

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 43 条（試験用燃料体）

2022 年 8 月 30 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

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 照射燃料集合体の種類及び構造
  - 4.2 熱設計
  - 4.3 機械設計
  - 4.4 炉心の概要
  - 4.5 炉心構成
  - 4.6 標準平衡炉心を用いた核熱設計における保守性の確保
  - 4.7 核設計
  - 4.8 要求事項（試験炉設置許可基準規則第 43 条）への適合性説明

(別紙)

- 別紙 1：「炉心の変更」に関する基本方針
- 別紙 2：照射燃料集合体の安全確保の考え方
- 別紙 3：照射燃料集合体の構造概要と燃料要素の種類の変更
- 別紙 4：照射燃料集合体の仕様設定の考え方
- 別紙 5：照射燃料集合体における熱設計基準値、熱的制限値の設定
- 別紙 6：照射燃料集合体の燃料設計方針
- 別紙 7：照射燃料集合体の熱設計計算式

別紙 8 : 照射燃料集合体の熱設計に用いる物性式

別紙 9 : (欠番)

別紙 10 : 照射燃料集合体の熱設計結果

別紙 11 : クリープ寿命分数和の計算

別紙 12 : 照射燃料集合体の機械設計の制限について

別紙 13 : 疲労損傷和及び累積損傷和の計算

別紙 14 : 燃料溶融時における燃料と被覆管の相互作用による歪

別紙 15 : 限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置

別紙 16 : 照射燃料集合体の燃料要素の機械設計結果等の整理

別紙 17 : 照射燃料集合体の機械設計

(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)

## 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。

#### (1) 試験研究用等原子炉の炉心

##### (ii) 燃料体の最高燃焼度及び最大挿入量

##### (b) 照射燃料集合体

燃料要素最高燃焼度は、下記のとおりとする。

III型及びIV型特殊燃料要素	130,000MWd/t
III型及びIV型限界照射試験用要素	
A型照射燃料集合体装填時	150,000MWd/t
B型照射燃料集合体装填時	200,000MWd/t
D型照射燃料集合体装填時	200,000MWd/t
先行試験用要素	200,000MWd/t
基礎試験用要素	200,000MWd/t
A型用炉心燃料要素	90,000MWd/t
限界照射試験用補助要素	130,000MWd/t

##### b. 最大挿入量

燃料集合体の最大個数、炉心燃料領域核分裂性物質質量（最大）及び熱遮へいペレット領域核分裂性物質質量（最大）を以下に示す。なお、試験用燃料体（以下「照射燃料集合体」という。）は、炉心燃料領域に装荷するものとする。燃料集合体の種類毎の最大個数を第1表に示す。

燃料集合体の最大個数 79 体

照射燃料集合体の最大個数 4 体

##### (iv) 主要な熱的制限値

通常運転時及び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ることがないように、炉心燃料集合体、照射燃料集合体及び照射用実験装置（本体設備）について、定格出力時の熱的制限値を設ける。

##### b. 照射燃料集合体

照射燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料部が熔融温度に達することなく、被覆管が機械的に破損せず、かつ、冷却材が沸騰しないよう、定格出力（先行試験に使用するB型照射燃料集合体にあつては、

定格出力を上回らない目標出力を含む。)時に第2表の熱的制限値を満たす設計とする。ただし、試験用要素を装填した照射燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、試験用要素が計画された範囲でその健全性を喪失しても、他の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、定格出力時に第2表の熱的制限値を満たす設計とする。

## (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

#### b. 照射燃料集合体

照射燃料集合体の燃料要素は、Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素、Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素、先行試験用要素、基礎試験用要素、A型用炉心燃料要素(A型照射燃料集合体に装填するA型用炉心燃料要素(内側)及びA型用炉心燃料要素(外側)の2種類とする。)及び限界照射試験用補助要素の9種類から構成する。

これらの燃料要素は、円筒形のステンレス鋼の被覆管に燃料部及び熱遮へい部等を挿入し、その被覆管の両端を密封した構造とする。

### (iv) 燃料集合体の構造

#### b. 照射燃料集合体

照射燃料集合体は、炉心燃料集合体と同様に、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。照射燃料集合体の種類は、燃料集合体の中央に試料部を設けたA型照射燃料集合

体、燃料集合体内に数本のコンパートメントを納めたB型及びD型照射燃料集合体、炉心燃料集合体と同様な形状のC型照射燃料集合体の4種類とする。

コンパートメントは、照射燃料集合体の内部において独自に冷却材流量を設定できる二重の円筒管（ $\alpha$ 型コンパートメントにおいては、外管に六角管も用いる。）であり、その種類は装填する燃料要素の種類及び本数並びに構造及び主要寸法等の組合せにより $\alpha$ 型、 $\beta$ 型、 $\gamma$ 型及び $\delta$ 型コンパートメントの4種類に分類される。なお、 $\alpha$ 型及び $\gamma$ 型コンパートメントは、燃料要素最大5本をピンタイロッドの周囲に配置し、ワイヤスペーサ等で燃料要素間を保持する構造とする。 $\beta$ 型及び $\delta$ 型コンパートメントは、燃料要素1本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持する構造とする。先行試験用 $\gamma$ 型コンパートメントは、燃料要素1本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持し、これを上部と下部にストレーナを有した管構造である内壁構造容器に装填し、この内壁構造容器を納めた構造とする。基礎試験用 $\gamma$ 型コンパートメントは、燃料要素1本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持し、これを密封型の管構造である密封構造容器に装填し、この密封構造容器を納めた構造とする。照射燃料集合体の構造を以下に示す。また、主要仕様を第4表に示す。

(a) A型照射燃料集合体

A型照射燃料集合体は、試料部の周囲に、スパイラルワイヤを巻いたA型用炉心燃料要素を炉心燃料集合体と同じ燃料要素ピッチで正三角格子状に配置して、全体をラップ管に納め、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。

試料部は、燃料要素7本のバンドル（正三角格子状に配置した燃料要素の束）を二重のステンレス鋼の試料部六角管に納めたもの、 $\alpha$ 型又は $\beta$ 型コンパートメントをステンレス鋼の試料部六角管に納めた構造とする。

(b) B型照射燃料集合体

B型照射燃料集合体は、燃料集合体の中央部に設けたステンレス鋼のタイロッドのまわりに、 $\gamma$ 型コンパートメント6本を配し、全体をラップ管に納め、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。

先行試験用 $\gamma$ 型コンパートメント内には内壁構造容器1本が納められ、この内壁構造容器内に先行試験用要素を装填することにより、燃料熔融状態の先行試験用要素の被覆管が、万一、破損しても、先行試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えない構造とする。

基礎試験用 $\gamma$ 型コンパートメント内には密封構造容器1本が納められ、この密封構造容器内に基礎試験用要素を装填することにより、基礎試験用要素の被覆管が開孔しても、基礎試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えない構造とする。

(c) C型照射燃料集合体

C型照射燃料集合体は、燃料要素最大 91 本のバンドルをステンレス鋼の試料部六角管に納め、これをラップ管に納め、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。

また、照射条件をオンラインで計測するものにあつては、検出器を取り付け、計測線を炉外に引き出す構造とする。

(d) D型照射燃料集合体

D型照射燃料集合体は、燃料集合体の中央部に設けたステンレス鋼のタイロッドのまわりに、 $\gamma$ 型コンパートメント 6 本、 $\delta$ 型コンパートメント 18 本、又は、これら 2 種類のコンパートメントを混在させて配し、全体をラップ管に納め、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。

第1表 燃料集合体の種類毎の最大個数

燃料集合体	最大個数	備考
炉心燃料集合体	79体	
内側燃料集合体	19体	
外側燃料集合体	60体	
照射燃料集合体	4体	照射用実験装置を炉心燃料領域に装荷する場合には、照射用実験装置との合計
A型照射燃料集合体	4体	
試験用要素装填時	2体	
B型照射燃料集合体	4体	
先行試験用要素または基礎試験用要素装填時を除く 試験用要素装填時	1体	D型照射燃料集合体の試験用要素装填時との合計
C型照射燃料集合体	4体	
D型照射燃料集合体	4体	
試験用要素装填時	1体	B型照射燃料集合体の先行試験用要素または基礎試験用要素装填時を除く場合との合計

※ 試験用要素は、照射燃料集合体の燃料要素のうち、Ⅲ型特殊燃料要素、Ⅳ型特殊燃料要素、A型炉心燃料要素及び限界照射試験用補助要素を除く燃料要素である。



第2表 主要な熱的制限値

項目	燃料最高温度				被覆管最高温度 (肉厚中心) * 1				燃料最大 溶融割合
	A型照射燃料 集合体装填時	B型照射燃料 集合体装填時	C型照射燃料 集合体装填時	D型照射燃料 集合体装填時	A型照射燃料 集合体装填時	B型照射燃料 集合体装填時	C型照射燃料 集合体装填時	D型照射燃料 集合体装填時	
集合体	燃料最高温度 2,350°C								
炉心燃料集合体	620°C								
装填燃料要素	2,540°C	2,540°C	2,540°C	2,540°C	700°C	610°C	700°C	700°C	—
III型特殊燃料要素	2,540°C	2,540°C	—	—	750°C [890°C]	700°C [890°C]	—	—	—
IV型特殊燃料要素	2,540°C [2,680°C]	2,540°C [2,680°C]	—	—	660°C [810°C]	610°C [810°C]	—	—	—
III型限界照射試験用要素	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IV型限界照射試験用要素	—	—	—	—	—	—	—	—	—
先行試験用要素	—	—	—	—	—	—	—	—	—
基礎試験用要素	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A型用炉心燃料要素	2,350°C	—	—	—	620°C	—	—	—	—
限界照射試験用補助要素	—	2,540°C (2,680°C)	—	2,540°C (2,680°C)	—	—	—	700°C (890°C)	—
内壁構造容器	—	—	—	—	—	—	—	—	—
密封構造容器	—	—	—	—	—	—	—	—	—
照射用実験装置	溶融温度 (熱分解するもの場合は、過度の分解が生じない温度) 以下* 4				750°C* 5 (外側容器：675°C)				—

※ [ ]の値は、被覆管開孔時のみに適用する。〈 〉の値は、限界照射試験用要素の被覆管の開孔時のみに適用する。

\* 1 : 内壁構造容器及び密封構造容器または密封構造容器の最高温度。

\* 2 : 酸化燃料要素を除く。

\* 3 : 酸化燃料要素の場合。

\* 4 : 照射物最高温度。

\* 5 : 照射燃料要素の最高温度。

第3表 燃料要素の主要仕様 (2/3)

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	種類	ウラン 濃縮度	ウラン酸化物*3 焼結ペレット	燃料要素 有効長さ					
集合体 照射燃料集合体 III型特殊燃料要素	プルトニウム・ウラン 混合酸化物 焼結ペレット 同上	32wt%以下	-	原子炉級	26wt%以下	ウラン酸化物*3 焼結ペレット	50cm以下*5							
IV型特殊燃料要素	同上	同上	-	同上	24wt%以下	同上	同上							
III型限界照射試験用要素	同上	同上	-	同上	26wt%以下	同上	同上							
IV型限界照射試験用要素	同上	同上	-	同上	24wt%以下	同上	同上							
先行試験用要素	プルトニウムまたは*6*7 ウランの単体または混合 物の酸化物、炭化物、窒 化物または金属	-	-	同上	-	ウランの*4*6 酸化物、炭化物、 窒化物または金属	同上							
基礎試験用要素	プルトニウム・ウラン 混合酸化物焼結ペレット、 プルトニウム・ウラン 混合炭化物焼結ペレット、 プルトニウム・ウラン 混合窒化物焼結ペレット またはプルトニウム・ ウラン混合金属スラグ	左欄について、 それぞれ 32wt%以下、 25wt%以下、 30wt%以下、 20wt%以下	-	同上	-	ウラン酸化物*4 焼結ペレット、 ウラン炭化物 焼結ペレット、 ウラン窒化物 焼結ペレット、 またはウラン金属 スラグ	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			熱遮へい部				材料	外径 (mm)	肉厚 (mm)	燃料部	燃料部
	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	種類						
集合体 照射燃料集合体 A型用炉心燃料要素 (内側)	プルトニウム・ウラン混合酸化物 焼結ペレット 同上	32wt%以下	約16wt%	原子炉級 同上	約18wt%	ウラン酸化物*3 焼結ペレット 同上	オーステナイト系 ステンレス鋼 同上	約5.5 同上	約0.35 同上	50cm以下*5	燃料部	燃料部
A型用炉心燃料要素 (外側) 限界照射試験用補助要素	同上	同上	約21wt% —	同上	同上	同上	同上	6.4~7.5	0.4~0.6	同上	同上	同上

\* 1 : Pu/(Pu+<sup>241</sup>Am+U)  
 \* 2 : (<sup>239</sup>Pu+<sup>241</sup>Pu)/(Pu+<sup>241</sup>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

## 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。

(3) 燃料集合体、反射体及び遮へい集合体並びに炉心構造物等は、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、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ように設計する。

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。

(試験用燃料体)

第四十三条 試験用燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

- 一 試験計画の範囲内において、試験用燃料体の健全性を維持できない場合においても、燃料体の性状又は性能に悪影響を与えないものであること。
- 二 設計基準事故時において、試験用燃料体が破損した場合においても、試験研究用等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ものであること。
- 三 放射性物質の漏えい量を抑制するための措置を講じたものであること。
- 四 輸送中又は取扱中において、著しい変形が生じないものであること。

適合のための設計方針

試験用燃料体は、照射燃料集合体から構成する。照射燃料集合体は以下を満足するものとする。

- 一 試験用要素以外の燃料要素は、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。ただし、試験用要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、試験用要素が計画された範囲内でその健全性を喪失しても、他の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、それぞれの燃料要素について、設計方針を定め、その方針を満足するよう設計する。

照射燃料集合体は、装填する燃料要素の健全性を維持できない場合においても、炉心燃料集合体の性状又は性能に悪影響を与えないよう、装填する燃料の特徴に応じてコンパートメント、内壁構造容器または密封構造容器を設けることとする。燃料が溶融する可能性が低く、かつ被覆管が壊れる可能性が低い燃料要素に対してはラップ管で、燃料が溶融する可能性は低いものの被覆管が壊れる可能性が高い燃料要素に対してはコンパートメントで、燃料が溶融する可能性が高く被覆管が壊れる可能性が高い燃料要素に対しては内壁構造容器または密封構造容器で、それぞれの安全を確保し、他の燃料集合体へ影響を与えないように設計する。なお、限界照射試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、コンパートメントの冷却材出口部は多数の小口径の孔とし、万一、限界照射試験用要素の開孔部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。

- 二 試験用要素以外の燃料要素は、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、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。ただし、試験用要素にあつては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、計画された範囲でその健全性を喪失しても、他の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、使用する試験用要素に応じて設計方針を定め、その方針を満足するよう設計する。

照射燃料集合体は、装填する燃料要素の健全性を維持できない場合においても、炉心燃料集合体の性状又は性能に悪影響を与えないよう、装填する燃料の特徴に応じてコンパートメント、内

壁構造容器または密封構造容器を設けることとする。燃料が溶融する可能性が低く、かつ被覆管が壊れる可能性が低い燃料要素に対してはラップ管で、燃料が溶融する可能性は低いものの被覆管が壊れる可能性が高い燃料要素に対してはコンパートメントで、燃料が溶融する可能性が高く被覆管が壊れる可能性が高い燃料要素に対しては内壁構造容器または密封構造容器で、それぞれ安全を確保し、他の燃料集合体へ影響を与えないように設計する。なお、限界照射試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、コンパートメントの冷却材出口部は多数の小口径の孔とし、万一、限界照射試験用要素の開孔部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。先行試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、燃料溶融状態の先行試験用要素の被覆管の破損が生じた場合でも、内壁構造容器の健全性が確保される構造とするとともに、内壁構造容器の冷却材出口部を多数の小口径の孔とし、万一、先行試験用要素の被覆管の破損部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。基礎試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、基礎試験用要素の被覆管が開孔した場合でも、密封構造容器の健全性が確保される構造とする。

