

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所（南地区）高速実験炉原子炉施設（「常陽」）

第 32 条（炉心等）

（その 2：第 32 条第 4 項）

2022 年 9 月 6 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究所高速実験炉部

第 32 条：炉心等（その 2：第 32 条第 4 項）

目 次

1. 要求事項の整理
2. 設置許可申請書における記載
3. 設置許可申請書の添付書類における記載
 - 3.1 安全設計方針
 - 3.2 気象等
 - 3.3 設備等
4. 要求事項への適合性
 - 4.1 炉心燃料集合体の概要
 - 4.2 設計方針
 - 4.3 使用条件
 - 4.4 評価
 - 4.5 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 32 条第 4 項）への適合性説明

(別紙)

- 別紙 1 : 燃料要素の熱・機械設計の流れ
- 別紙 2 : 炉心燃料要素の熱設計計算式
- 別紙 3 : 炉心燃料要素の熱設計に用いる物性式
- 別紙 4 : 被覆管歪に係る主要な材料特性式
- 別紙 5 : 被覆管歪の制限
- 別紙 6 : 燃料集合体の機械設計の制限について
- 別紙 7 : クリープ寿命分数和の計算
- 別紙 8 : 被覆管各部の応力計算式
- 別紙 9 : 設計応力強さ (Sm) 設定における ASME の適用
- 別紙 10 : 疲労損傷和及び累積損傷和の計算

- 別紙 11 : MK-IV炉心における炉心燃料要素の機械設計結果等の整理
- 別紙 12 : 燃料集合体の機械設計の流れ
- 別紙 13 : 集合体各部の応力計算式
- 別紙 14 : MK-IV炉心における炉心燃料集合体の機械設計結果等の整理
- 別紙 15 : 輸送時及び取扱い時の評価の整理
- 別紙 16 : MK-III炉心から継続して使用する炉心燃料集合体について

(添付)

- 添付 1 : 設置許可申請書における記載
- 添付 2 : 設置許可申請書の添付書類における記載 (安全設計)
- 添付 3 : 設置許可申請書の添付書類における記載 (適合性)
- 添付 4 : 設置許可申請書の添付書類における記載 (設備等)

本日も提示範囲

添付 1 設置許可申請書における記載

5. 試験研究用等原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備

ハ. 原子炉本体の構造及び設備

原子炉本体は、燃料体（試験用燃料体を含む。）、反射材、制御材、炉心構造物及び原子炉容器等から構成する。原子炉容器の上部には回転プラグを、原子炉容器の外側には遮へいグラファイト及び生体遮へい体を放射線遮蔽体として設ける。

(2) 燃料体

燃料集合体は、炉心燃料集合体及び照射燃料集合体から構成する。炉心燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の炉心燃料集合体に加わる負荷に耐え、かつ、輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないように設計する。照射燃料集合体は、設計基準事故時において、照射燃料集合体が破損した場合においても、原子炉を安全に停止するために必要な機能及び炉心の冷却機能を損なうおそれがないように、また、輸送中又は取扱中において、著しい変形が生じないように、さらに、放射性物質の漏えい量を抑制するための措置を講じることができるよう設計する。

炉心燃料集合体は、核分裂性プルトニウム富化度等が異なる内側燃料集合体と外側燃料集合体の 2 種類から構成する。照射燃料集合体は、高速増殖炉用燃料の開発及び高速炉用燃料の設計精度の向上のための試験に使用するものであり、構造がそれぞれ異なる A 型、B 型、C 型及び D 型照射燃料集合体の 4 種類から構成する。

(i) 燃料材の種類

炉心燃料集合体の燃料ペレット部及び熱遮へいペレット部、照射燃料集合体の燃料部及び熱遮へい部の燃料材の種類は第 3 表のとおりである。

(ii) 被覆材の種類

炉心燃料集合体及び照射燃料集合体の被覆材（被覆管）の種類（材料）は第 3 表のとおりである。

(iii) 燃料要素の構造

a. 炉心燃料集合体

炉心燃料集合体の燃料要素は、燃料材を有する炉心燃料要素（内側）及び炉心燃料要素（外側）の 2 種類から構成する。炉心燃料要素は、円筒形のステンレス鋼の被覆管にプルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット等を挿入し、その被覆管の両端を密封した構造とする。

燃料ペレットは、プルトニウム・ウラン混合酸化物粉末を円柱状にプレス成形し、約 94%理論密度になるよう焼結したものとす。上部反射体ペレットの上部にガスブレンナムを設け、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガス等により、被覆管及び端栓溶接部に過大な応力が生じることを防止する。

