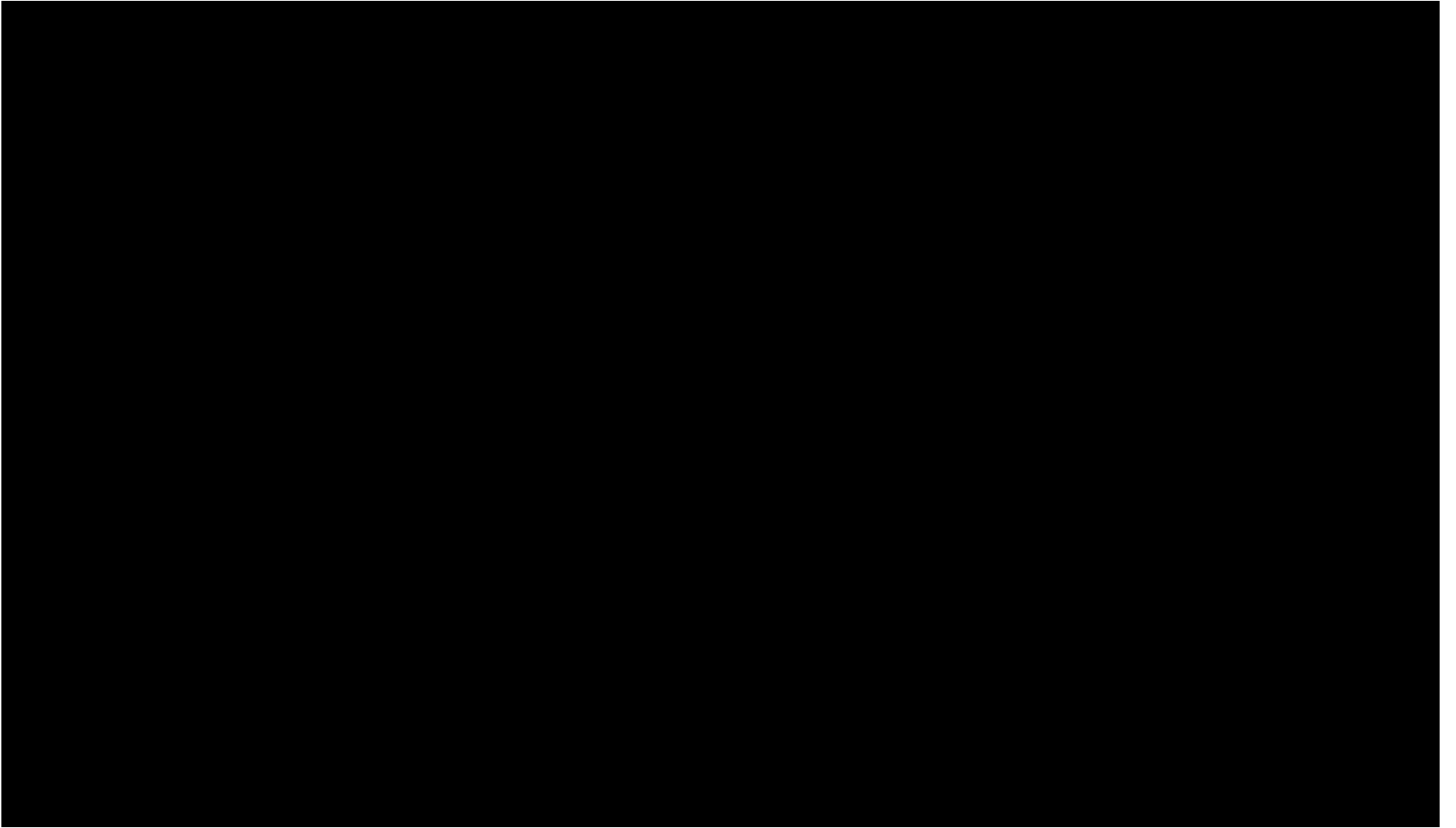


图 1 燃料要素构造 (单位: mm)

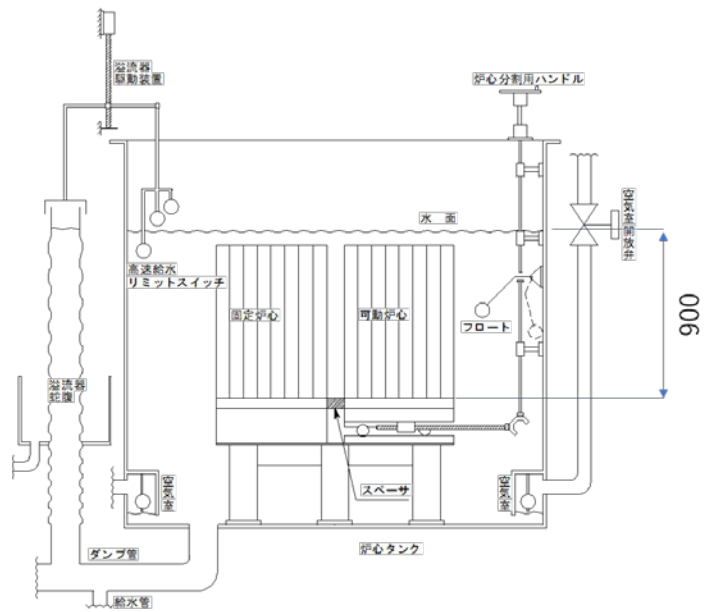


図2 炉心タンク構造 (単位: mm)

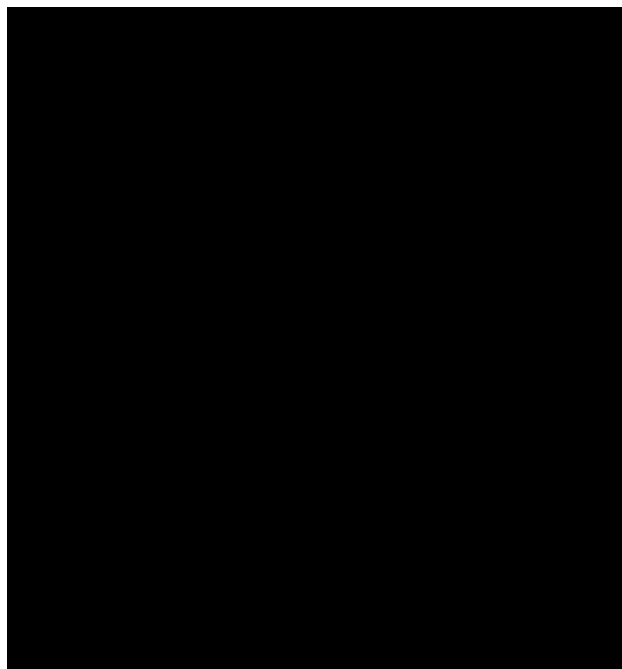


図3 標準型燃料板支持フレーム
(青色の箇所がアルミ燃料支持部)