



**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**

2022年4月8日

日本原子力研究開発機構 大洗研究所

高速実験炉部

（照射燃料集合体の安全確保の考え方）

照射燃料集合体における設計方針 (1/3)

規則の要求	許可における照射燃料集合体の設計方針
<p>(1) 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。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 第1号に規定する「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」とは、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熔融が生じる場合等をいう。 第1号に規定する「燃料体の性状又は性能に悪影響を与えない」とは、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ことをいう。 	<ul style="list-style-type: none"> 照射燃料集合体に装荷する燃料要素は、炉心燃料要素の設計方針に基づき実施。通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても、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、その健全性を維持するよう設計する。 計画的に健全性を喪失させる場合には、その範囲を制限することで、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。 集合体の設計方針は炉心燃料集合体の設計方針と同じ。

照射燃料集合体における設計方針 (2/3)

規則の要求

(2) 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。

【解釈】

第2号に規定する「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」とは、燃料の許容設計限界を超えないこと及び試験用燃料体はその許容試験限界を超えないことをいう。なお、試験用燃料体の「許容試験限界」とは、試験用燃料体があらかじめ計画した範囲内で被覆材の破損又は燃料棒にあっては燃料材の一部溶融等の試験を行うことができる限界をいい、運転時の異常な過渡変化時においても、その損傷により燃料体の健全性を損なうことのないことが要求される。

許可における照射燃料集合体の設計方針

- 燃料破損検出系により、燃料要素の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。
- 計画的に健全性を喪失させる要素の場合、その健全性を喪失した状態で燃料要素が破損しても、その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（炉心の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が集合体の外で放出されないように集合体を設計する）。

照射燃料集合体における設計方針 (3/3)

規則の要求	照射燃料集合体
<p>(3) 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。</p> <p>【解釈】</p> <ul style="list-style-type: none"> 第3号に規定する「放射性物質の漏えい量を抑制するための措置」とは、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措置をいう。 	<ul style="list-style-type: none"> 照射燃料集合体の1体当たりの核分裂性物質量は、炉心燃料集合体を超えないものに制限する。 照射燃料集合体の装荷本数を制限する。 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。 被覆管を開孔させる限界照射試験用要素にあつては、年間放出管理目標値の1%程度に抑制するため、年間試験回数を制限する。 被覆管を開孔させる基礎試験用要素にあつては、密封構造容器に装填し、密封構造容器の健全性を確保する。
<p>(4) 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。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 照射燃料集合体の設計方針は炉心燃料集合体の設計方針と同じ。燃料集合体の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。

特殊燃料要素、限界照射試験用要素、先行試験用要素、基礎試験用要素の設計方針の比較

要素	特徴	設計方針	
(参考) 炉心燃料要素	<ul style="list-style-type: none"> 健全性を喪失させない。 健全性の喪失が許可されない燃料体(第32条)を満たす。 	<p>【燃料要素】</p> <ul style="list-style-type: none"> (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ブ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、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) 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設計する。なお、設計疲労曲線は、ASME Sec. IIIに準拠した曲線を使用する。 <p>【燃料集合体】</p> <ul style="list-style-type: none"> (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、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。 	
特殊燃料要素	<ul style="list-style-type: none"> 健全性を喪失させない。 健全性の喪失が許可されない燃料体(第32条)を満たす。 	<p>【燃料要素】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 <p>【燃料集合体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の設計方針に準ずる。 	p. 6 ~
限界照射試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> 計画的にその健全性を喪失させる(被覆管の開孔)。 計画的な健全性の喪失が許可される試験用燃料体(第43条)を満たす。 	<p>【燃料要素】</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 燃料最高温度は、溶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。 <p>【燃料集合体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の設計方針に準ずる。 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する。 	p. 10 ~
先行試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> 計画的にその健全性を喪失させる 計画的な健全性の喪失が許可される試験用燃料体(第43条)を満たす。 	<p>【燃料要素】</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 燃料最高温度が溶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、燃料溶融割合が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。 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。 <p>【燃料集合体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の設計方針に準ずる。 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する。 	p. 14 ~
基礎試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> 計画的にその健全性を喪失させる(被覆管の開孔)。 計画的な健全性の喪失が許可される試験用燃料体(第43条)を満たす。 	<p>【燃料要素】</p> <ul style="list-style-type: none"> a. 燃料最高温度が溶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。 <p>【燃料集合体】</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の設計方針に準ずる。 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。 	p. 14 ~

特殊燃料要素の許可、設工認、使用段階での管理 (1/2)

【熱設計・核設計】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 熱設計基準値や熱的制限値を定め、設置変更許可申請書に記載する。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 許可の最大燃料径・最大密度条件、最大線出力密度条件において熱的制限値を満足できることを確認し、評価結果の一例として設置変更許可申請書に記載する。 上記の最大条件となる寸法（燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ）に範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 被覆材種類（Ⅲ型：オーステナイト系、Ⅳ型：フェライト系）、通常使用温度（熱的制限値）を決定し、設置変更許可申請書に記載する。 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 熱設計基準値や熱的制限値を定め、設置変更許可申請書に記載する。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料要素種類、Pu含有率、被覆材種類（2種類）、通常使用温度（熱的制限値）を決定し、設置変更許可申請書に記載する。 炉心燃料集合体の仕様、炉心構成から計算される結果にもとづく条件で評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって寸法等を決定し、設計仕様、設計条件が許可に適合していることを確認する。集合体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ていないことを確認する。 許可で定めた設計手法により通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の核熱計算を実施し、結果が許可で定めた方針を満足する（健全性が維持される）ことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計仕様、設計条件が許可に適合していることを確認する。 許可で定めた通りに核熱計算し、設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。（材料検査、寸法検査、性能検査等） サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として、炉心構成（照射燃料集合体の装荷本数が制限以内であること）や熱的制限値を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。 サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として熱的制限値を確認する。

特殊燃料要素の許可、設工認、使用段階での管理 (2/2)

【燃料設計（強度計算）】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 材料のクリープ強度、Sm値、設計疲労曲線は、試験目的を踏まえて被覆管材料を選択するため許可には定めのないものの、内圧評価、応力評価、疲労評価の方針により、設工認で決定できるようにする。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 寸法（燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ）は範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 許可に定めた仕様範囲のなかで最大径仕様の条件での成立例を示し設置変更許可申請書に記載する。 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 燃料仕様から定まるSm値を設置変更許可申請書に記載している。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の仕様、使用条件にしたがって評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって、寸法、材料（Sm値等）、使用条件を決定し、許可に適合していることを確認する。 設計仕様、設計条件のもとでの強度計算結果が許可で定めた方針を満足することを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法や材料、設計条件が許可の通りであることを確認する。 強度計算結果が設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。（材料検査、寸法検査等） 燃料破損検出系により、燃料要素の被覆管の破損が検知された場合は、原子炉を停止し、炉心から照射燃料集合体を取り出す。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。

特殊燃料要素の仕様の設定の考え (1/2)

項目	炉心燃料要素	III型特殊燃料要素	IV型特殊燃料要素	仕様設定の考え方
燃料材種類	PuU混合酸化物焼結ペレット	PuU混合酸化物焼結ペレット		炉心燃料要素と同様に制限する。
Pu含有率 [wt%]	≦32	≦32	≦32	炉心燃料要素と同様に制限する。 許可では最も保守的な条件で熱設計基準値を設定する。
核分裂性Pu富化度 [wt%]	約16 (内側) 約21 (外側)	≦80		U濃縮度と併せて線出力密度の調整に用いる。試験目的によって線出力密度を変えるため制限しない。ただしPu組成を原子炉級に制限しているため、約80%が上限となる。 許可では最大線出力密度を制限する。
Pu組成	原子炉級	原子炉級		炉心燃料要素と同様に制限する。
U濃縮度 [wt%]	約18	≦26	≦24	核分裂性Pu富化度と併せて線出力密度の調整に用いる。 許可では最大線出力密度を制限する。
初期密度 [%TD]	約94	≦95		試験目的も踏まえて一定の範囲に制限し、許可では最大条件での成立性を確認する。
燃料直径 [mm]	約4.6	5.3~7.5	5.18~6.18	試験目的も踏まえて一定の範囲に制限し、許可では最大条件での成立性を確認する。
ペレット長さ [mm]	約9	≦15		燃料の寸法を試験目的に合わせてパラメータとするため、過去の照射実績を踏まえて一定の範囲で制限する。

特殊燃料要素の仕様の設定の考え (2/2)

項目	炉心燃料要素	III型特殊燃料要素	IV型特殊燃料要素	仕様設定の考え方
被覆管種類	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)	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	試験目的に合わせてそれぞれ設定する。材質を制限するため、熱設計基準値を設定する。
被覆管外径 [mm]	約5.5	6.4~8.5	6.5~7.5	試験目的も踏まえて一定の範囲に制限し、許可では最大条件での成立性を確認する。
被覆管肉厚 [mm]	約0.35	0.4~0.7	0.56~0.76	試験目的も踏まえて一定の範囲に制限し、許可では最大被覆管径・燃料径に合わせた条件での成立性を確認する。
燃料-被覆直径ギャップ [mm]	約0.1	≤ 0.2	約0.1	試験目的も踏まえて一定の範囲に制限し、許可では最大被覆管径・燃料径に合わせた条件での成立性を確認する。
ガスプレナム長さ [cm]	約58	≤ 90		試験する燃料に合わせて燃料要素内の内圧を変えることができるように範囲を制限する。
燃料有効長 [cm]	約50	≤ 50 (≤ 55 ※MK-II炉心からの継続燃料)		炉心燃料領域高さ (MK-IV炉心約50cm) 以下。ただし、照射燃料の場合はMK-II炉心から継続するものがあり、その場合はMK-II炉心の炉心燃料領域高さ (約55cm) 以下に制限する。
燃料要素全長 [cm]	約154	≤ 200		試験目的により製造できる燃料要素全長が変わるため、幅を持たせる必要がある。ただし、集合体 (全長約297cm) に収納できる目安として200cm以下に制限する。

限界照射試験用要素の許可、設工認、使用段階での管理 (1/2)

【熱設計・核設計】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 燃料材種類の範囲、Pu含有率、被覆管材料、使用温度は、試験目的を踏まえてパラメータにできるように範囲で定めるが、熱設計基準値を定める考え方を設置変更許可申請書に記載し、設工認で決定できるようにする。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 許可の最大燃料径・最大密度条件、最大線出力密度条件において熱的制限値を満足できることを確認し、評価結果の一例として設置変更許可申請書に記載する。被覆管開孔時には熱設計基準値を満足することを確認し、設置変更許可申請書に記載する。 上記の最大条件となる寸法（燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ）に範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 熱設計基準値や熱的制限値を定め、設置変更許可申請書に記載する。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料要素種類、Pu含有率、被覆材種類（2種類）、通常使用温度（熱的制限値）を決定し、設置変更許可申請書に記載する。 炉心燃料集合体の仕様、炉心構成から計算される結果にもとづく条件で評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって、寸法、材料（Sm値等）、使用条件を決定し、許可に適合していることを確認する。 許可で定めた設計手法により通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時の核熱計算を実施し、結果が許可で定めた方針を満足する（計画的に健全性を喪失させるが、それ以外では健全性が維持される）ことを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計仕様、設計条件が許可に適合していることを確認する。 許可で定めた通りに核熱計算し、設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。（材料検査、寸法検査、性能検査等） サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として、炉心構成（照射燃料集合体の装荷本数が制限以内であること）や熱的制限値を確認する。 特殊試験計画により年間試験回数を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。 サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として熱的制限値を確認する。

限界照射試験用要素の許可、設工認、使用段階での管理 (2/2)

【燃料設計（強度計算）】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 材料のクリープ強度、Sm値、設計疲労曲線は、試験目的を踏まえて被覆管材料を選択するため許可には定めないものの、内圧評価、応力評価、疲労評価の方針により、設工認で決定できるようにする。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 寸法（燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ）は範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 許可に定めた仕様範囲のなかで設計の成立例を示し設置変更許可申請書に記載する。 放射性物質の漏えい量を抑制するため、装填本数及び年間試験回数を制限する。 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 燃料仕様から定まるSm値を設置変更許可申請書に記載している。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の仕様、使用条件にしたがって評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって、寸法、材料（Sm値等）、使用条件を決定し、許可に適合していることを確認する。 設計仕様、設計条件のもとでの強度計算結果が許可で定めた方針を満足することを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法や材料、設計条件が許可の通りであることを確認する。 強度計算結果が設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。（材料検査、寸法検査等） 燃料破損検出系により、燃料要素の被覆管の開孔または破損が検知された場合は、原子炉を停止し、炉心から照射燃料集合体を取り出す。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。