主要仕様は第 3 表のとおりである。

(iv) 燃料集合体の構造

a. 炉心燃料集合体

炉心燃料集合体は、燃料要素、ステンレス鋼の六角形のラップ管、ハンドリングヘッド及びエントランスノズル等から構成する。燃料要素は、隣接する燃料要素間の間隙を保持するワイヤスペーサを巻いた状態で、正三角格子状に配列して、ラップ管に納められる。この下部にエントランスノズルを、上部にハンドリングヘッドを配した構造とする。主要仕様は第4表のとおりである。

第3表 燃料要素の主要仕様 (1/3)

項目	燃料材										被覆管		燃料要素有効長さ	
	燃料ペレット部					熱遮へいペレット部種類					材料	外径 (mm)	肉厚 (mm)	燃料ペレット部
	種類	プルトニウム含有率* ¹	核分裂性プルトニウム富化度* ²	プルトニウム同位体組成比	ウラン濃縮度	ウラン酸化物* ³ 焼結ペレット								
集合体 炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	プルトニウム・ウラン混合酸化物 焼結ペレット	32wt%以下	約16wt%	原子炉級	約18wt%	ウラン酸化物* ³ 焼結ペレット	同上	同上	同上	オーステナイト系 ステンレス鋼	約5.5	約0.35	約50cm	
炉心燃料要素 (外側)	同上	同上	約21wt%	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	

第3表 燃料要素の主要仕様 (3/3)

項目	燃料材					被覆管			燃料要素有効長さ 燃料部
	燃料部		熱遮へい部			材料	外径(mm)	肉厚(mm)	
	種類	プルトニウム含有率*1	核分裂性プルトニウム富化度*2	プルトニウム同位体組成比	ウラン濃縮度				
集合体 照射燃料集合体 A型用炉心燃料要素(内側) A型用炉心燃料要素(外側) 限界照射試験用補助要素	プルトニウム・ウラン混合酸化物 焼結ペレット 同上 同上	32wt%以下 同上 同上	約16wt% 約21wt% —	原子炉級 同上 同上	約18wt% 同上 26wt%以下	オーステナイト系 ステンレス鋼 同上 同上	約5.5 同上 6.4~7.5	約0.35 同上 0.4~0.6	50cm以下*5 同上 同上

- * 1 : $Pu / (Pu + {}^{241}Am + U)$ 。
- * 2 : $({}^{239}Pu + {}^{241}Pu) / (Pu + {}^{241}Am + U)$ 。
- * 3 : 劣化ウラン。
- * 4 : 天然ウランまたは劣化ウラン。
- * 5 : MK-II炉心から継続して使用する燃料要素の場合は、55cm以下とする。
- * 6 : 燃料材の他、マイナーアクチノイドや核分裂生成物を混入させる場合がある。ただし、マイナーアクチノイド及び核分裂生成物の最大混入割合は50wt%とする。
- * 7 : ペレットでない酸化物の場合、O/M比を調整するため、ウラン金属を混入させる場合がある。ただし、ウラン金属の最大混入割合は10wt%とする。

第4表 燃料集合体の主要仕様 (1/4)

項目	集合体	炉心燃料集合体
装填燃料要素個数		127本
燃料要素ピッチ		約6.5mm

添付 2 設置許可申請書の添付書類における記載（安全設計）

添付書類八

1. 安全設計の考え方

1.1 安全設計の方針

1.1.2 炉心等の設計に関する基本方針

原子炉施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものとし、かつ、炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより燃料の許容設計限界を超えないものとする。

(4) 炉心燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の炉心燃料集合体に加わる負荷に耐え、かつ、輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないように設計する。燃料要素は、燃料温度、核分裂生成ガスによる内部ガス圧、被覆管の応力及び歪等を制限することにより、その健全性を確保する。燃料集合体は、種々の荷重に基づく応力及び変形を制限することにより、その健全性を確保する。

添付 3 設置許可申請書の添付書類における記載（適合性）

添付書類八

1. 安全設計の考え方

1.8 「設置許可基準規則」への適合

原子炉施設は、「設置許可基準規則」に適合するように設計する。各条文に対する適合のための設計方針は次のとおりである。

(炉心等)

第三十二条 試験研究用等原子炉施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、試験研究用等原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない。

2 炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に試験研究用等原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより燃料の許容設計限界を超えないものでなければならない。

3 燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、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いて、試験研究用等原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものでなければならない。

4 燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における試験研究用等原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとする。
- 二 輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとする。

適合のための設計方針

4 について

炉心燃料集合体は、127本の燃料要素を束ねたものをステンレス鋼製のラップ管内に収納したものであり、各燃料要素はその下部端栓部に差し込まれた板状のノックバーを、エントランスノズルに溶接された正六角形の組棒に固定することで支持されている。

燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、種々の荷重に基づく応力及び変形を制限することにより、燃料集合体の健全性が損なわれることがない設計とする。ここでは、寸法公差や各部温度などの評価条件を保守的に設定するものとしても、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において集合体各部の応力が設計許容応力を超えないことを確認した。また、輸送中又は取扱中に加わる荷重として、設計上の加速度条件として6Gを設定し、この加速度に基づく荷重により、燃料要素支持部等に発生する応力を評価し、これが許容応力以下であることを確認することで過度の変形を防止し、その機能が阻害されることがないように設計する。ここでは、輸送時及び取扱い時に各部にかかる応力が設計許容応力を超えないことを確認した。

燃料要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、燃料温度、核分裂生成ガスによる内部ガス圧、被覆管の応力及びび歪等を制限することにより、その健全性が損なわれることがない設計とする。ここでは、寸法公差や発生ガス量、各部温度、熱過渡条件などの評価条件を保守的に設定するものとしても、通常運転時において燃料中心温度が熱的制限値を満足し、かつ運転時の異常な過渡変化時において、燃料中心温度が熱設計基準値を満足すること、使用期間中の被覆管歪が十分小さいこと、使用期間中に被覆管内圧によるクリープ破断が生じないこと、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において被覆管各部の応力が設計許容応力を超えないこと、使用期間中の累積疲労サイクル

が制限値を超えないことを確認した。また、設計加速度 6G に対する荷重に対して十分な強度を有し、その機能が阻害されることがないように設計する。ここでは、輸送時及び取扱い時にプレナムスリーブが座屈しないこと、ペレットが移動しないことを確認した。

添付書類八の以下の項目参照

3. 原子炉本体
5. 原子炉冷却系統施設
6. 計測制御系統施設

添付書類十の以下の項目参照

2. 運転時の異常な過渡変化
3. 設計基準事故

添付書類八

3. 原子炉本体

3.7 燃料集合体

3.7.1 概要

燃料集合体は、炉心燃料集合体及び照射燃料集合体から構成する。

炉心燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の炉心燃料集合体に加わる負荷に耐え、かつ、輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないように設計する。照射燃料集合体は、設計基準事故時において、照射燃料集合体が破損した場合においても、原子炉を安全に停止するために必要な機能及び炉心の冷却機能を損なうおそれがないように、また、輸送中又は取扱中において、著しい変形が生じないように設計する。炉心燃料集合体は、核分裂性プルトニウム富化度等が異なる内側燃料集合体と外側燃料集合体の 2 種類から構成する。

照射燃料集合体は、高速増殖炉用燃料の開発及び高速炉用燃料の設計精度の向上に使用するものであり、構造がそれぞれ異なる A 型、B 型、C 型及び D 型照射燃料集合体の 4 種類から構成する。なお、一部の照射試験にあっては、炉心燃料集合体の設計方針に定める制限を超え、又は、超える可能性のある場合がある。これらの照射試験には、燃料要素の被覆管が開孔する可能性のある条件で照射を行う限界照射試験、照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料要素を照射する先行試験、及び照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料要素を照射する基礎試験がある。

3.7.2 炉心燃料集合体

3.7.2.1 設計方針

(1) 燃料要素

燃料要素は、燃料温度、核分裂生成ガスによる内部ガス圧、被覆管の応力及び歪等を制限することにより、その健全性を確保する。このため、原子炉内における使用期間中、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、以下の方針を満足するように燃料要素の設計を行う。なお、設計に当たっては、燃料密度変化、核分裂生成ガスの生成及び放出、被覆管のクリープ及びスエリング、燃焼に伴って変化する他の諸性質の効果等を考慮する。

(i) 燃料最高温度は、2,650℃以下となるように設計する。

(ii) 被覆管歪は、十分小さくなるように設計する。

(iii) 被覆管内圧は、被覆管にかかる引張応力を抑え、円周方向へのクリープ破断を生じないように十分低く設計する。

(iv) 被覆管の各部にかかる荷重に対する応力計算値は、A S M E Sec. III の基準に準拠して設定した値を満たすように設計する。この時、当該基準に準拠して設定した 620℃における S U S 3 1 6 相当ステンレス鋼の S_m 値は 176N/mm²、

高 Ni オーステナイト系ステンレス鋼(A)の S_m 値は $201\text{N}/\text{mm}^2$ である。

(v) 累積疲労サイクルは、クリープによる累積損傷をも考慮して、設計疲労寿命以下となるよう設計する。なお、設計疲労曲線は、A S M E Sec. IIIに準拠した曲線を使用する。

(2) 燃料集合体

燃料集合体は、種々の荷重に基づく応力及び変形を制限することにより、その健全性を確保する。また、燃料集合体が他の構成部品の機能を阻害することがないようにする。このため、以下の方針を満足するように燃料集合体を設計する。

