

京都大学複合原子力科学研究所の原子炉施設  
[京都大学臨界実験装置(KUCA)]の変更に係る  
設計及び工事の計画の承認申請書

(KUCA軽水減速炉心用低濃縮燃料要素の製作)  
(KUCA固体減速炉心用低濃縮燃料要素の製作)

京都大学複合原子力科学研究所

2023年4月25日

# 前回のヒアリング(2023/4/6)における質問一覧

## 質問一覧(1/3)

No.	質問内容
①	<p>【技術基準規則第22条第2項】 技術基準規則第6条(地震による損傷の防止)を適合対象条項から除いているのであれば、技術基準規則第22条第2項「燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷に耐えられるものでなければならない。」において、地震荷重を考慮しなければならない。これを適合性の資料に加えること。</p>
②	<p>【技術基準規則第11条】 現状の適合性の資料において、燃料要素は手で扱うため保守又は修理が可能であるとの記載になっている。しかし規則の要求は、「必要な設備の機能の確認をするための試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守又は修理ができるものでなければならない。」であるため、まずは燃料要素が持つべき必要な機能とは何であるかの説明が必要である(閉じ込めとか、遮蔽とか)。その上で「試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守又は修理」に関する説明に繋げること。</p>
③	<p>【技術基準規則第21条第1項第3号】 燃料要素に影響を与える環境条件として温度上昇を挙げており、温度上昇が大きくないことから大丈夫との説明となっている。では、影響を受ける温度はどの程度なのか。それも説明すること。加えて、「その機能を発揮することができるものであること」とあるので、「その機能」とは何であるかについても説明すること。</p>

## 質問一覧(2/3)

No.	質問内容
④	<p>【技術基準規則第22条第1項】</p> <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 最大熱出力が100Wであるから放射線の影響は低いとのことであるが、説明が不足している。最大熱出力が低いためFPの蓄積が少なく、そのため放射線の影響が低いという説明に変更し、適合対象条文の説明に追記すること。</li><li>(2) 「必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない」と要求されているので、保持すべき物理的及び化学的性質は何かを説明すること。</li><li>(3) 燃料要素とさや管とで有意な相互作用はないとの説明であるが、温度上昇がないため、膨張が起らず燃料要素とさや管との間のクリアランスで吸収できるとのことであれば、その旨、まとめ資料で説明すること。</li></ol>

## 質問一覧(3/3)

No.	質問内容
⑤	<p>【技術基準規則第26条】</p> <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 実際の燃料要素(長板、角板、トリウム)の保管状況(貯蔵庫が燃料室中の何処に、どの程度の隔離距離でもって配置されるのか、何がどれだけの量入る想定としているのか、バードケージ中においても燃料要素が何処にどれだけ収納されるのか)を正確に説明すること。その際、低濃縮燃料要素のみを貯蔵することにも言及すること。</li><li>(2) 次に保管状況を考慮した上での解析の考え方を説明すること。これについては、設置申請書との整合性から水没条件と気中条件があるものと考えている。これらについて、隔離距離を考慮した相互干渉の考え方(例:水没条件であれば単一ユニットで良い、気中条件においては、長板と角板の隔離距離が近くなるので相互干渉を考慮しなければならない、トリウム貯蔵庫に関しては隔離距離を考えれば単一ユニットで良い、等々)や、水没モデルであれば反射境界を何処に設定するのか等を含めた解析モデルを妥当性も含めて提示すること。</li><li>(3) 気中条件における評価について、真空雰囲気仮定しているが、気中の水分率を考慮した場合について説明すること。</li><li>(4) 被覆材とバードケージについては、原子個数密度が記載されているが、組成と密度も追記すること。</li></ol>