限界照射試験用要素の仕様の設定の考え (1/2)

項目	炉心燃料要素	III型特殊燃料要素	IV型特殊燃料要素	仕様設定の考え方
燃料材種類	PuU混合酸化物焼結ペレット	PuU混合酸化物焼結ペレット		特殊燃料要素と同じ。
Pu含有率 [wt%]	≦32	≦32	≦32	特殊燃料要素と同じ。
核分裂性Pu富化度 [wt%]	約16 (内側) 約21 (外側)	≦80		特殊燃料要素と同じ。
Pu組成	原子炉級	原子炉級		特殊燃料要素と同じ。
U濃縮度 [wt%]	約18	≦26	≦24	特殊燃料要素と同じ。
初期密度 [%TD]	約94	≦95		特殊燃料要素と同じ。
燃料直径 [mm]	約4.6	5.3~6.6	5.18~6.18	試験ニーズも踏まえて、III型では特殊燃料要素より細く制限。IV型は特殊燃料要素と同じ。
ペレット長さ [mm]	約9	≦15		特殊燃料要素と同じ。

限界照射試験用要素の仕様の設定の考え (2/2)

項目	炉心燃料要素	III型特殊燃料要素	IV型特殊燃料要素	仕様設定の考え方
被覆管種類	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)	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	特殊燃料要素と同じ。
被覆管外径 [mm]	約5.5	6.4~7.5	6.5~7.5	試験ニーズも踏まえて、III型では特殊燃料要素より細く制限。IV型は特殊燃料要素と同じ。
被覆管肉厚 [mm]	約0.35	0.4~0.6	0.56~0.76	
燃料-被覆直径ギャップ [mm]	約0.1	≤ 0.2	約0.1	特殊燃料要素と同じ。
ガスプレナム長さ [cm]	約58	≤ 90		特殊燃料要素と同じ。
燃料有効長 [cm]	約50	≤ 50 (≤ 55 ※MK-II炉心からの継続燃料)		特殊燃料要素と同じ。
燃料要素全長 [cm]	約154	≤ 200		特殊燃料要素と同じ。

先行試験用要素及び基礎試験用要素の許可、設工認、使用段階での管理 (1/2)

【熱設計・核設計】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 燃料材種類、Pu含有率、被覆管材料、使用温度は、試験目的を踏まえてパラメータにできるような範囲で定めるが、熱設計基準値を定める考え方を設置変更許可申請書に記載し、設工認で決定できるようにする。(先行試験用要素の溶融させない場合では、溶融温度以下と定めることで、設工認で熱的制限値が決定できるとともに、燃料の健全性を確保できるようにする。) <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 寸法(燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ)は範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 線出力の調整に用いる核分裂性Pu富化度(Pu組成)やU濃縮度は、試験目的を踏まえてパラメータにできるような範囲で定めるが、最大線出力密度を制限して評価し、設置変更許可申請書に記載する。(必要な冷却材流量をキャプセルで確保できることを説明する。) 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針や計算手法を定め、設置変更許可申請書に記載する。 熱設計基準値や熱的制限値を定め、設置変更許可申請書に記載する。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 燃料要素種類、Pu含有率、被覆材種類(2種類)、通常使用温度(熱的制限値)を決定し、設置変更許可申請書に記載する。 炉心燃料集合体の仕様、炉心構成から計算される結果にもとづく条件で評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって、燃料材種類、Pu含有率、被覆管材料、使用温度、核分裂性Pu富化度、U濃縮度、線出力密度を決定し、許可に適合していることを確認する。 核熱計算結果が許可で定めた方針を満足することを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計仕様、設計条件が許可に適合していることを確認する。 許可で定めた通りに核熱計算し、設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。(材料検査、寸法検査、性能検査等) サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として、炉心構成(照射燃料集合体の装荷本数が制限以内であること)や熱的制限値を確認する。 特殊試験計画により年間試験回数を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。 サイクル運転に先立ち、運転計画書の確認事項として熱的制限値を確認する。

先行試験用要素及び基礎試験用要素の許可、設工認、使用段階での管理 (2/2)

【燃料設計（強度計算）】

	照射燃料集合体の制限の管理	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更許可申請	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 材料のクリープ強度、Sm値、設計疲労曲線は、試験目的を踏まえて被覆管材料を選択するため許可には定めないものの、内圧評価、応力評価、疲労評価の方針により、設工認で決定できるようにする。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 寸法（燃料径、被覆管径、肉厚、燃料-被覆管ギャップ）は範囲を定め、設置変更許可申請書に記載する。 許可に定めた仕様範囲のなかで最大径仕様燃料で設計の成立例を示し設置変更許可申請書に記載する。 （燃料材の種類や被覆管材料は試験目的から幅を持たせるが、寸法は過去の照射実績を踏まえ、特殊燃料要素の仕様範囲に制限する。） 	<p>[設計方針]</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計方針を定め、設置変更許可申請書に記載する。 燃料仕様から定まるSm値を設置変更許可申請書に記載している。 <p>[設計条件・評価]</p> <ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料集合体の仕様、使用条件にしたがって評価し、設置変更許可申請書に記載する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で定めた範囲にしたがって、寸法、材料（Sm値等）、使用条件を決定し、許可に適合していることを確認する。 設計仕様、設計条件のもとでの強度計算結果が許可で定めた方針を満足することを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 寸法や材料、設計条件が許可の通りであることを確認する。 強度計算結果が設計方針を満足することを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。（材料検査、寸法検査等） 燃料破損検出系により、燃料要素の被覆管の開孔または破損が検知された場合は、原子炉を停止し、炉心から照射燃料集合体を取り出す。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の仕様等を確認・検査する。

先行試験用要素/基礎試験用要素の仕様の設定 (1/3)

項目	炉心燃料要素	先行試験用要素	基礎試験用要素	仕様設定の考え方
燃料材種類	PuU混合酸化物焼結ペレット	PuまたはUの単体または混合物の酸化物、炭化物、窒化物、金属 (試験目的によりMA等を混入させる)	PuU混合酸化物焼結ペレット、 PuU混合炭化物焼結ペレット、 PuU混合窒化物焼結ペレット、 PuU混合金属スラグ	先行試験用要素は照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いる試験のため、ペレット以外の形状も幅広く設定する必要がある。ただし高速炉の燃料開発が目的であるため、一定の種類に制限する。基礎試験用要素は、過去の照射実績を考慮した種類に制限する。
Pu含有率 [wt%]	≦32	≦100 (Pu単体)	≦32 (酸化物)、 ≦25 (炭化物)、 ≦30 (窒化物)、 ≦20 (金属)	制限値 (融点) に影響を及ぼす項目。先行試験用要素では、照射挙動が不明な材料を燃料材に用いる試験であり、高Pu燃料の試験も実施する。そのため制限を設けない。基礎試験用要素は、過去の照射実績を考慮した範囲に制限する。どちらの要素も熱設計基準値を溶融温度以下とすることで燃料の健全性を確保する。
核分裂性Pu富化度 [wt%]	約16 (内側) 約21 (外側)	≦80		U濃縮度と併せて線出力密度の調整に用いる。試験目的によって線出力密度を変えるため制限しない。ただしPu組成を原子炉級に制限しているため、約80%が上限となる。
Pu組成	原子炉級	原子炉級		先行試験用要素は照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いる試験ではあるものの、高速炉燃料の開発が目的であるため炉心燃料要素と同様に原子炉級に制限する。基礎試験用要素も同じく原子炉級に制限する。

先行試験用要素/基礎試験用要素の仕様の設定 (2/3)

項目	炉心燃料要素	先行試験用要素	基礎試験用要素	仕様設定の考え方
U濃縮度 [wt%]	約18	≦85		核分裂性Pu富化度と併せて線出力密度の調整に用いる。試験目的によって線出力密度を変えるため制限しない。
初期密度 [%TD]	約94	≦95		試験目的に合わせてパラメータとするため、一定の範囲に制限する。過去の照射実績を踏まえ、特殊燃料要素と同じ制限とする。
燃料直径 [mm]	約4.6	4.6~7.5		先行試験用要素、基礎試験用要素とも、燃料の寸法を試験目的に合わせてパラメータとするため、一定の範囲で制限する。過去の照射実績を踏まえ、特殊燃料要素の仕様範囲に制限する。
燃料外径/内径 [mm]	—	4.6~7.5 / 約2		
ペレット長さ [mm]	約9	≦15		先行試験用要素、基礎試験用要素とも、燃料の寸法を試験目的に合わせてパラメータとするため、一定の範囲で制限する。過去の照射実績を踏まえ、特殊燃料要素と同じ制限とする。
被覆管種類	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)	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	基礎試験用要素は照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いる試験のため、被覆材は幅広く設定する必要がある。ただし、高速炉燃料の開発が目的であり、現実的な被覆材候補としてステンレス鋼に制限する。先行試験用要素は、過去の照射実績を踏まえた範囲で制限する。

先行試験用要素/基礎試験用要素の仕様の設定 (3/3)

項目	炉心燃料要素	先行試験用要素	基礎試験用要素	仕様設定の考え方
被覆管 外径 [mm]	約5.5	5.4~8.5		先行試験用要素、基礎試験用要素とも、被覆管寸法を試験目的に合わせてパラメータとするため、一定の範囲で制限する。外径、肉厚とも過去の照射実績を踏まえ、特殊燃料要素の仕様範囲に制限する。
被覆管 肉厚 [mm]	約0.35	0.3~0.8		
燃料-被覆 直径ギャップ [mm]	約0.1	≤ 0.2		ギャップも試験目的に合わせてパラメータとすることがある。ギャップコンダクタンスの設定に使用している過去の照射実績も考慮した範囲に制限する。
ガスプレナム 長さ [cm]	約58	≤ 150		試験する燃料に合わせて燃料要素内の内圧を変えることができるように範囲を制限する。
燃料有効長 [cm]	約50	≤ 50 (≤ 55 ※MK-II炉心からの継続燃料)		炉心燃料領域高さ (MK-IV炉心約50cm) 以下。ただし、照射燃料の場合はMK-II炉心から継続するものがあり、その場合はMK-II炉心の炉心燃料領域高さ (約55cm) 以下に制限する。
燃料要素全長 [cm]	約154	≤ 200		試験目的により製造できる燃料要素全長が変わるため、幅を持たせる必要がある。ただし、集合体 (全長約297cm) に収納できる目安として200cm以下に制限する。

（照射燃料集合体の熱設計）

照射燃料集合体に係る熱設計基準値の設定の基本方針

【基本方針】

- ・炉心燃料集合体と同じ方針に則り、熱設計基準値を設定する。

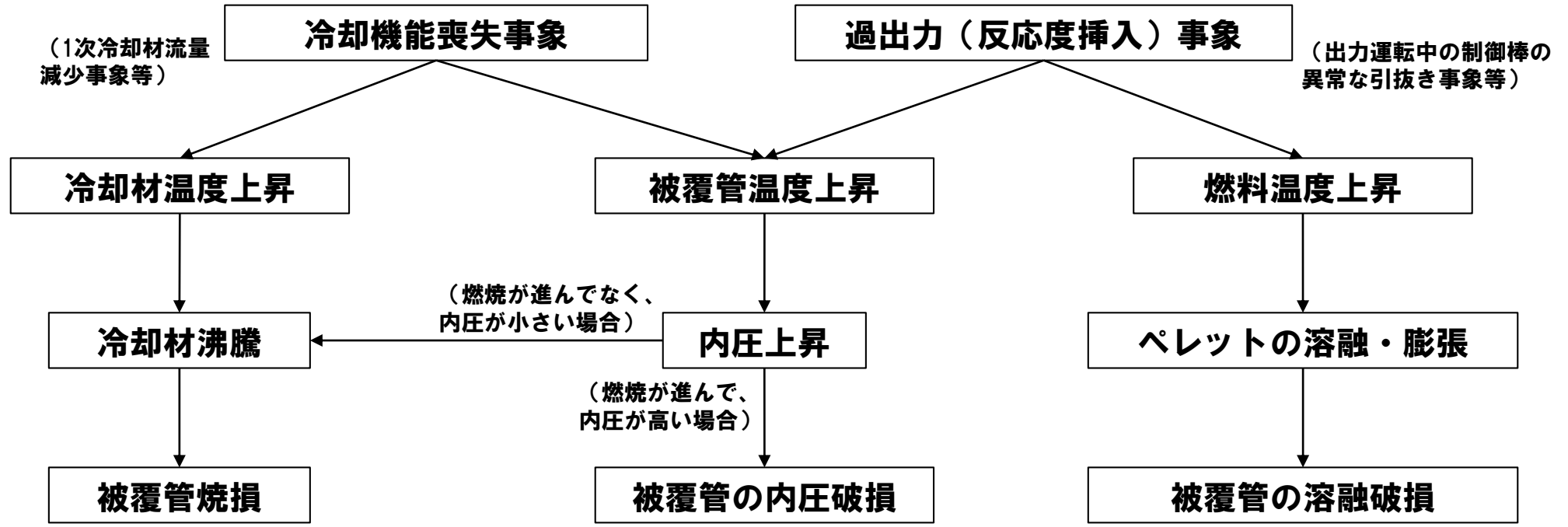
「熱設計基準値」＝許容設計限界

燃料の許容設計限界：原子炉の設計と関連して、燃料の損傷が安全設計上許容される程度であり、かつ、継続して原子炉施設の運転をすることができる限界であって、燃料要素の仕様、原子炉の運転状態から定まる燃料要素の使用条件と、燃料の「故障」の形態等から定められる。