(i) 燃料集合体の輸送中又は取扱中に受ける通常の荷重に対して、十分な強度を有するように設計する。

(ii) 原子炉内における使用期間中の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料集合体の構成部品にかかる荷重に対する応力計算値は、A S M E Sec. IIIの基準に準拠して設定した値を満たすように設計する。

3.7.2.2 使用条件

炉心燃料集合体の使用条件を第 3.7.1 表に示す。

3.7.2.3 主要設備

(1) 燃料要素

燃料要素の主要仕様を第 3.7.2 表に示す。燃料要素は、燃料材を有する炉心燃料要素（内側）及び炉心燃料要素（外側）の 2 種類から構成する。炉心燃料要素は、第 3.7.1 図に示すように、燃料ペレット（プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット）を被覆管に挿入し、その上下に熱遮へいペレット（ウラン酸化物焼結ペレット（劣化ウラン））を、上部の熱遮へいペレットの上部に上部反射体ペレット、プレナムスプリング及びプレナムスリーブを入れ、また、下部の熱遮へいペレットの下部に下部反射体ペレットを入れて、両端に端栓を溶接した密封構造とし、内部にヘリウムガスを封入したものとする。

燃料ペレットは、プルトニウム・ウラン混合酸化物粉末を円柱状にプレス成形し、約 94%理論密度になるよう焼結したものとする。燃料ペレット及び熱遮へいペレットと被覆管との間には適当な間隙を確保し、かつ、上部反射体ペレットの上部にガスプレナムを設け、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガス、燃料ペレット及び熱遮へいペレットと被覆管との熱膨張差、燃焼に伴う燃料ペレットの密度変化等により、被覆管及び端栓溶接部に過大な応力が生じることを防止する。また、燃料ペレット、熱遮へいペレット及び上部・下部反射体ペレットが取扱中に移動することがないように、プレナムスリーブ及びプレナムスプリングによって支持する構造とする。

隣接する燃料要素間の間隙を保持するため、燃料要素にはワイヤスペーサを巻く。

(2) 燃料集合体

炉心燃料集合体の概略構造を第 3.7.2 図に示す。また、その主要仕様を第 3.7.3 表に示す。炉心燃料集合体は、燃料要素、ラップ管、ハンドリングヘッド、下部反射体及

びエントランスノズル等から構成し、127本の燃料要素を正三角格子状に配列して、これらをラップ管に納め、この下部にエントランスノズルを、上部にハンドリングヘッドを配した構造とする。

燃料要素は、隣接する燃料要素間の間隙を保持するためのワイヤスペーサを巻いた状態で、その下部端栓に差し込まれた板状のノックバーを、エントランスノズルに溶接された正六角形の組棒に固定することにより支持される。ハンドリングヘッドは、ラップ管の上部に溶接固定される。なお、ハンドリングヘッド下端と燃料要素上端との間には、燃料要素の膨張による干渉を防止するため、約84mmの間隙を設ける。また、下部反射体は、6枚の羽根を有するスクリュ形状とし、エントランスノズルに固定する。エントランスノズルには、炉心支持板の構造と相まって、冷却材流量を調節するためのオリフィス孔を複数個設ける。

3.7.2.4 評価

(1) 構成材料

燃料ペレットは、炉心の運転温度及び圧力において、被覆管及び充填ガス（ヘリウムガス）に対して化学的に不活性であり、核分裂生成物を保持する能力がある。

ステンレス鋼は、吸収断面積が小さく中性子経済性に優れ、燃料ペレットと被覆管の相互作用及び被覆管の内外圧力差による変形に十分耐える強度を有し、1次冷却材、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料、核分裂生成物等に対して高い耐食性を有し、かつ、高い信頼性を有する材料である。なお、設計降伏点（ S_y ）、設計引張強さ（ S_u ）などの短時間強度に及ぼす主な環境効果として、高速中性子による照射効果とナトリウム浸漬による効果がある。このうち、照射効果については、約500℃以下では、フランクループ生成に伴う転位密度増加による硬化のため強度が上昇するのに対し、約500℃以上では、主に冷間加工組織の回復、軟化のため強度低下が生ずる。一方、ナトリウム浸漬効果については、高温側で固溶元素のナトリウム中への選択的拡散溶出が生じることにより強度は低下する。被覆管の短時間強度はこの環境効果を考慮して設定する。また、被覆管の内圧クリープ破断強度も同様の環境効果を考慮して設定する。

