



**高速実験炉原子炉施設（「常陽」）
第43条（試験用燃料体）に係る説明資料**

2021年11月19日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

高速実験炉部

第43条に係る説明内容

 : 本日まで提示

1. 照射燃料集合体の概要
2. 安全設計の考え方
3. III型特殊燃料要素の熱設計
4. III型特殊燃料要素の機械設計
5. IV型特殊燃料要素
6. 限界照射試験用要素
7. 先行試験用要素、基礎試験用要素
8. 設工認の一例

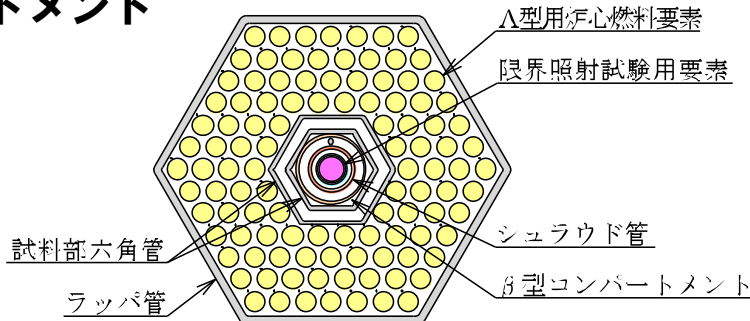
6. 限界照射試験用要素

限界照射試験の概要

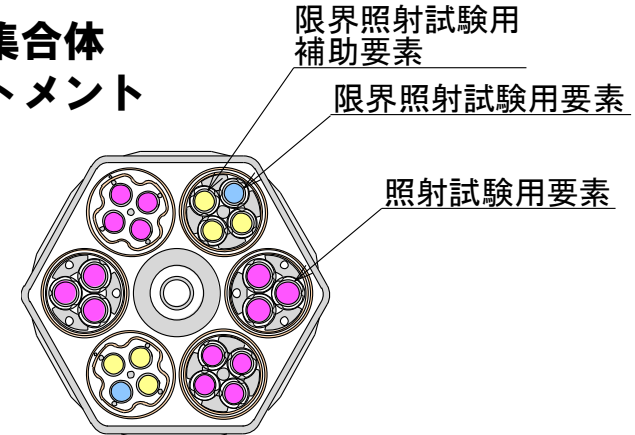
限界照射試験では、燃料の設計限界を見極めるため、被覆管がクリープ破損により開孔するまで照射を継続する。RTCB (Run-to-Cladding Breach) 試験。

燃料要素	概要	装填可能集合体
III型限界照射試験用要素	III型特殊燃料要素の限界照射試験用	β型コンパートメント：A型 γ型コンパートメント：B型、D型
IV型限界照射試験用要素	IV型特殊燃料要素の限界照射試験用	β型コンパートメント：A型 γ型コンパートメント：B型、D型
限界照射試験用補助要素	γ型コンパートメントで限界照射試験実施時に、コンパートメント内の温度分布を均一にすることを目的に、試験用要素とともにコンパートメントに装填される燃料要素	γ型コンパートメント：B型、D型

A型照射燃料集合体
β型コンパートメント
装填時



B型照射燃料集合体
γ型コンパートメント
装填時



限界照射試験における設計方針

【規則の要求】

- 試験計画で制限した範囲内で、被覆材の破損が生じたとしても、試験計画の範囲内で、燃料体の機能及び健全性を阻害しない設計とする。
- 設計基準事故時に、試験用要素が破損したとしても、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（燃料の許容設計限界を超えない）設計とする。
- 被覆材の破損による一次冷却材中への核分裂生成物等の放射性物質の放出量を、試験用燃料体の破損範囲の限定、破損燃料検出設備による運転監視等により適切に制限できる設計とする。

限界照射試験用要素を装填した照射燃料集合体にあっては、

- 被覆管の開孔に係る設計では、クリープ寿命分数和は1を超えるが、被覆管に発生する応力は許容応力を超えないことを確認する。
- 炉心の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子がコンパートメント外へ放出されないことを確認する。

限界照射試験の熱設計基準値・熱的制限値

	熱設計基準値	熱的制限値
Ⅲ型限界照射試験用要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：890℃※ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：750（β型）/700（γ型）℃ （被覆管開孔時：890℃）
Ⅳ型限界照射試験用要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：810℃※ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：660（β型）/610（γ型）℃ （被覆管開孔時：810℃）
限界照射試験用補助要素	燃料最高温度：2,680℃ 被覆管最高温度：890℃ 冷却材最高温度：910℃	燃料最高温度：2,540℃ （試験用要素の被覆管開孔時：2,680℃） 被覆管最高温度：700℃ （試験用要素の被覆管開孔時：890℃）

※限界照射試験用要素は、燃料の耐用限界を見極めるため、被覆管が開孔するまで照射を継続する。しかし、限界照射試験用要素においても、保守的に、通常の開孔する可能性のない燃料要素の熱設計基準値（被覆管の内圧破損を防止する目的で設定）を準用する。

限界照射で予測される被覆管の開孔形態

限界照射試験の目的：原子炉の通常運転下における燃料要素の耐用限界を調べる。
 （耐用限界以外の原因による破損は防止する）

被覆管の耐用限界を原因とした開孔のメカニズム
 照射に伴って

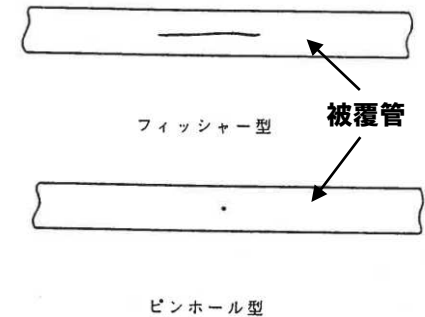
- ・ 被覆管強度が低下
 - ・ 被覆管にかかる応力の増加
- 被覆管のクリープ損傷が進み、最終的にクリープ破損に至る。

被覆管の開孔形態

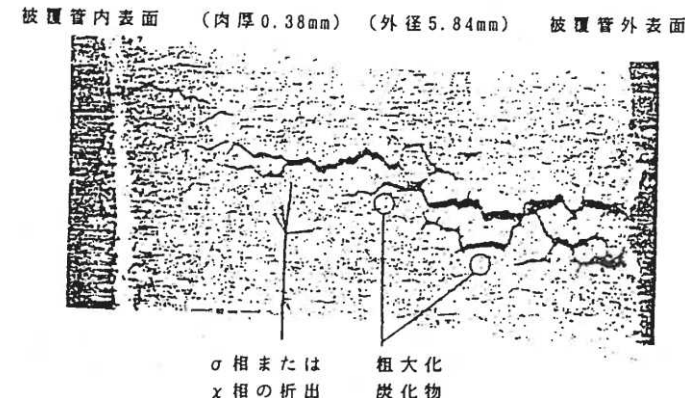
- ・ 結晶粒界に沿って微小なクラックが多数生じた結果、破損が発生。

→ピンホール型かフィッシャー型の破損形態

- ・ 海外炉における燃料破損経験においても、通常運転時に生じる破損形態はピンホール型及びフィッシャー型。生じるクラックの大きさは長さ～数cm、幅～0.数mm程度。

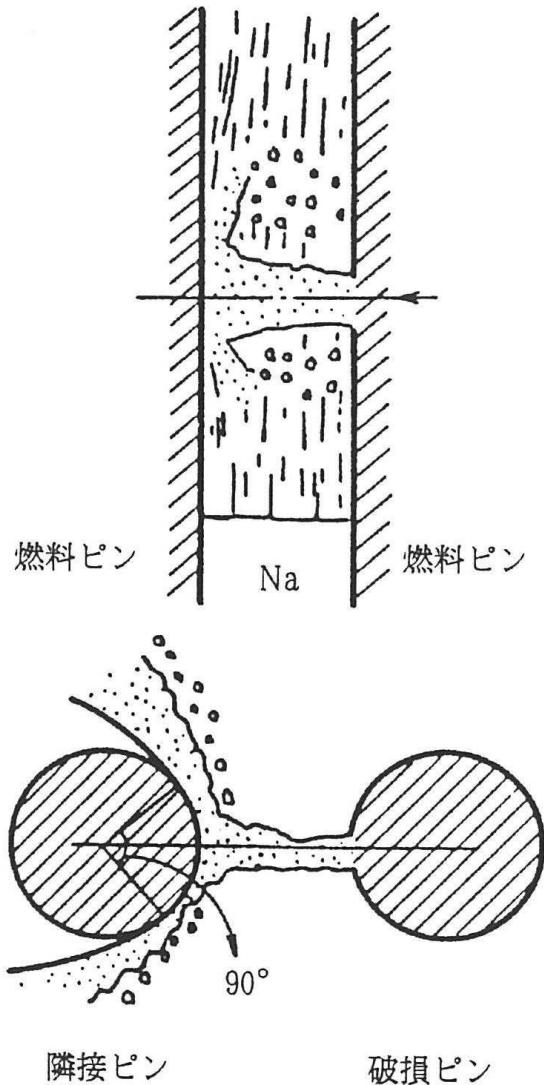


クリープ破損の形態



フィッシャー型破損の例（EBR-II）

限界照射試験用要素の被覆管開孔時の熱設計



被覆管が開孔した場合の影響

- 限界照射試験用要素に蓄積されていたFPガスが冷却材中へ放出されることによりFPガスと冷却材の二相流が形成され、圧力損失が増大する影響で、この影響により冷却材流量が減少
 - ガス放出分の冷却材流量を減少させて評価
- 限界照射試験用補助要素と対面する箇所に生じた場合に、限界照射試験用要素から放出されたFPガスが隣接する限界照射試験用補助要素に吹き付ける影響（ガスジェットインピンジメント）で、この影響により限界照射試験用補助要素の除熱性能が局所的に低下
 - 被覆管表面熱伝達率を一律に $1\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ として評価（通常時は約 $20\sim 30\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ ）