※燃料の故障、評価基準、設定理由の考え方は炉心燃料集合体と同じ

- ・照射燃料集合体は、その試験目的に応じて仕様を決定するため、燃料材や被覆材の材質の決定は製作段階となる。許可段階で熱設計基準値を定められない要素はその設定方法を定め、設工認段階で許可に沿って定められていることを確認する。
- ・燃料材あるいは被覆材の照射挙動が不明確な材料を用いる先行試験・基礎試験では、燃料要素を装填するキャプセル（内壁構造容器・密封構造容器）に熱設計基準値を設定する。

照射燃料集合体に係る熱設計基準値の設定の考え方 (1/2)



【設定理由】
被覆管の焼損防止

【評価基準】
炉心ナトリウム温度 < ナトリウム沸点
(冷却材の沸騰防止)

→ 冷却材温度に係る熱設計基準値

【設定理由】
被覆管の内圧破損防止

【評価基準】
被覆管最高温度 < 制限値

→ 被覆管温度に係る熱設計基準値

【設定理由】
燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止

【評価基準】
燃料最高温度 < 燃料融点
(燃料の溶融防止)
又は
燃料最大溶融割合 < 制限値

→ 燃料温度 (又は燃料最大溶融割合) に係る熱設計基準値

照射燃料集合体に係る熱設計基準値の設定の考え方 (2/2)²²

①冷却材温度に係る熱設計基準値

【炉心燃料集合体】

絶対に冷却材を沸騰させることがないように裕度を持って設定する。

【照射燃料集合体】

どの特殊燃料要素、試験用要素に対しても、冷却材沸騰に対する照射試験上の要求はないため、炉心燃料集合体と同様に設定する。

②燃料温度に係る熱設計基準値

【炉心燃料集合体】

絶対に燃料を溶融させることがないように裕度を持って設定する。

【照射燃料集合体】

燃料照射で炉心燃料集合体のように大きな裕度を持つと、溶融に対する限界を見極める試験ができなくなる事情がある。燃料照射試験を実施する目的を踏まえ、裕度を切り詰めて設定する。

③被覆管温度に係る熱設計基準値

【炉心燃料集合体】

炉心設計を踏まえて設定された熱的制限値に対して過渡時に破損しないよう設定する。

【照射燃料集合体】

炉心燃料集合体と異なり熱的制限値は各燃料要素での開発目標を踏まえて設定されるが、熱的制限値に対して過渡時に破損しないように熱設計基準値を設定する点は炉心燃料集合体と同様である。

照射燃料集合体の熱設計基準値の一覧

要素	燃料最高温度に係る 熱設計基準値	被覆管最高温度に 係る熱設計基準値	冷却材最高温度に 係る熱設計基準値
Ⅲ型特殊燃料要素	2,680℃	890℃	910℃
Ⅳ型特殊燃料要素	2,680℃	810℃	910℃
Ⅲ型限界照射試験用要素	2,680℃	890℃	910℃
Ⅳ型限界照射試験用要素	2,680℃	810℃	910℃
先行試験用要素	溶融温度を超えない*1 ※酸化物燃料で溶融温度を超え る設計をする場合は 最大溶融割合30%	急速加熱による 破断温度以下*1	910℃
基礎試験用要素	溶融温度を超えない	急速加熱による 破断温度以下*1	910℃
A型用炉心燃料要素	2,650℃	840℃	910℃
限界照射試験用補助要素	2,680℃	890℃	910℃
内壁構造容器*2	—	890℃	910℃
密封構造容器*2	—	890℃	910℃

*1 複数の材料を使用可能としており、許可段階で熱設計基準値を定められない要素はその設定方法として定める。

*2 燃料要素を装填する厚肉のキャプセル（内壁構造容器、密封構造容器）に対して設定する。

(参考) 先行試験用要素及び基礎試験用要素の概要

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

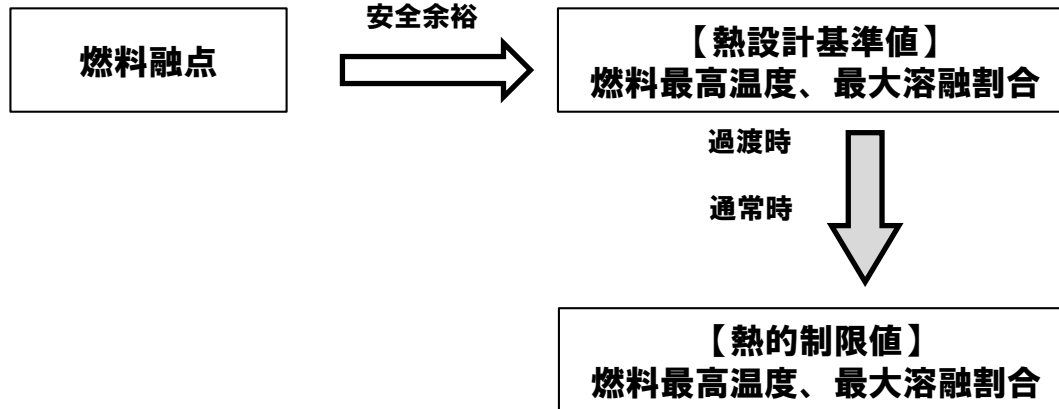
基礎試験：照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料要素を照射する試験

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 (クロム又はクロムとニッケルを含有させた合金鋼(クロム含有率10.5%以上、炭素含有率1.2%以下)、酸化物分散強化型を含む)

- 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、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。

熱的制限値の設定

(i) 燃料温度に係る熱的制限値



酸化物

燃料最高温度：2,680℃

最大溶融割合：30%

その他

燃料最高温度：溶融温度を超えない

酸化物

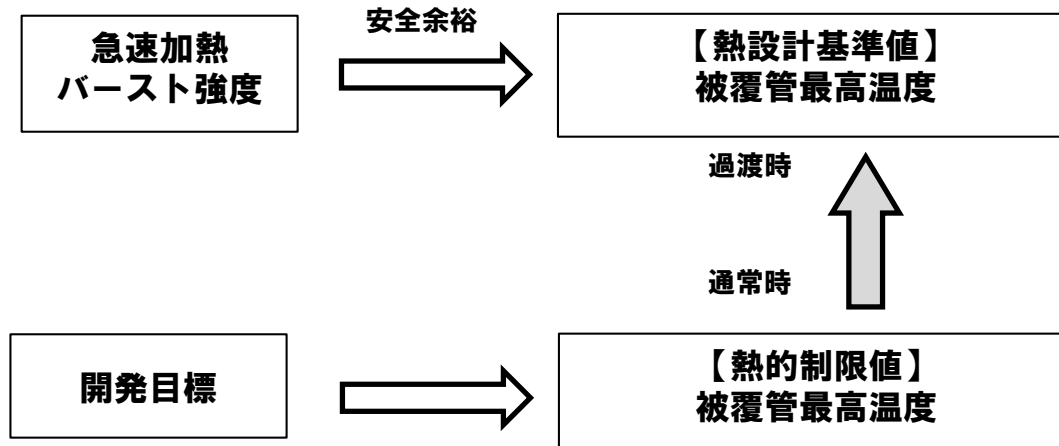
燃料最高温度：2,540℃

燃料溶融割合：20%

その他

燃料最高温度：溶融温度以下

(ii) 被覆管温度に係る熱的制限値



オーステナイト系ステンレス鋼

被覆管最高温度：890℃

フェライト系ステンレス鋼

被覆管最高温度：810℃

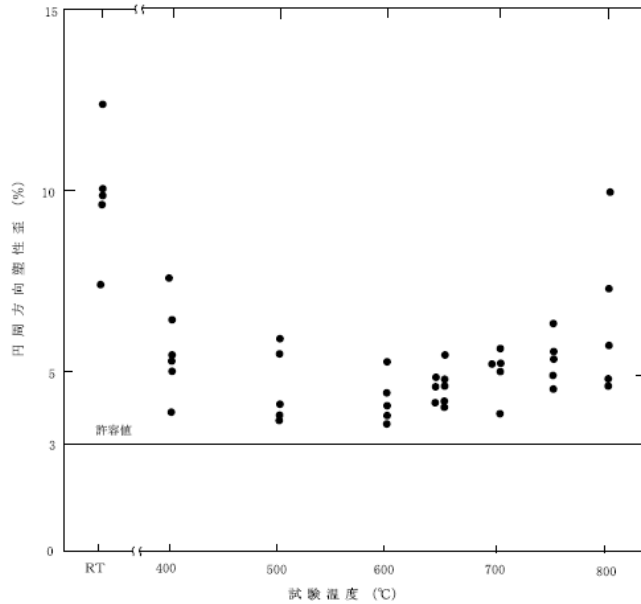
オーステナイト系ステンレス鋼

被覆管最高温度：890℃

フェライト系ステンレス鋼

被覆管最高温度：810℃

酸化物燃料を溶融させる場合の熱設計基準値の設定 (1/2) ²⁶



SUS316の破断時の円周方向塑性歪

【被覆管過大歪の防止】

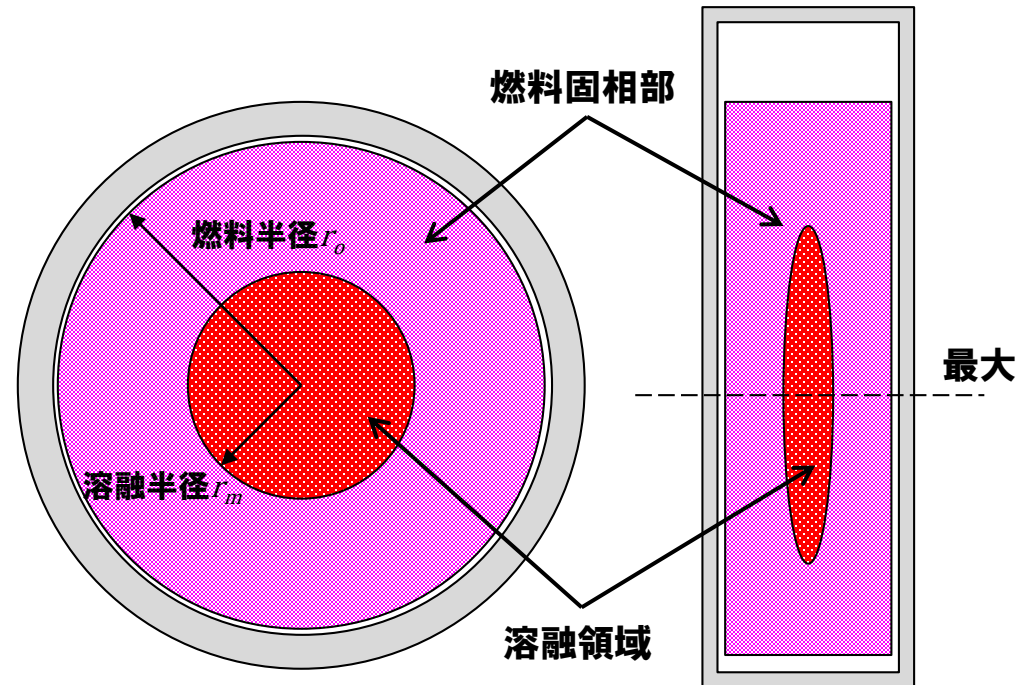
- ・被覆管の過大歪（燃料の「故障」）に対して、燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止として燃料温度に係る熱設計基準値を設定。
- ・燃料の一部溶融を伴う試験の場合は、燃料溶融割合を制限することで被覆管の機械的損傷防止を図る。
- ・被覆管の円周方向引張全歪は、SUS316の破断時の円周方向引張塑性歪の実験データに十分な設計余裕を考慮した3%以内とする。