(2) 燃料要素

燃料要素の性能評価は、核分裂生成ガスの生成及び放出、燃料ペレットの密度変化及び熱膨張、被覆管のスエリング、クリープ及び弾性変形、燃料ペレットと被覆管の相互作用等の原子炉運転中に生ずる諸現象を考慮して行う。本原子炉で使用する燃料要素と類似仕様の燃料要素の照射実績は、本燃料要素の過出力（定格出力に過出力因子を乗じた出力であって、燃料ペレットの最高温度が運転時の異常な過渡変化時に達する最高温度を包絡する出力をいう。以下同じ。）時の最大線出力密度である約360W/cmを上回る線出力密度で、本燃料要素の燃料要素最高燃焼度を上回る約110,000MWd/tの燃焼度が達成されており、また、本燃料要素の燃料要素最高燃焼度90,000MWd/t以上の燃焼度を達成した照射実績は多数あり、こうした高燃焼度までの燃料要素の健全性が確認されている。

原子炉内における使用期間中、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、

燃料要素の健全性は以下のように保たれる。なお、内側燃料集合体の燃料要素と外側燃料集合体の燃料要素とは、燃料ペレットのプルトニウム混合比等がわずかに異なるのみで、その他の寸法、構造、材料等の仕様及び炉内使用条件が同様であるので、それぞれの評価結果に有意な差が生じることはない。

(i) 燃料最高温度

燃料最高温度は、「3.5.3 計算方法」に基づいた解析により、定格出力時最大線出力密度約 330W/cm において約 2,300℃、過出力時最大線出力密度約 360W/cm において約 2,410℃であり、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料の融点⁽¹⁾に原子炉内における使用期間中の変化を考慮して設定した燃料最高温度に関する熱設計基準値 2,650℃を超えることはない。

(ii) 被覆管の歪

被覆管の外径は、高速中性子照射下における核分裂生成ガスの蓄積による内圧に起因するクリープ変形、スエリング等により、原子炉内における使用期間中徐々に増加する。

被覆管の外径増加は主にクリープ及びスエリングに起因するが、その増加量は、前者によるものが燃焼末期で約 2.4%以下、後者によるものが燃焼末期で約 1.8%以下であり、原子炉内における使用期間中約 4.2%以下に保つことができる。

なお、クリープ及びスエリングによる変形は、直接被覆管の健全性を損なうものではないことが照射実績により示されている。一方、1次冷却材流路断面積を確保して燃料集合体の健全性を保持するという観点からは、米国の EBR-II、仏国のラプソディ及びフェニックス等における照射実績により、7%程度の外径増加は燃料集合体の健全性に問題がないことが確認されている。

(iii) 被覆管の内圧

被覆管内圧は、製造時に封入するヘリウムガス、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガス等によって生じ、燃焼とともに徐々に上昇するが、ガस्पレンラムの体積を十分大きくとっているため、最高燃焼度の被覆管の内圧によるクリープ寿命分数和は、約 0.2 である。なお、クリープ寿命分数和の計算において、核分裂生成ガスの蓄積量は当機構製造の燃料要素の照射試験により設定し、使用末期において 100%の核分裂生成ガスが放出するものとして評価する。

(iv) 被覆管の応力

被覆管の応力は、燃焼初期においては、被覆管の内圧と外圧である 1次冷却材の運転圧力約 0.29MPa [gage] (約 3 kg/cm² [gage]) とがほぼ等しいので、被覆管応力は小さい。また、燃焼に伴って核分裂生成ガスの蓄積により内圧が徐々に上昇し、被覆管には引張応力が生ずるが、ガस्पレンラムの体積を十分に大きくとっているため、燃焼末期においても過度に大きくなることはない。

さらに、燃料ペレットが膨張して被覆管に接触することにより応力が発生するが、燃料ペレットのクリープ並びに被覆管のクリープ及びスエリングによる応力緩和が生ずるので、過大な応力が発生することはない。なお、ハンドリングヘッド下端と燃料要素上端との間には、燃料要素の膨張による干渉を防止するため、約 84mm の間隙

を設けているため、被覆管のクリープ、スエリング及び熱膨張による燃料要素の軸方向変位による応力は吸収される。

被覆管応力としては、これらの応力のほかに熱応力、地震による応力、わん曲拘束による応力、ワイヤスペーサとの接触による応力、流力振動による応力等を考慮するが、これらの応力を組み合わせた場合の通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における一次膜応力の最大値は $112\text{N}/\text{mm}^2$ であり、SUS 316 相当ステンレス鋼及び高 Ni オーステナイト系ステンレス鋼 (A) の S_m 値を下回る。

(v) 疲労サイクル

原子炉内における使用期間中に被覆管に生ずる熱応力及び内外圧力差による応力は、原子炉の起動停止や運転時の異常な過渡変化により変動し、応力サイクルが生ずる。これらによる疲労寿命分数和は、0.1 以下である。