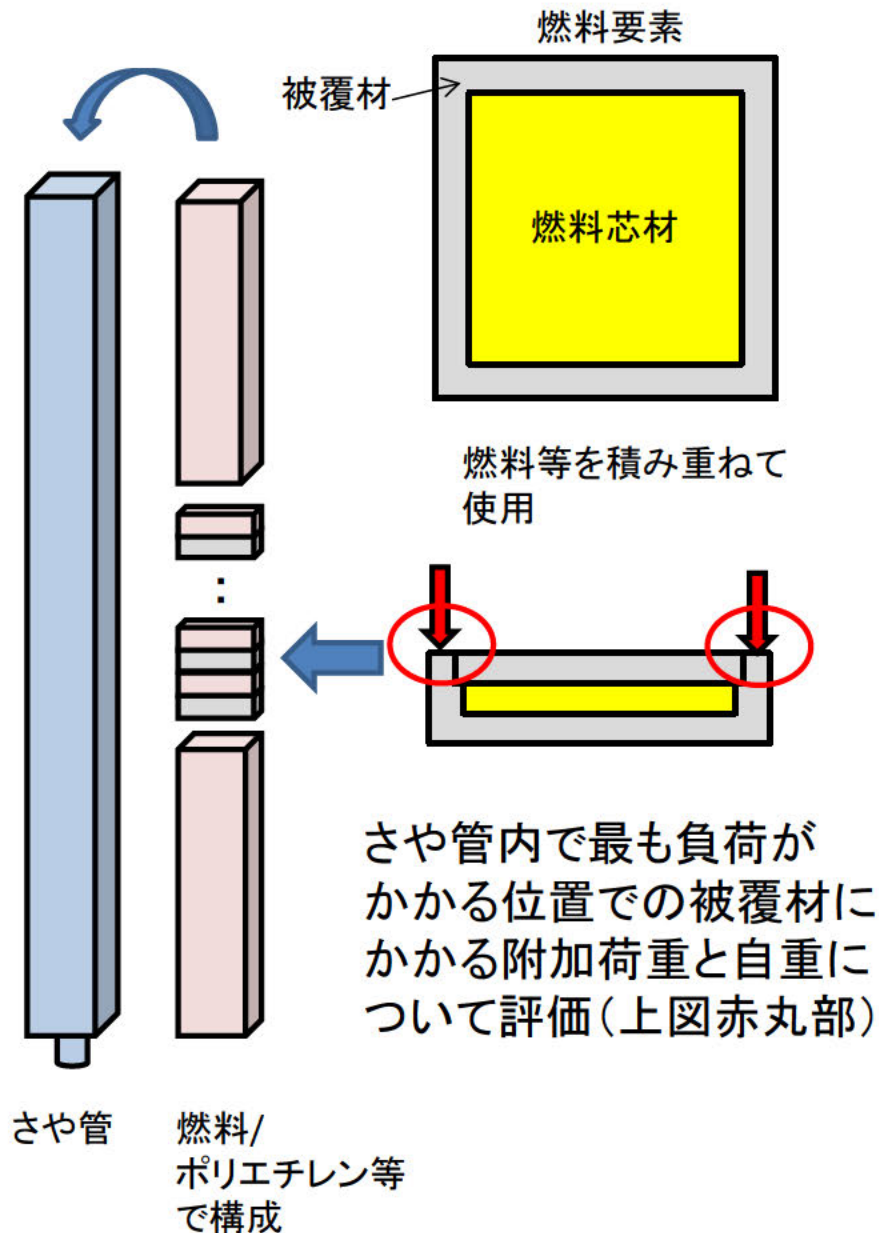
## 質問①に対する回答

## 質問①に対する回答

No.	質問内容
①	<p>【技術基準規則第22条第2項】 技術基準規則第6条(地震による損傷の防止)を適合対象条項から除いているのであれば、技術基準規則第22条第2項「燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、最高使用圧力、自重、附加荷重その他の燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物に加わる負荷に耐えられるものでなければならない。」において、地震荷重を考慮しなければならない。これを適合性の資料に加えること。</p>

- 設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-4-2節より、燃料要素の耐震重要度分類はCである。
- 垂直方向の耐震荷重を考慮するために、自重、附加加重を1.24倍したものと、それらが作用する被覆材の耐力を比較する。

# ①の回答についての説明(固体)



## 固体第2項

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。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、燃料芯材の強度は考慮せず、荷荷がかかる被覆材への追加荷重及び自重を評価の対象とする。