三 **試験用要素以外の**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。また、照射燃料集合体の1体当たりの核分裂性物質量は、炉心燃料集合体のそれを超えないものとする。B型、C型及びD型照射燃料集合体のそれぞれの1体当たりの核分裂性物質量は、A型照射燃料集合体のその最大を超えないものとする。ただし、試験用要素にあつては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、計画された範囲でその健全性を喪失するものがある。限界照射試験用要素、先行試験用要素及び基礎試験用要素の装填時にあつては、年間照射試験回数を制限するとともに、燃料破損検出系により、燃料要素の被覆管の開孔又は破損が検知された場合には、原子炉を停止し、当該照射燃料集合体を炉心から取り出すとともに、放射性廃ガス中の放射性物質の濃度が所定の値を超える場合には、当該廃ガスを貯留タンクに圧入貯蔵するものとする。

四 照射燃料集合体は、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、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ないように設計する。

添付書類八の以下の項目参照  
3. 原子炉本体

添付書類八

3. 原子炉本体

3.5 熱設計

3.5.1 設計方針

(2) 照射燃料集合体

照射燃料集合体の熱設計は、炉心燃料集合体の設計方針に基づいて行う。ただし、試験用要素を装填した照射燃料集合体は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、試験用要素が計画された範囲内でその健全性を喪失しても、他の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、それぞれの燃料要素について以下の方針に基づいて熱設計を行う。

(i) III型及びIV型特殊燃料要素

III型及びIV型特殊燃料要素の熱設計は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料ペレットが熔融温度に達することなく、被覆管が機械的に破損せず、かつ、冷却材が沸騰しないよう、以下の方針に基づいて行う。

- a. 特殊燃料要素が、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、熱設計基準値を超えないよう、かつ、その被覆管のクリープ寿命分数和と疲労寿命分数和を加えた累積損傷和が設計上の制限値である 1.0 を超えないよう、定格出力時における熱的制限値を設定し、これを満たすこと。
- b. 設計計算手法及び物性定数は、各種の試験研究を通じて信頼度を確認したものを使用すること。
- c. 公称値並びに工学的安全係数は、適切な安全余裕を有すること。

(ii) III型及びIV型限界照射試験用要素

III型及びIV型限界照射試験用要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、被覆管の開孔による炉心への影響を最小限に抑えられるよう、以下の方針に基づいて設計を行う。

- a. 試験用要素が、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、燃料最高温度が熔融温度に達することなく、かつ、被覆管が計画された範囲内でその健全性を喪失しても、試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、定格出力時における熱的制限値を設定し、これを満たすこと。
- b. 設計計算手法及び物性定数は、各種の試験研究を通じて信頼度を確認したものを使用すること。



c. 公称値並びに工学的安全係数は、適切な安全余裕を有すること。

(iii) 先行試験用要素

先行試験用要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料部の溶融による炉心への影響を最小限に抑えられるよう、以下の方針に基づいて設計を行う。

a. 試験用要素が、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、酸化燃料の燃料部が溶融しても、試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、定格出力時における燃料部、被覆管及び内壁構造容器の熱的制限値を設定し、これを満たすこと。

(iv) 基礎試験用要素

基礎試験用要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、被覆管の開孔による炉心への影響を最小限に抑えられるよう、以下の方針に基づいて設計を行う。

a. 試験用要素が、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、被覆管が開孔しても、試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、定格出力時における燃料部、被覆管及び密封構造容器の熱的制限値を設定し、これを満たすこと。

(v) A型用炉心燃料要素

A型用炉心燃料要素の熱設計は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料ペレットが溶融温度に達することなく、被覆管が機械的に破損せず、かつ、冷却材が沸騰しないように、以下の方針に基づいて行う。

a. A型用炉心燃料要素が、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、熱設計基準値を超えないよう、かつ、その被覆管のクリープ寿命分数和と疲労寿命分数和を加えた累積損傷和が設計上の制限値である1.0を超えないよう、定格出力時における熱的制限値を設定し、これを満たすこと。

b. 設計計算手法及び物性定数は、各種の試験研究を通じて信頼度を確認したものを使用すること。

c. 公称値並びに工学的安全係数は、適切な安全余裕を有すること。

(vi) 限界照射試験用補助要素

限界照射試験用補助要素は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、燃料ペレットが溶融温度に達することなく、被覆管が機械的に破損せず、かつ、冷却材が沸騰しないよう、以下の方針に基づいて設計を行う。

a. 試験用補助要素が、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、熱設計基準値を超えないよう、かつ、その被覆管のクリ

ープ寿命分数和と疲労寿命分数和を加えた累積損傷和が設計上の制限値である1.0を超えないよう、定格出力時における熱的制限値を設定し、これを満たすこと。

- b. 設計計算手法及び物性定数は、各種の試験研究を通じて信頼度を確認したものを使用すること。
- c. 公称値並びに工学的安全係数は、適切な安全余裕を有すること。

照射燃料集合体では、試験目的に応じて、燃料材や被覆材の種類、寸法や燃料材物性を組み合わせ、所定の照射試験条件を実現する。そのため、設置変更許可申請の段階にあっては、想定される照射試験を踏まえ、燃料要素の仕様を一定の範囲に限定する。

熱設計基準値及び熱的制限値にあっては、当該仕様の組合せを考慮し、燃料最高温度又は燃料最大熔融割合（径方向断面における熔融割合の最大）、被覆管最高温度（肉厚中心）及び冷却材最高温度について、熱設計基準値及び熱的制限値を定める。なお、熱設計基準値及び熱的制限値は、最大値として設定したものであり、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の第27条に基づく設計及び工事の計画の認可申請の段階にあっては、確定した燃料要素の仕様を用いて、個別に熱設計基準値及び熱的制限値を設定するため、当該値は、設置変更許可申請の段階で定めた熱設計基準値及び熱的制限値を下回る場合がある。

熱設計に使用する設計計算手法及び物性定数についても、設置変更許可申請の段階で、代表的なものを定め、設計及び工事の計画の認可申請の段階において、確定した燃料要素の仕様を用いて個別に定めるものとする。

また、熱設計に使用する工学的安全係数にあっては、燃料の仕様に依存しない原子炉熱出力の測定誤差等による工学的安全係数を、設置変更許可申請の段階で定め、燃料の仕様に依存するものについては、設計及び工事の計画の認可申請の段階において、確定した燃料要素の仕様を用いて個別に定める。

### 3.5.2 熱設計基準値及び熱的制限値

#### 3.5.2.1 熱設計基準値

##### (2) 照射燃料集合体

照射燃料集合体に装填する燃料要素は、その仕様範囲も考慮し、最高温度となる熱設計基準値を定める。「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の第27条に基づく設計及び工事の計画の認可申請の段階にあっては、製作する燃料要素の仕様を踏まえ、最新知見も考慮して個別に熱設計基準値を定める。

##### (i) III型及びIV型特殊燃料要素

- a. 燃料最高温度は、2,680℃とする。
- b. III型特殊燃料要素の被覆管最高温度（肉厚中心）は、890℃、IV型特殊燃料要素の被覆管最高温度（肉厚中心）は、810℃とする。
- c. 冷却材最高温度は、910℃とする。

##### (ii) III型及びIV型限界照射試験用要素

- a. 燃料最高温度は、2,680℃とする。

- b. III型限界照射試験用要素の被覆管最高温度（肉厚中心）は、890℃、IV型限界照射試験用要素の被覆管最高温度（肉厚中心）は、810℃とする。
- c. 冷却材最高温度は、910℃とする。
- (iii) 先行試験用要素
  - a. 燃料最高温度は、溶融温度を超えないこととする。ただし、酸化物燃料にあつては、溶融温度を超える設計をする場合があるが、最大溶融割合は、30%とする。
  - b. 被覆管最高温度（肉厚中心）は、890℃とする。
  - c. 内壁構造容器最高温度（肉厚中心）は、890℃とする。
  - d. 内壁構造容器を冷却する冷却材の最高温度は、910℃とする。
- (iv) 基礎試験用要素
  - a. 燃料最高温度は、溶融温度を超えないこととする。
  - b. 被覆管最高温度（肉厚中心）は、890℃とする。
  - c. 密封構造容器最高温度（肉厚中心）は、890℃とする。
  - d. 密封構造容器を冷却する冷却材の最高温度は、910℃とする。
- (v) A型用炉心燃料要素
  - a. 燃料最高温度は、2,650℃とする。
  - b. 被覆管最高温度（肉厚中心）は、840℃とする。
  - c. 冷却材最高温度は、910℃とする。
- (vi) 限界照射試験用補助要素
  - a. 燃料最高温度は、2,680℃とする。
  - b. 被覆管最高温度（肉厚中心）は、890℃とする。
  - c. 冷却材最高温度は、910℃とする。

### 3.5.2.2 熱的制限値

#### (2) 照射燃料集合体

照射燃料集合体に装填する燃料要素は、その仕様範囲も考慮し、最高温度となる熱的制限値を定める。「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の第27条に基づく設計及び工事の計画の認可申請の段階にあつては、製作する燃料要素の仕様を踏まえ、最新知見も考慮して個別に熱的制限値を定める。

##### (i) III型及びIV型特殊燃料要素

燃料最高温度 2,540℃

被覆管最高温度（肉厚中心）

III型特殊燃料要素 700℃

IV型特殊燃料要素 610℃

##### (ii) III型及びIV型限界照射試験用要素

燃料最高温度 2,540℃

ただし、被覆管の開孔時にあつては、2,680℃

被覆管最高温度（肉厚中心）

A型照射燃料集合体装填時

Ⅲ型限界照射試験用要素 750℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、890℃

Ⅳ型限界照射試験用要素 660℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、810℃

B型照射燃料集合体装填時

Ⅲ型限界照射試験用要素 700℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、890℃

Ⅳ型限界照射試験用要素 610℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、810℃

D型照射燃料集合体装填時

Ⅲ型限界照射試験用要素 700℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、890℃

Ⅳ型限界照射試験用要素 610℃

ただし、被覆管の開孔時にあっては、810℃

(iii) 先行試験用要素

燃料最高温度 溶融温度以下

ただし、酸化物燃料にあっては、最大溶融割合 20%

被覆管最高温度 (肉厚中心) 750℃

内壁構造容器最高温度 (肉厚中心) 675℃

(iv) 基礎試験用要素

燃料最高温度 溶融温度以下

被覆管最高温度 (肉厚中心) 750℃

密封構造容器最高温度 (肉厚中心) 675℃

(v) A型用炉心燃料要素

燃料最高温度 2,350℃

被覆管最高温度 (肉厚中心) 620℃

(vi) 限界照射試験用補助要素

燃料最高温度 2,540℃

ただし、試験用要素の被覆管の開孔時にあっては、2,680℃

被覆管最高温度 (肉厚中心) 700℃

ただし、試験用要素の被覆管の開孔時にあっては、890℃

### 3.5.3 計算方法

#### (1) 設計計算手法

照射燃料集合体の熱設計計算では、以下の(i)～(vii)に示す式を用いる。なお、内壁構造容器の温度については、以下の被覆管と同様に行う。また、先行試験用要素の被覆管温度については、内壁構造容器の温度から内壁構造容器内の冷却材温度を以下の冷却材温度と同様に計算し、これを冷却材温度として計算する。密封構造容器の温度については、以下の被覆管と同様に行う。また、基礎試験用要素の被覆管温度については、

密封構造容器の温度から密封構造容器内の冷却材温度を以下の冷却材温度と同様に計算し、これを冷却材温度として計算する。照射用実験装置の熱設計は、照射燃料集合体と同様に行うこととし、外側容器の温度については、以下の被覆管と同様に行う。また、照射試料キャプセル温度については、外側容器の温度から外側容器内の冷却材温度を以下の冷却材温度と同様に計算し、これを冷却材温度として計算する。照射物の温度については、以下の燃料最高温度と同様に計算する。

(i) 冷却材温度

冷却材温度は、以下の式により計算する。

$$T_{Na} = T_{IN} + \frac{1}{W \cdot C_p} \int_0^x ql(x) dx$$

ここで  $T_{Na}$  : 冷却材温度 (°C)

$ql(x)$  : 線出力密度 (W/cm)

$W$  : 冷却材流量 (g/s)

$C_p$  : 冷却材比熱 (W・s/g/°C)

$T_{IN}$  : 冷却材入口温度 (°C)

$x$  : 炉心下端からの距離 (軸方向距離) (cm)

(ii) 被覆管表面温度

被覆管表面温度は、以下の式により計算する。

$$T_{Co} = T_{Na} + \frac{D_e}{K_{Na}} \cdot \frac{1}{Nu} \cdot \frac{ql}{\pi d_{Co}}$$

ここで  $T_{Co}$  : 被覆管表面温度 (°C)

$D_e$  : 水力等価直径 (cm)

$d_{Co}$  : 被覆管外径 (cm)

$K_{Na}$  : 冷却材熱伝導度 (W/cm/°C)

$Nu$  : ヌセルト数

(iii) 被覆管内面温度

被覆管内面温度は、以下の式により計算する。

$$T_{Ci} = T_{Co} + \frac{\ln(d_{Co}/d_{Ci})}{2\pi K_C} \cdot ql$$

ここで  $T_{Ci}$  : 被覆管内面温度 (°C)

$K_C$  : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C)

$d_{Ci}$  : 被覆管内径 (cm)

(iv) 燃料表面温度

燃料表面温度は以下の式により計算する。

$$T_S = T_{Ci} + \frac{ql}{h_g \cdot \pi(d_p + d_{Ci})/2}$$

ここで  $T_S$  : 燃料表面温度 (°C)

$h_g$  : ギャップ熱伝達率 (W/cm<sup>2</sup>/°C)

$d_p$  : ペレット直径 (cm)

(v) 燃料最高温度

熔融温度に達しない範囲の燃料最高温度は以下の式により計算する。なお、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料では、燃料ペレットの相変化及び密度変化を考慮する。

$$\int_{T_s}^{T_p} k dT = \frac{ql}{4\pi}$$

ここで  $T_p$  : 燃料最高温度 (°C)

$k$  : 燃料熱伝導度 (W/cm/°C)

(vi) 燃料溶融半径

先行試験用要素 (溶融あり) の燃料溶融半径は、以下の式により計算する。

$$\int_{T_s}^{T_m} k dT = \frac{ql}{4\pi} \left( 1 - \frac{r_m^2}{r_o^2} \right)$$

ここで  $r_m$  : 燃料溶融半径 (cm)

$T_m$  : 燃料の溶融温度 (°C)

$r_o$  : 燃料半径 (cm)

(vii) 燃料溶融割合

先行試験用要素 (溶融あり) の燃料溶融割合は、以下の式により計算する。

$$V_m = \frac{r_m^2}{r_o^2}$$

ここで  $V_m$  : 燃料溶融割合

(2) 物性定数

熱設計計算における物性定数は、第 3.5.1 表に示す値を使用する。また、先行試験用要素及び基礎試験用要素の被覆管については、オーステナイト系ステンレス鋼の場合はオーステナイト系ステンレス鋼の、フェライト系ステンレス鋼 (マルテンサイト系ステンレス鋼及びフェライト-マルテンサイト系ステンレス鋼を含む。) の場合は高速炉用フェライト系ステンレス鋼の物性定数を使用する。