限界照射試験における熱設計評価条件

燃料要素設計仕様・設計条件

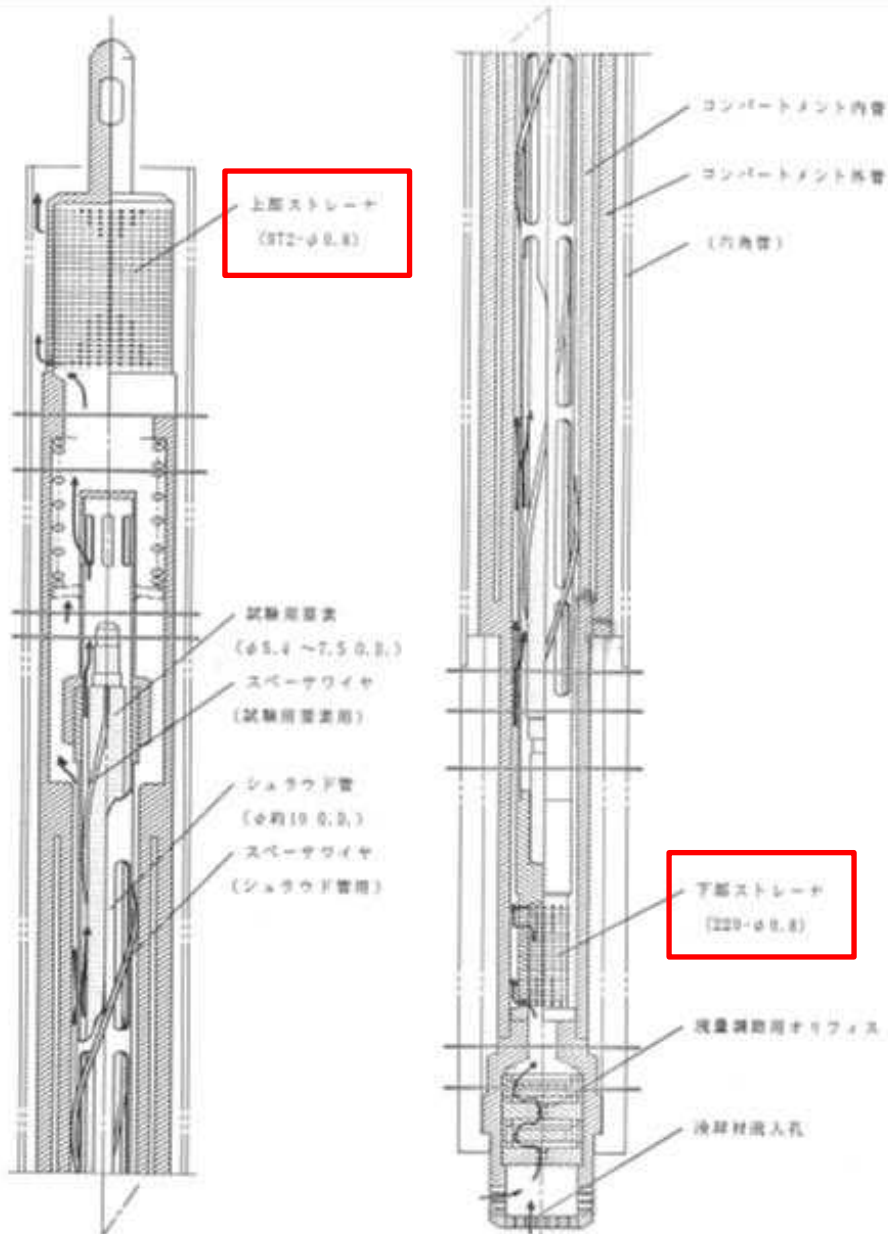
	Ⅲ型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	Ⅳ型限界照射試験用要素
組織未変化時理論密度 [%TD]	95	95
ペレット直径 [mm]	6.6	6.18
直径ギャップ [mm]	0.10	0.20
被覆管外径 [mm]	7.5	7.5
被覆管肉厚 [mm]	0.4	0.56
被覆管最高温度（肉厚中心） [°C] 通常時 過出力時 被覆管開孔時	700 728 760（Ⅲ型）/810（補助要素）	610 631 650
O/M比	1.97	1.97
被覆管材料	オーステナイト系 ステンレス鋼	高速炉用フェライト系 ステンレス鋼
最大線出力密度 [w/cm]	定格：480 過出力：520	定格：500 過出力：540

限界照射試験における熱設計評価結果

燃料要素評価結果

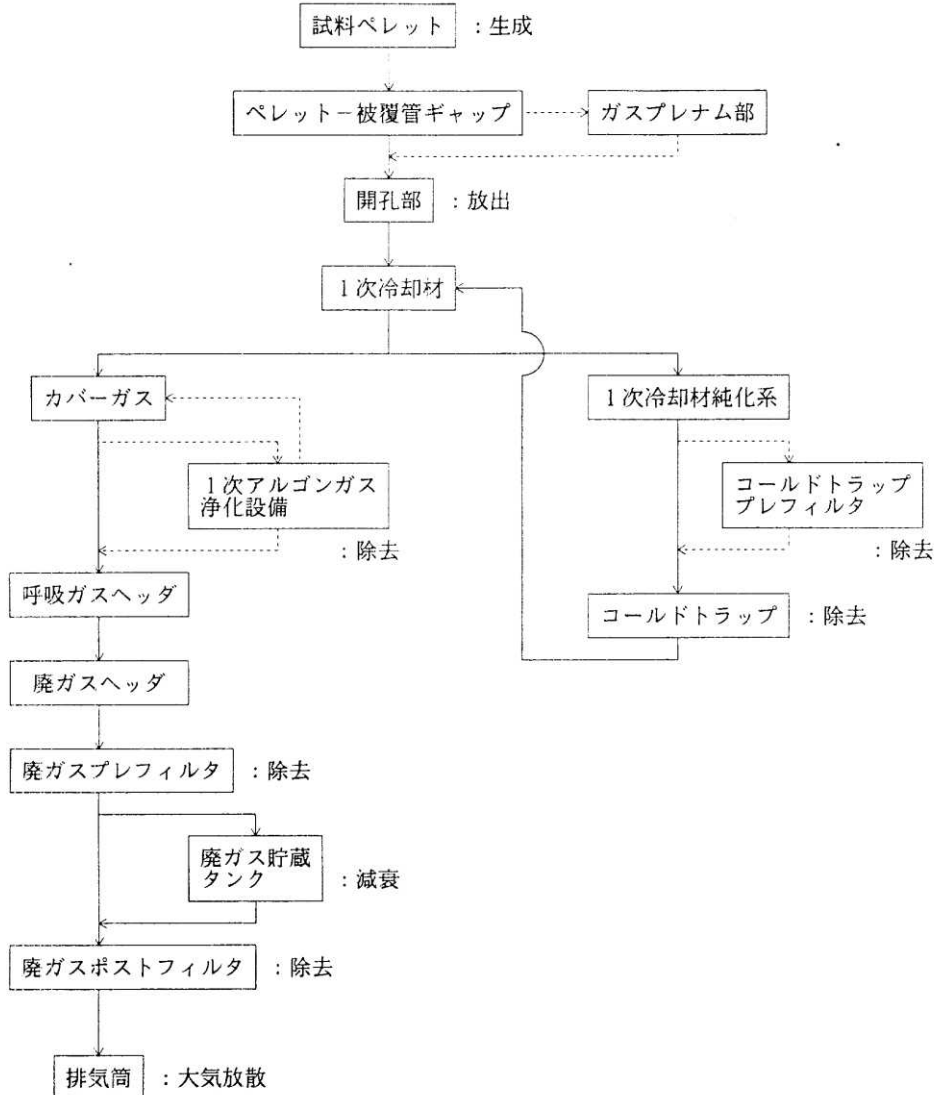
		燃料最高温度 [°C]	制限値 [°C]
定格出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,430	約2,540
	IV型限界照射試験用要素	約2,520	約2,540
過出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,560	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,630	約2,680
試験用要素の 被覆管開孔時	III型限界照射試験用要素	約2,460	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,540	約2,680
	限界照射試験用補助要素	約2,580	約2,680

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (1/2)



- コンパートメントにストレーナを設置し、冷却材出口部を多数の小口径の孔とする。
 - ストレーナ孔径を炉心燃料要素の冷却材流路を確保するスパイラルワイヤ径 ($\phi 0.9$) より小さいものとする。
- 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コンパートメントの外側へ放出されない構造となる。

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (2/2)



- ストレーナ孔径より小さな粒径の燃料粒子はコンパートメント外へ流出する可能性がある。
- 流出した燃料粒子の一部は、1次冷却系の冷却材の流速が遅くなる部分で沈降すると考えられる。また、一部は1次冷却材純化系のコールドトラッププレフィルタ及びコールドトラップにて除去される。
- 揮発性FPは排気筒から大気放散される。
→年間の試験回数を制限（A型4回、B型1回）することで、環境への放射性物質の放出量を低く抑える。（下表、年間放出管理目標値の1%程度。）

	限界照射試験時の被覆管開孔時（A型4回、B型1回/年）	（参考）年間の希ガス及びよう素の放出管理目標値
希ガス	約 $8.3 \times 10^{12} \text{Bq/y}$	$6.2 \times 10^{14} \text{Bq/y}$
よう素	約 $1.0 \times 10^7 \text{Bq/y}$	$8.9 \times 10^8 \text{Bq/y}$