【燃料の最大溶融割合】

- ・燃料温度計算により、燃料融点を超える領域を溶融領域とする。
- ・以下の計算式で径方向断面の溶融割合 V_m を計算する。

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

- ・軸方向の最大値を最大溶融割合とする。

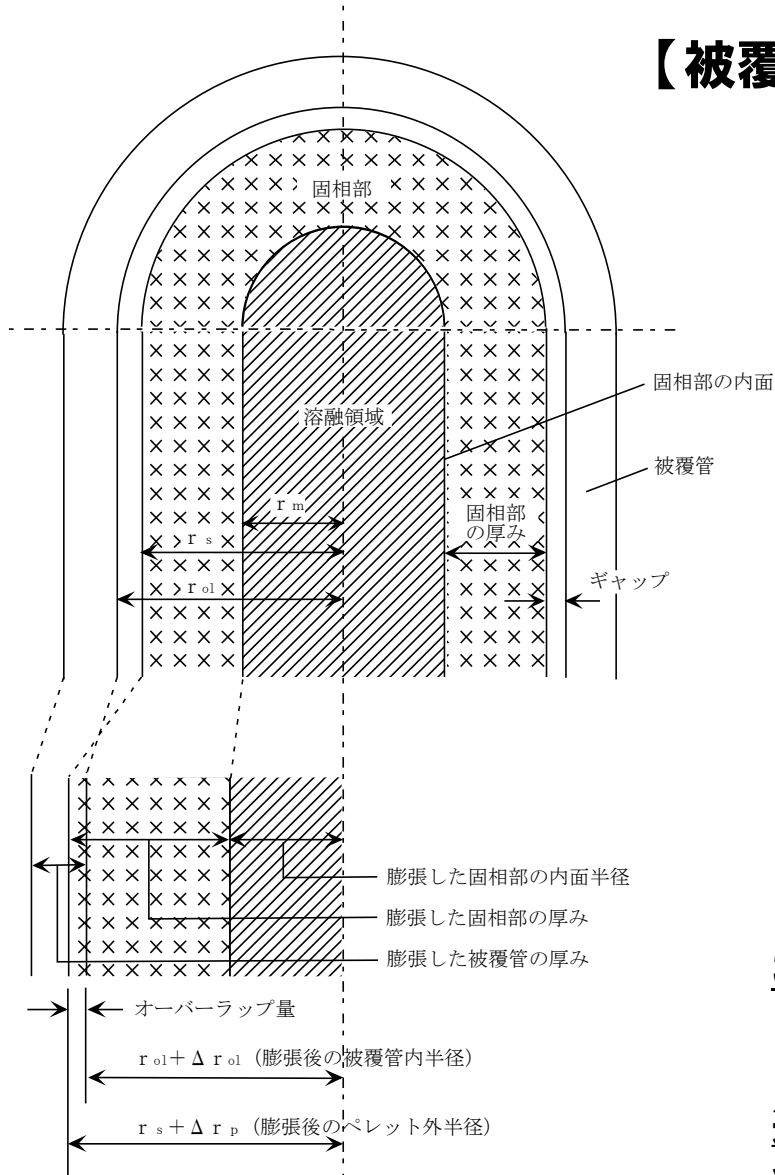


(燃料要素径方向断面)

(燃料要素軸方向断面)

酸化物燃料を溶融させる場合の熱設計基準値の設定 (2/2) ²⁷

【被覆管歪の評価】



- 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。

さらに、
過出力時に30%（熱設計基準値）を超えない通常運転時の溶融割合として「溶融割合20%を熱的制限値」とする。

被覆管歪の評価モデル

照射燃料集合体に係る熱設計の制限の管理方法

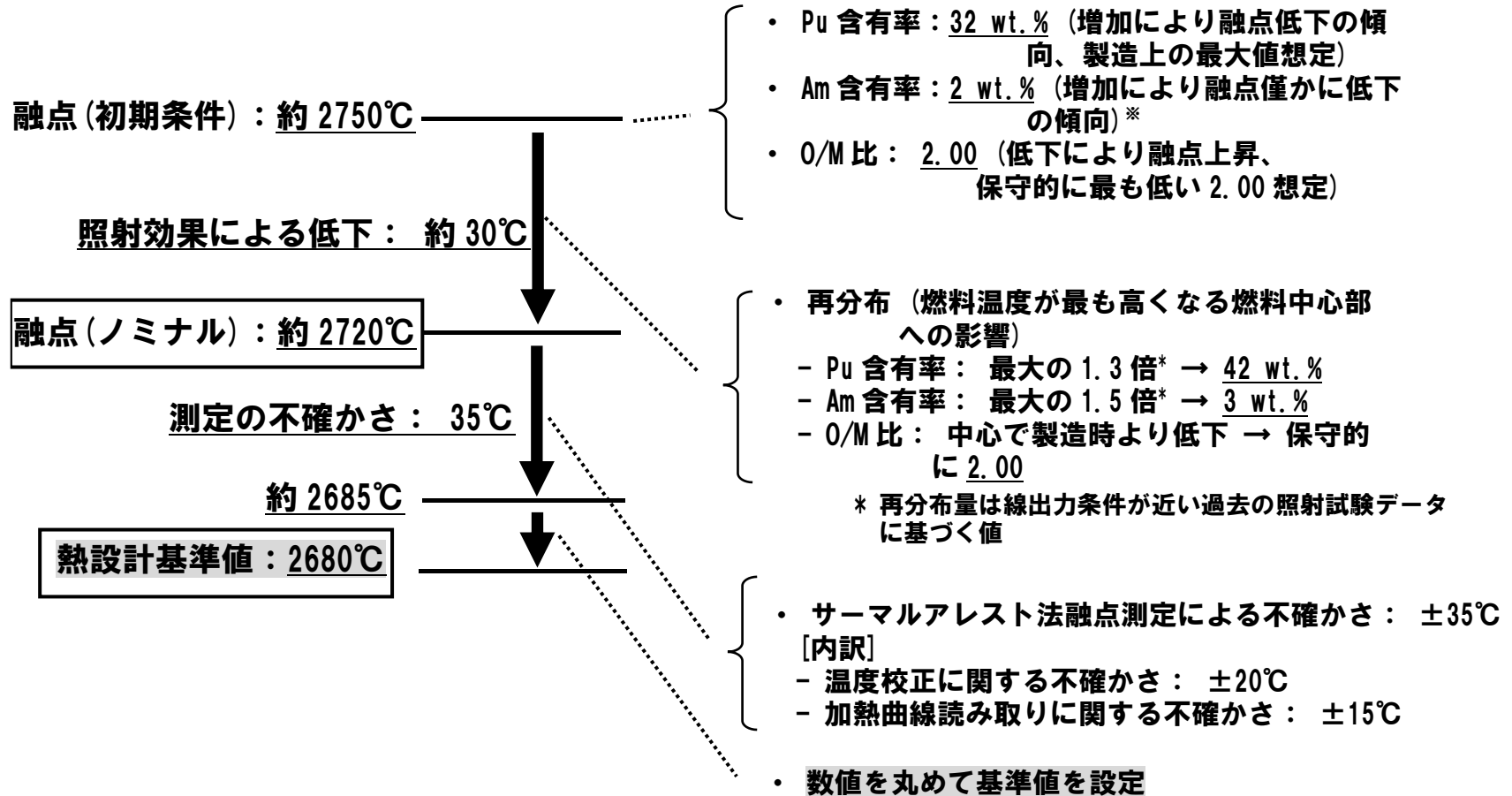
	照射燃料集合体の制限の管理	(例) 溶融させない場合の先行試験用要素	(参考) 炉心燃料集合体の制限の管理
設置変更申請	<ul style="list-style-type: none"> 炉心燃料要素と同じく熱設計基準値、熱的制限値を定めるが、具体的な温度を定められないものは、設定の考え方を設置変更許可申請書に定める。 熱設計基準値が許可に定めた制限値あるいは考え方を遵守すれば、燃料の故障が防止できることを説明する。 	<ul style="list-style-type: none"> 熱設計基準値：溶融温度を超えない、熱的制限値：溶融温度以下と定める。 溶融温度を超えなければ、溶融燃料と被覆管の相互作用による被覆管の機械的損傷を防止できることを説明する。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料要素仕様を定め、熱設計基準値及び熱的制限値を設定し、設置許可変更許可申請書に記載する。 熱設計基準値を遵守すれば、燃料の故障が防止できることを説明する。
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> 許可で考え方を定めたものによっては、製作する燃料の燃料材の種類に合わせて熱設計基準値及び熱的制限値（燃料温度、溶融割合）を定める。 設工認申請書に記載した熱設計基準値及び熱的制限値が許可に適合していることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 燃料材の種類に合わせて、熱設計基準値、熱的制限値として具体的な温度を設定する。 設定した熱設計基準値及び熱的制限値が溶融温度を下回っていることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設工認申請書に記載した熱設計基準値、熱的制限値が許可に適合していることを確認する。
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、当該照射燃料集合体の制限事項等を確認する。 原子炉施設保安規定に基づき、サイクル運転に先立ち、設工認で定めた設計条件を満たすことを評価・確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 当該照射燃料集合体について、燃料最高温度を評価し、熱的制限値以下であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 使用前事業者検査により、炉心燃料集合体の制限事項等を確認する。 原子炉施設保安規定に基づき、サイクル運転に先立ち、炉心構成の制限事項の遵守や核特性への影響が所定の範囲内であることを評価・確認。

（参考 個別の熱設計基準値の設定方法）

酸化物燃料における燃料温度に関する熱設計基準値の設定

【燃料材の主要仕様】

種類	Pu含有率
プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料	32wt%以下



※Am 含有率は、設工認において製作する燃料集合体に使用する Pu 組成がわかった段階で、使用予定範囲で ^{241}Pu の崩壊も踏まえて制限をかける

酸化物の燃料温度に関する熱設計基準値の設定の変更

	従来		今回の変更		備考
	炉心燃料要素	照射燃料 (酸化物)	炉心燃料要素	照射燃料 (酸化物)	
Pu含有率	~40wt%	~40wt%	~42wt%	~42wt%	照射による再分布を考慮
O/M比	~1.99	~1.97	~2.00	~2.00	融点に関する最新知見を反映し、炉心燃料要素とIII型特殊燃料要素の設計条件を統一
Am含有率	未考慮	未考慮	~3wt%	~3wt%	照射による再分布を考慮
融点測定データ	E.A.Aitkenらのデータ*1,2	E.A.Aitkenらのデータ*1,2	加藤らのデータ*3	加藤らのデータ*3	最新知見の反映
融点	2,675°C ≦	約2,710°C	約2,720°C	約2,720°C	
測定誤差	25°C (2,650°C ≦)	25°C (約2,685°C)	35°C (約2,685°C)	35°C (約2,685°C)	測定誤差を考慮した融点
熱設計基準値	2,650°C	2,680°C	2,650°C	2,680°C	融点に関する最新知見反映で生じた裕度を安全裕度として確保

*1 : E. A. Aitken and S. K. Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures, Quartely Report No.4", GEAP-5672, 1969.

*2 : E. A. Aitken and S. K. Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures, Quarterly Report No.16", GEAP-12229, 1971.

*3 : 加藤ら、「高速炉燃料の熱物性評価—融点と熱伝導率—」、JAEA-Technology, 2006-049, 2006年.