### 評価計算結果

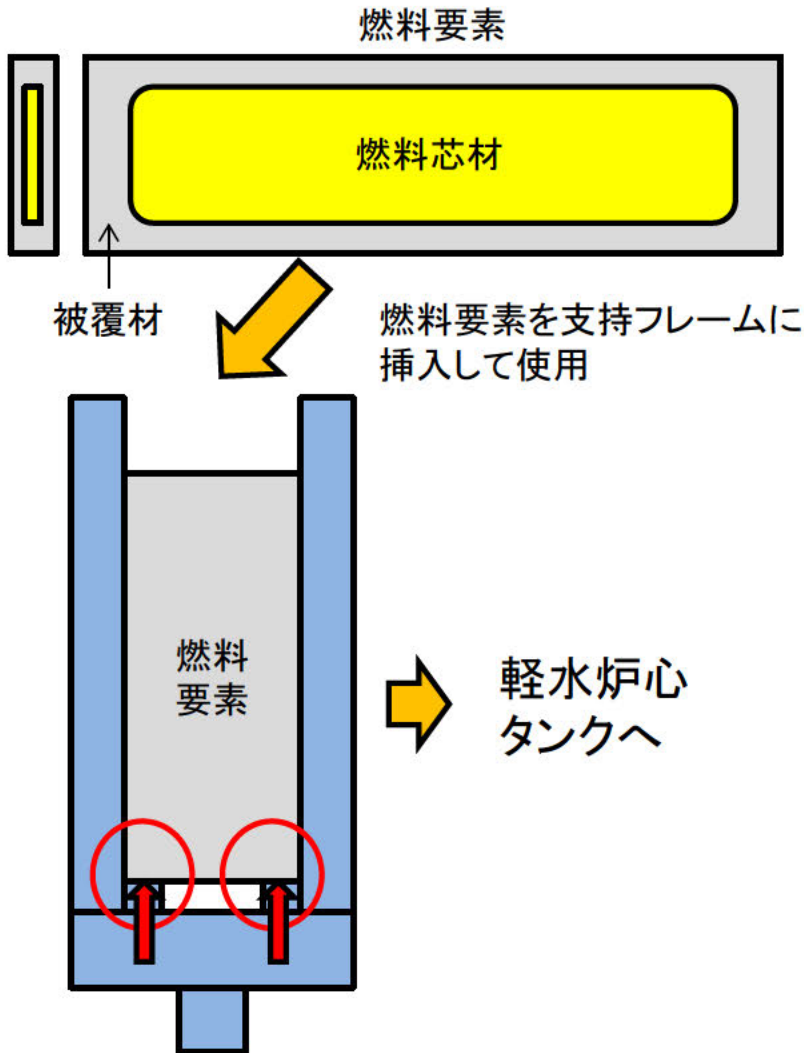
追加荷重[N/mm <sup>2</sup> ]	被覆材の耐力[N/mm <sup>2</sup> ]
	63.7

↓ ×1.24

地震荷重を考慮しても、アルミニウム被覆材の耐力に対して十分に小さく、要求事項に適合する設計



# ①の回答についての説明(軽水)



燃料要素被覆材と燃料フレームが接する箇所(図の赤い部分)に加わる自重と水圧による負荷を考慮する

## 軽水第2項

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燃料芯材を挟み込んだ構造である。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、燃料芯材の強度は考慮せず、**負荷がかかる被覆材への追加荷重及び自重を評価対象とする。**

## 評価計算結果

水圧による追加荷重 [N/mm <sup>2</sup> ]	自重による追加荷重 [N/mm <sup>2</sup> ]	被覆材の耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]
$8.8 \times 10^{-3}$		63.7

↓ × 1.24

地震荷重を考慮しても、アルミニウム被覆材の耐力に対して十分に小さく、要求事項に適合する設計

## 質問②に対する回答

## 質問②に対する回答

No.	質問内容
②	<p>【技術基準規則第11条】 現状の適合性の資料において、燃料要素は手で扱うため保守又は修理が可能であるとの記載になっている。しかし規則の要求は、「必要な設備の機能の確認をするための試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守又は修理ができるものでなければならない。」であるため、まずは燃料要素が持つべき必要な機能とは何であるかの説明が必要である（閉じ込めとか、遮蔽とか）。その上で「試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守又は修理」に関する説明に繋げること。</p>