限界照射試験時のFPの流れ

7. 先行試験用要素・基礎試験用要素

先行試験及び基礎試験の概要

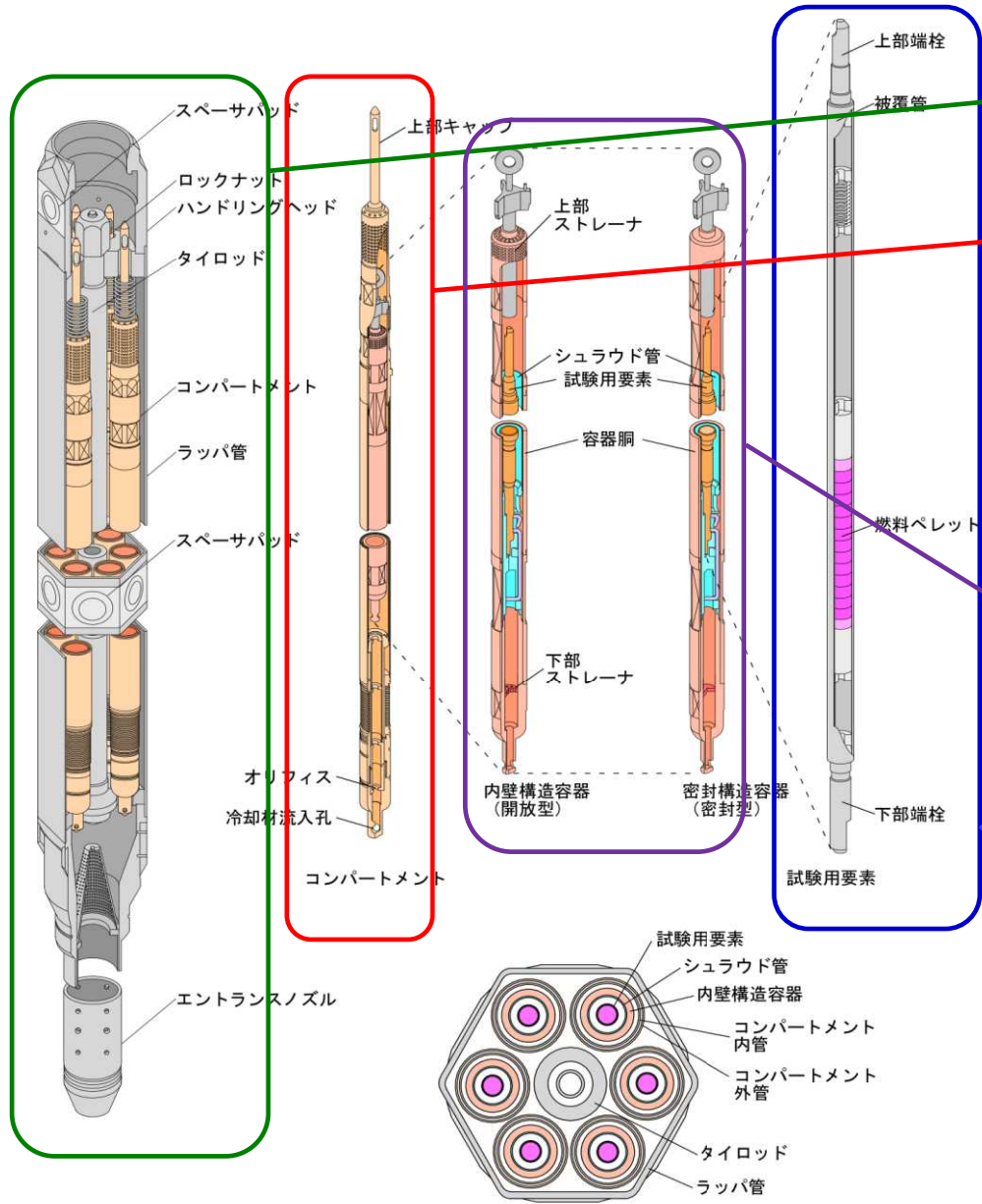
先行試験：照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料要素を照射する試験

基礎試験：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試験

燃料要素	燃料材	被覆材
先行試験用要素	プルトニウム又はウランの単体又は混合物の酸化物、炭化物、窒化物又は金属 (試験目的に応じて、マイナーアクチニドや核分裂生成物を混入(≦50wt%)。また、ペレットでない酸化物において、ウラン金属を混入し、O/M比を調整可能(≦10wt%))	オーステナイト系ステンレス鋼又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)
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、プルトニウム・ウラン混合金属スラグ(Pu含有率それぞれ32wt%以下、25wt%以下、30wt%以下、20wt%以下)	ステンレス鋼

- 照射中の挙動が不明確な燃料材や被覆材の照射を実施するため、さらに厚肉のキャプセル(内壁構造容器、密封構造容器)に装填した上で、コンパートメントに収納することで安全性を向上させる。
- 先行試験の燃料材、基礎試験の被覆材は、高速増殖炉の開発目的を踏まえて選定し、設工認段階でその仕様を明確にするとともに健全性を評価する。

照射燃料集合体（先行試験及び基礎試験用）



集合体

- B型照射燃料集合体

コンパートメント

- Y型コンパートメント（先行試験用）
※内壁構造容器1本を収納
- Y型コンパートメント（基礎試験用）
※密封構造容器1本を収納

キャプセル

- 内壁構造容器
※先行試験用要素を装填
- 密封構造容器
※基礎試験用要素を装填

燃料要素

- 先行試験用要素
- 基礎試験用要素

B型照射燃料集合体

先行試験用要素及び基礎試験用要素の熱的制限値及び熱設計基準値

	熱設計基準値				熱的制限値		
	燃料 最高温度	被覆管 最高温度	内壁構造容器 密封構造容器 最高温度	冷却材 最高温度	燃料 最高温度	被覆管 最高温度	内壁構造容器 密封構造容器 最高温度
先行試験用要素 (溶融なし)	溶融温度を 超えない	890℃	890℃	910℃	溶融温度以下	750℃	675℃
先行試験用要素 (溶融あり)	最大溶融割合 30%	890℃	890℃	910℃	最大溶融割合 20%	750℃	675℃
基礎試験用要素	溶融温度を 超えない	890℃	890℃	910℃	溶融温度以下	750℃	675℃

- 燃料材の種類を照射実績のある酸化物、炭化物、窒化物、金属に制限し、燃料最高温度に係る熱設計基準値を「溶融温度を超えない」とする。設工認段階では製作する燃料要素の燃料材に合わせて個別に熱設計基準値を設定する。
- 先行試験用要素で燃料を一部溶融させる場合は、熱設計基準値及び熱的制限値は溶融割合で設定する。熱的制限値は過出力時に熱設計基準値を超えない溶融割合として設定。
- 被覆材の種類を先行試験用要素ではオーステナイト系ステンレス鋼と高速炉用フェライト系ステンレス鋼（酸化物分散強化型も含む）、基礎試験用要素ではステンレス鋼に制限し、熱設計基準値はⅢ型特殊燃料要素（オーステナイト系ステンレス鋼）の890℃とする。内壁構造容器及び密封構造容器についても同じ。
- 冷却材最高温度に係る熱設計基準値の考え方及び値は、炉心燃料要素や他の特殊燃料要素、試験用要素と同じ。

炭化物燃料の特徴と熱設計基準値の設定例

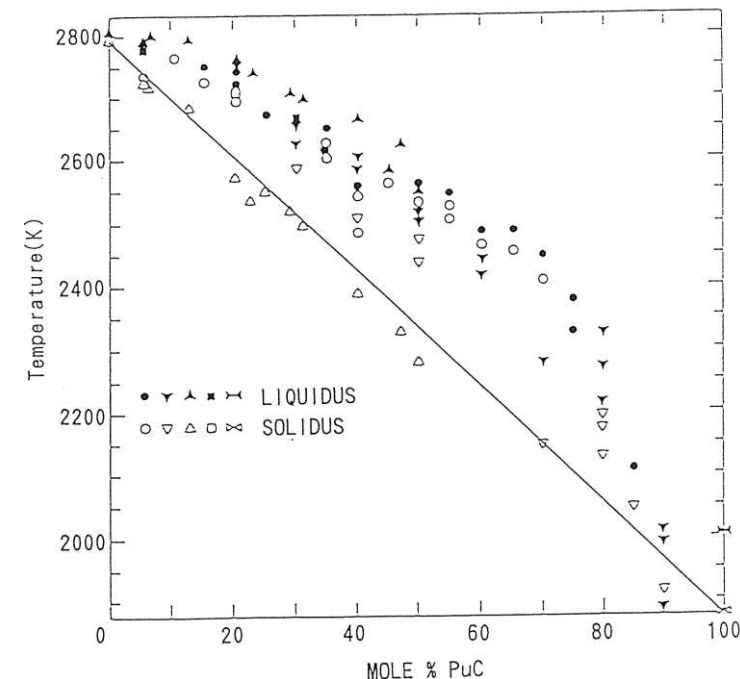
【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の一般的な特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料と比較して
 - 核分裂性物質密度が約30%大きい
 - 3~5倍高い熱伝導度
- 被覆管との浸炭

【熱設計基準値】

- 熔融温度を熱設計基準値とする。
- 固相線温度はUCの値からPuCの値へ直線的に減少。
- Pu含有率25%※に対しては、再分布を考慮した35%に対して固相線温度は2,190℃。
- 不確かさを50℃考慮して、Pu含有率25%※に対する熱設計基準値を2,140℃。