炭化物燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

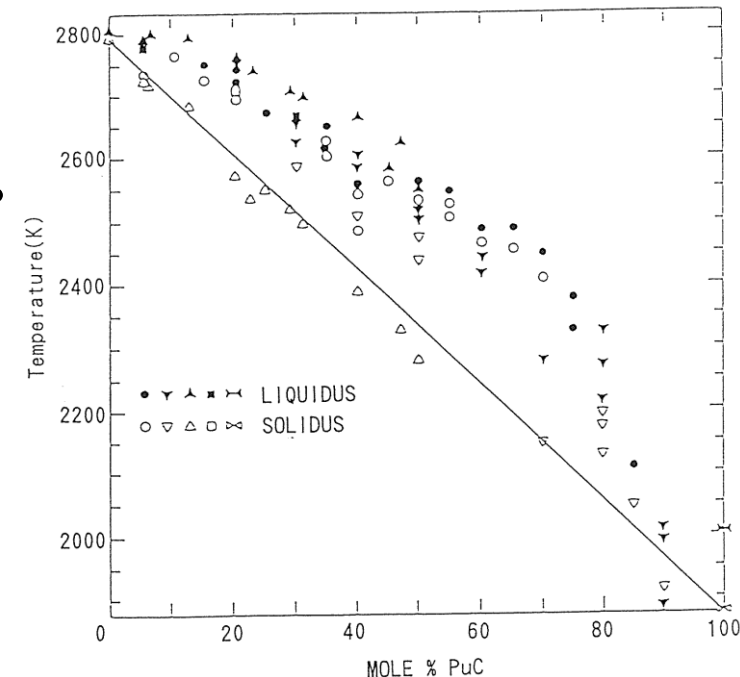
【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- 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

【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。



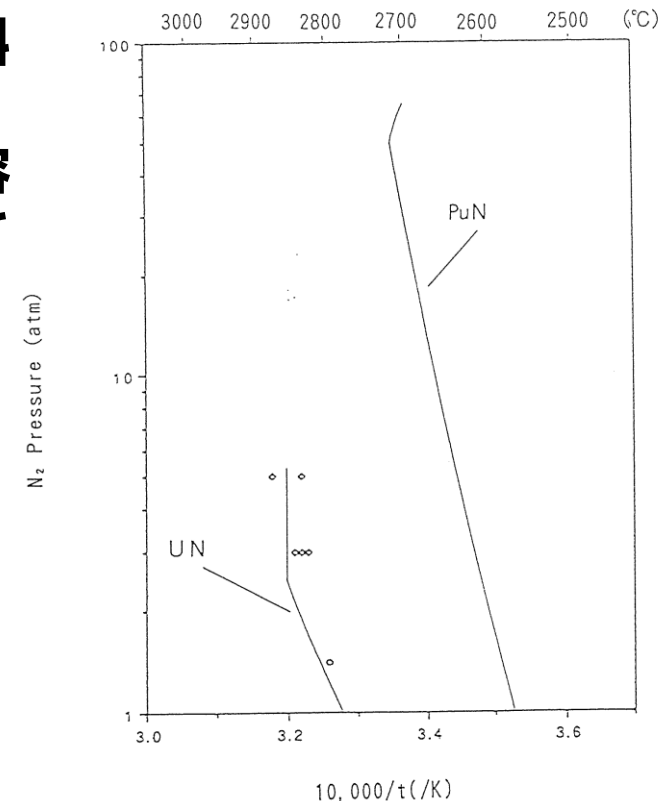
窒化物燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【プルトニウム・ウラン混合窒化物燃料の特徴】

- (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。



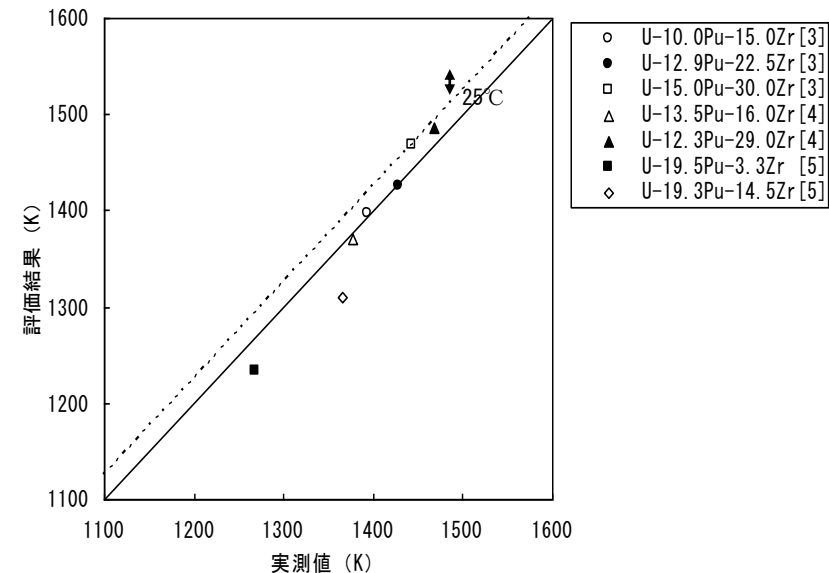
金属燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【プルトニウム・ウラン混合金属燃料の特徴】

- 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

【熱設計基準値】

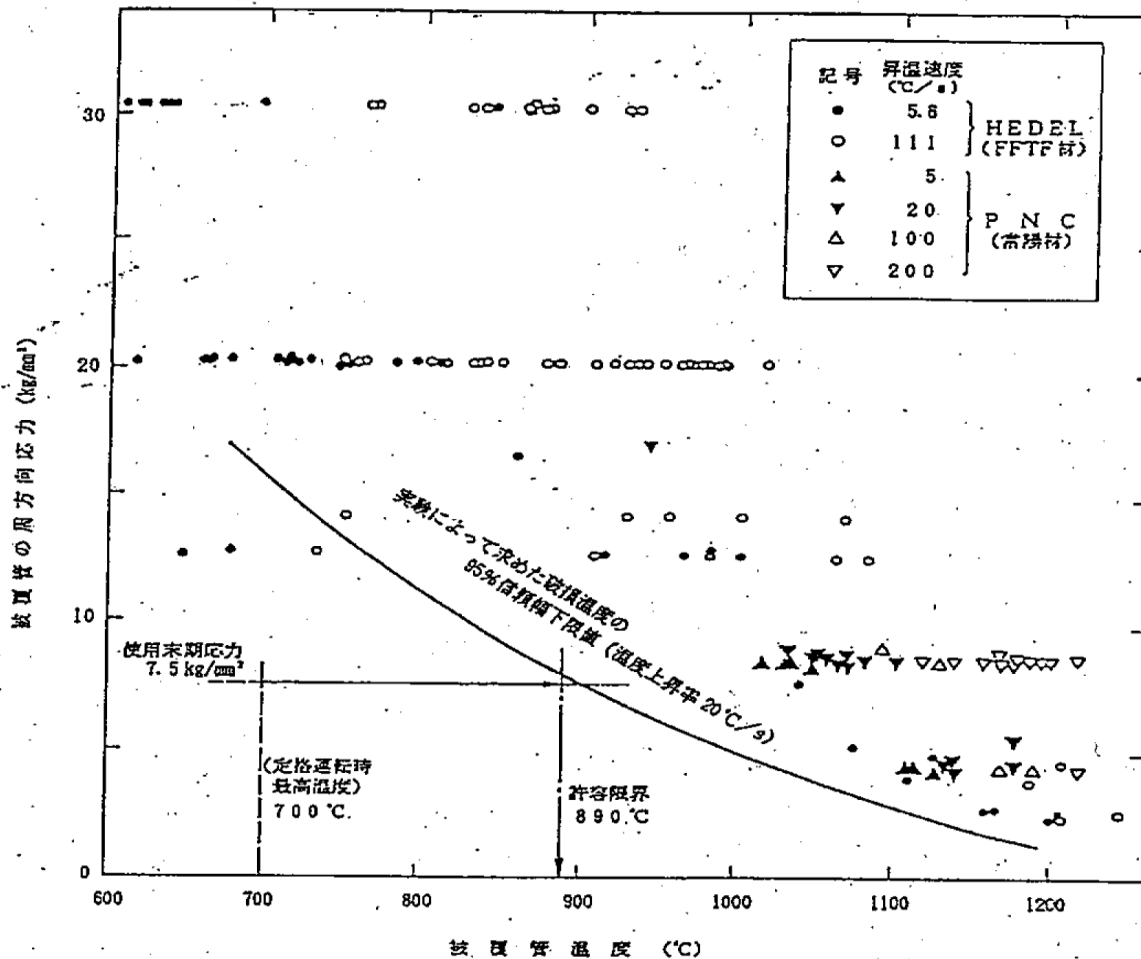
- 熔融温度を熱設計基準値とする。
- 融点は、U, Pu, Zrの組成によって決まる。
- U-Pu-Zr 3元系状態図よりU-Zr合金及びU-Pu-Zr合金の固相線温度が評価されており、燃料組成について整理して固相線温度を評価。
- 金属燃料の仕様範囲で最も固相線温度が低くなるのは、プルトニウム混合比21%、ジルコニウム混合比9%の場合で、固相線温度の評価は1,089℃。
- U-Pu-Zr合金の未照射材の融点測定値と固相線評価温度の比較（右図）から、不確かさ25℃を考慮し、熱設計基準値を1,064℃。



オーステナイト系ステンレス鋼の被覆管最高温度に係る熱設計基準値の設定

【被覆材の主要仕様】

種類	使用末期応力
オーステナイト系ステンレス鋼	7.5kgf/mm ² (約74N/mm ²)



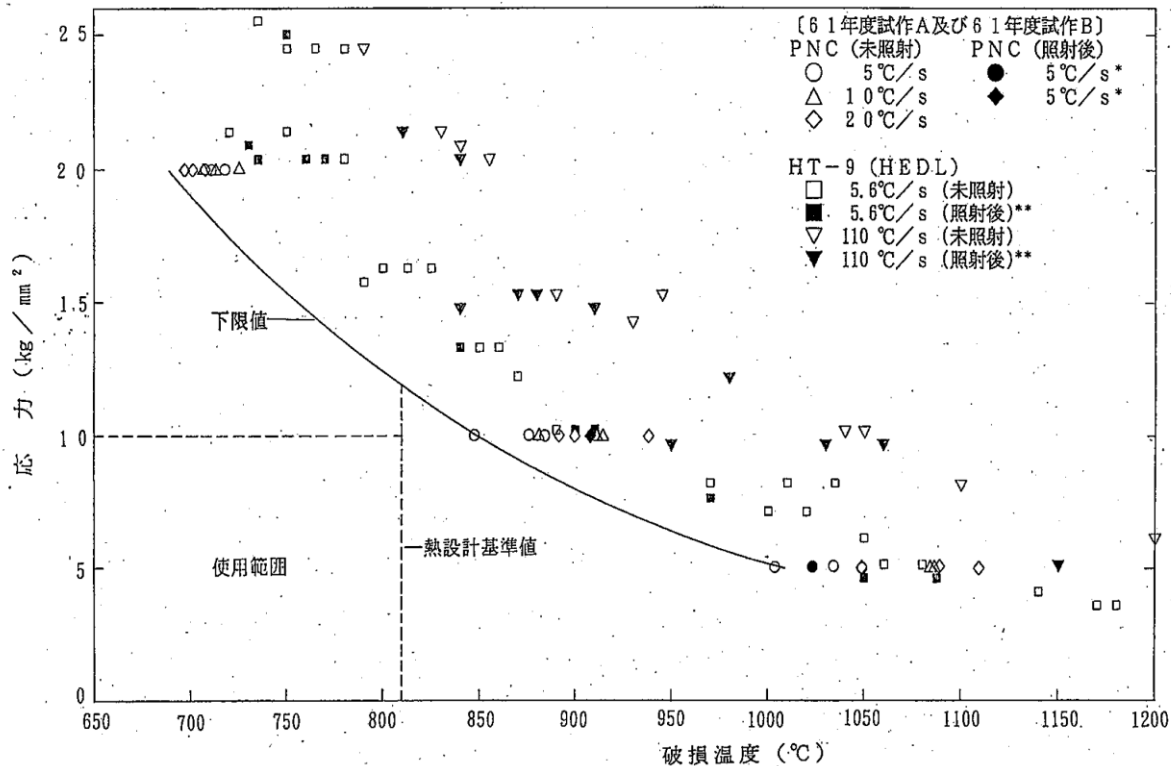
【急速加熱バースト試験結果と熱設計基準値】

- 炉心燃料要素の被覆管最高温度に対する熱設計基準値と同じく、急速加熱バースト試験の結果から設定。
- オーステナイト系ステンレス鋼の仕様範囲とそれに基づく被覆管応力を考慮して、**890°C**を熱設計基準値とする。
- 設定の考え方は炉心燃料要素の被覆管最高温度に対する熱設計基準値と同じだが、仕様範囲が異なるため、熱設計基準値の値は異なる。

フェライト系ステンレス鋼の被覆管最高温度に係る熱設計基準値の設定

【被覆材の主要仕様】

種類	使用末期応力
高速炉用フェライト系ステンレス鋼	10kgf/mm ² (約98N/mm ²)



【急速加熱バースト試験結果と熱設計基準値】

- ・ 設定の考え方はオーステナイト系ステンレス鋼と同じ。
- ・ 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の仕様範囲とそれに基づく被覆管応力を考慮して、**810°C**を熱設計基準値とする。