3.5.4 出力分布

熱設計計算では、第 3.4.5 表に示す出力ピーキング係数を使用する。なお、照射燃料集合体及び照射用実験装置の出力ピーキング係数は、炉心燃料集合体のそれを上回ることはない。

3.5.5 冷却材流量配分

照射燃料集合体の冷却材流量配分については、炉心燃料集合体のそれと同様に行うが、必要に応じて照射燃料集合体等の内部に設ける流量調節機構により行う。

3.5.6 工学的安全係数

熱設計計算における工学的安全係数は、燃料ペレット、被覆管、冷却材等の温度上昇の最大値を求めるための係数であり、炉心燃料集合体にあつては、製作公差、物性定数のばらつき、

出力分布の不確かさ、冷却材の温度及び流量等の変動、原子炉熱出力の測定誤差等を含み、照射燃料集合体にあつては、燃料仕様によらず共通する原子炉熱出力の測定誤差等を含む<sup>(3)</sup>。なお、照射燃料集合体にあつては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の第 27 条に基づく設計及び工事の計画の認可申請の段階において、製作する燃料要素の仕様を踏まえ、燃料仕様に依存する項目について個別に工学的安全係数を定める。熱設計計算に用いる炉心燃料集合体及び照射燃料集合体の工学的安全係数を以下に示す。

#### 工学的安全係数

照射燃料集合体 1.05

#### 3.5.7 過出力因子

過出力因子は、運転時の異常な過渡変化時において、燃料ペレットが達し得る最高温度及びペレット最大熔融割合を求めるための因子である。熱設計計算に用いる過出力因子を以下に示す。

#### 過出力因子

照射燃料集合体 1.08

ただし、A型用炉心燃料要素については 1.07

#### 3.5.8 熱特性主要目

熱設計計算に用いる熱特性の主要目を第 3.5.3 表に示す。

#### 3.5.9 評価

炉心燃料集合体及び照射燃料集合体の定格出力時における燃料最高温度、被覆管最高温度及び冷却材最高温度並びに過出力時における燃料最高温度の評価結果を第 3.5.4 表に示す。

#### 3.5.10 参考文献

- (3) 池上哲雄他、「(XIV) ホットスポットファクターの見直し」、日本原子力学会昭和 59 年度炉物理・炉工学分科会予稿集 A 5 3 (1984)
- (4) M.Kato et al., “Physical Properties and Irradiation Behavior Analysis of Np- and Am-Bearing MOX Fuels”, J.Nucl. Sci.Technol., 48:4, 646-653 (2011)
- (5) “Mechanical and Physical Properties of the Austenitic Chromium-Nickel Stainless Steels at Elevated Temperatures”, The International Nickel Company (1963)
- (6) 揃政敏他、「高速炉用フェライト系ステンレス鋼燃料被覆管物性及び特性評価(「常陽」IV型特殊燃料要素用被覆管)」、PNC-TN9430 90-003 (1990)
- (7) O.E.Dwyer et al., At. Energy Rev. 4, 3 (1966)
- (8) R.N.Lyon, “Chem. Eng. Progr.”, 47, 75/79 (1951)
- (9) G. H. Golden et al., “THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SODIUM”, ANL-7323 (1967)

第 3.5.1 表 熱設計計算に使用する物性定数 (1/3)

項目	物性定数	出典
燃料ペレット熱伝導度 $\lambda = \frac{1-p}{1+0.5p} \cdot \lambda_0$ $\lambda_0 = \frac{1}{0.01595 + 2.713x + 0.35834m + 0.06317Np + (2.493 - 2.625x) \times 10^{-4}T} + \frac{1.541 \times 10^{11}}{T^{2.5}} \cdot \exp\left(-\frac{15220}{T}\right)$ <p> <math>\lambda</math> : 気孔率 p における燃料ペレット熱伝導度 (W/m/K)  <math>\lambda_0</math> : 100%TD における熱伝導度 (W/m/K)                      p : 気孔率 (=1-<math>\rho</math>)  <math>\left[ \begin{array}{l} \rho = 0.99 \text{ (柱状晶領域)} \\ \rho = 0.97 \text{ (等軸晶領域)} \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} 1,900^\circ\text{C} \leq T_p \\ 1,400^\circ\text{C} \leq T_p &lt; 1,900^\circ\text{C} \\ T_p &lt; 1,400^\circ\text{C} \end{array} \right]</math>                      T : 燃料ペレット温度 (K)                      X : 2.00- 0/M      0/M : 化学量論比                      Am : Am 含有率      Np : Np 含有率                 </p>	プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料	加藤らの式 <sup>(4)</sup>



第 3.5.1 表 熱設計計算に使用する物性定数 (2/3)

項目	物性定数	出典
ギヤップ熱伝達率	照射燃料集合体の場合 $hg = \frac{C1 + C2Q}{G_0 - C3D_{pin}Q + C4}$ hg : ギヤップ熱伝達率 (W/cm <sup>2</sup> /°C) G <sub>0</sub> : 製造時直径ギヤップ幅 (cm) D <sub>pin</sub> : 製造時被覆管内径 (cm) Q : 線出力 (W/cm) C1~C4 は照射試験及び物性値から評価し設定される係数で、以下の通り。 C1 : ギヤップ部のガス熱伝導度由来する係数 (W/cm/°C) C2 : 燃料ペレットの熱膨張係数由来する係数 (1/°C) C3 : 燃料ペレットの熱膨張係数由来する係数 (cm/W) C4 : 温度ジャンプ距離に由来する係数 (cm)	
被覆管熱伝導度	オーステナイト系ステンレス鋼 $K_c = 0.132 + 1.3 \times 10^{-4} T_c$ K <sub>c</sub> : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C) T <sub>c</sub> : 被覆管温度 (°C) 高速炉用フェライト系ステンレス鋼 $K_c = (25.475 - 2.038 \times 10^{-2} T_c + 1.665 \times 10^{-4} T_c^2 - 3.040 \times 10^{-7} T_c^3 + 1.727 \times 10^{-10} T_c^4) \times 10^{-2}$ K <sub>c</sub> : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C) T <sub>c</sub> : 被覆管温度 (°C)	International Nickel Company <sup>(5)</sup>  PNC-TN9430 90-003 <sup>(6)</sup>

第 3.5.1 表 熱設計計算に使用する物性定数 (3/3)

項目	物性定数	出典
被覆管表面熱伝達率	$h_{fi,lm} = \left[ \frac{K_N}{D} \right] Nu$ <p> <math>h_{fi,lm}</math> : 被覆管表面熱伝達率 (cal/cm<sup>2</sup>/s/°C)  <math>D</math> : 水力等価直径 (cm)  <math>K_N</math> : 冷却材熱伝導度 (cal/cm/s/°C)  <math>Nu</math> : ヌセルト数 <math>Nu = 7.0 + 0.025Pe^{0.8}</math>  <math>Pe</math> : ペクレ数                 </p>	<p>Dwyer の式<sup>(7)</sup></p> <p>Lyon の式<sup>(8)</sup></p>
冷却材比熱	$C_p = 0.3433 - 1.387 \times 10^{-4} T_N + 1.106 \times 10^{-7} T_N^2$ $C_p$ : 冷却材比熱 (cal/g/°C) $T_N$ : 冷却材温度 (°C)	ANL - 7323 <sup>(9)</sup>
冷却材密度	$\gamma = 0.9500 - 2.298 \times 10^{-4} T_N - 1.461 \times 10^{-8} T_N^2 + 5.638 \times 10^{-12} T_N^3$ $\gamma$ : 冷却材密度 (g/cm <sup>3</sup> ) $T_N$ : 冷却材温度 (°C) (100°C ~ 1,400°C)	ANL - 7323 <sup>(9)</sup>
冷却材粘性係数	$\log \mu = -1.4892 + 220.65 / T_N - 0.49251 \log T_N$ $\mu$ : 冷却材粘性係数 (g/cm/s) $T_N$ : 冷却材温度 (K)	ANL - 7323 <sup>(9)</sup>
冷却材熱伝導度	$K_N = 0.93978 - 3.2505 \times 10^{-4} T_N + 3.6192 \times 10^{-8} T_N^2$ $K_N$ : 冷却材熱伝導度 (W/cm/°C) $T_N$ : 冷却材温度 (°F)	ANL - 7323 <sup>(9)</sup>
冷却材エンタルピー	$H = 1.628393 T_N - 4.16517 \times 10^{-4} T_N^2 + 1.534903 \times 10^{-7} T_N^3 - 554.5873$ $H$ : 冷却材エンタルピー (W・s/g) $T_N$ : 冷却材温度 (K)	ANL - 7323 <sup>(9)</sup>

第 3.5.3 表 熱特性主要目

原子炉熱出力	100MW	
1 次冷却材全流量	約 2,700t/h	
原子炉入口冷却材温度	約 350℃	
原子炉出口冷却材温度	約 456℃	
原子炉プレナム最高圧力	約 4kg/cm <sup>2</sup> [gage] (約 0.39MPa[gage]) * <sup>1</sup>	
燃料要素最大線出力密度	定格出力時	過出力時
照射燃料集合体 III型特殊燃料要素	約 480W/cm	約 520W/cm
IV型特殊燃料要素	約 500W/cm	約 540W/cm
III型限界照射試験用要素	約 480W/cm	約 520W/cm
IV型限界照射試験用要素	約 500W/cm	約 540W/cm
先行試験用要素	約 1,000W/cm	約 1,080W/cm
基礎試験用要素	約 600W/cm	約 650W/cm
A型用炉心燃料要素	約 330W/cm	約 360W/cm
限界照射試験用補助要素	約 480W/cm	約 520W/cm

\*1：水頭圧を除く。

第3.5.4表 熱特性解析結果 (2/3)

	燃料最高温度			燃料最大溶解割合	
	定格出力時	過出力時	限界照射試験用要素の被覆管開孔時	定格出力時	過出力時
照射燃料集合体					
III型特殊燃料要素	約2,480°C	約2,590°C	—	—	—
IV型特殊燃料要素	約2,520°C	約2,630°C	—	—	—
III型限界照射試験用要素	約2,430°C	約2,560°C	約2,460°C	約20% * 2	約30% * 2
IV型限界照射試験用要素	約2,520°C	約2,630°C	約2,540°C	—	—
先行試験用要素	溶解温度以下*1	溶解温度以下*1	—	—	—
基礎試験用要素	溶解温度以下	溶解温度以下	—	—	—
A型用炉心燃料要素	約2,300°C	約2,410°C	—	—	—
限界照射試験用補助要素	約2,430°C	約2,560°C	約2,580°C	—	—
	被覆管最高温度 (肉厚中心) * 3				
	定格出力時				
	A型照射燃料集合体 装填時	B型照射燃料集合体 装填時	C型照射燃料集合体 装填時	D型照射燃料集合体 装填時	照射用実験装置 装填時
照射燃料集合体					
III型特殊燃料要素	約700°C	約700°C	約700°C	約700°C	—
IV型特殊燃料要素	約610°C	約610°C	約610°C	約610°C	—
III型限界照射試験用要素	約750°C	約700°C	—	約700°C	—
IV型限界照射試験用要素	約660°C	約610°C	—	約610°C	—
先行試験用要素	—	約750°C	—	—	—
基礎試験用要素	—	約750°C	—	—	—
A型用炉心燃料要素	620°C以下	—	—	—	—
限界照射試験用補助要素	—	約700°C	—	約700°C	—
内壁構造容器	—	約675°C	—	—	—
密封構造容器	—	約675°C	—	—	—
照射用実験装置	—	—	—	—	—
照射燃料キャプセル	—	—	—	—	約750°C
外側容器	—	—	—	—	約675°C

第3.5.4表 熱特性解析結果 (3/3)

	被覆管最高温度 (肉厚中心)			
	限界照射試験用要素の被覆管の開孔時		D型照射燃料集合体装填時	
	A型照射燃料集合体装填時	B型照射燃料集合体装填時	C型照射燃料集合体装填時	D型照射燃料集合体装填時
照射燃料集合体				
III型限界照射試験用要素	約820℃	約760℃	約690℃	約760℃
IV型限界照射試験用要素	約700℃	約650℃	約600℃	約650℃
限界照射試験用補助要素	—	約810℃	—	約810℃
	冷却材最高温度			
	定格出力時			
	A型照射燃料集合体装填時	B型照射燃料集合体装填時	C型照射燃料集合体装填時	D型照射燃料集合体装填時
照射燃料集合体				
III型特殊燃料要素	約690℃	約690℃	約690℃	約690℃
IV型特殊燃料要素	約600℃	約600℃	約600℃	約600℃
III型限界照射試験用要素	約740℃	約690℃	—	—
IV型限界照射試験用要素	約650℃	約600℃	—	—
先行試験用要素	—	約670℃*4	—	—
基礎試験用要素	—	約670℃*5	—	—
A型用炉心燃料要素	約600℃	—	—	—
限界照射試験用補助要素	—	約690℃	—	約690℃
照射用実験装置	—	—	—	約670℃*6

- \* 1 : 酸化物燃料を除く。
- \* 2 : 酸化物燃料の場合。
- \* 3 : 内壁構造容器及び密封構造容器または密封構造容器の最高温度。  
照射燃料キャプセルにあっては、照射燃料キャプセルの最高温度。  
外側容器にあっては、外側容器の最高温度。
- \* 4 : 内壁構造容器を冷却する冷却材の値。
- \* 5 : 密封構造容器を冷却する冷却材の値。
- \* 6 : 外側容器を冷却する冷却材の値。

### 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つては、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。

#### 3.7.3 照射燃料集合体

##### 3.7.3.1 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。ただし、試験用要素にあつては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、計画された範囲でその健全性を喪失しても、他の燃料要素の健全性に影響を与えないよう、使用する試験用要素に応じて以下の方針を満足するよう設計する。

###### (i) III型及びIV型特殊燃料要素

- a. 燃料最高温度は、2,680℃以下となるように設計する。
- b. 被覆管歪は、十分小さくなるように設計する。
- c. 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ブ破断を生じないように十分低く設計する。
- d. 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。
- e. 累積疲労サイクルは、クリーブ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に設計する。

###### (ii) III型及びIV型限界照射試験用要素

- a. 燃料最高温度は、熔融温度を超えないように設計する。
- b. 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、被覆管が著しく損傷しない

よう、定格出力時の被覆管温度を制限する。

- c. 設計計算手法及び物性定数は、各種の試験研究を通じて信頼度を確認したものを使用する。
- d. 公称値及び工学的安全係数は、適切な安全余裕を有すること。

(iii) 先行試験用要素

- a. 燃料最高温度が熔融温度を超えないように設計する。ただし、酸化物燃料については、燃料熔融割合が30%を超えないように設計する。
- b. 燃料部と被覆管との相互作用による被覆管の円周方向引張全歪は、第3.7.3図に示すSUS316の破断時の円周方向引張塑性歪の実験データに十分な設計余裕を考慮した3%以内とする。
- c. 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ブ破断を生じないように十分低く設計する。
- d. 被覆管の各部にかかる荷重に対する応力計算値は、ASME 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。
- e. 累積疲労サイクルは、クリーブ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に設計する。

(iv) 基礎試験用要素

- a. 燃料最高温度が熔融温度を超えないように設計する。
- b. 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、被覆管が著しく損傷しないよう、定格出力時の被覆管温度を制限する。
- c. 被覆管の各部にかかる荷重に対する応力計算値は、ASME 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。