※基礎試験用要素の制限値。



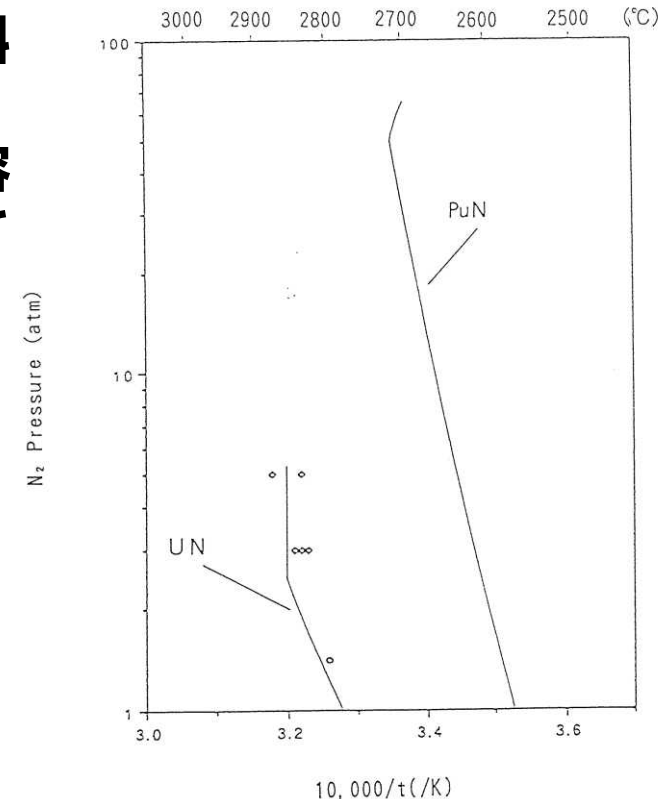
窒化物燃料の特徴と熱設計基準値の設定例

【プルトニウム・ウラン混合窒化物燃料の一般的な特徴】

- (U, Pu)N
- 高い重金属元素密度、高い融点、優れた熱伝導度
- 燃料の高温分解

【熱設計基準値】

- 燃料温度に対応する窒素分圧となるまで、窒化物燃料は分解する。
- 温度上昇により分解が進行した場合、溶融温度及び溶融温度に対応する窒素分圧となった後、窒化物として溶融する。
- 溶融温度についてはPuNが低く、窒素圧についてはUNが低いため、PuNの分解温度を熱設計基準値とする。
- UN溶解時の窒素圧は約2atm。安全上、被覆管内圧の上昇を抑制する観点から窒素圧を0.1atmに制限。
- 0.1atm時のPuNの分解温度を図から2,440°C。実験値の不確かさ50°Cを考慮し、熱設計基準値を2,390°C。



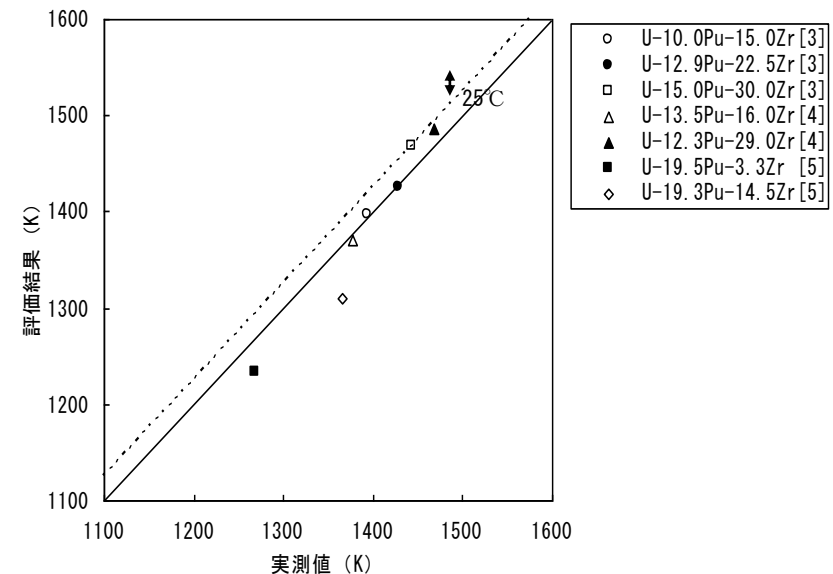
金属燃料の特徴と熱設計基準値の設定例

【プルトニウム・ウラン混合金属燃料の一般的な特徴】

- U-Pu-Zr合金
- 射出鑄造・乾式再処理技術の適用による経済性向上
- 被覆管液相腐食

【熱設計基準値】

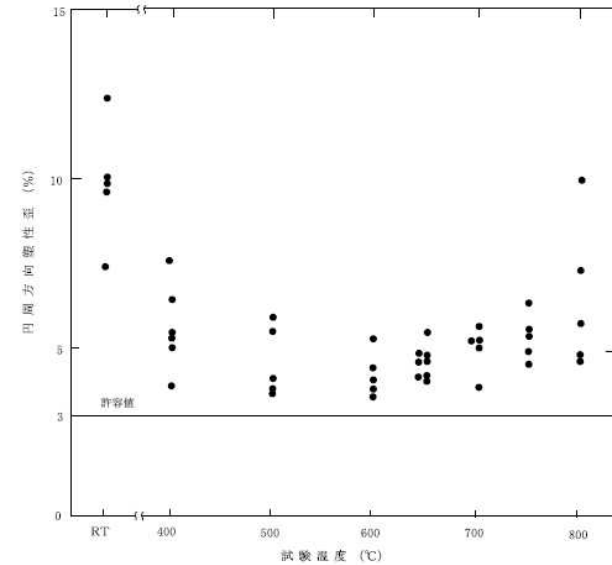
- 溶融温度を熱設計基準値とする。
- 融点は、U, Pu, Zrの組成によって決まる。
- U-Pu-Zr 3元系状態図よりU-Zr合金及びU-Pu-Zr合金の固相線温度が評価されており、燃料組成について整理して固相線温度を評価。
- 金属燃料の仕様範囲で最も固相線温度が低くなるのは、プルトニウム混合比21%、ジルコニウム混合比9%の場合で、固相線温度の評価は1089℃。
- U-Pu-Zr合金の未照射材の融点測定値と固相線評価温度の比較（右図）から、不確かさ25℃を考慮し、熱設計基準値を1064℃。



酸化物燃料を溶融させる場合の熱設計基準値

【熱設計基準値】

- 被覆管の過大歪（燃料の「故障」）に対して、燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止として燃料温度に係る熱設計基準値を設定。
- 燃料の一部溶融を伴う融を伴う試験の場合は、燃料溶融割合を制限することで被覆管の機械的損傷防止を図る。
- 被覆管の円周方向引張全歪は、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。

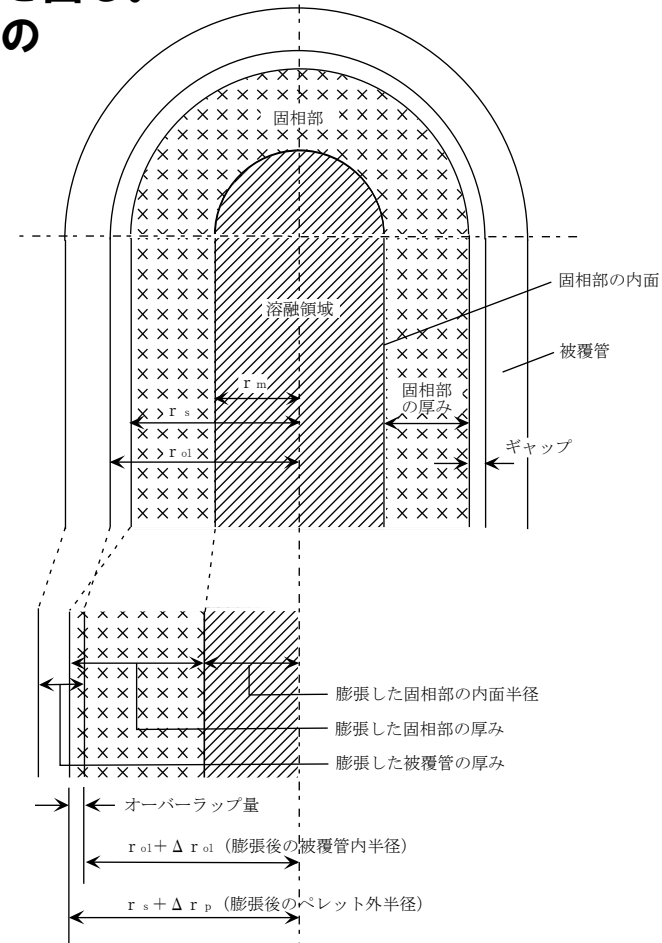


- ペレットは相変化に伴う膨張及び熱膨張を、被覆管は熱膨張を考慮する。照射に伴う中心空孔の生成、等軸晶及び柱状晶の組織変化による収縮は考慮しない。
- ペレットは、温度分布に沿って径方向に自由膨張するものとする。
- ペレットの相変化に伴う膨張は、溶融先端の試料ペレットを押し上げて軸方向に生じるものとする。
- ペレットは、液相及び固相で非圧縮性とする。

上記に基づき、被覆管円周方向引張全歪を評価。

$$\varepsilon = \frac{\text{(膨張した燃料と膨張した被覆管のオーバーラップ量)}}{\text{(膨張した被覆管の外半径)}} \\ = \frac{\Delta r_f - \Delta r_{ci} - \Delta G}{r_{co} + \Delta r_{co}}$$

3%を超えないよう、熱設計基準値を「溶融割合を30%」とする。



被覆管歪の評価モデル

【規則の要求】

- ・試験計画で制限した範囲内で、被覆材の破損あるいは燃料棒にあっては燃料材の一部に溶融が生じたとしても、試験計画の範囲内で、燃料体の機能及び健全性を阻害しない設計とする。
- ・設計基準事故時に、試験用要素が破損したとしても、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（燃料の許容設計限界を超えない）設計とする。
- ・被覆材の破損による一次冷却材中への核分裂生成物等の放射性物質の放出量を、試験用燃料体の破損範囲の限定、破損燃料検出設備による運転監視等により適切に制限できる設計とする。