第14図 被覆管急速加熱時の破損温度
 (高速炉用フェライト系ステンレス鋼)

* JOYO 530°C~580°C 3.8×10^{22} n/cm² (E<0.1MeV)
 ** FFTF 370°C~620°C $1 \sim 16 \times 10^{22}$ n/cm² (E<0.1MeV)

冷却材最高温度に係る熱設計基準値の設定

【冷却材の主要仕様】

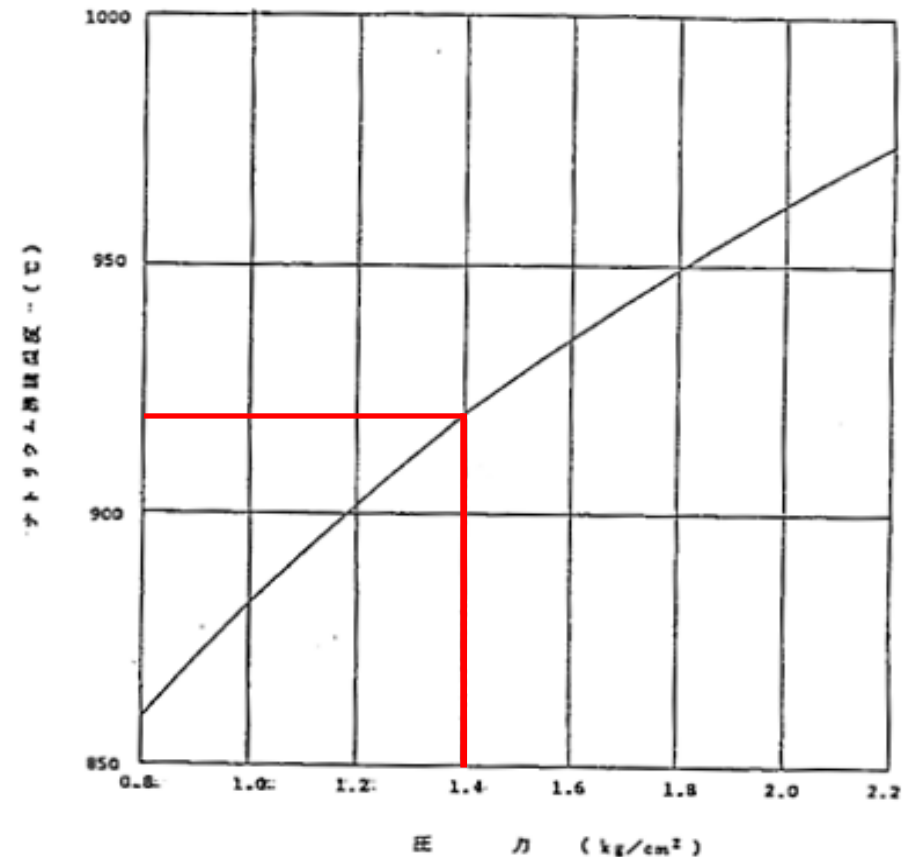
種類	炉心頂部（燃料集合体頂部）冷却材圧力
ナトリウム	約0.04N/mm ² （約0.4kgf/cm ² ）

【熱設計基準値の設定の流れ】

- ・ 炉内の使用条件から、冷却材の沸点を設定。
- ・ 冷却材沸点に対して安全裕度を考慮して設定。
- ・ 炉心要素の冷却材最高温度に対する熱設計基準値と同じ考え方。

【冷却材沸点と熱設計基準値】

- ・ 炉内の燃料集合体頂部の冷却材圧力（水頭圧含む）における沸騰温度は**約920℃**。
- ・ 安全裕度を考慮して**910℃**と設定。
- ・ 炉心燃料要素の冷却材最高温度に係る熱設計基準値と同じ値。



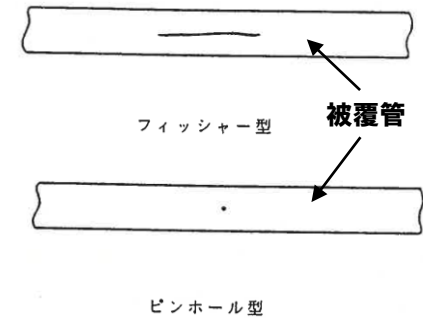
ナトリウム沸騰温度

限界照射試験用要素の被覆管開孔時の熱設計(1/2)

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

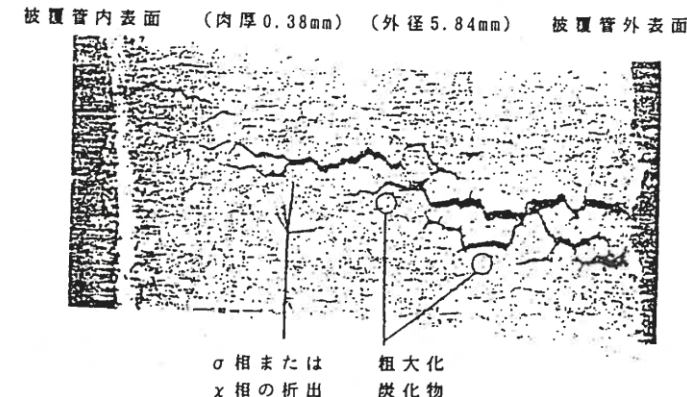
- ・被覆管強度が低下
 - ・被覆管にかかる応力の増加
- 被覆管のクリープ損傷が進み、最終的にクリープ破損に至る。



クリープ破損の形態

被覆管の開孔形態

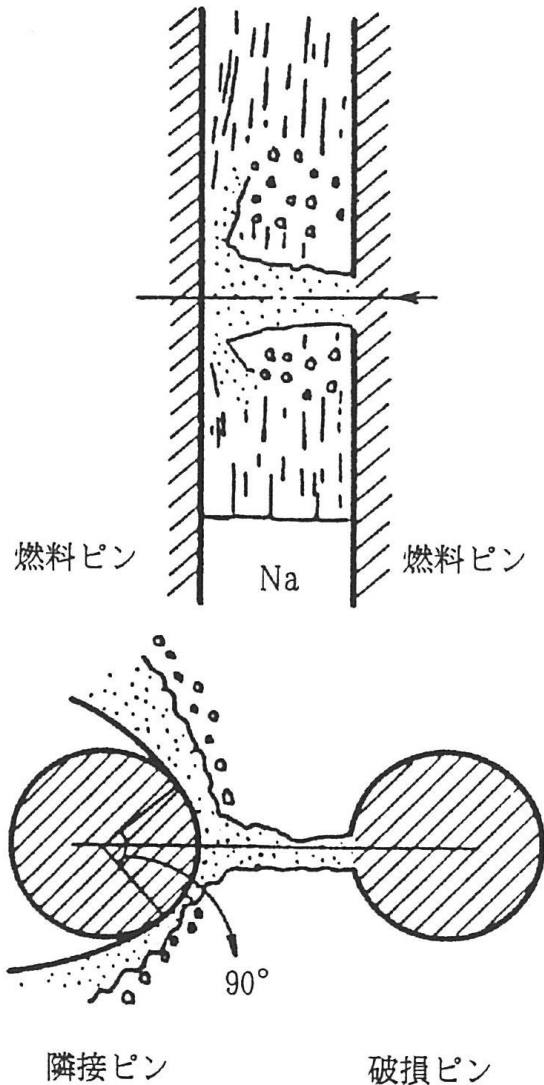
- ・結晶粒界に沿って微小なクラックが多数生じた結果、破損が発生。
- ピンホール型かフィッシャー型の破損形態
- ・海外炉における燃料破損経験においても、通常運転時に生じる破損形態はピンホール型及びフィッシャー型。生じるクラックの大きさは長さ～数cm、幅～0.数mm程度。



フィッシャー型破損の例 (EBR-II) *

* J. W. Weber, et al., Int. Conf. on Fast Breeder Reactor Fuel Performance, March (1979), p. 87

限界照射試験用要素の被覆管開孔時の熱設計 (2/2)

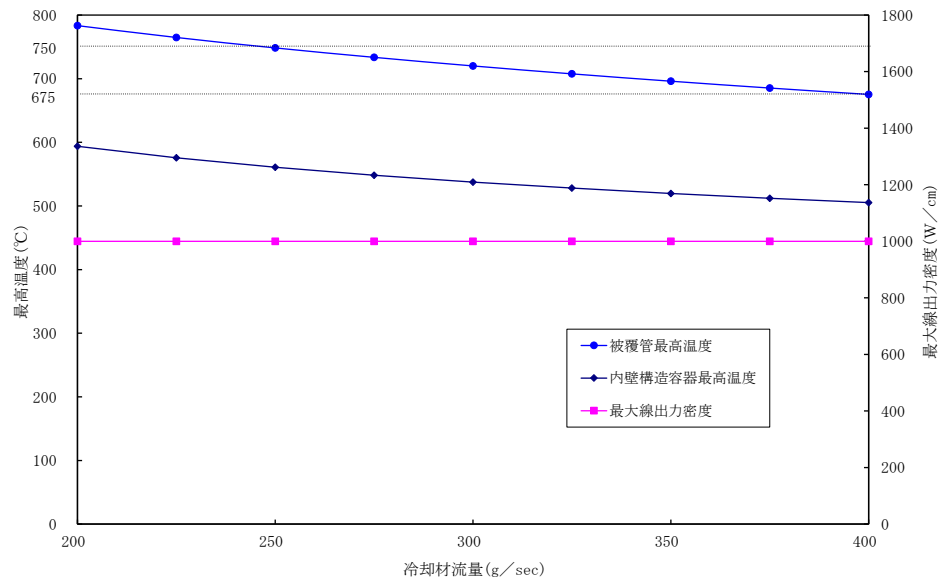


被覆管が開孔した場合の影響

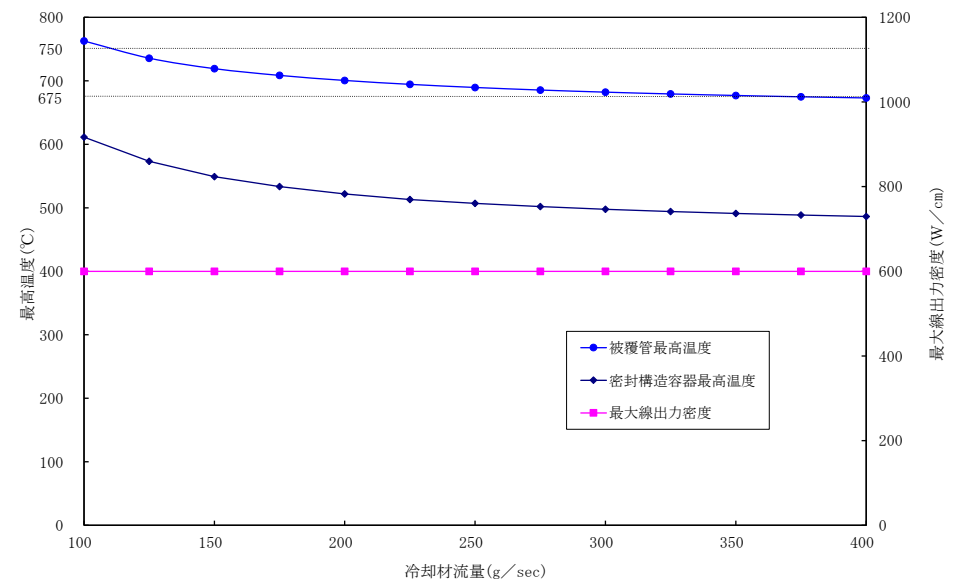
- ・ 限界照射試験用要素に蓄積されていたFPガスが冷却材中へ放出されることによりFPガスと冷却材の二相流が形成され、圧力損失が増大する影響により冷却材流量が減少
→ガス放出分の冷却材流量を減少させて評価

- ・ 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）により、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 $20\sim 30\text{W}/\text{cm}^2\text{C}$ ）

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

工学的安全係数

照射燃料集合体では、試験ごとに燃料要素の寸法、材料等の仕様が異なる。そのため、炉心燃料要素のように一律に工学的安全係数を設定することができない。

炉心燃料要素と照射燃料集合体に装填する燃料要素には以下の特徴がある。

<p>炉心燃料要素</p>	<p>熱設計はノミナル寸法で評価し、燃料製造に係る不確かさは工学的安全係数（統計項）に含む。</p>
<p>照射燃料集合体に装填する燃料要素（特殊燃料要素及び試験用要素）</p>	<p>照射燃料集合体に装填される燃料要素は、燃料ペレットの充填位置も含め管理する。 試験ごとに燃料要素の寸法公差や材料等の仕様などを定めて評価を行うため、工学的安全係数には燃料製造に係る不確かさは含まない。</p>