(v) A型用炉心燃料要素

- a. 炉心燃料集合体の燃料要素の設計方針を満足するよう設計する。

(vi) 限界照射試験用補助要素

- a. 燃料最高温度は、2,680℃以下となるように設計する。
- b. 被覆管歪は、十分小さくなるように設計する。
- c. 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ブ破断を生じないように十分低く設計する。
- d. 被覆管の各部にかかる荷重に対する応力計算値は、ASME 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。
- e. 累積疲労サイクルは、クリーブ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に設計する。

(2) 燃料集合体

炉心燃料集合体の設計方針に準ずる。ただし、限界照射試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、コンパートメントの冷却材出口部は多数の小口径の孔とし、万一、限界照射試験用要素の開孔部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。また、先行試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、燃料熔融状態の先

先行試験用要素の被覆管の破損が生じた場合でも、内壁構造容器の健全性が確保される構造とするとともに、内壁構造容器の冷却材出口部を多数の小口径の孔とし、万一、先行試験用要素の被覆管の破損部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。基礎試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、基礎試験用要素の被覆管が開孔した場合でも、密封構造容器の健全性が確保される構造とする。

#### 3.7.3.2 使用条件

照射燃料集合体の使用条件を第3.7.1表に示す。なお、限界照射試験、先行試験及び基礎試験においては、燃料要素を除き、照射燃料集合体を構成する部材等を適当な照射期間ごとに交換できるものとする。また、燃料破損検出系により、燃料要素の被覆管の開孔又は破損が検知された場合には、原子炉を停止し、当該照射燃料集合体を炉心から取り出すとともに、放射性廃ガス中の放射性物質の濃度が所定の値を超える場合には、当該廃ガスを貯留タンクに圧入貯蔵するものとする。

#### 3.7.3.3 解析手法

##### (1) 燃料要素

燃料要素の解析は、「3.5.3 計算方法 (1)設計計算手法」及び追補1「3. 原子炉及び炉心」の追補の「VI. 照射燃料集合体に装填する燃料要素の設計」に基づいて行う。ただし、Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素並びに限界照射試験用補助要素の解析における、限界照射試験用要素の被覆管に開孔が生じその開孔部から核分裂生成ガスが放出された場合の影響は、被覆管表面温度を算出する式において考慮する。

##### (2) 燃料集合体

炉心燃料集合体の解析に準じて行う。ただし、試験用要素を装填した集合体にあつては、集合体に加わる種々の荷重に対して集合体の各構成要素が十分な強度を有し、その機能が保持されることについて、有限要素法構造解析コード等を用いて解析を行う。また、先行試験用要素又は基礎試験用要素を装填した集合体にあつては、試験用要素を装填する内壁構造容器又は密封構造容器に加わる種々の荷重に対して、内壁構造容器又は密封構造容器の機能が保持されることについても解析を行う。

#### 3.7.3.4 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、寸法及び組成の異なる、Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素、Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素、先行試験用要素、基礎試験用要素、A型用炉心燃料要素（A型照射燃料集合体に装填するA型用炉心燃料要素（内側）及びA型用炉心燃料要素（外側）の2種類とする。）及び限界照射試験用補助要素の9種類から構成する。

これらの燃料要素は、燃料部を被覆管に挿入し、その上下に熱遮へい部（燃料部が金



属燃料の燃料要素を除く。)を、上部の熱遮へい部の上にプレナムスプリング等(燃料部と被覆管との熱伝達を燃料要素内に充填するナトリウムで行うナトリウムボンド型の燃料要素及び燃料部が振動充填燃料の燃料要素を除く。)を入れ、両端に端栓を溶接した密封構造とし、内部に不活性ガスを封入する。

## (2) 燃料集合体

照射燃料集合体の概略構造を第 3.7.4 図に、主要仕様を第 3.7.3 表に示す。照射燃料集合体は、炉心燃料集合体と同様に、燃料要素、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。照射燃料集合体の種類は、燃料集合体の中央に試料部を設けた A 型照射燃料集合体、燃料集合体内に数本のコンパートメントを納めた B 型及び D 型照射燃料集合体、炉心燃料集合体と同様な形状の C 型照射燃料集合体の 4 種類とする。

コンパートメントは、照射燃料集合体の内部において独自に冷却材流量を設定できる二重の円筒管( $\alpha$  型コンパートメントにおいては、外管に六角管も用いる。)であり、その種類は装填する燃料要素の種類及び本数並びに構造及び主要寸法等の組合せにより  $\alpha$  型、 $\beta$  型、 $\gamma$  型及び  $\delta$  型コンパートメントの 4 種類に分類される。なお、 $\alpha$  型及び  $\gamma$  型コンパートメントは、燃料要素最大 5 本をピンタイロッドの周囲に配置し、ワイヤスペーサ等で燃料要素間を保持する構造とする。 $\beta$  型及び  $\delta$  型コンパートメントは、燃料要素 1 本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持する構造とする。先行試験用  $\gamma$  型コンパートメントは、燃料要素 1 本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持し、これを上部と下部にストレーナを有した管構造である内壁構造容器に装填し、この内壁構造容器を納めた構造とする。基礎試験用  $\gamma$  型コンパートメントは、燃料要素 1 本をシュラウド管に装填し、ワイヤスペーサ等で燃料要素とシュラウド管との間を保持し、これを密封型の管構造である密封構造容器に装填し、この密封構造容器を納めた構造とする。

照射燃料集合体の構造を以下に示す。

### (i) A 型照射燃料集合体

A 型照射燃料集合体は、試料部の周囲に、ワイヤスペーサを巻いた A 型用炉心燃料要素を炉心燃料集合体と同じ燃料要素ピッチで正三角格子状に配置して、全体をラップ管に納め、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。

試料部は、燃料要素 7 本のバンドル(正三角格子状に配置した燃料要素の束)を二重のステンレス鋼の試料部六角管に納めたもの、**ないし**  $\alpha$  型又は  $\beta$  型コンパートメントをステンレス鋼の試料部六角管に納めた構造とする。

A 型照射燃料集合体は、燃料材が占める体積比率が比較的大きいため、高い中性子束による照射試験ができる機能を有する。また、コンパートメントを有するものにあつては、コンパートメントを適宜取り出すことにより照射中の燃料要素の健全性を追跡確認できる機能を有する。

**A 型照射燃料集合体の概略構造を第 3.7.4 図及び第 3.7.5 図に示す。**

(ii) B型照射燃料集合体

B型照射燃料集合体は、燃料集合体の中央部に設けたステンレス鋼のタイロッドのまわりに、 $\gamma$ 型コンパートメント6本を配し、全体をラップ管に納め、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。B型照射燃料集合体は、ほぼ同一の照射条件下でパラメトリックなデータを得ることができ、また、コンパートメントを適宜取り出すことにより照射中の燃料要素の健全性を追跡確認できる機能を有する。

先行試験用 $\gamma$ 型コンパートメント内には内壁構造容器1本が納められ、この内壁構造容器内に先行試験用要素を装填することにより、燃料溶融状態の先行試験用要素の被覆管が、万一、破損しても、先行試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えない構造とする。

基礎試験用 $\gamma$ 型コンパートメント内には密封構造容器1本が納められ、この密封構造容器内に基礎試験用要素を装填することにより、基礎試験用要素の被覆管が開孔しても、基礎試験用要素以外の燃料要素の健全性に影響を与えない構造とする。

B型照射燃料集合体の概略構造を第3.7.4図及び第3.7.6図～第3.7.8図に示す。

(iii) C型照射燃料集合体

C型照射燃料集合体は、燃料要素最大91本のバンドルをステンレス鋼の試料部六角管に納め、これをラップ管に納め、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。C型照射燃料集合体は、同時に多数の照射データを得ることができ、燃料要素の健全性を統計的に確認できる機能を有する。

C型照射燃料集合体の概略構造を第3.7.4図及び第3.7.9図に示す。

また、照射条件をオンラインで計測するものにあつては、検出器を取り付け、計測線を炉外に引き出す構造とする。計測線付C型照射燃料集合体は、内側延長管、外側延長管、ハウジング等の上部構造により炉心上部機構に支持する。上部案内管、外側延長管及び内側延長管の間隙には、ステンレス鋼、炭化ほう素等の遮へい体を設ける。計測線付C型照射燃料集合体の試料部は、燃料交換時に回転プラグが回転できるように、下部案内管によりガイドして上部案内管に引き上げる。計測線は、照射試験終了後計測線付C型照射燃料集合体の取り出し時に、内側延長管と外側延長管により切断し、上部構造と切り離す。

計測線付C型照射燃料集合体の概略構造を第3.7.10図に示す。

(iv) D型照射燃料集合体<sup>(2)</sup>

D型照射燃料集合体は、燃料集合体の中央部に設けたステンレス鋼のタイロッドのまわりに、 $\gamma$ 型コンパートメント6本、 $\delta$ 型コンパートメント18本、又は、これら2種類のコンパートメントを混在させて配し、全体をラップ管に納め、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。D型照射燃料集合体は、ほぼ同一の照射条件下で燃料要素1本ごとに最大18のパラメータを設定して照射データを得ることができ、また、コンパートメントを適宜取り出すことにより照射中の燃料要素の健全性を追跡確認できる機能を有する。

D型照射燃料集合体の概略構造を第3.7.4図及び第3.7.11図に示す。

### 3.7.3.5 評価

#### (1) 構成材料

燃料材であるプルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合炭化物焼結ペレット及びプルトニウム・ウラン混合窒化物焼結ペレット並びに熱遮へいペレットの材料であるウラン酸化物焼結ペレット、ウラン炭化物焼結ペレット及びウラン窒化物焼結ペレットは、炉心の運転温度及び圧力において、被覆管（Ⅲ型特殊燃料要素にあつてはオーステナイト系ステンレス鋼、Ⅳ型特殊燃料要素にあつては高速炉用フェライト系ステンレス鋼、Ⅲ型限界照射試験用要素にあつてはオーステナイト系ステンレス鋼、Ⅳ型限界照射試験用要素にあつては高速炉用フェライト系ステンレス鋼、A型用炉心燃料要素にあつてはオーステナイト系ステンレス鋼、限界照射試験用補助要素にあつてはオーステナイト系ステンレス鋼）及び充填ガス（ヘリウム）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。なお、プルトニウム・ウラン混合窒化物焼結ペレットは、照射中にごくわずかがプルトニウムと窒素に分離するが、その影響は無視できる程度である。また、先行試験用要素及び基礎試験用要素に装填する燃料材の種類のうち、金属燃料は、照射中にごくわずかが被覆管（ステンレス鋼）と反応する可能性があるが、その影響は無視できる程度である<sup>(3)~(12)</sup>。

被覆管等に用いているステンレス鋼は、吸収断面積が小さく中性子経済に優れ、燃料ペレットと被覆管の相互作用及び被覆管の内外圧差による変形に十分耐える強度を有し、ナトリウム、プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料、プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料、プルトニウム・ウラン混合窒化物燃料及び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。ただし、Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素及び基礎試験用要素にあつては、被覆管の強度限界を超えると考えられる厳しい条件下（高燃焼度、高被覆管温度等）で照射を行うため、被覆管が開孔する可能性がある。

#### (2) 燃料要素

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。

##### (i) Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素

###### a. 燃料最高温度

Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素の燃料最高温度は、定格出力時の最大線出力密度（それぞれ 480W/cm 及び 500W/cm）においてそれぞれ約 2,480℃及び約 2,520℃であり、また、過出力時の最大線出力密度（それぞれ 520W/cm 及び 540W/cm）においてそれぞれ約 2,590℃及び約 2,630℃であり、設計方針を満足する。

###### b. 被覆管の内圧、応力等

Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素の被覆管内圧は、製造時に封入する不活性ガス、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、ガスペナ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、被覆管肉厚が最も薄い場合においても 1.0 未

満である。

Ⅲ型及びⅣ型特殊燃料要素の被覆管応力は、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  $3\text{kg}/\text{cm}^2[\text{gage}]$  (約  $0.29\text{MPa}[\text{gage}]$ ) とがほぼ等しいので小さい。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するが、通常運転時における一次膜応力の最大値は被覆管の材料の  $S_m$  値より十分小さい。

さらに、照射クリープ、スエリング等によるⅢ型及びⅣ型特殊燃料要素の被覆管の歪は十分小さく、各種の応力サイクルによる累積疲労サイクルは設計疲労寿命に比べて十分小さい。

(ii) Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素

a. 燃料最高温度

Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素の燃料最高温度は、定格出力時の最大線出力密度（それぞれ  $480\text{W}/\text{cm}$  及び  $500\text{W}/\text{cm}$ ）においてそれぞれ約  $2,480^\circ\text{C}$  及び約  $2,520^\circ\text{C}$  であり、また、過出力時の最大線出力密度（それぞれ  $520\text{W}/\text{cm}$  及び  $540\text{W}/\text{cm}$ ）においてそれぞれ約  $2,590^\circ\text{C}$  及び約  $2,630^\circ\text{C}$  であり、設計方針を満足する。一方、被覆管開孔時における燃料最高温度は、 $2,680^\circ\text{C}$  を超えない。

b. 被覆管の内圧、応力等

Ⅲ型及びⅣ型限界照射試験用要素は、最高燃焼度に至るまでにクリープ寿命分数和が  $1.0$  を超えるよう設計されるため、被覆管が開孔に至る可能性がある。

(iii) 先行試験用要素

燃料部を溶融させない先行試験用要素について、設計仕様及び設計条件を第 3.7.4 表に、設計結果を第 3.7.5 表に示す。また、燃料部を溶融させる先行試験用要素について、設計仕様及び設計条件を第 3.7.6 表に、設計結果を第 3.7.7 表に示す。

a. 燃料最高温度

先行試験用要素の燃料材は、照射挙動が不明確な材料を用いる場合があるが、融点及び熱伝導度等を安全側に考慮して設計するため、過出力時にあっても、燃料最高温度が溶融温度を超えない結果となる。また、一部の酸化燃料にあつては、定格出力時に、燃料最高温度が溶融温度を超えるよう設計する場合があるが、同様に、融点及び熱伝導度等を安全側に考慮して設計するため、過出力時にあっても、燃料溶融割合が  $30\%$  を超えない結果となる。

b. 被覆管の内圧、応力等

先行試験用要素の被覆管内圧は、燃料部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、ガスプレナムの体積を十分大きくとることにより、被覆管の内圧によるクリープ寿命分数和は、 $1.0$  未満である。

先行試験用要素の被覆管応力は、燃焼初期においては小さい。また、燃焼に伴って内圧が徐々に上昇するが、通常運転時における一次膜応力は被覆管の材料の  $S_m$  値より小さい。

さらに、各種の応力による累積疲労サイクルは設計疲労寿命に比べて小さい。

c. 被覆管の歪（燃料溶融に伴う燃料と被覆管の相互作用による歪）

酸化物燃料の燃料溶融時に生じる被覆管の歪は、燃料溶融割合が 30%であっても、3%を超えることはない。

(iv) 基礎試験用要素

基礎試験用要素について、設計仕様及び設計条件を第 3.7.8 表に、設計結果を第 3.7.9 表に示す。

a. 燃料最高温度

基礎試験用要素の燃料最高温度は、定格出力時の最大線出力密度を制限することにより、過出力時にあっても溶融温度を超えることはない。

b. 被覆管の内圧、応力等

基礎試験用要素の被覆管内圧は、燃料部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、通常運転時における一次膜応力は被覆管の材料の  $S_m$  値より小さい。クリープ寿命分数和は、最高燃焼度に至るまでに 1.0 を超えるよう設計することがあるため、この場合は、被覆管が開孔に至る可能性がある。