【方針】

先行試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、

- ①燃料の溶融に係る設計では、燃料溶融割合が通常運転時に熱的制限値（燃料溶融割合の制限）を超えないこと、及び運転時の異常な過渡変化時に熱設計基準値（燃料溶融割合の制限）を超えないことを確認する。
- ②設計基準事故時に被覆管が破損しても、内壁構造容器が健全であることを確認するとともに、炉心の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が内壁構造容器外へ放出されないことを確認する。

基礎試験用要素を装填した照射燃料集合体にあつては、

- ①被覆管の開孔に係る設計では、クリープ寿命分数和は1を超えるが、被覆管に発生する応力は許容応力を超えないことを確認する。
- ②設計基準事故時においても、密封構造容器が健全であることを確認する。

先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計（1/2）

燃料要素評価仕様・評価条件（通常運転時）

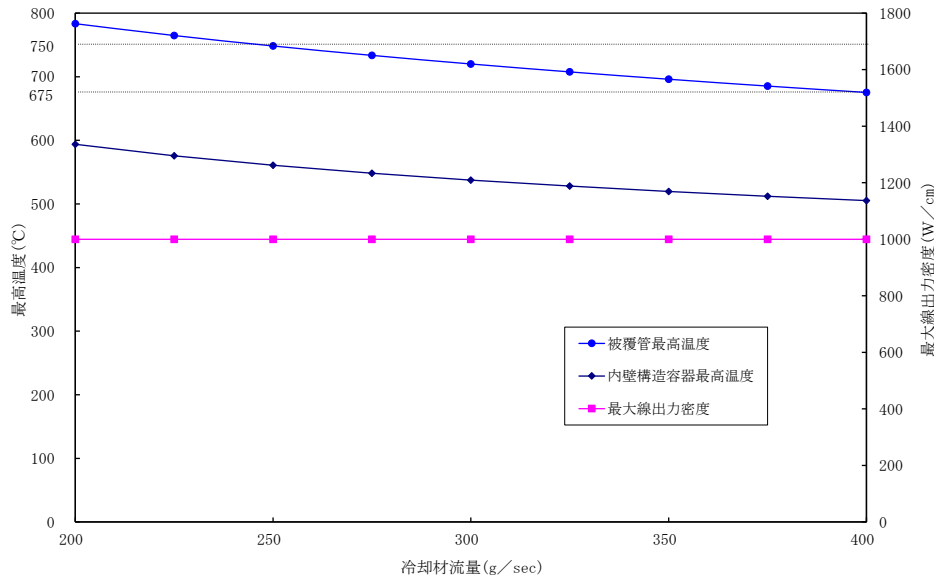
項目	先行試験用要素 （溶融なし）	先行試験用要素 （溶融あり）	基礎試験用要素
燃料部種類	PuU混合酸化物燃料	PuU混合酸化物燃料	PuU混合酸化物燃料
Pu含有率 [wt%]	30	30	30
ペレット直径 [mm]	7.32	6.44	7.32
直径ギャップ [mm]	0.18	0.16	0.18
初期理論密度 [%TD]	95	95	95
被覆管種類	高Niオーステナイト系ステンレス鋼 (A)	高Niオーステナイト系ステンレス鋼 (A)	SUS316相当ステンレス鋼
被覆管外径 [mm]	8.5	7.5	8.5
被覆管肉厚 [mm]	0.5	0.45	0.5
O/M比	1.97	1.97	1.97
最大線出力密度 [W/cm]	450	640	450
被覆管最高温度	700	650	700

先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計（2/2）

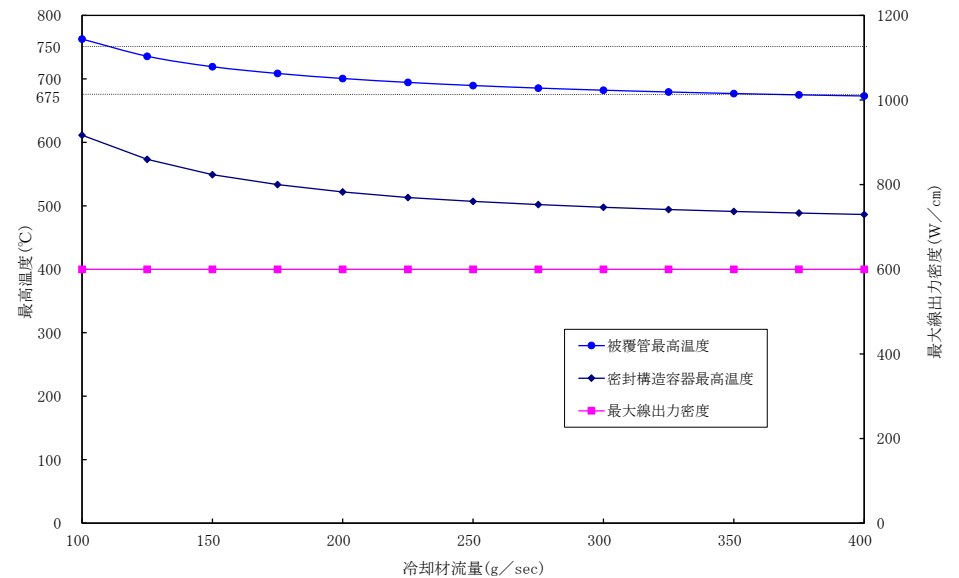
燃料要素評価結果

	先行試験用要素 (溶融なし)	先行試験用要素 (溶融あり)	基礎試験用要素
燃料最高温度 (燃料最大溶融割合)	約2,510°C	約30%	約2,510°C
被覆管の歪(燃料と被覆管の相互作用)	—	約1%	—
被覆管内圧	約9.02MPa	—	約7.09MPa
クリープ寿命分数和	約0.2	—	約2.0
被覆管一次膜応力 (過出力時)	約143.3N/mm ² (Sm : 153.5N/mm ²)	約6.8N/mm ² (Sm : 228.4N/mm ²)	約113.0N/mm ² (Sm : 118.3N/mm ²)

内壁構造容器・密封構造容器の熱設計



内壁構造容器の最高温度と冷却材流量の関係



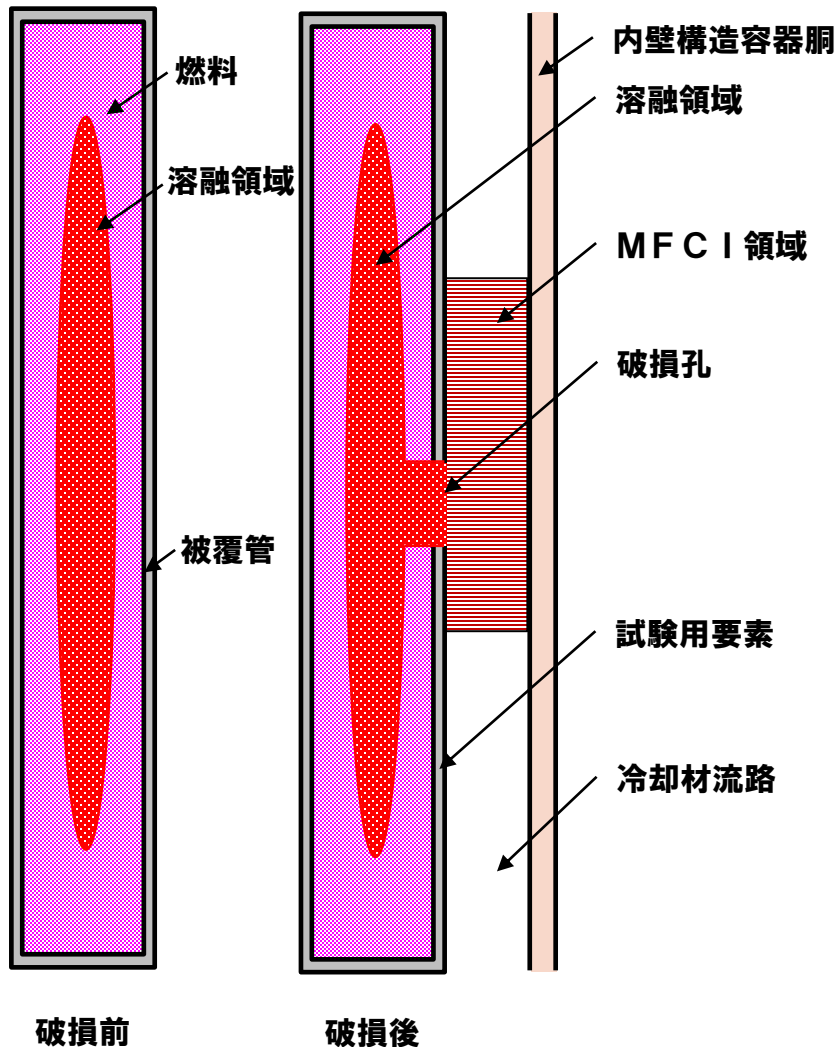
密封構造容器の最高温度と冷却材流量の関係

- Y型コンパートメントは～400g/sの流量を確保可能で、最大線出力密度の条件であっても、必要な冷却材流量を確保可能。
- 定格時の内壁構造容器及び密封構造容器の最高温度は熱的制限値を超えることはない。
- 運転時の異常な過渡変化時に到達しうる密封構造容器の最高温度も熱設計基準値を超えない。