原子炉全体に係る項目のみを考慮することとし、以下の工学的安全係数を用いる。
照射燃料集合体の工学的安全係数：1.05

（参考 照射燃料集合体の燃料設計）

**（参考 照射燃料集合体の燃料設計
—特殊燃料要素—）**

III型特殊燃料要素の評価仕様

III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。

照射燃料集合体に装填される燃料要素は、その試験目的に合わせて個々に仕様が決まる。ここでは、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガスが最大となるよう、ペレット径を最大、初期密度最大、燃料要素有効長さ最長とし、燃焼度を許可上最大の条件で設計する。

設計仕様

項目	仕様
ペレット直径	7.5mm (中実)
初期密度	95%TD
O/M比	1.97
プルトニウム含有比	30wt%
Puフィッサイル率	72wt%
被覆管種類	SUS316相当ステンレス鋼
被覆管外径	8.5mm
被覆管肉厚	0.4mm
被覆管平均径	4.05mm
燃料要素有効長さ	550mm
ガスプレナム長さ	900mm
蒸発性不純物量	150 μ g/g
金属・酸化物比	0.88

設計条件

項目	仕様
燃料要素最高燃焼度 (軸方向平均)	130,000MWd/t
最大線出力密度(定格)	480W/cm
燃焼時間	1,060日
被覆管最高温度 (通常運転時、肉厚中心)	700°C
プレナム温度	690°C
FPガス発生率	0.27n/fission
FPガス放出率	100%
気体定数	82.06cm ³ atm/molK

III型特殊燃料要素の評価結果

III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、ガスプレ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。

被覆管応力は、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Sm値より十分小さい。

設計結果

項目	仕様	備考
燃料最高温度	約2,590℃	熱設計基準値：2,680℃
被覆管内圧	約7.2MPa (73 kg/cm ²)	
クリープ寿命分数和	0.81	制限：1.0
被覆管一次膜応力	約73N/mm ² (7.4 kg/mm ²)	Sm値：11.4 kg/mm ²

IV型特殊燃料要素の評価仕様

III型特殊燃料要素と同様、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガスが最大となるよう、ペレット径を最大、初期密度最大、燃料要素有効長さ最長とし、燃焼度を許可上最大の条件で設計する。

設計仕様

項目	仕様
ペレット直径	6.18mm (中実)
初期密度	95%TD
O/M比	1.97
プルトニウム含有比	30wt%
被覆管種類	高速炉用フェライト系ステンレス鋼
被覆管外径	7.5mm
被覆管肉厚	0.56mm
燃料要素有効長さ	550mm
ガスプレナム長さ	800mm

設計条件

項目	仕様
燃料要素最高燃焼度 (軸方向平均)	130,000MWd/t
最大線出力密度(定格)	500W/cm
燃焼時間	940日
被覆管最高温度 (通常運転時、肉厚中心)	610°C

IV型特殊燃料要素の評価結果

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、被覆管肉厚が最も薄い場合においてもガスパレナムの体積を十分大きくとることで、最高燃焼度の被覆管の内圧によるクリープ寿命分数和を1.0未満にできる。

このときの被覆管応力は、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Sm値より十分小さい。

設計結果

項目	仕様	備考
燃料最高温度	約2,630℃	熱設計基準値：2,680℃
被覆管内圧	約7.4MPa (75kg/cm ²)	
クリープ寿命分数和	0.01	制限：1.0
被覆管一次膜応力	約69N/mm ² (7.0kg/mm ²)	Sm値：14.2kg/mm ²

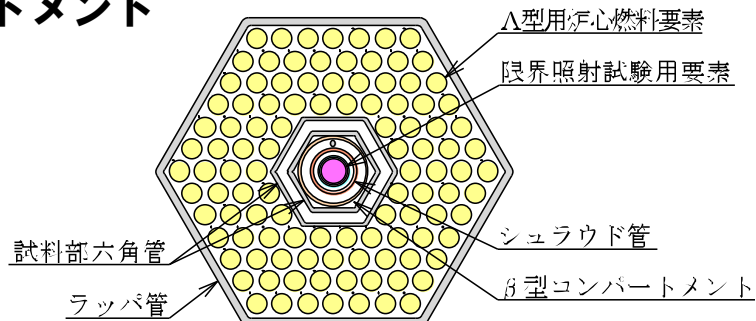
**（参考 照射燃料集合体の燃料設計
—限界照射試験用要素—）**

限界照射試験の概要

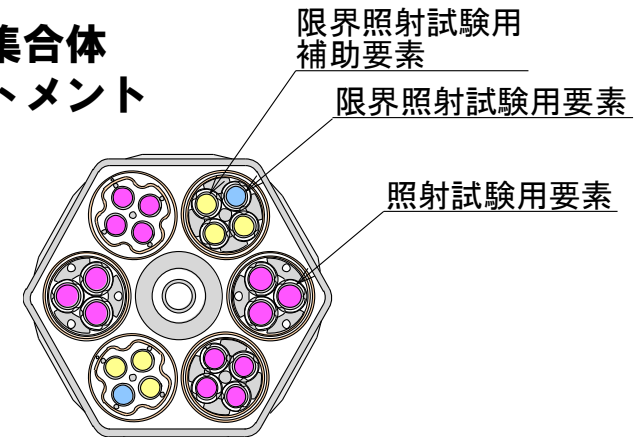
限界照射試験では、燃料の設計限界を見極めるため、被覆管がクリープ破損により開孔するまで照射を継続する。RTCB (Run-to-Cladding Breach) 試験。

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



限界照射試験用要素の制限の考え方

- 通常運転時に計画された範囲内で試験用要素の健全性を喪失させる試験を行っても、運転時の異常な過渡変化時において、試験用要素が、あらかじめ定めた制限を超えない設計とする。
- 試験用要素の健全性の喪失により原子炉の健全性を損なわない（「許容設計限界」を超えない）設計とする。
- 試験用要素の健全性を喪失させても、他の燃料要素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、原子炉の停止及び炉心の冷却に影響を与えない設計とする。
- 被覆材の破損による1次冷却系中への核分裂生成物等の放射性物質の放出量を、試験用要素の破損範囲を限定することで制限する設計とする。



燃料要素	考え方
III型及びIV型限界照射試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> • 被覆管の開孔に係る設計では、クリープ破損による開孔は発生する（クリープ寿命分数和が1.0を超えるよう設計する）が、被覆管の破断は発生しない（設計許容応力を下回るように設計する）ことを確認する。 • 炉心の冷却を阻害する物のコンパートメント外への放出が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

**（参考 照射燃料集合体の燃料設計
— 先行試験用要素 / 基礎試験用要素 —）**

先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計例（1/4）

【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
燃料材種類	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
ペレット外径/内径 [mm]	7.32 / 1.8	6.44	7.32 / 1.8
燃料-被覆管直径 ギャップ [mm]	0.18	0.16	0.18
初期理論密度 [%TD]	95	95	95
O/M比	1.97	1.97	1.97
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
プレナム長さ [mm]	980	865	680
最大線出力密度 [W/cm]	450	640	450
燃焼時間 [日]	2,280	—	1,140
被覆管最高温度 [°C]	700	650	700

許可の範囲内で製作する燃料要素の仕様・条件を設定

【応力及びクリープ寿命 分数和の計算例】

- ・ 先行試験用要素（溶融なし）の例。
- ・ 設計仕様・設計条件のもとで、照射初期から燃焼速度一定として計算する。
- ・ 被覆管肉厚は、Naによる外面腐食、FPによる内面腐食を考慮する。

項目	値
燃料要素内ガスモル量	$4.9 \times 10^{-2} \text{mol}$ （使用末期）
初期ガスモル量	$1.5 \times 10^{-3} \text{mol}$
蒸発性不純物ガスモル量	$1.8 \times 10^{-3} \text{mol}$
プレナム体積	上部： 29g/cm^3 下部： 7.5g/cm^3
被覆管内圧	92kgf/cm^2 （使用末期）
被覆管肉厚	（次ページに記載）
被覆管一次膜応力	14.1kgf/mm^2 （使用末期）
計算時間 (Δt)	720h（76ステップ (n ））
クリープ破断時間評価式	（表の下に記載）
評価応力に考慮する安全係数	0.8

クリープ破断時間の評価には、ラーソン・ミラー・パラメータで整理した以下の式を用いる。

$$LMP = 27.121 - 3.898 \log \sigma_r \quad (\sigma_r < 10.5 \text{kgf/mm}^2)$$

$$= 42.208 - 45.286 \log \sigma_r + 37.655 (\log \sigma_r)^2 - 11.353 (\log \sigma_r)^3 \quad (\sigma_r \geq 10.5 \text{kgf/mm}^2)$$

$$LMP = T(18.91 + \log 3t_r) \times 10^{-3}$$

σ : 応力
 LMP : ラーソン・ミラー・パラメータ
 t_r : 破断時間
 T : 温度

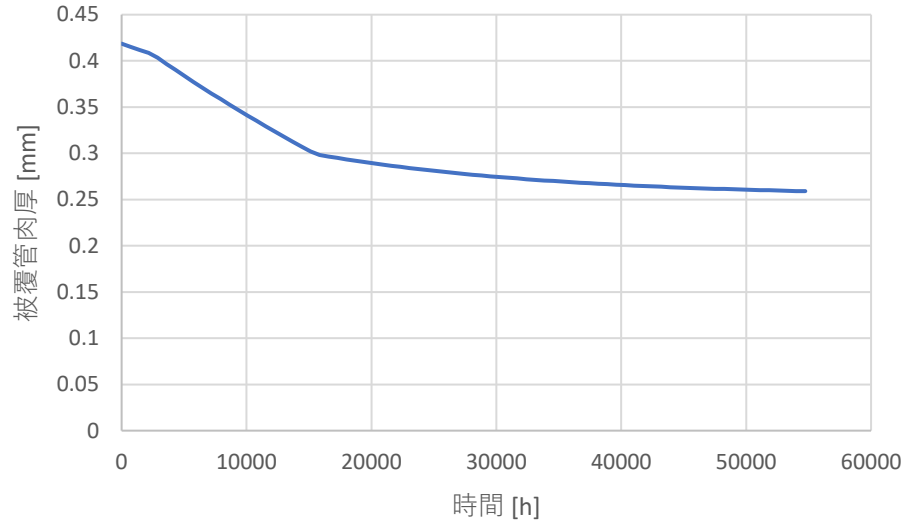
クリープ寿命分数和

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta t_i}{t_{ri}} \right) \leq 1.0 \quad (\text{制限値})$$

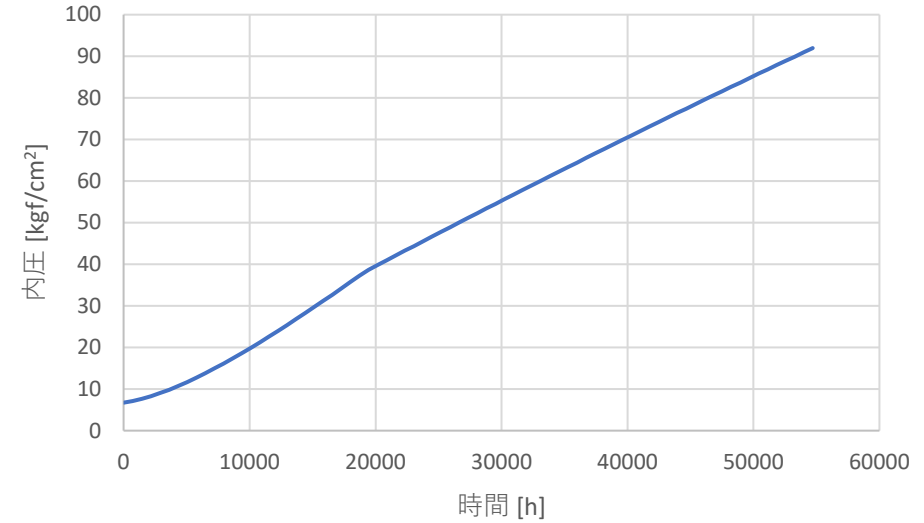
i : 負荷サイクル数
 Δt_i : 全寿命のうち、平均温度 T_i において一次一般膜応力強さが $(\sigma_r)_i$ である負荷サイクル i の累積持続時間
 t_{ri} : 温度 T_i 、応力強さ $(\sigma_r)_i$ に対する許容時間