- 設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節において、燃料要素は安全上の機能別重要度分類としてPS-3及びMS-3に分類され、安全機能として、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」が求められている。
- 燃料要素は、さや管あるいは支持フレームに装填されて使用されることから、炉心の形成のためには、さや管あるいは支持フレームに装填不能なほど有意な変形等の損傷があってはならない。
- 放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減のためには、燃料要素に有害な傷があってはならない。

以上を踏まえ、適合性資料の記載を以下に改める(青字が追記部分)。

設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節において、燃料要素は安全上の機能別重要度分類としてPS-3及びMS-3に分類され、安全機能として、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」が求められている。燃料要素は、さや管あるいは支持フレームに装填されて使用されることから、炉心の形成のためには、さや管あるいは支持フレームに装填不能なほど有意な変形等の損傷があってはならない。さらに、放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減のためには、燃料要素に有害な傷があってはならない。本申請の対象である燃料要素は、運転により燃料要素に蓄積される核分裂生成物が僅少であり、運転後においても燃料要素を直接取り扱うことが可能である。したがって、安全を確保する上で必要な機能の確認をするための試験又は検査及びこれらの機能を健全に維持するための保守として、有害な傷や損傷がないことを目視により実施することが可能である。

## 質問③に対する回答

## 質問③に対する回答

No.	質問内容
③	<p>【技術基準規則第21条第1項第3号】 燃料要素に影響を与える環境条件として温度上昇を挙げており、温度上昇が大きくないことから大丈夫との説明となっている。では、影響を受ける温度はどの程度なのか。それも説明すること。加えて、「その機能を発揮することができるものであること」とあるので、「その機能」とは何であるかについても説明すること。</p>

- 設置変更承認申請書の添付書類十の10-1-1節において、運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界を超えることなく事態が収束される設計であることの判断基準として、燃料の最高温度が400℃を超えないこととしている。
- 設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節において、燃料要素は安全上の機能別重要度分類としてPS-3及びMS-3に分類され、安全機能として、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」が求められている。
- 燃料要素は、さや管あるいは支持フレームに装填されて使用されることから、炉心の形成のためには、さや管あるいは支持フレームに装填不能なほど有意な変形等の損傷が生じては、燃料要素は機能を発揮できなくなる。
- さらに、放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減のためには、変形に伴い、燃料要素に有害な傷が生じては、燃料要素は機能を発揮できなくなる。

以上を踏まえ、適合性資料の記載を以下に改める(青字が追記部分)。

渡過渡変化時及び設計基準事故時において、影響を与えると想定される環境条件としては、当該燃料要素の温度上昇がある。設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節において、燃料要素は安全上の機能別重要度分類としてPS-3及びMS-3に分類され、安全機能として、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」が求められている。燃料要素は、さや管あるいは支持フレームに装填されて使用されることから、炉心の形成のためには、温度上昇により、さや管あるいは支持フレームに装填不能なほど有意な変形等の損傷が生じては、燃料要素は機能を発揮できなくなる。さらに、放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減のためには、温度上昇により、燃料要素に有害な傷が生じては、燃料要素は機能を発揮できなくなる。それに対して、当該燃料要素における初期値25°Cからの温度上昇の最大値は、軽水減速炉心も含めて、固体減速炉心での運転時の異常な過渡変化における49.3°C(最大値74.3°C)である。設置変更承認申請書の添付書類十の10-1-1節において、運転時の異常な過渡変化時において、燃料の許容設計限界を超えることなく事態が収束される設計であることの判断基準として、燃料の最高温度が400°Cを超えないこととしており、温度上昇の影響を受けることはない。