	定格出力	熱的制限値	運転時の異常な過渡変化時	熱設計基準値
被覆管	約750°C	750°C	約870°C	890°C
内壁構造容器	約675°C	675°C	約770°C	890°C
密封構造容器	約675°C	675°C	約770°C	890°C

内壁構造容器の健全性評価（1/3）

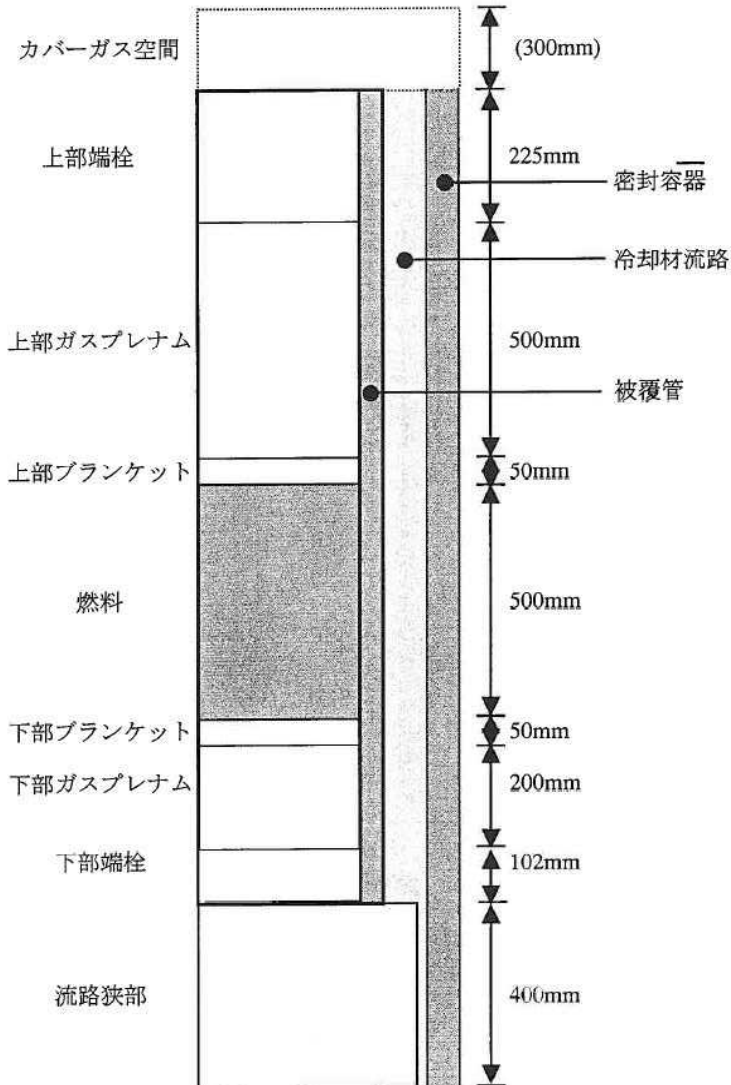
被覆管が破損しても、内壁構造容器が健全であることを確認する



- ・ 万一、溶融燃料が内壁構造容器内のナトリウム中に放出された場合、
 - > 先行試験用要素内の核分裂性生成ガス（FPガス）が内壁構造容器内のナトリウム中へ放出。
 - > 燃料部が溶融していることもあるため、溶融燃料とナトリウムの相互作用（Molten Fuel Coolant Interaction: MFC I）による圧力が発生。（左図）
- ・ 内壁構造容器内で発生する圧力を高速炉安全解析コードSAS4Aにより評価。
- ・ 内壁構造容器内で発生する圧力を内壁構造容器の耐圧が上回ることをもって、内壁構造容器の健全性を確認する。

内壁構造容器の健全性評価（2/3）

SAS4A解析モデル



解析条件

- ・ 内壁構造容器、先行試験用要素を円筒でモデル化。
- ・ 先行試験用要素の被覆管外径を最大の8.5mm。
- ・ 燃料ペレット外径最大の7.5mm。
- ・ 最大断面溶融割合に対する設計余裕として、保守的に熱設計基準値の30%を上回る40%に設定。

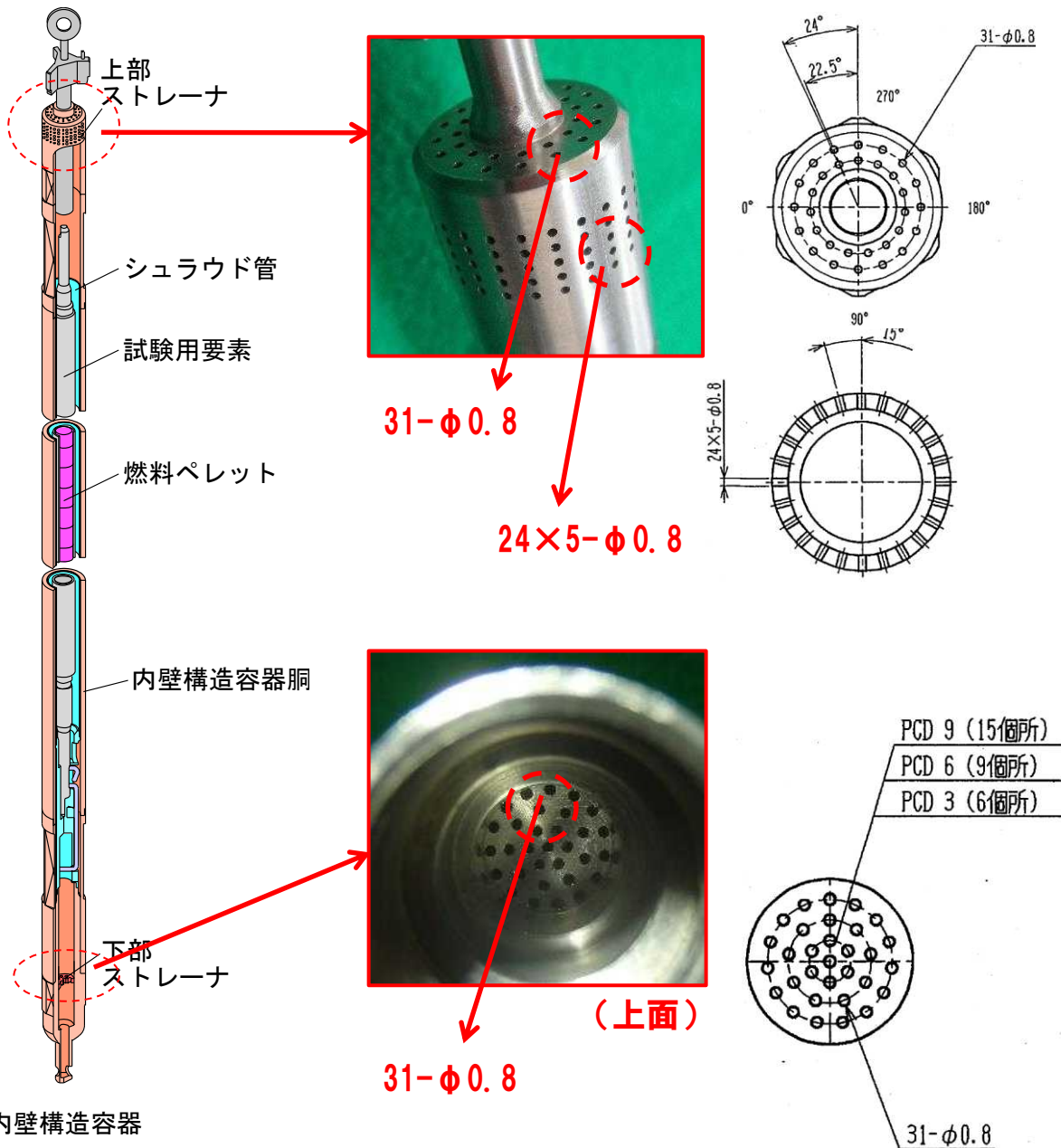
評価結果

発生圧力	内壁構造容器の耐圧
最大13.2MPa	30.6MPa

内壁構造容器の健全性評価 (3/3)

炉心の冷却を阻害する物の内壁構造容器外への放出がないことを確認する。

- 内壁構造容器にストレーナを設置し、冷却材出口部を多数の小口径の孔とする。
 - ストレーナ孔径を炉心燃料要素の冷却材流路を確保するスパイラルワイヤ径 ($\Phi 0.9$) より小さいものとする。
- 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コンパートメントの外側へ放出されない構造となる。



事故と相まって被覆管の健全性を喪失した場合 の内壁構造容器及び密封構造容器の健全性

事故と相まって先行試験用要素の被覆管が破損した場合の内壁構造容器の健全性、及び事故と相まって基礎試験用要素の被覆管が開孔した場合の密封構造容器の健全性を確認する。