(v) A型用炉心燃料要素

炉心燃料集合体の燃料要素の評価結果と同様である。

(vi) 限界照射試験用補助要素

a. 燃料最高温度

限界照射試験用補助要素の燃料最高温度は、定格出力時の最大線出力密度 480 W/cm において約 2,480°C であり、また、過出力時の最大線出力密度 520 W/cm において約 2,590°C であり、設計方針を満足する。一方、被覆管開孔時における燃料最高温度は、2,680°C を超えない。

b. 被覆管の内圧、応力等

限界照射試験用補助要素の被覆管内圧は、製造時に封入する不活性ガス、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、ガスペナ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、隣接する限界照射試験用要素の被覆管開孔時のクリープ損傷を考慮し、被覆管肉厚が最も薄い場合においても 1.0 未満である。

限界照射試験用補助要素の被覆管応力は、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 3kg/cm<sup>2</sup>[gage] (約 0.29MPa[gage]) とがほぼ等しいので小さい。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するが、通常運転時における一次膜応力の最大値は被覆管の材料の  $S_m$  値より十分小さい。

さらに、照射クリープ、スエリング等による限界照射試験用補助要素の被覆管の歪は十分小さく、各種の応力サイクルによる累積疲労サイクルは設計疲労寿命に比べて十分小さい。

(3) 燃料集合体

燃料集合体は、輸送中又は取扱中並びに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が加わるが、これらの荷重に対して十分な強度を有している。

先行試験用要素を装填したB型照射燃料集合体にあつては、燃料溶融状態にある先行試験用要素の被覆管が破損した際に発生する内壁構造容器内の圧力に対し、内壁構造容器の健全性が確保されることを確認した。

この発生する圧力の評価には、高速炉安全解析コードであり、実験の解析により妥当性が確認されているSAS3Dを改良したSAS4A<sup>(13)~(17)</sup>を使用した。

内壁構造容器及び先行試験用要素を円筒形モデルにて、内壁構造容器の内径 13mm、先行試験用要素の被覆管の外径 8.5mm、燃料ペレットの直径 7.5mm、スミア密度 85%TDの仕様で、燃料溶融割合を安全側に 40%として発生する圧力を評価した結果、最大 13.2MPa である。

この圧力は、SUS316相当ステンレス鋼の 675°Cで 15,000 時間使用した時の許容応力から求められる内壁構造容器の耐圧 30.6MPa を下回るため、内壁構造容器の健全性は確保される。

基礎試験用要素を装填したB型照射燃料集合体にあつては、基礎試験用要素の被覆管の開孔時及び開孔後の継続使用時においても、基礎試験用要素から放出される核分裂生成ガスの圧力が、最大 9.82MPa であり、SUS316相当ステンレス鋼の 675°Cで 15,000 時間使用した時の許容応力から求められる密封構造容器の耐圧 30.6MPa を下回るため、密封構造容器の健全性は確保される。

なお、事故と相まって基礎試験用要素の被覆管が開孔しても、事故時の密封構造容器の到達温度 800°Cは、密封構造容器が破損に至る温度 906°Cを下回るため、事故時であっても密封構造容器の健全性は確保される。

#### 3.7.4 参考文献

- (2) 核燃料サイクル開発機構、「D型照射リグの設計報告書」、JNC TN9410 99-010(1999)
- (3) 尾形 他, 電力中央研究所 研究報告 T95030 (1996)
- (4) T. Ogata et al., J. Nucl. Mater. 250 (1997) 171.
- (5) K. Nakamura et al., J. Nucl. Mater. 275 (1999) 246.
- (6) T. Ogata et al., J. Nucl. Sci. Technol., 37 (2000) 244.
- (7) K. Nakamura et al., J. Nucl. Sci. Technol., 38 (2001) 112.
- (8) D.D. Keiser Jr. and M.C. Petri, J. Nucl. Mater. 240 (1996) 51.
- (9) A.B. Cohen, H. Tsai and L.A. Neimark, J. Nucl. Mater. 204 (1993) 244.
- (10) Integral Fast Reactor Program, Annual Progress Report FY 1993, ANL-IFR-244.
- (11) H. Tsai, Y.Y. Liu, D. Wang and J.M. Kramer, Proc. Int. Conf. Fast Reactor and Related Fuel Cycles, Kyoto (Atomic Energy Society of Japan, 1991).
- (12) H. Tsai, Proc. Int. Fast Reactor Safety Meeting, Snowbird, 1990, vol. II (American Nuclear Society, 1990).
- (13) 丹羽元, 小山和也, 高速炉安全解析コードSAS4Aの導入整備と試計算に基づく改良検証計画 ZN9410 86-024, 1986年3月
- (14) 川田賢一, SAS4AコードによるCABRI-2 E3試験解析 ZN9410 93-185, 1993年8月
- (15) 久保重信, SAS4AによるCABRI-II E7試験解析 ZN9410 94-280, 1994年10月

- (16) 川田賢一, 佐藤一憲, 丹羽元, “CABRI-2 炉内試験総合評価(2) : 破損後物質移動モデルの改良と適用”, 日本原子力学会 1993 年秋の大会 1993 年 10 月 9~11 日 神戸商船大学, 予稿集 p109
- (17) 佐藤一憲, “CABRI-2 炉内試験総合評価(3) : 单相冷却材中での破損後挙動”, 日本原子力学会 1994 年春の年会 1994 年 3 月 29~31 日 筑波大学, 予稿集 p367

第3.7.1表 燃料集合体の使用条件 (2/4)

	燃料最高温度			燃料最大熔融割合		
	定格出力時	過出力時	限界照射試験用要素の被覆管開孔時	定格出力時	過出力時	過出力時
	照射燃料集合体 III型特殊燃料要素 IV型特殊燃料要素 III型限界照射試験用要素 IV型限界照射試験用要素 先行試験用要素 基礎試験用要素 A型用炉心燃料要素 限界照射試験用補助要素	2,540℃ 2,540℃ 2,540℃ 2,540℃ 溶解温度以下*1 溶解温度以下 2,350℃ 2,540℃	2,680℃ 2,680℃ 2,680℃ 2,680℃ 溶解温度以下*1 溶解温度以下 2,650℃ 2,680℃	— — 2,680℃ 2,680℃ — — — 2,680℃	— — — — 20%*2 — — —	— — — — 30%*2 — — —
	被覆管最高温度 (肉厚中心) *3					
	定格出力時					
	A型照射燃料集合体 装填時	B型照射燃料集合体 装填時	C型照射燃料集合体 装填時	D型照射燃料集合体 装填時		
照射燃料集合体 III型特殊燃料要素 IV型特殊燃料要素 III型限界照射試験用要素 IV型限界照射試験用要素 先行試験用要素 基礎試験用要素 A型用炉心燃料要素 限界照射試験用補助要素 内壁構造容器 密封構造容器	700℃ 610℃ 750℃ 660℃ — — 620℃ — — —	700℃ 610℃ 700℃ 610℃ 750℃ 750℃ — 700℃ 675℃ 675℃	700℃ 610℃ — — — — — — — —	700℃ 610℃ 700℃ 610℃ — — — 700℃ — —		



第3.7.1表 燃料集合体の使用条件 (3/4)

	被覆管最高温度 (肉厚中心)				被覆管円周方向 最大引張塑性歪
	限界照射試験用要素の被覆管の開孔時		D型照射燃料集合体 装填時		
	A型照射燃料集合体 装填時	B型照射燃料集合体 装填時			
照射燃料集合体 III型限界照射試験用要素 IV型限界照射試験用要素 先行試験用要素 限界照射試験用補助要素	890℃ 810℃ — —	890℃ 810℃ — 890℃	890℃ 810℃ — 890℃	— — 3% —	
	最高燃焼度				
	A型照射燃料集合体 装填時	B型照射燃料集合体 装填時	C型照射燃料集合体 装填時	D型照射燃料集合体 装填時	
照射燃料集合体 III型特殊燃料要素 IV型特殊燃料要素 III型限界照射試験用要素 IV型限界照射試験用要素 先行試験用要素 基礎試験用要素 A型用炉心燃料要素 限界照射試験用補助要素	130,000MWd/t 130,000MWd/t 150,000MWd/t 150,000MWd/t — — 90,000MWd/t —	130,000MWd/t 130,000MWd/t 200,000MWd/t 200,000MWd/t 200,000MWd/t 200,000MWd/t — 130,000MWd/t	130,000MWd/t 130,000MWd/t — — — — — —	130,000MWd/t 130,000MWd/t 200,000MWd/t 200,000MWd/t — — — 130,000MWd/t	

第3.7.1表 燃料集合体の使用条件 (4/4)

照射燃料集合体 A型照射燃料集合体 B型照射燃料集合体 C型照射燃料集合体 D型照射燃料集合体	燃料集合体の挿入量  第2.4.1表のとおり	炉心挿入位置		
		炉心燃料領域*4 (外側燃料領域*5) 炉心燃料領域*4 炉心燃料領域*4 炉心燃料領域*4		
年間照射試験回数				
限界照射試験用要素 装填時		先行試験用要素 装填時		基礎試験用要素 装填時
照射燃料集合体 A型照射燃料集合体 B型照射燃料集合体 C型照射燃料集合体 D型照射燃料集合体	最大4回 最大1回*6 — 最大1回*6	— 最大14回 — —	— 最大14回 — —	— 最大14回 — —

- \* 1 : 酸化物燃料を除く。
- \* 2 : 酸化物燃料の場合。
- \* 3 : 内壁構造容器及び密封構造容器にあつては、内壁構造容器または密封構造容器の最高温度。
- \* 4 : 制御棒及び後備炉停止制御棒の隣接位置に装荷しないものとする。
- \* 5 : A型用炉心燃料要素 (外側) 装填時。
- \* 6 : B型照射燃料集合体とD型照射燃料集合体の合計。

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (2/6)

		燃料材			
		燃料部			
	種類	プルトニウム含有率*1	核分裂性*2 プルトニウム富化度	プルトニウム 同位体組成比	ウラン濃縮度
照射燃料集合体 III型特殊燃料要素	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット	32wt%以下	25wt%以下	原子炉級	26wt%以下
	同上	同上	25wt%以下	同上	24wt%以下
	同上	同上	25wt%以下	同上	26wt%以下
	同上	同上	25wt%以下	同上	24wt%以下
	プルトニウムまたは*6*7ウランの単体または混合物の酸化物、炭化物、窒化物または金属	(制限なし)	80wt%以下	同上	85wt%以下
基礎試験用要素	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合炭化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合窒化物焼結ペレットまたはプルトニウム・ウラン混合金属スラグ	左欄について、それぞれ32wt%以下、25wt%以下、30wt%以下、20wt%以下	左欄について、それぞれ25wt%以下、20wt%以下、24wt%以下、16wt%以下	同上	85wt%以下
	A型用炉心燃料要素 (内側)	32wt%以下	約16wt%	同上	約18wt%
A型用炉心燃料要素 (外側) 限界照射試験用補助要素	同上	同上	約21wt%	同上	約18wt%
	同上	同上	25wt%以下	同上	26wt%以下

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (3/6)

	燃料材					熱遮へい部 種類
	燃料部					
	燃料ペレット (中実) 直径	燃料ペレット (中空) 外径/内径	燃料ペレット長さ			
照射燃料集合体 III型特殊燃料要素	5.3~7.5mm	5.3~7.5mm/約2mm	15mm以下	95%理論密度以下	ウラン酸化物* <sup>3</sup> 焼結ペレット	
IV型特殊燃料要素	5.18~6.18mm	5.18~6.18mm/約2mm	同上	95%理論密度以下	同上	
III型限界照射試験用要素	5.3~6.6mm	(該当なし)	同上	95%理論密度以下	同上	
IV型限界照射試験用要素	5.18~6.18mm	(該当なし)	同上	95%理論密度以下	同上	
先行試験用要素	4.6~7.5mm	4.6~7.5mm/約2mm	同上	95%理論密度以下	ウランの酸化物、* <sup>4</sup> * <sup>6</sup> 炭化物、窒化物または金属	
基礎試験用要素	4.6~7.5mm	4.6~7.5mm/約2mm	同上	95%理論密度以下	ウラン酸化物焼結ペレット* <sup>4</sup> ウラン炭化物焼結ペレット、 ウラン窒化物焼結ペレット またはウラン金属スラグ	
A型用炉心燃料要素 (内側)	約4.6mm	(該当なし)	約9mm	約94%理論密度	ウラン酸化物* <sup>3</sup> 焼結ペレット	
A型用炉心燃料要素 (外側)	約4.6mm	(該当なし)	約9mm	約94%理論密度	同上	
限界照射試験用補助要素	5.3~6.6mm	(該当なし)	15mm以下	95%理論密度以下	同上	

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (4/6)

	被覆管				その他の部品の材料	
	材料	外径	肉厚	端栓	ワイヤスパーサ	
照射燃料集合体						
III型特殊燃料要素	オーステナイト系 ステンレス鋼	6.4～8.5mm	0.4～0.7mm	オーステナイト系 ステンレス鋼	オーステナイト系 ステンレス鋼	
IV型特殊燃料要素	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	6.5～7.5mm	0.56～0.76mm	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	
III型限界照射試験用要素	オーステナイト系 ステンレス鋼	6.4～7.5mm	0.4～0.6mm	オーステナイト系 ステンレス鋼	オーステナイト系 ステンレス鋼	
IV型限界照射試験用要素	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	6.5～7.5mm	0.56～0.76mm	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼	
先行試験用要素	オーステナイト系 ステンレス鋼または 高速炉用フェライト系 ステンレス鋼 (酸化物 分散強化型を含む)	5.4～8.5mm	0.3～0.8mm	オーステナイト系 ステンレス鋼または 高速炉用フェライト系 ステンレス鋼 (酸化物 分散強化型を含む)	ステンレス鋼	
基礎試験用要素	ステンレス鋼 (クロム又は クロムとニッケルを 含せた合金鋼、酸化物 分散強化型を含む)	同上	同上	ステンレス鋼	同上	
A型用炉心燃料要素 (内側)	オーステナイト系 ステンレス鋼	約5.5mm	約0.35mm	オーステナイト系 ステンレス鋼	オーステナイト系 ステンレス鋼	
A型用炉心燃料要素 (外側)	同上	同上	同上	同上	同上	
限界照射試験用補助要素	同上	6.4～7.5mm	0.4～0.6mm	同上	同上	

第3.7.2表 燃料要素の主要仕様 (5/6)

	その他の部品の材料	
	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
照射燃料集合体		プレナムスリーブ
III型特殊燃料要素	オーステナイト系ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼
IV型特殊燃料要素	高速炉用フェライト系ステンレス鋼	同上
III型限界照射試験用要素	オーステナイト系ステンレス鋼	同上
IV型限界照射試験用要素	高速炉用フェライト系ステンレス鋼	同上
先行試験用要素	ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼
基礎試験用要素	同上	同上
A型用炉心燃料要素 (内側)	オーステナイト系ステンレス鋼	SUS304 ステンレス鋼
A型用炉心燃料要素 (外側)	同上	同上
限界照射試験用補助要素	同上	オーステナイト系ステンレス鋼

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)	ガスプレナム長さ	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+<sup>241</sup>Am+U)。

\* 2 : (<sup>239</sup>Pu+<sup>241</sup>Pu)/(Pu+<sup>241</sup>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。

\* 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 : ベ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 (2/6)