この疲労寿命分数和にクリープ寿命分数和を加えた被覆管の累積損傷和は約 0.2 以下であり、設計上の制限値である 1.0 を下回る。

(3) 燃料集合体

燃料集合体には、輸送中又は取扱中、通常運転時並びに運転時の異常な過渡変化時に種々の荷重が加わるが、以下のように燃料集合体の健全性は確保される。なお、内側燃料集合体と外側燃料集合体とは、それぞれの燃料要素の仕様がほぼ同様であり、燃料集合体の寸法、構造、材料等の仕様及び炉内使用条件が同様であるので、それぞれの評価結果に有意な差が生じることはない。

(i) 輸送中又は取扱中における健全性

燃料集合体は、輸送中又は取扱中に加わる荷重として設定する 6G に対して十分な強度を有し、その機能が阻害されることはない。

(ii) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における健全性

燃料集合体には過大な応力がかからず、燃料要素にスパイラル状に巻いたワイヤスペーサにより、適切な冷却材流路が確保される。

被覆管のクリープ、スエリング及び熱膨張による燃料要素の軸方向変位は、燃料要素の上端を自由に伸びられるようにすることにより吸収される。

燃料要素には 1 次冷却材の流動に伴う抗力が働くため、燃料要素の下端をノックバーにより固定する。

水流動試験及び高温ナトリウム中耐久試験の結果から、1 次冷却材の流動により燃料集合体を受ける影響が小さいことを確認している。

3.7.4 参考文献

- (1) 加藤正人他、「高速炉用ウラン・プルトニウム混合酸化物燃料の融点に及ぼす酸素・金属比の影響」、日本原子力学会和文論文誌、Vol. 7, No. 4, p420(2008)

第3.7.1表 燃料集合体の使用条件 (1/4)

	燃料最高温度		被覆管最高温度 (肉厚中心)	最高燃焼度
	定格出力時	過出力時		
炉心燃料集合体				
炉心燃料要素 (内側)	2,350°C	2,650°C	620°C	90,000MW d / t
炉心燃料要素 (外側)	2,350°C	2,650°C	620°C	90,000MW d / t
	燃料集合体の挿入量		炉心挿入位置	
炉心燃料集合体			内側燃料領域	
内側燃料集合体	最大19体		外側燃料領域	
外側燃料集合体	最大60体			

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (1/6)

燃料材						
燃料ペレット部						
種類	フルトニウム含有率*1	核分裂性*2 フルトニウム富化度	フルトニウム 同位体組成比	ウラン濃縮度		
炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	フルトニウム・ ウラン混合酸化物 焼結ペレット	32wt%以下	原子炉級	約18wt%		
炉心燃料要素 (外側)	同上	約21wt%	同上	同上		
燃料材						
燃料ペレット部						
熱遮へいペレット部						
種類						
炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	燃料ペレットの初期密度	燃料ペレット (中実) 直径	燃料ペレット長さ	ウラン酸化物*3 焼結ペレット	その他の部品の材料	
炉心燃料要素 (外側)	約94%理論密度	約4.6mm	約9mm	同上	端栓	
炉心燃料要素 (外側)	同上	同上	同上	同上	その他の部品の材料	
材料						
炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	SUS316相当 ステンレス鋼または 高Niオーステナイト系 ステンレス鋼 (A)	外径	肉厚	SUS316 ステンレス鋼、 SUS316相当 ステンレス鋼または 高Niオーステナイト系 ステンレス鋼 (A)		
炉心燃料要素 (外側)	同上	約5.5mm	約0.35mm	同上		
その他の部品の材料						
炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	スパイラルワイヤ	上部放射体ペレット及び 下部放射体ペレット	プレナムスプリング	プレナムスリーブ		
炉心燃料要素 (外側)	同上	SUS316ステンレス鋼 または高Niオーステナイト系 ステンレス鋼 (A)、(B)	SUS304 ステンレス鋼	SUS316 ステンレス鋼		
炉心燃料要素 (外側)	燃料ペレット- 被覆管間隙 (半径)	ガスプレナム長さ	燃料要素有効長さ (燃料ペレット部)	燃料要素全長		
炉心燃料集合体 炉心燃料要素 (内側)	約0.1mm	約58cm	約50cm	約154cm		
炉心燃料要素 (外側)	同上	同上	同上	同上		

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (6/6)