評価条件

項目	評価条件
急速加熱開始温度	675℃
温度上昇率	20℃/s
急速加熱開始応力	89.2N/mm ²

評価結果

破損に至る温度	到達温度
906℃	800℃

- ・ 事故時の内壁構造容器及び密封構造容器の到達温度が、破損に至る温度を超えないため、事故時の内壁構造容器及び密封構造容器の健全性は確保される。

8. 設工認の一例

設工認例 概要

設工認名：
照射燃料集合体（B型照射燃料集合体（先行試験（その5）用）の製作

概要

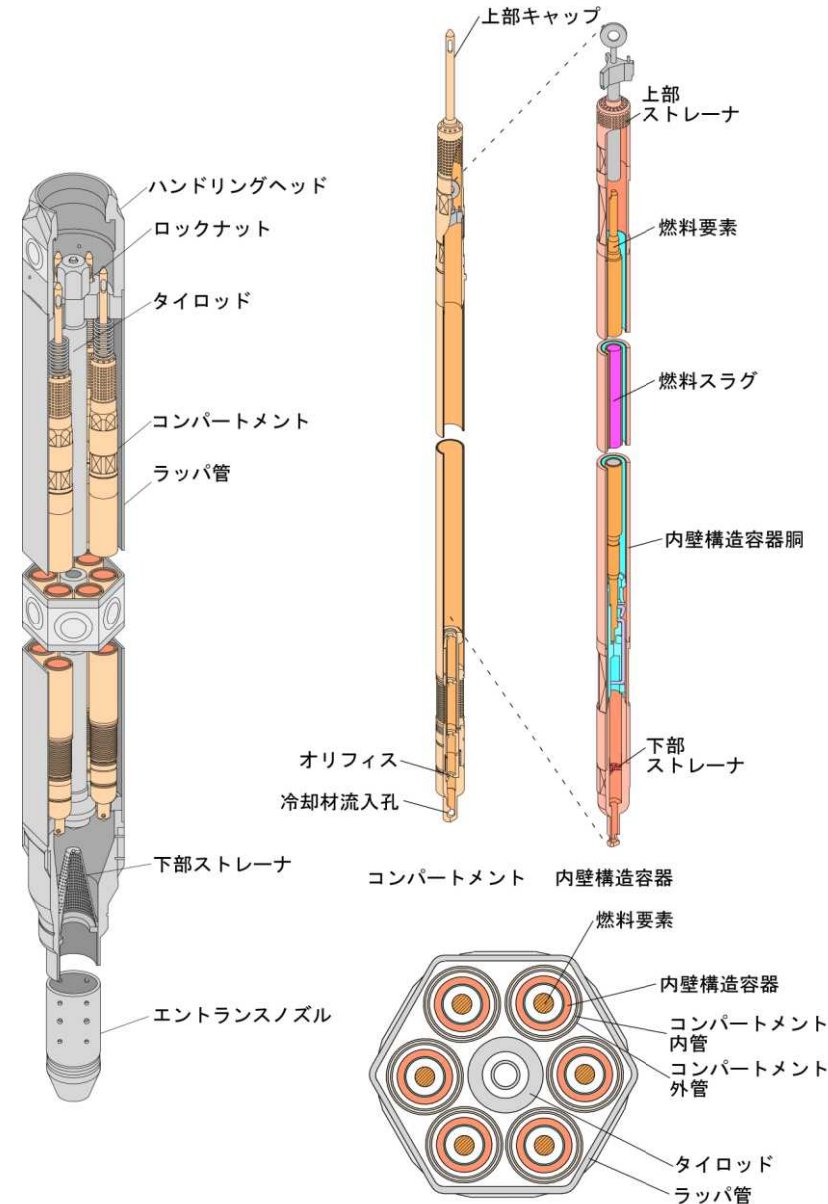
- ・ B型照射燃料集合体
- ・ 先行試験用要素
- ・ 金属燃料

申請範囲

- ・ 先行試験用要素6本
- ・ 燃料要素を除く構成部品で構成されるB型照射燃料集合体（先行試験（その5）用）1体

→燃料要素を除く構成部品

- ・ 内壁構造容器を含む先行試験用 Y 型コンパートメント6本
- ・ タイロッド
- ・ ハンドリングヘッド
- ・ エントランスノズル付ラッパ管



B型照射燃料集合体（金属燃料）

設工認例 設計条件

先行試験用要素 (6)-①、(7)-①

- ・ 最高燃焼度：30,000MWd/t …試験目的に合わせた条件を設定
- ・ 最大線出力密度：500W/cm …試験目的に合わせた条件を設定
- ・ 燃料最高温度：1,011℃ …燃料最高温度の熱的制限値として設定
- ・ 被覆管最高温度：640℃ …被覆管最高温度の熱的制限値として設定

先行試験用要素 (6)-②、(7)-②

- ・ 最高燃焼度：80,000MWd/t …試験目的に合わせた条件を設定
- ・ 最大線出力密度：500W/cm …試験目的に合わせた条件を設定
- ・ 燃料最高温度：1,011℃ …燃料最高温度の熱的制限値として設定
- ・ 被覆管最高温度：620℃ …被覆管最高温度の熱的制限値として設定

※許可における先行試験用要素の熱的制限値は

- ・ 燃料最高温度：溶融温度以下（ただし、酸化物にあっては、最大溶融割合20%）
- ・ 被覆管最高温度：750℃

製作する燃料要素の特徴（次ページ）に合わせて設工認段階で設定

設工認例 設計仕様（材料、組成）（1/2）

先行試験用要素 (6)、(7)

燃料スラグ (1)、(2)

- 種類：ウラン・プルトニウム・ジルコニウム合金 …燃料の種類を決定
- 核分裂性物質含有率：17.9±1.0wt% …公差も含めて仕様を決定
- ウラン濃縮度：0.71±0.10wt% …公差も含めて仕様を決定
- プルトニウム混合比：20.0±1.0wt% …公差も含めて仕様を決定
- ジルコニウム混合比：10.0±1.0wt% …公差も含めて仕様を決定
- 密度：15.3～16.1g/cm³

被覆管

- 材料：高速炉用フェライト系
ステンレス鋼
- 組成：右表
…組成も含めて材料を決定

高速炉用フェライト系ステンレス鋼

化学成分 (wt%)					
C	Si	Mn	P	S	Ni
0.07～ 0.13	<0.10	0.30～ 0.75	≦0.030	≦0.030	≦0.80
Cr	Mo	W	N	Nb	V
10.0～ 12.0	0.30～ 0.70	1.70～ 2.30	0.03～ 0.07	0.03～ 0.07	0.15～ 0.25

※先行試験用要素の許可仕様では

- 燃料：プルトニウム又はウランの単体又は混合物の酸化物、炭化物、窒化物又は金属
- 被覆：オーステナイト系ステンレス鋼又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）

製作する燃料要素の仕様を許可の範囲内で設工認段階で設定

設工認例 設計仕様（材料、組成）（2/2）

先行試験用 Y 型コンパートメント (6)

コンパートメント外管、コンパートメント内管、内壁構造容器胴

- ・材料：SUS316相当ステンレス鋼
- ・組成：右表 …組成も含めて仕様を決定

タイロッド

- ・材料：SUS316相当ステンレス鋼
- ・組成：右表 …組成も含めて仕様を決定

ハンドリングヘッド

- ・材料：SUS316ステンレス鋼
- ・組成：JIS G 4303 SUS316 …仕様を決定

エントランスノズル付ラッパ管

ラッパ管

- ・材料：SUS316相当ステンレス鋼
- ・組成：右表 …組成も含めて仕様を決定

エントランスノズル

- ・材料：SUS316ステンレス鋼
- ・組成：JIS G 4303 SUS316 …仕様を決定

SUS316相当ステンレス鋼

化学成分 (wt%)				
C	Si	Mn	P	S
0.040~ 0.080	0.40~ 1.00	1.40~ 2.00	0.015~ 0.040	≦0.010
Ni	Cr	Mo	Co	B
13.00~ 14.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	≦0.05	0.0020~ 0.0060
N	Cu	Ti	V	Nb
≦0.0100	≦0.20	0.05~ 0.10	≦0.20	0.05~ 0.10
Ta	As	Al	Zr	O
≦0.05	≦0.030	≦0.050	≦0.10	≦0.0040

※製作する構成部品の仕様を組成も含めて設工認段階で設定

設工認例 設計仕様（主要寸法）（1/3）

先行試験用要素(6)

燃料スラグ(1)

- ・直径：5.05±0.05mm …公差も含めて仕様を決定
- ・長さ：200±1mm …公差も含めて仕様を決定

先行試験用要素(7)

燃料スラグ(2)

- ・直径：4.95±0.05mm …公差も含めて仕様を決定
- ・長さ：200±1mm …公差も含めて仕様を決定

先行試験用要素(6)、(7)

被覆管

- ・外径：6.86±0.02mm …公差も含めて仕様を決定
- ・肉厚：0.56±0.03mm …公差も含めて仕様を決定

※先行試験用要素の許可仕様では

- ・燃料：直径4.6～7.5mm、有効長50cm以下
- ・被覆管：外径5.4～8.5mm、肉厚0.3～0.8mm

製作する燃料要素の仕様を許可の範囲内で設工認段階で設定

設工認例 設計仕様（主要寸法）（2/3）

先行試験用 Y 型コンパートメント (6)

コンパートメント外管

- ・ 外管外径： $26.40_{-0.05}^{+0.10}$ mm …公差も含めて仕様を決定
- ・ 外管肉厚： 0.600 ± 0.075 mm …公差も含めて仕様を決定

コンパートメント内管

- ・ 内管内径： $22.40_{-0.05}^{+0.10}$ mm …公差も含めて仕様を決定
- ・ 内管肉厚： 0.600 ± 0.075 mm …公差も含めて仕様を決定

内壁構造容器

- ・ 内壁構造容器胴内径： $12.8_{-0.1}^{+0.2}$ mm …公差も含めて仕様を決定
- ・ 内壁構造容器胴肉厚： $3.0_{-0.2}^{+0.1}$ mm …公差も含めて仕様を決定

※ Y 型コンパートメント（先行試験用）の許可仕様では

- ・ コンパートメント外管：外径約26.4mm、肉厚約0.6mm
- ・ コンパートメント内管：外径約22.4mm、肉厚約0.6mm
- ・ 内壁構造容器：内径13mm以下、肉厚2.8mm以上