	照射燃料集合体			
	A型照射燃料集合体		B型照射燃料集合体	
	バンドル型	コンパートメント型		
ワッパ管				
材料	SUS316相当 ステンレス鋼 約78.5mm	SUS316相当 ステンレス鋼 約78.5mm	SUS316相当 ステンレス鋼 約78.5mm	SUS316相当 ステンレス鋼 約78.5mm
六角外対辺長さ				
バンドリングヘッド				
材料	SUS316 ステンレス鋼	SUS316 ステンレス鋼	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	SUS316 ステンレス鋼	SUS316 ステンレス鋼
試験部六角管				
材料	ステンレス鋼	ステンレス鋼	(該当なし)	(該当なし)
タイロッド				
個数	(該当なし)	(該当なし)	1本	1本
材料	(該当なし)	(該当なし)	SUS316相当 ステンレス鋼	SUS316相当 ステンレス鋼
コンパートメント				
装填個数			6本	6~18本
α型コンパートメント	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
β型コンパートメント	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
γ型コンパートメント	(該当なし)	(該当なし)	6本*1	最大6本*1
δ型コンパートメント	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	最大18本*1



第3.7.3表 燃料集合体の主要仕様 (3/6)

	照射燃料集合体			
	A型照射燃料集合体		B型照射燃料集合体	C型照射燃料集合体*1
	バンドル型	コンパートメント型		
装填燃料要素個数	最大115本	最大113本	最大30本	最大91本
III型特殊燃料要素	最大7本	最大5本	最大30本	最大91本
IV型特殊燃料要素	(該当なし)	最大5本	最大30本	(該当なし)
III型限界照射試験用要素	(該当なし)	最大1本	最大6本	(該当なし)
IV型限界照射試験用要素	(該当なし)	最大1本	最大6本	(該当なし)
先行試験用要素	(該当なし)	(該当なし)	最大6本	(該当なし)
基礎試験用要素	(該当なし)	(該当なし)	最大6本	(該当なし)
A型用炉心燃料要素(内側)	最大108本	最大108本	最大6本	(該当なし)
A型用炉心燃料要素(外側)	最大108本	最大108本	(該当なし)	(該当なし)
限界照射試験用補助要素	(該当なし)	(該当なし)	最大18本	(該当なし)
燃料要素ピンチ				
III型特殊燃料要素	6~11mm	6~11mm	6~11mm	6~11mm
IV型特殊燃料要素	6~11mm	6~11mm	6~11mm	6~11mm
III型限界照射試験用要素	—	6~11mm	6~11mm	6~11mm
IV型限界照射試験用要素	—	6~11mm	6~11mm	6~11mm
A型用炉心燃料要素(内側)	約6.47mm	約6.47mm	(該当なし)	(該当なし)
A型用炉心燃料要素(外側)	約6.47mm	約6.47mm	(該当なし)	(該当なし)
限界照射試験用補助要素	(該当なし)	(該当なし)	6~11mm	6~11mm
燃料要素配列	正三角格子配列等	正三角格子配列等*4	(該当なし)	正三角格子配列等
燃料要素間隔保持方式	ワイヤスベーパー型及びグリッドスベーパー型	ワイヤスベーパー型、グリッドスベーパー型及びシュラウド管型	ワイヤスベーパー型、グリッドスベーパー型及びシュラウド管型	ワイヤスベーパー型、グリッドスベーパー型及びシュラウド管型
燃料集合体全長	約297cm	約297cm	約297cm	約297cm*6

第3.7.3表 燃料集合体の主要仕様 (4/6)

	照射燃料集合体			
	コンパートメント			
	α型コンパートメント		β型コンパートメント	
	ワイヤペーパー型	グリッドスペーサー型	ワイヤペーパー型	シュウロウド管型
外管 個数 材料	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 (規定なし) (規定なし)	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 (規定なし) (規定なし)	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 (規定なし) (規定なし)	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 約23.1mm 約0.55mm
外径 肉厚				
内管 個数 材料	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 (規定なし) (規定なし)	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 (規定なし) (規定なし)	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 約14~19mm 約0.55mm	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 約14~19mm 約0.55mm
内径 肉厚				
ピンタイロッド 個数 材料	1本または3本 SUS316相当 ステンレス鋼 (該当なし) (該当なし)	1本または3本 SUS316相当 ステンレス鋼 (該当なし) (該当なし)	(該当なし) (該当なし) (該当なし)	(該当なし) (該当なし) (該当なし)
シュウロウド管 個数 材料	(該当なし) (該当なし)	(該当なし) (該当なし)	1本 オーステナイト系 ステンレス鋼	1本 オーステナイト系 ステンレス鋼
装填燃料要素個数	最大5本 最大5本 最大5本 (該当なし) (該当なし)	最大5本 最大5本 最大5本 (該当なし) (該当なし)	最大5本 最大5本 最大5本 (該当なし) (該当なし)	1本 (該当なし) (該当なし) 最大1本 最大1本
III型特殊燃料要素				
IV型特殊燃料要素				
III型限界照射試験用要素				
IV型限界照射試験用要素				
燃料要素間隔保持方式	ワイヤペーパー型	グリッドスペーサー型	ワイヤペーパー型	シュウロウド管型

第3.7.3表 燃料集合体の主要仕様 (5/6)

照射燃料集合体		コンパートメント				基礎試験用	
		先行試験用		基礎試験用			
		ワイヤスペース型	グリッドスペース型	シュウワウド管型	ワイヤスペース型	シュウワウド管型	シュウワウド管型
外管							
個数	1本	1本	1本	1本	1本	1本	1本
材料	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼
外径	約26.4mm	約26.4mm	約26.4mm	約26.4mm	約26.4mm	約26.4mm	約26.4mm
肉厚	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm
内管							
個数	1本	1本	1本	1本	1本	1本	1本
材料	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼
内径	—	約22.4mm	約22.4mm	約22.4mm	約22.4mm	約22.4mm	約22.4mm
肉厚	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm	約0.6mm
ピンタイロッド							
個数	1本または3本	1本または3本	1本または3本	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
材料	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
シュウワウド管							
個数	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	1本	1本	1本	1本
材料	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	オーステナイト系ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼	オーステナイト系ステンレス鋼
内壁構造容器または密封構造容器							
個数	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	内壁構造容器1本*7	内壁構造容器1本*7	密封構造容器1本*7	密封構造容器1本*7
材料	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼	SUS316相当ステンレス鋼
内径	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	13mm以下	13mm以下	13mm以下	13mm以下
肉厚	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	2.8mm以上	2.8mm以上	2.8mm以上	2.8mm以上
装填燃料要素個数	最大5本*2	最大5本*2	最大5本*2	1本*2	1本*2	1本*2	1本*2
III型特殊燃料要素	最大5本	最大5本	最大5本	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
IV型特殊燃料要素	最大5本	最大5本	最大5本	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
III型限界照射試験用要素	最大1本*3	最大1本*3	最大1本*3	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
IV型限界照射試験用要素	最大1本*3	最大1本*3	最大1本*3	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
先行試験用要素	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	最大1本	最大1本	最大1本	最大1本
基礎試験用要素	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
限界照射試験用補助要素	最大3本*3	最大3本*3	最大3本*3	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)	(該当なし)
燃料要素間隔保持方式	ワイヤスペース型	グリッドスペース型	ワイヤスペース型	シュウワウド管型	ワイヤスペース型	ワイヤスペース型	シュウワウド管型

第3.7.3表 燃料集合体の主要仕様 (6/6)

照射燃料集合体	
コンパートメント	
δ型コンパートメント	
ワイヤスペーサ型	シユラウト管型
外管 個数 材料 外径 肉厚 内管 個数 材料 内径 肉厚 シユラウト管 個数 材料 装填燃料要素個数 III型特殊燃料要素 IV型特殊燃料要素 燃料要素間隔保持方式	1本 SUS316相当 ステンレス鋼 約16.4mm 約0.4mm 1本 SUS316相当 ステンレス鋼 約12.8mm 約0.5mm 1本 オーステナイト系 ステンレス鋼 1本*2 最大1本 最大1本 ワイヤスペーサ型 シユラウト管型

- \* 1 : 照射燃料集合体には、ステンレス鋼のダミー要素のみを装填したコンパートメントを装填する場合がある。  
 全てがダミー要素となる場合は、核燃料物質を含まない試料を装填したダミーコンパートメントとすることができる。
- \* 2 : 燃料要素を装填しないコンパートメントについては、ステンレス鋼のダミー要素、または、核燃料物質を含まない試料を装填する。
- \* 3 : 限界照射試験用要素を装填するコンパートメントについては、限界照射試験用要素1本を限界照射試験用補助要素3本と共に1本のコンパートメントに装填する。
- \* 4 : コンパートメント内を除く。
- \* 5 : 計測線付C型照射燃料集合体の場合は70mm以下。
- \* 6 : 計測線付C型照射燃料集合体の場合は約12m以下。
- \* 7 : 燃料要素またはダミー要素を装填しないダミー容器がある。

第3.7.4表 先行試験用要素（燃料溶融なし、使用末期）の設計仕様及び設計条件

項目	設計仕様及び設計条件
設計仕様	
燃料部	
種類	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット
プルトニウム含有率	30wt%以下
燃料ペレット外径	7.32mm
燃料ペレット内径	1.8mm
燃料ペレットの初期密度	95%理論密度
被覆管	
種類	高Niオーステナイト系ステンレス鋼（A）
外径	8.5mm
肉厚	0.5mm
燃料要素有効長さ（燃料部）	500mm
ガスペナム長さ	980mm
設計条件（通常運転時）	
燃料要素最高燃焼度	200,000MW d / t
最大線出力密度	450W / cm
燃焼時間	2,280日
被覆管最高温度（肉厚中心）	700℃

第3.7.5表 先行試験用要素（溶融なし、使用末期）の設計結果

項目	設計結果	制限値または許容値
燃料最高温度（過出力時）	約2,510℃	2,680℃
被覆管内圧	約9.02MPa	—
クリープ寿命分数和	約0.2	1
被覆管一次膜応力		
通常運転時	約137.8N / mm <sup>2</sup>	158.6N / mm <sup>2</sup>
過出力時	約143.3N / mm <sup>2</sup>	153.5N / mm <sup>2</sup>
累積疲労サイクル	約0.7	1

第3.7.6表 先行試験用要素（燃料溶融あり、使用初期）の設計仕様及び設計条件

項目	設計仕様及び設計条件
設計仕様	
燃料部	
種類	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット
プルトニウム含有率	30wt%以下
燃料ペレット直径	6.44mm
燃料ペレットの初期密度	95%理論密度
被覆管	
種類	高Niオーステナイト系ステンレス鋼（A）
外径	7.5mm
肉厚	0.45mm
燃料要素有効長さ（燃料部）	500mm
ガスペナム長さ	865mm
設計条件（通常運転時）	
最大線出力密度	640W/cm
被覆管最高温度（肉厚中心）	650°C

第3.7.7表 先行試験用要素（溶融あり、使用初期）の設計結果

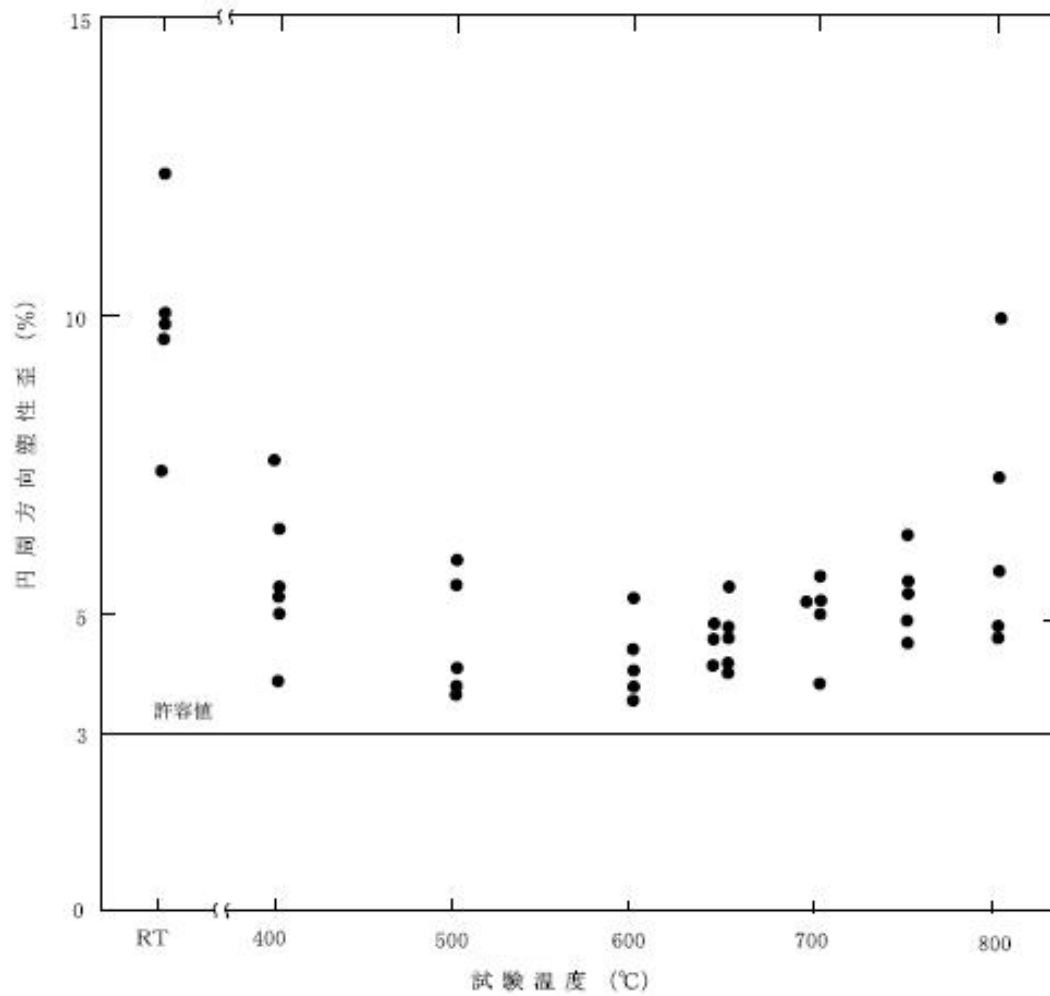
項目	設計結果	制限値または許容値
燃料溶融割合（過出力時）	約30%	30%
被覆管一次膜応力		
通常運転時	約6.5N/mm <sup>2</sup>	240.2N/mm <sup>2</sup>
過出力時	約6.8N/mm <sup>2</sup>	228.4N/mm <sup>2</sup>
被覆管の歪（燃料と被覆管の相互作用）	約1%	3%

第3.7.8表 基礎試験用要素（使用末期）の設計仕様及び設計条件

項目	設計仕様及び設計条件
設計仕様	
燃料部	
種類	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット
プルトニウム含有率	30wt%以下
燃料ペレット外径	7.32mm
燃料ペレット内径	1.8mm
燃料ペレットの初期密度	95%理論密度
被覆管	
種類	SUS316相当ステンレス鋼
外径	8.5mm
肉厚	0.5mm
燃料要素有効長さ（燃料部）	500mm
ガスプレナム長さ	680mm
設計条件（通常運転時）	
燃料要素最高燃焼度	100,000MW d / t
最大線出力密度	450W / cm
燃焼時間	1,140日
被覆管最高温度（肉厚中心）	700°C