	燃料ペレット 被覆管間隙 (半径)	ガスブレナム長さ	燃料要素有効長さ (燃料部)	燃料要素全長
照射燃料集合体				
III型特殊燃料要素	0.2mm以下	90cm以下	50cm以下 (55cm以下*5)	200cm以下
IV型特殊燃料要素	約0.1mm	同上	同上	同上
III型限界照射試験用要素	0.2mm以下	同上	同上	同上
IV型限界照射試験用要素	約0.1mm	同上	同上	同上
先行試験用要素	0.2mm以下	150cm以下	同上	200cm以下
基礎試験用要素	同上	同上	同上	同上
A型用炉心燃料要素 (内側)	約0.1mm	約58cm	同上	約154cm
A型用炉心燃料要素 (外側)	同上	同上	同上	同上
限界照射試験用補助要素	0.2mm以下	90cm以下	同上	200cm以下

* 1 : Pu/(Pu+²⁴¹Am+U)。

* 2 : (²³⁹Pu+²⁴¹Pu)/(Pu+²⁴¹Am+U)。

* 3 : 劣化ウラン。

* 4 : 天然ウランまたは劣化ウラン。

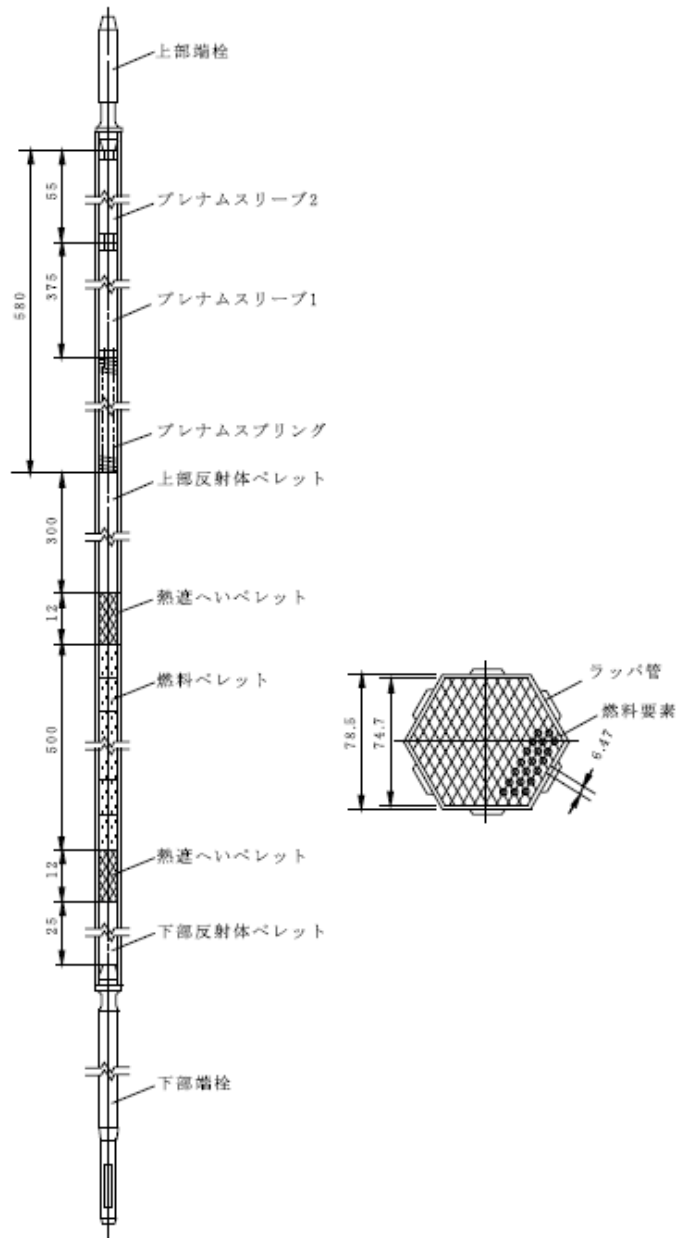
* 5 : MK-II炉心から継続して使用する燃料要素の場合。

* 6 : 燃料材の他、マイナーアクチノイドや核分裂生成物を混入させる場合がある。ただし、マイナーアクチノイド及び核分裂生成物の最大混入割合は50wt%とする。

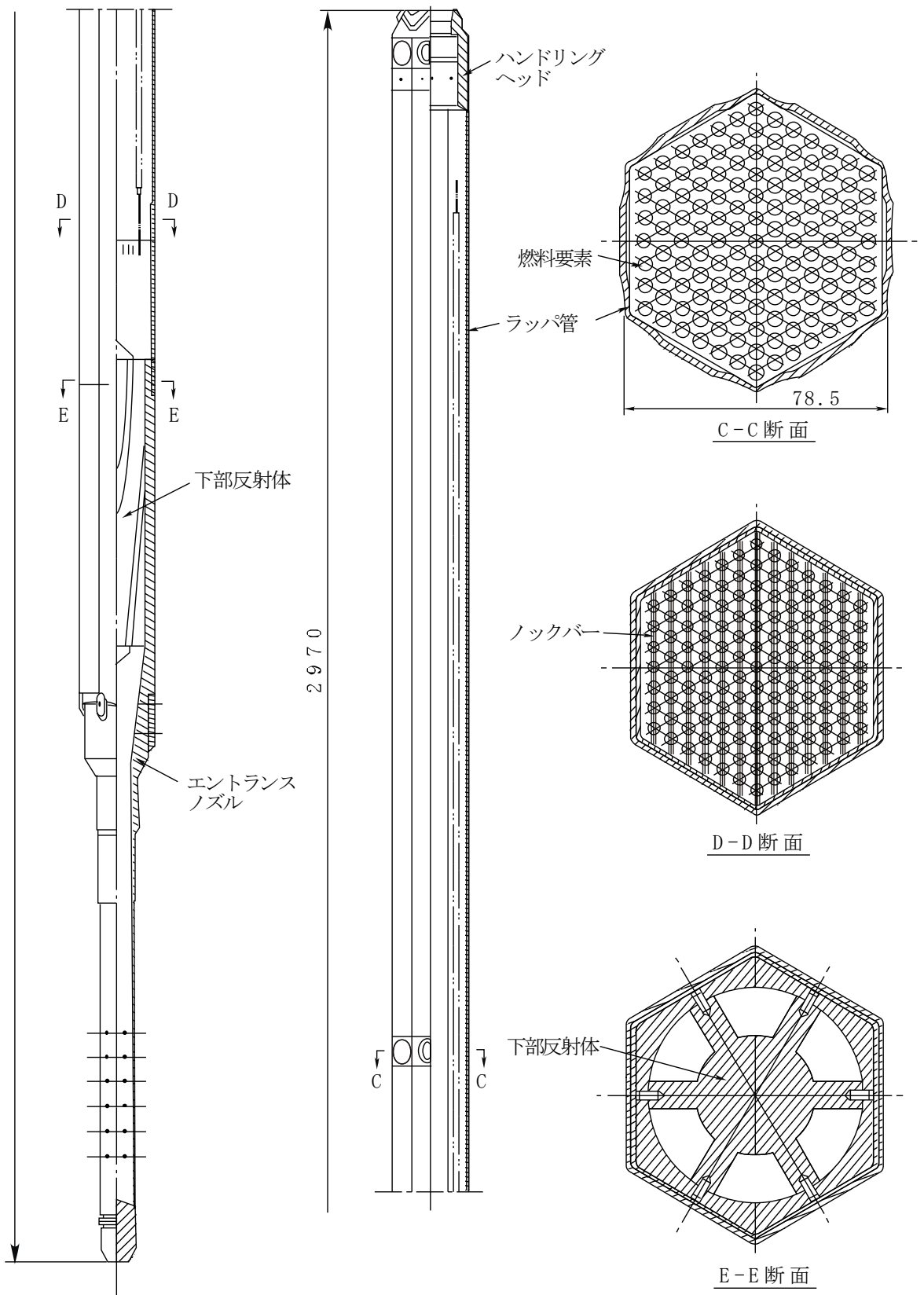
* 7 : ペレットでない酸化物の場合、O/M比を調整するため、ウラン金属を混入させる場合がある。ただし、ウラン金属の最大混入割合は10wt%とする。