製作するコンパートメントの仕様を許可の範囲内で設工認段階で設定

設工認例 設計仕様（主要寸法）（3/3）

タイロッド

- ・ 外径：25.0±0.1mm …公差も含めて仕様を決定
- ・ 肉厚：4.5±0.1mm …公差も含めて仕様を決定

ハンドリングヘッド

- ・ パッド部外対辺間距離：80.3±0.1mm
- ・ 内径：56.0±0.1mm

エントランスノズル付ラッパ管

ラッパ管

- ・ 対辺間距離（六角内辺）：74.70±0.30mm
- ・ パッド部外対辺間距離：81.20⁺⁰_{-0.05} mm
- ・ 肉厚：1.90±0.13mm

エントランスノズル

- ・ 外径：57.00±0.02mm
- ・ 球面座半径：35.00±0.25mm

※ B型照射燃料集合体の許可仕様では

- ・ ラッパ管：六角外対辺長さ約78.5mm

製作する集合体の仕様を許可の範囲内で設工認段階で設定

設工認例 強度計算書（添付書類）（1/7）

設計方針

燃料要素

- （1）燃料最高温度（燃料スラグの最高温度をいう。以下同じ。）は、 $1,064^{\circ}\text{C}$ 以下となるように設計する。
- （2）被覆管歪は、十分小さくなるように設計する。
- （3）被覆管内圧は、被覆管にかかる引張応力を抑え、円周方向のクリープ破断を生じないように十分低く設計する。
- （4）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の基準に準拠した値を満たすように設計する。
- （5）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に設計する。

集合体

- （1）輸送及び取扱い時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。
- （2）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、集合体の構成部品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。

※製作する燃料要素の特徴も踏まえて設工認段階で設定

設工認例 強度計算書（添付書類）（2/7）

燃料要素

（1）燃料最高温度

評価条件

- ・ 金属燃料、ボンドナトリウムの物性値
- ・ 燃料スラグ径：公差を含む最大値
- ・ 集合体流量：被覆管が熱的制限値となる流量
- ・ 出力：設計条件（最大線出力密度500W/cm）

※製作する燃料要素の公差を含む厳しい仕様で評価

評価結果

先行試験用要素 (6)-①、(7)-①

運転状態	燃料最高温度	設計方針
定格出力時	1,008	1,011以下
過出力時	1,048	1,064以下

先行試験用要素 (6)-②、(7)-②

運転状態	燃料最高温度	設計方針
定格出力時	995	1,011以下
過出力時	1,033	1,064以下

基準を満たすことを確認する。

設工認例 強度計算書（添付書類）（3/7）

（2）被覆管歪

評価条件

- ・ 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の材料物性
- ・ 照射温度：561℃（最大発熱部）
- ・ 高速中性子照射量： $17.0 \times 10^{22} \text{n/cm}^3$ （最大）

※燃料要素の仕様条件を考慮した厳しい仕様で評価

評価結果

スエリング歪	照射クリープ歪	熱クリープ歪	被覆管歪合計	許容値
約0.01%	約0.18%	約0.03%	約0.22%	7%

（3）被覆管内圧

評価条件

- ・ プレナム体積：寿命を通じて最小となるようにプレナム体積を設定
- ・ 被覆管肉厚：公差、Na腐食、FP腐食、金属液相腐食を考慮
- ・ 温度：被覆管最高温度が熱的制限値となる条件

評価結果

先行試験用要素 (6)-①、(7)-①

評価位置	クリープ寿命分数和	許容値
最高温度部	7.44×10^{-3}	1.0

先行試験用要素 (6)-②、(7)-②

評価位置	クリープ寿命分数和	許容値
最高温度部	2.22×10^{-3}	1.0

設工認例 強度計算書（添付書類）（4/7）

（4）被覆管各部の応力

評価条件

- ・被覆管肉厚：公差、Na腐食、FP腐食、金属液相腐食を考慮
- ・温度：被覆管最高温度が熱的制限値となる条件
- ・応力評価式の設定

※製作する燃料要素の公差を含む厳しい仕様で評価

評価結果

先行試験用要素

(6)-①、(7)-①

最高温度部

使用末期

運転時の異常な過渡変化時

第I-3表

先行試験用要素(6)-①(7)-① 各部の応力(8) (運転時の異常な過渡変化時)

(単位 kg/mm²)

解析位置	時期	応力の原因	周方向応力				軸方向応力							
			Pm	PL	Pb	Q		Pm	PL	Pb	Q			
						内面	外面				内面	外面		
最高温度部	使用末期	被覆管内外圧差	2.54					1.27						
		管壁温度勾配				-6.74	6.74					-6.74	6.74	
		軸方向温度勾配				-0.38	-0.10					-0.43	0.43	
		流力振動								0.04				
		湾曲抑制										0.00	0.00	
		ワイヤ・被覆管相互作用										0.00	0.00	
		端栓部の圧力不連続										0.00	0.00	
		端栓部の温度不連続										0.00	0.00	
		ブレナムスプリング力						0.00						
		下部端栓取付角度誤差										0.04	-7.17	7.17
		スエリング差										-0.04	-7.17	7.17
		合計			2.54			-7.12	6.64	1.27		0.04	-7.17	7.17
		Pm (PL)			2.54					1.27				
Pm (PL) + Pb			2.54					1.31						
Pm (PL) + Pb + Q			内面		外面		内面		外面					
			-4.58		9.18		-5.86		8.48					
							-5.94		8.40					

強度評価

(評価温度 702 °C)

単位 N/mm² (kg/mm²)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
Pm (PL)	25.0 (2.54)	28 (2.9) (Sm)	0.893
Pm (PL) + Pb	25.0 (2.54)	42 (4.3) (1.5Sm)	0.596
Pm (PL) + Pb + Q	90.1 (9.18)	113 (11.6) (Sq)	0.798

設工認例 強度計算書（添付書類）（5/7）

（5）疲労損傷

評価条件

- ・疲労サイクル：燃焼条件に合わせて起動・スクラム回数の条件を設定
- ・応力：（4）と同じ

※燃料要素の仕様条件に合わせて評価

評価結果

先行試験用要素(6)-①、(7)-①

評価位置	疲労損傷和 Df	クリープ寿命 分数和Dc	Df+Dc	許容 値
最大発熱部	3.40×10^{-5}	5.45×10^{-6}	3.95×10^{-5}	1.0
最高温度部	3.40×10^{-5}	7.44×10^{-3}	7.47×10^{-3}	1.0
上部端栓部	3.40×10^{-5}	1.93×10^{-4}	2.27×10^{-4}	1.0

先行試験用要素(6)-②、(7)-②

評価位置	疲労損傷和 Df	クリープ寿命 分数和Dc	Df+Dc	許容 値
最大発熱部	9.50×10^{-5}	3.35×10^{-6}	9.84×10^{-5}	1.0
最高温度部	9.50×10^{-5}	2.22×10^{-3}	2.32×10^{-3}	1.0
上部端栓部	9.50×10^{-5}	7.63×10^{-5}	1.71×10^{-4}	1.0

設工認例 強度計算書（添付書類）（6/7）

集合体

（1）輸送及び取扱い時

評価条件

- ・ 加速度：6G（輸送及び取扱い時に受ける最大加速度を考慮）
- ・ 応力評価式の設定

※集合体の仕様に合わせて評価

評価結果

タイロッド

ドレン孔断面にかかる応力	許容応力
35.9N/mm ²	292N/mm ²

締結ネジ部断面にかかる応力	許容応力
105N/mm ²	585N/mm ²

コンパートメント内管の座屈荷重

座屈荷重	6Gの加速度が加わった時の コンパートメントの荷重
1960N	201N

設工認例 強度計算書（添付書類）（7/7）

（2）集合体各部の応力

評価条件

- ・各肉厚：公差を考慮
- ・温度：内壁構造容器は熱的制限値となる条件、コンパートメントは内壁構造容器と同じ温度、ラツパ管は入口出口温度から保守的に設定
- ・応力評価式の設定

※構成部品の仕様、照射条件に合わせて評価

評価結果

ラツパ管

エントランスノズルー

ラツパ管接合部

最高温度部

使用末期

運転時の異常な過渡変化時

第I-10表 B型照射燃料集合体 各部の応力(8)

(単位 kg/mm²)

評価位置	エントランスノズルラツパ管接合部		運転状態				運転時の異常な過渡変化時		評価時期	使用末期
	周方向応力						軸方向応力			
	応力の原因	P _m	PL	P _b	Q		P _m	PL	P _b	Q
内面					外面	内面				外面
湾曲拘束				0.37	0.37				1.22	1.22
				-0.37	-0.37				-1.22	-1.22
接合部構造不連続				1.04	-0.35				2.30	-2.30
接合部スエリング差				1.61	5.45				-6.40	6.40
応力の合計				3.02	5.47				-2.88	5.32
				2.28	4.73				-5.32	2.88
P _m (PL)	0.00					0.00				
P _m (PL)+P _b	0.00					0.00				
P _m (PL)+P _b +Q	内面		外面		内面		外面			
	3.02		5.47		-2.88		5.32			
	2.28		4.73		-5.32		2.88			

強度評価 (評価温度 350℃)

単位 N/mm² (kg/mm²)

応力強さの種類	応力強さ	許容応力強さ	設計比
P _m (PL)	0.0 (0.00)	125 (12.8) (Sm)	0.00
P _m (PL)+P _b	0.0 (0.00)	188 (19.2) (1.5Sm)	0.00
P _m (PL)+P _b +Q	74.6 (7.60)	376 (38.4) (3Sm)	0.20

設工認例 核熱計算書（添付書類）

1. 核設計

評価条件

- 炉心：設計対象炉心を設定
- 応力：（4）と同じ

※照射条件に合わせて評価

評価結果

- 設計対象炉心の過剰反応度が核的制限値を満足することを確認。

2. 熱設計

評価条件

- 強度計算書の（1）燃料最高温度と同じ

評価結果

- 熱設計基準値、熱的制限値を満足することを確認。