## 質問④に対する回答



## 質問④に対する回答

No.	質問内容
④	<p>【技術基準規則第22条第1項】</p> <p>(1) 最大熱出力が100Wであるから放射線の影響は低いとのことであるが、説明が不足している。最大熱出力が低いためFPの蓄積が少なく、そのため放射線の影響が低いという説明に変更し、適合対象条文の説明に追記すること。</p> <p>(2) 「必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない」と要求されているので、保持すべき物理的及び化学的性質は何かを説明すること。</p> <p>(3) 燃料要素とさや管とで有意な相互作用はないとの説明であるが、温度上昇がないため、膨張が起らず燃料要素とさや管との間のクリアランスで吸収できるとのことであれば、その旨、まとめ資料で説明すること</p>

- KUCAは最大熱出力が100Wであり、「燃料内に核分裂生成物は微量しか蓄積されない」（設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-2節）ため、放射線の影響は低い。
- 燃料要素には、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」の機能が求められることから（設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節）、必要な物理的性質とは形状維持であり、必要な化学的低質とは耐腐食性である。
- 設置変更承認申請書の添付書類十に示されるように温度上昇はわずかであり（最大温度上昇49.3℃）、燃料要素に有意な膨張は生じない（被覆材のアルミの線膨張係数は██████████であるため、最大変形量は██████████）。従って、膨張による変形は、固体減速炉心用燃料要素を装填するさや管██████████と燃料要素██████████（██████████）間の██████████のクリアランスに吸収される（まとめ資料で説明する）。

以上を踏まえ、適合性資料の記載を以下に改める(青字が追記部分)。

#### 【軽水減速炉心】

軽水減速炉心における最大熱出力は100Wであり、設置変更承認申請書の記載にあるとおり、核分裂生成物(FP)の蓄積が少ないため放射線の影響は低く、また、最高使用圧力は常圧、最高使用温度は90°C(運転時の異常な過渡変化での温度上昇は最大でも約2°C以下)と低い。そのため、評価計算書Aに示したとおり、圧力は常圧で使用し温度上昇が僅かなため影響はない。温度については、初期値25°Cから温度上昇が2°C以下と低いため、異常をもたらすような熱応力、ブリスタ(400°Cを超えないことが基準)は発生しない。放射線については、照射によるスウェリングでの体積増加率 $dV/V$ は[REDACTED]と小さく影響はない。なお、使用する被覆材も、これまでKUCAで約45年間使用していたものとほぼ同じアルミニウム合金であり、使用条件も変わらないため腐食のおそれはない。燃料要素には、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」の機能が求められることから(設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節)、必要な物理的性質とは形状維持であり、必要な化学的性質とは耐腐食性であると考えられるが、以上のことから、運転時においても、物理的および化学的性質を保持できるものである。なお、材料検査、外観検査及び寸法検査を実施し、適切な材料及び構造であることを確認する。

## 【固体減速炉心】

固体減速炉心における最大熱出力は100Wであり、設置変更承認申請書の記載にあるとおり、核分裂生成物(FP)の蓄積が少ないため放射線の影響は低く、また、最高使用圧力は常圧、最高使用温度は90°C(運転時の異常な過渡変化での温度上昇は最大でも49.3°C)と低い。そのため、評価計算書Cに示したとおり、圧力は常圧で使用し温度上昇が僅かなため影響はない。温度については、初期値25°Cから温度上昇が最大49.3°Cと低いため、異常をもたらすような被覆材への影響、ブリスタ(400°Cを超えないことが基準以下)は発生しないため、影響はなし。放射線については、照射によるスウェリングでの体積増加率 $dV/V$ は[REDACTED]と小さく、影響はない。なお、使用する被覆材も、これまでKUCAで約45年間使用していたものと同様アルミニウム合金であり、使用条件も変わらないため腐食のおそれはない。燃料要素には、「炉心の形成」及び「放射性物質の閉じ込め、遮蔽及び放出低減」の機能が求められることから(設置変更承認申請書の添付書類八の8-1-3-2節)、必要な物理的性質とは形状維持であり、必要な化学的性質とは耐腐食性であると考えられるが、以上のことから、運転時においても、物理的および化学的性質を保持できるものである。