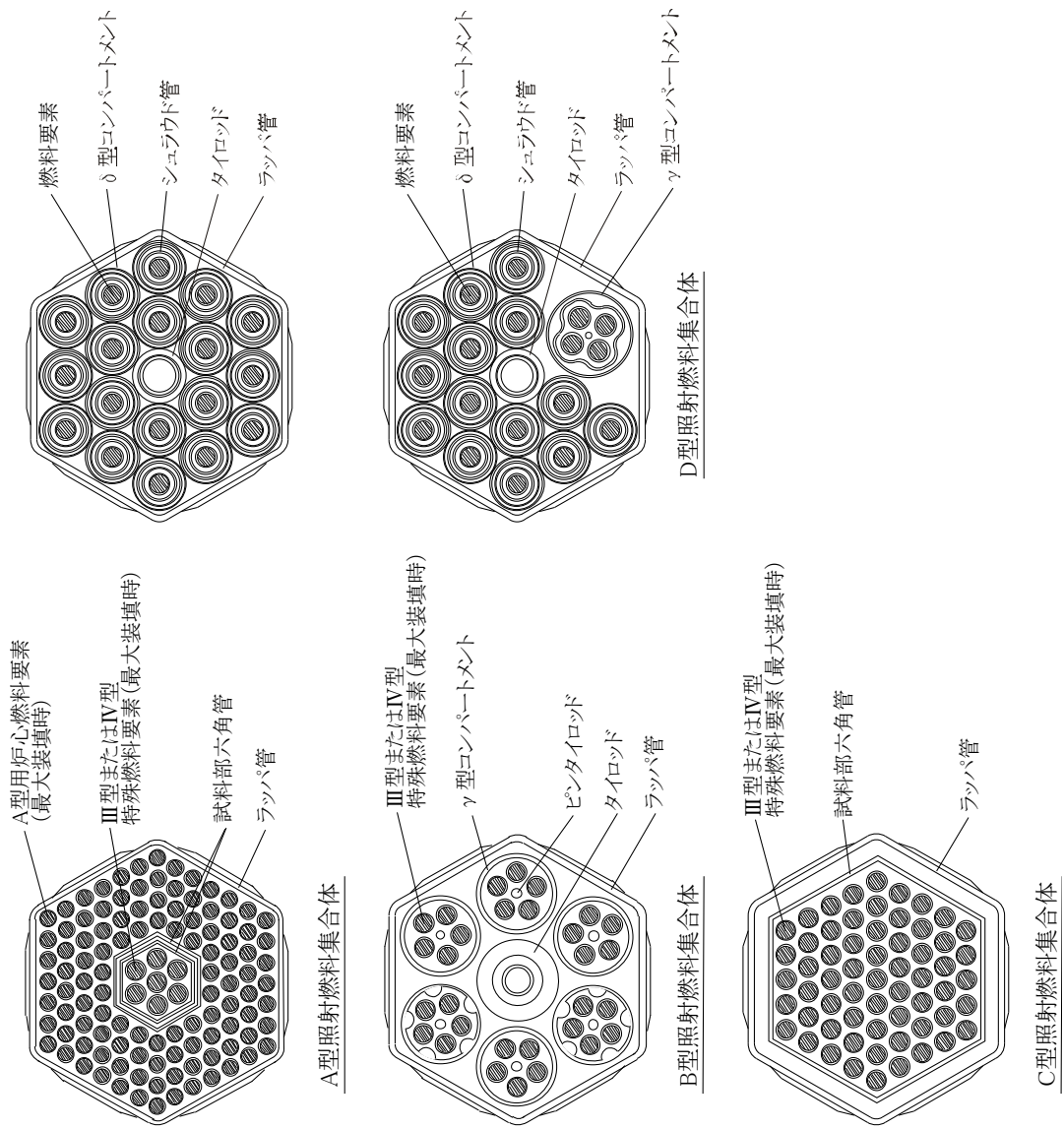
第3.7.9表 基礎試験用要素（使用末期）の設計結果

項目	設計結果	制限値または許容値
燃料最高温度（過出力時）	約2,510°C	2,680°C
被覆管内圧	約7.09MPa	—
クリープ寿命分数和	約2.0	—
被覆管一次膜応力		
通常運転時	約108.2N / mm <sup>2</sup>	135.1N / mm <sup>2</sup>
過出力時	約113.0N / mm <sup>2</sup>	118.3N / mm <sup>2</sup>

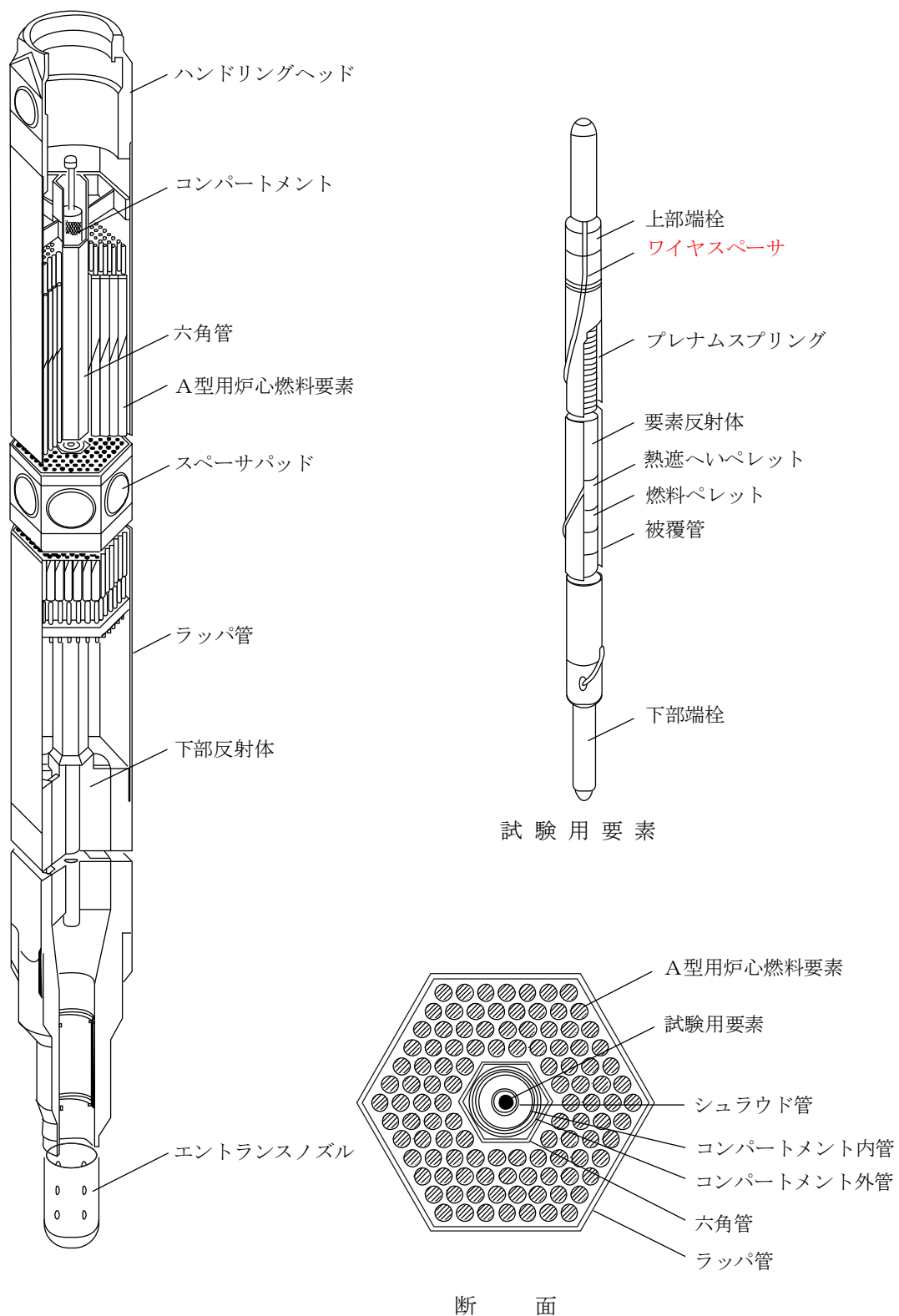


第 3.7.3 図 SUS 316 の破断時の円周方向塑性歪

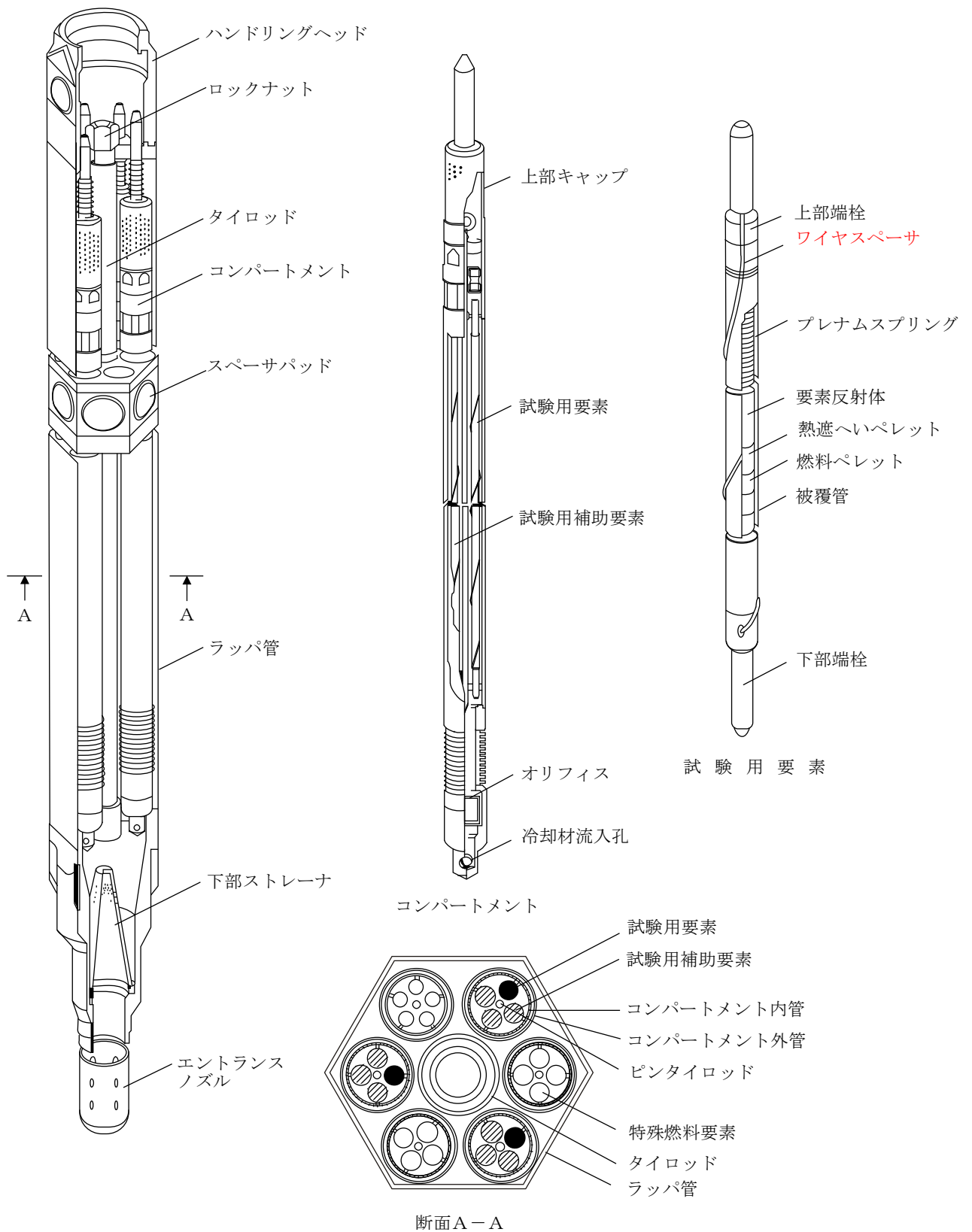




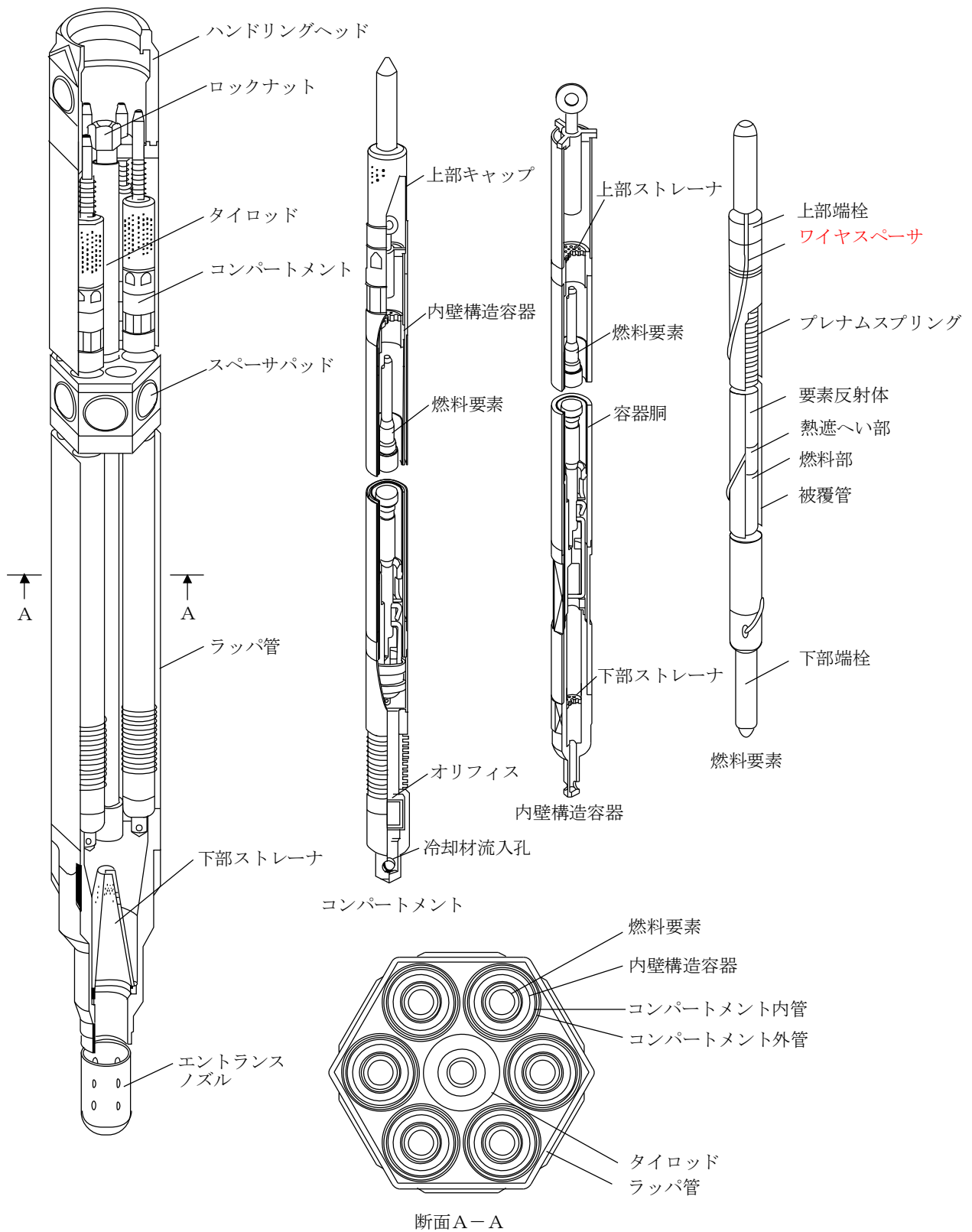
第 3.7.4 図 照射燃料集合体 **一断面図** (参考用)