第3.7.3表 燃料集合体の主要仕様 (1/6)

	炉心燃料集合体	
	内側燃料集合体	外側燃料集合体
ラップ管材料	SUS316相当ステンレス鋼または高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A) 約78.5mm	SUS316相当ステンレス鋼または高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A) 約78.5mm
六角外対辺長さ		
ハンドリングヘッド材料	SUS316ステンレス鋼	SUS316ステンレス鋼
エントランスノズル材料	SUS316ステンレス鋼	SUS316ステンレス鋼
装填燃料要素個数	127本	127本
炉心燃料要素 (内側)	127本	127本
炉心燃料要素 (外側)	—	—
燃料要素ピッチ	約6.47mm	約6.47mm
燃料要素配列	正三角格子配列	正三角格子配列
燃料要素間隔保持方式	ワイヤスパーサ型	ワイヤスパーサ型
燃料集合体全長	約297cm	約297cm
その他の部品の材料	SUS316ステンレス鋼	SUS316ステンレス鋼
ノックバー	SUS316ステンレス鋼	SUS316ステンレス鋼
組枠	SUS316ステンレス鋼または高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A)、(B)	SUS316ステンレス鋼または高Niオーステナイト系ステンレス鋼(A)、(B)
下部反射体		



第 3.7.1 図 炉心燃料要素



第 3.7.2 図 炉心燃料集合体