なお、材料検査、外観検査及び寸法検査を実施し、適切な材料及び構造であることを確認する。

## 質問⑤に対する回答

## 質問⑤に対する回答

No.	質問内容
⑤	<p>【技術基準規則第26条】</p> <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 実際の燃料要素（長板、角板、トリウム）の保管状況（貯蔵庫が燃料室中の何処に、どの程度の隔離距離でもって配置されるのか、何がどれだけの量入る想定としてしているのか、バードケージ中においても燃料要素が何処にどれだけ収納されるのか）を正確に説明すること。その際、低濃縮燃料要素のみを貯蔵することにも言及すること。</li><li>(2) 次に保管状況を考慮した上での解析の考え方を説明すること。これについては、設置申請書との整合性から水没条件と気中条件があるものと考えている。これらについて、隔離距離を考慮した相互干渉の考え方（例：水没条件であれば単一ユニットで良い、気中条件においては、長板と角板の隔離距離が近くなるので相互干渉を考慮しなければならない、トリウム貯蔵庫に関しては隔離距離を考えれば単一ユニットで良い、等々）や、水没モデルであれば反射境界を何処に設定するのか等を含めた解析モデルを妥当性も含めて提示すること。</li><li>(3) 気中条件における評価について、真空雰囲気仮定しているが、気中の水分率を考慮した場合について説明すること。</li><li>(4) 被覆材とバードケージについては、原子個数密度が記載されているが、組成と密度も追記すること。</li></ol>

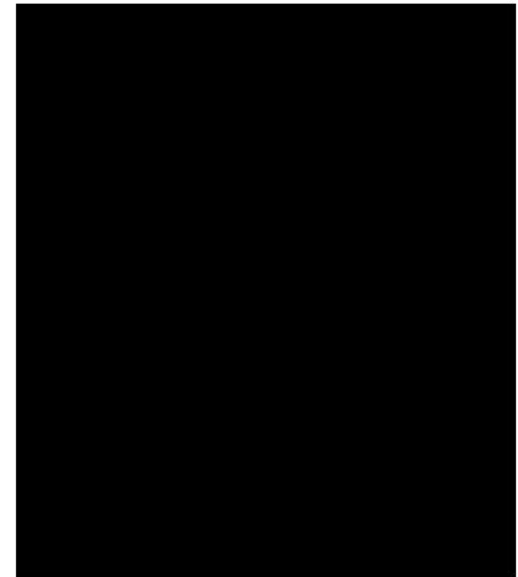
## 実際の燃料要素の保管状況

- 浸水のおそれのない [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] を設置
- 燃料室にウランの燃料要素を貯蔵する燃料貯蔵棚を設置
- トリウムの燃料要素を貯蔵するトリウム貯蔵庫 [REDACTED] [REDACTED]、うち一方は燃料貯蔵棚の周辺)を設置予定(右図参照)



燃料貯蔵棚及びトリウム貯蔵庫の配置

- 燃料室に最大 [REDACTED] 分の燃料貯蔵棚を設置可能
  - 固体減速炉心用バードケージは1個につき [REDACTED] を占有
  - 軽水減速炉心用バードケージは1個につき [REDACTED] を占有
- 現状、固体減速炉心用を [REDACTED] )、軽水減速炉心用を [REDACTED] 構築(右図参照)
- 今後、低濃縮ウランの燃料要素のみを貯蔵
  - 高濃縮ウランの燃料要素の撤去は完了
  - 天然ウランの燃料要素の保有量はゼロ