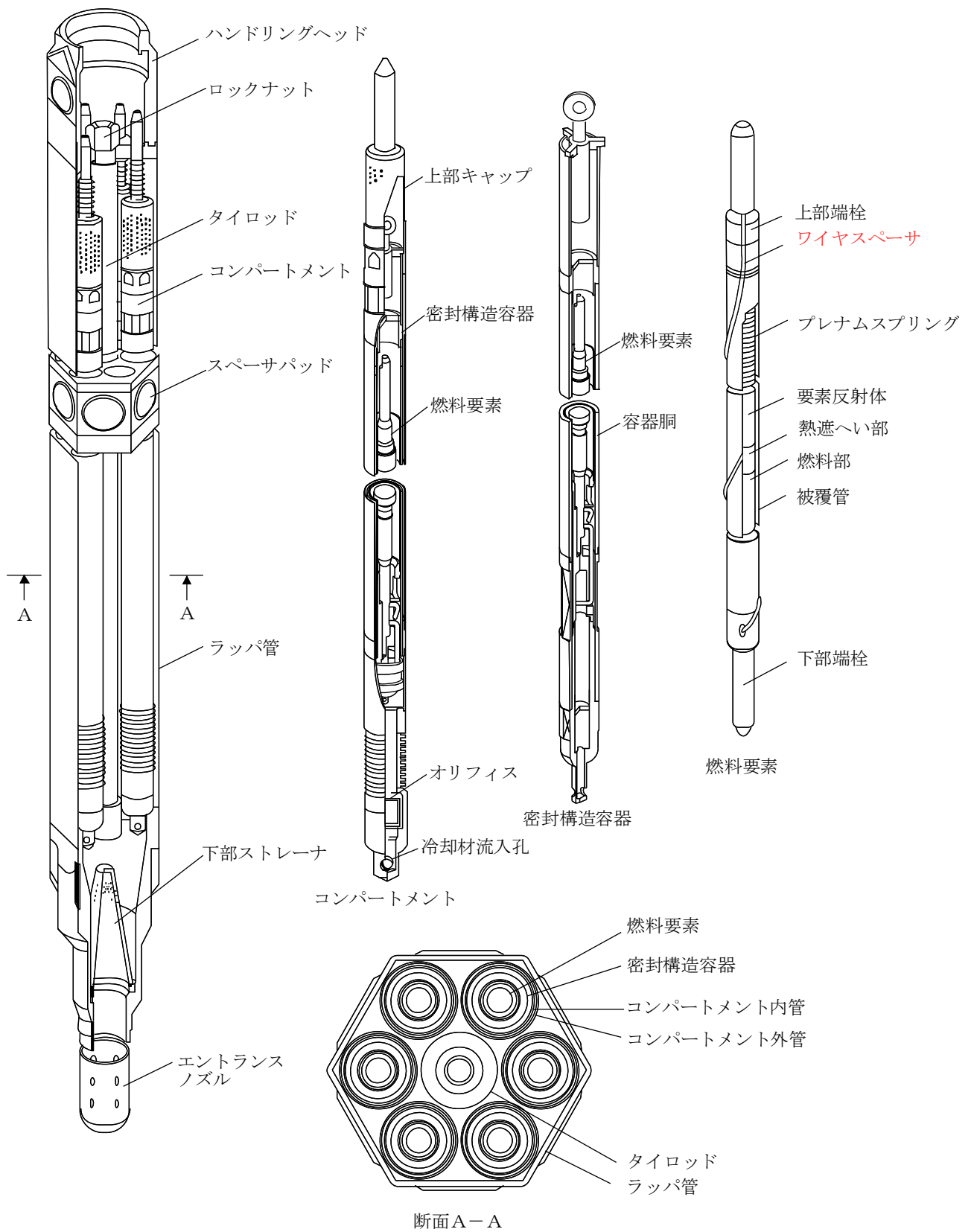
第 3.7.5 図 A型照射燃料集合体—限界照射試験用 (参考用)



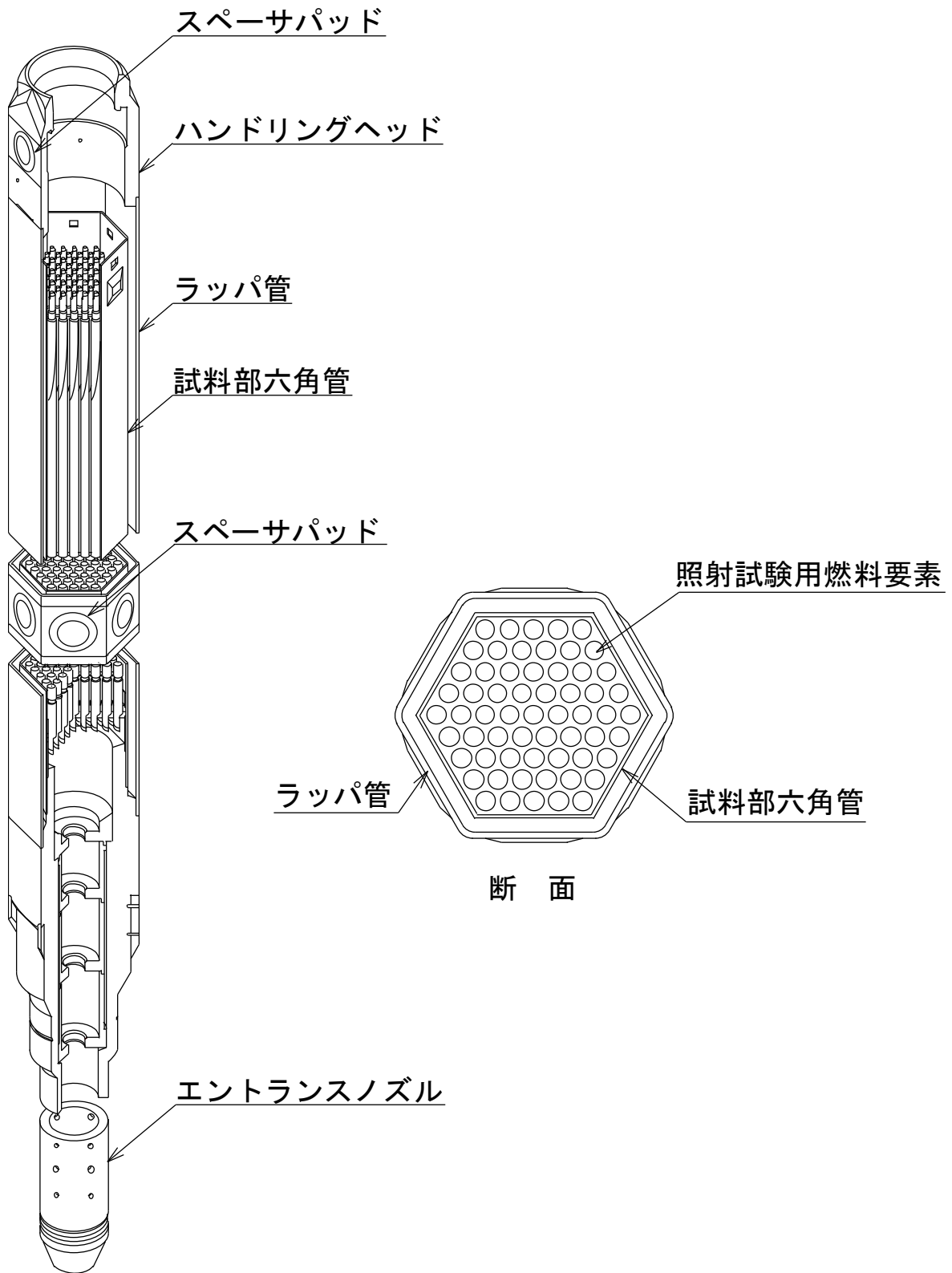
第 3.7.6 図 B型照射燃料集合体—限界照射試験用 (参考用)



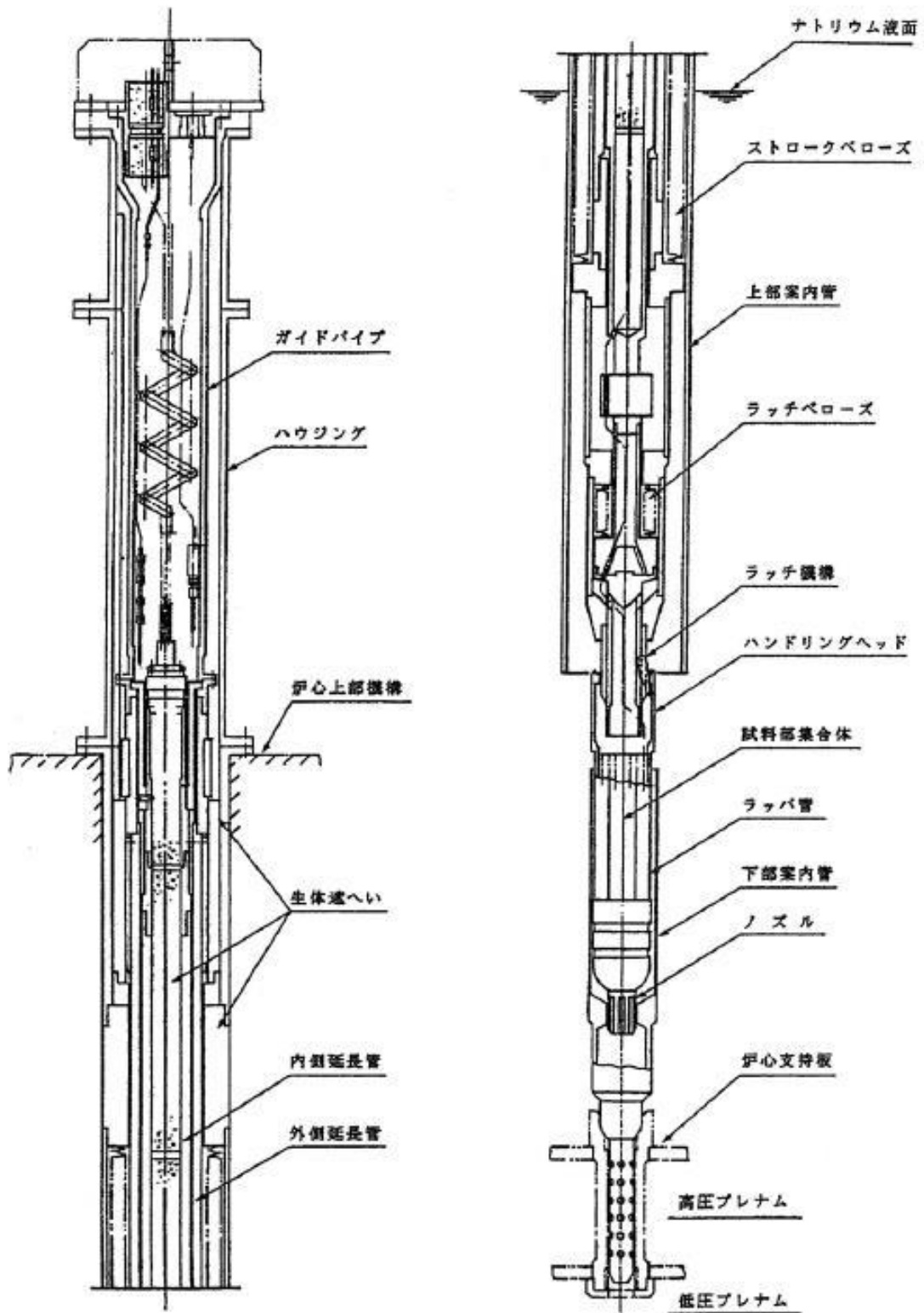
第3.7.7図 B型照射燃料集合体—先行試験用 (参考用)



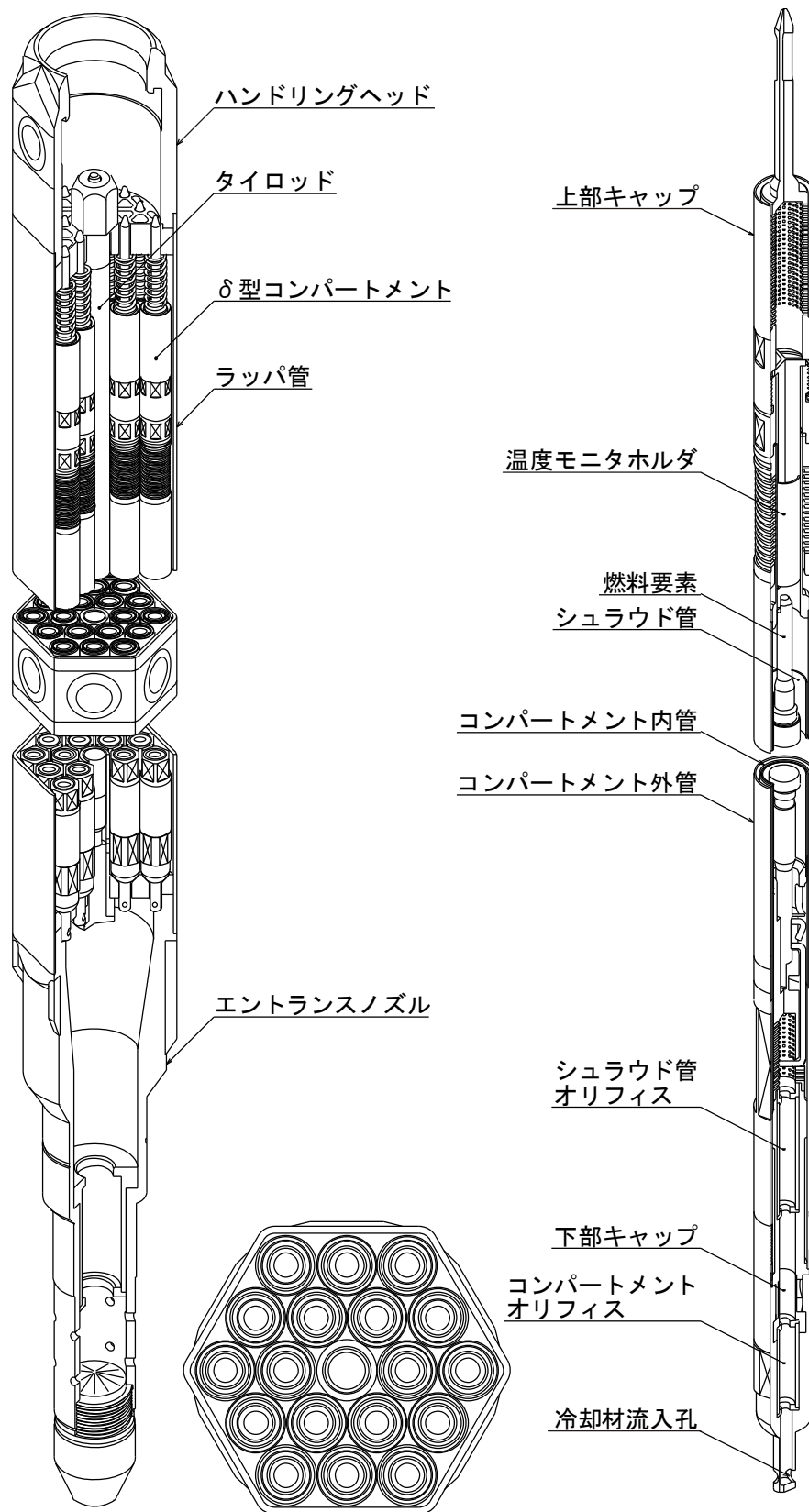
第 3.7.8 図 B 型照射燃料集合体—基礎試験用 (参考用)



第 3.7.9 図 C型照射燃料集合体 (参考用)



第 3.7. 10 図 計測線付 C 型照射燃料集合体 (参考用)



第 3.7.11 図 D型照射燃料集合体-δ型コンパートメント最大装填型 (参考用)