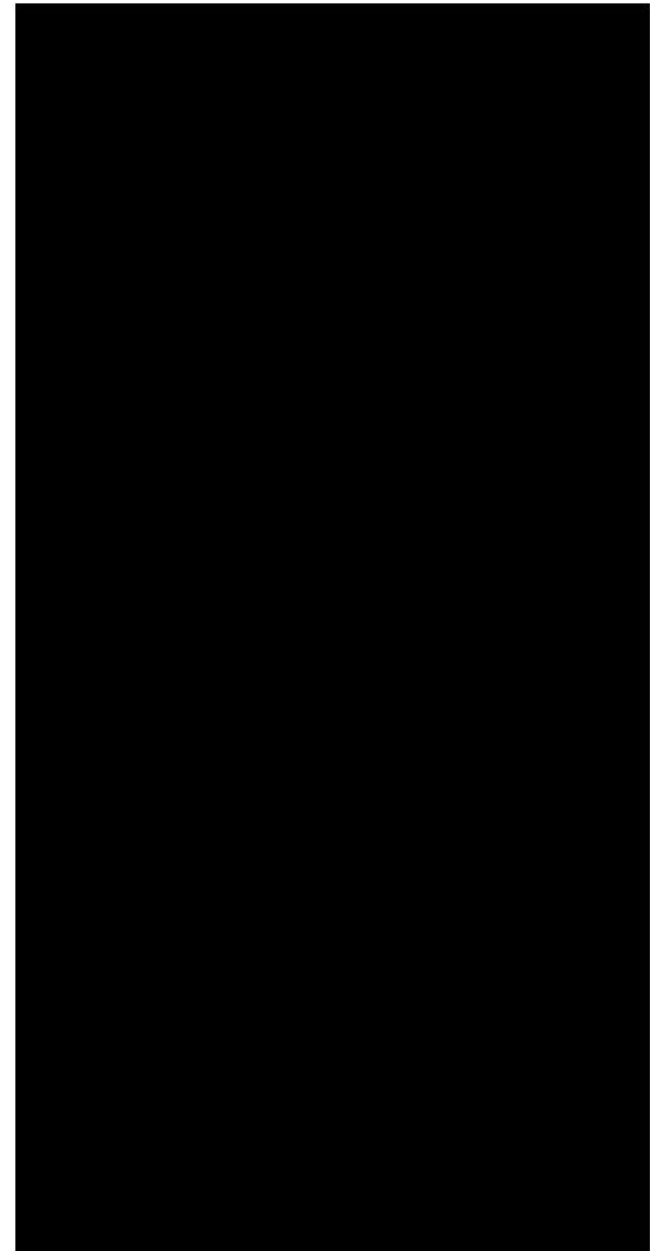


- 固体減速炉心用燃料貯蔵棚の寸法

- A(全高) = [REDACTED]
- B(奥行) = [REDACTED]
- C(1 枠有効幅) = [REDACTED]
- D(1 枠有効高) = [REDACTED]

- 軽水減速炉心用燃料貯蔵棚の寸法

- A(全高) = [REDACTED]
- B(奥行) = [REDACTED]
- C(1 枠有効幅) = [REDACTED]
- D(1 枠有効高) = [REDACTED]



- 固体減速炉心用バードケージの構造

- 内部ボックス( )に燃料要素を収納
- 外寸 立方の外寸 により、バードケージを隣接させても内部ボックス同士の隔離距離は確保
- 内部ボックスに物理的に収納可能な燃料要素枚数は であるが、保安規定にて に制限する予定

- 軽水減速炉心用バードケージの構造

- 内部ボックス( )に燃料要素を収納
- 外寸 の外寸 により、バードケージを隣接させても内部ボックス同士の距離は確保
- 内部ボックスに物理的に収納可能な燃料要素枚数は であるが、保安規定にて に制限する予定

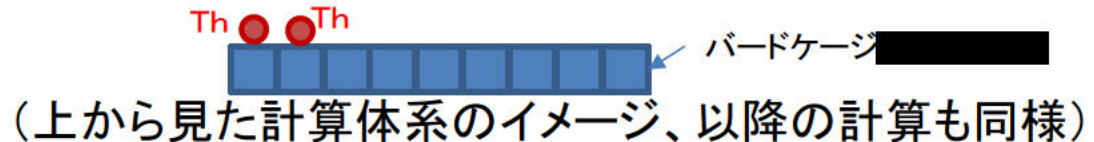


## 計算モデルと計算結果

- 固体減速炉心用バードケージの構造
  - 空気雰囲気(湿度0%、50%、100%)
  - 内部ボックス[REDACTED]に燃料要素を最大数[REDACTED]収納
  - 鋼製外枠は省略
  - バードケージを隣接させても内部ボックス同士の隔離距離は確保されるという条件は維持
  
- 軽水減速炉心用バードケージの構造
  - 空気雰囲気(湿度0%、50%、100%)
  - 内部ボックス[REDACTED]に燃料要素を最大数[REDACTED]収納
  - 鋼製外枠は省略
  - バードケージを隣接させても内部ボックス同士の隔離距離は確保されるという条件は維持
  
- 燃料貯蔵棚は省略
  - 燃料貯蔵棚を考慮すると内部ボックス同士の隔離距離は拡大(燃料貯蔵棚の1枠の寸法>バードケージの寸法)

## 計算結果(MCNP6コード(Ver1.0)+JENDL4.0、 $2 \times 10^8$ ヒストリー)

- 固体減速炉心用バードケージを██████にスタック(燃料貯蔵棚における貯蔵時を想定、ただし、実際よりも多いバードケージ数のため厳しい条件)
  - 空気中(湿度0%):  $K_{eff}=0.07719 \pm 0.00001$
  - 空気中(湿度50%):  $K_{eff}=0.07720 \pm 0.00001$
  - 空気中(湿度100%):  $K_{eff}=0.07720 \pm 0.00001$
  - 空気中(湿度100%) + トリウム(██████)を最下段に隣接:  $K_{eff}=0.07738 \pm 0.00001$



- 軽水減速炉心用バードケージを██████にスタック(燃料貯蔵棚における貯蔵時を想定、ただし、実際よりも多いバードケージ数のため厳しい条件)
  - 空気中(湿度0%):  $K_{eff}=0.05798 \pm 0.00000$  (表示桁数より誤差は小さい、以下同じ)
  - 空気中(湿度50%):  $K_{eff}=0.05798 \pm 0.00000$
  - 空気中(湿度100%):  $K_{eff}=0.05799 \pm 0.00000$
  - 空気中(湿度100%) + トリウム(██████)を最下段に隣接:  $K_{eff}=0.05811 \pm 0.00000$



- 燃料要素貯蔵時を想定した場合、最も厳しい結果を与える空気中(湿度100%)条件においても、クライテリアである $K_{eff}=0.95$ と比べて、十分に小さい値
- ただし、実際の燃料要素収納枚数は計算条件より少ない。さらに実際の燃料貯蔵棚に収納するとバードケージ間の隔離距離は拡大する。→ 実効増倍率はより小さい値
- トリウム貯蔵庫の影響は極めて小さい

- 固体減速炉心用バードケージを██████████にスタック(燃料室床設置時を想定、ただし、実際よりも多いバードケージ数のため厳しい条件)
  - 空气中(湿度0%): $K_{eff}=0.09022\pm 0.00001$
  - 空气中(湿度50%): $K_{eff}=0.09024\pm 0.00001$
  - 空气中(湿度100%): $K_{eff}=0.09024\pm 0.00001$
  - 空气中(湿度100%) + トリウム(██████████)を最下段に隣接: $K_{eff}=0.09045\pm 0.00001$
- 軽水減速炉心用バードケージを██████████にスタック(燃料室床設置時を想定、ただし、実際よりも多いバードケージ数のため厳しい条件)
  - 空气中(湿度0%): $K_{eff}=0.06554\pm 0.00000$ (表示桁数より誤差は小さい、以下同じ)
  - 空气中(湿度50%): $K_{eff}=0.06555\pm 0.00000$
  - 空气中(湿度100%): $K_{eff}=0.06554\pm 0.00000$
  - 空气中(湿度100%) + トリウム(██████████)を最下段に隣接: $K_{eff}=0.06573\pm 0.00000$



- 燃料室床設置時を想定した場合、最も厳しい結果を与える空气中(湿度100%)条件においても、クライテリアである $K_{eff}=0.95$ と比べて、十分に小さい値
- ただし、実際の燃料要素収納枚数は計算条件より少ない。→ 実効増倍率はより小さい値
- トリウム貯蔵庫の影響は極めて小さい

- 固体・軽水減速炉心用バードケージを水没させ、無限に配列（バードケージ単体に対する完全反射境界条件）
  - 固体減速炉心用バードケージ:  $K_{eff}=0.46645 \pm 0.00034$
  - 軽水減速炉心用バードケージ:  $K_{eff}=0.52072 \pm 0.00036$



- 水没・無限配列条件においても、クライテリアである $K_{eff}=0.95$ と比べて、十分に小さい値

以上