先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計例（3/4）

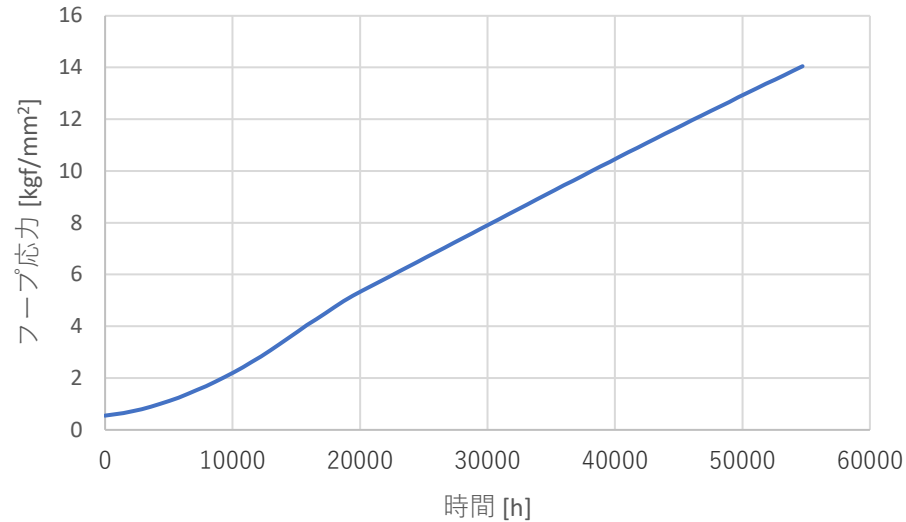
被覆管肉厚



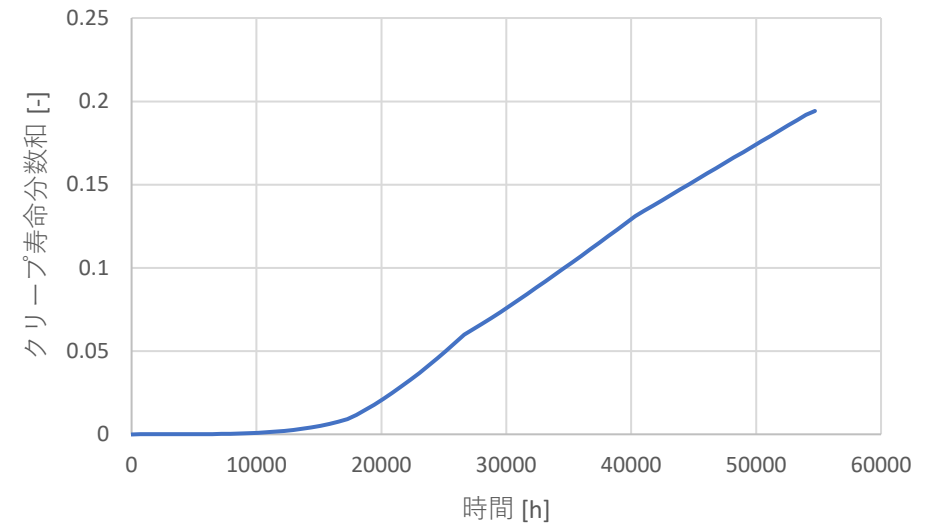
被覆管内圧



被覆管応力



クリープ寿命分数和



先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計例（4/4）

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℃	約30%	約2,510℃
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	約6.8N/mm ²	約113.0N/mm ²

制限

	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)	熱設計基準値：2,680℃	熱設計基準値：約30%	熱設計基準値：2,680℃
クリープ寿命分数和	1	—	1
被覆管一次膜応力	Sm：153.5N/mm ²	Sm：228.4N/mm ²	Sm：118.3N/mm ²

先行試験用要素の燃料仕様検討例 (1/3)

以下の先行試験用要素、基礎試験用要素の仕様を満たす燃料ペレットに対して、要素の機械設計の成立／不成立例を示す。

【燃料材仕様例】

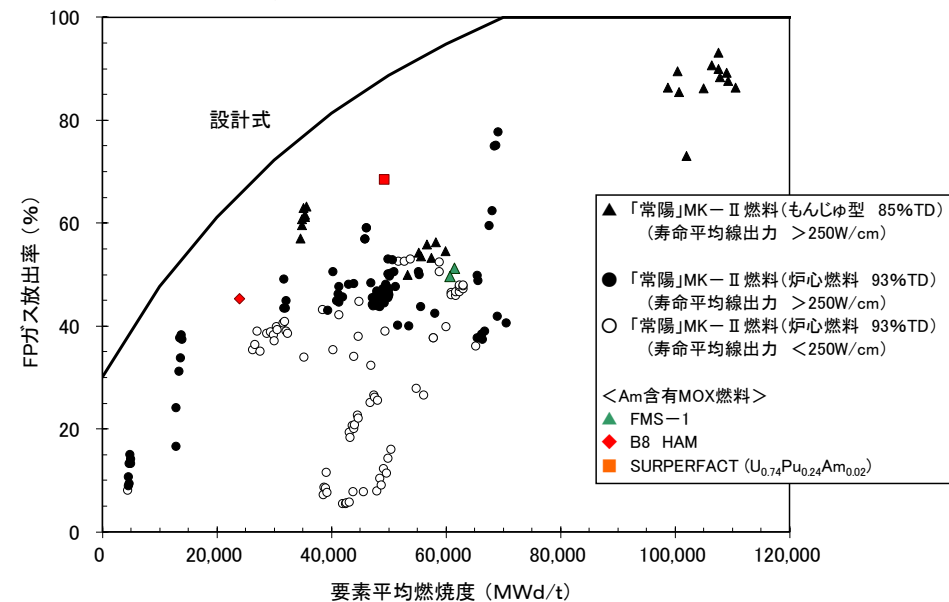
項目	値
燃料材種類	PuU混合酸化物燃料
Pu含有率 [wt%]	30
ペレット外径 [mm]	7.32
初期理論密度 [%TD]	95
ペレット密度 [g/cm ³]	10.50
O/M比	1.97
蒸発性不純物量 [μL/g]	150
水分 [ppm]	30

【照射条件】

最大燃焼度 [MWd/t]	200,000
照射日数 [日]	2280 (54720h、38cy)

【計算条件】

・FPガス放出率

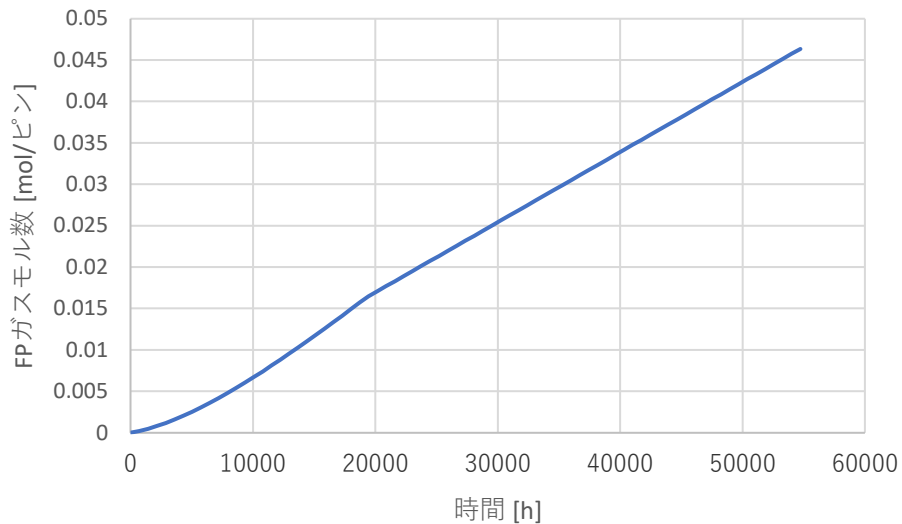


先行試験用要素の燃料仕様検討例 (2/3)

前ページの条件のもとで内圧を検討する。

【要素内ガス量】

・FPガス発生量



・蒸発性不純物モル量

0.00184mol/ピン

・初期封入ガス量

1気圧

【燃料要素の内圧】

		プレナム ケース①	プレナム ケース②
プレナム体積 [cm ³]		30	40
プレナム温度 [°C]		675	
使用 初期	ガスモル数 [mol/ピン]	0.00309	0.00351
	内圧 [kgf/cm ²]	8.28	7.05
使用 末期	ガスモル数 [mol/ピン]	0.0495	0.0499
	内圧 [kgf/cm ²]	133	101

先行試験用要素の燃料仕様検討例 (3/3)

前ページのケースに対して被覆管仕様を検討する。

【被覆管応力（使用末期）】

	被覆管 肉厚 [mm]	1次膜応力 [N/mm ²]	
		プレナム ケース①	プレナム ケース②
被覆管 ケース (1)	0.3	167.6	126.5
被覆管 ケース (2)	0.45	113.9	86.0

【設計許容応力】

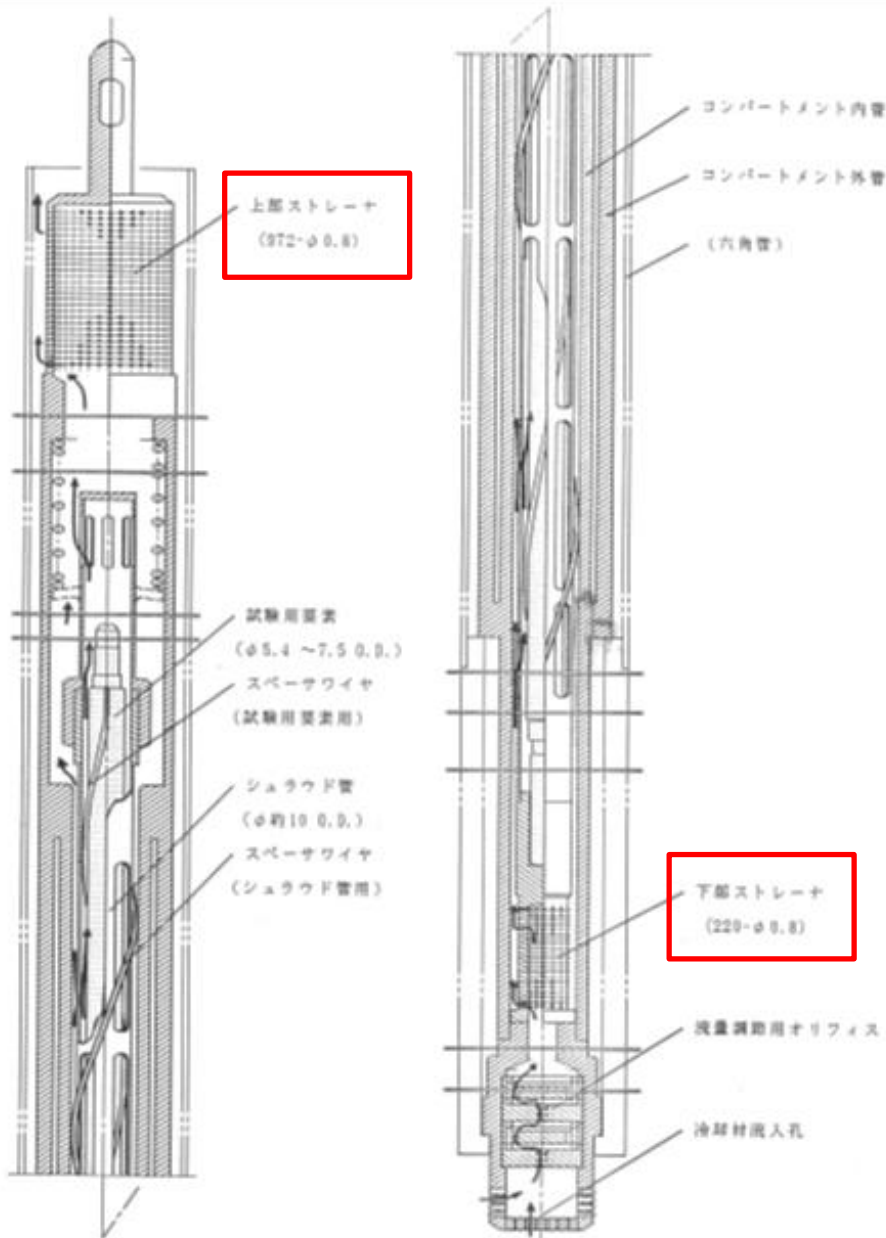
被覆材種類	Sm [N/mm ²]
SUS316相当ステンレ ス鋼 (PNC316)	112.6
高Niオーステナイト 系ステンレス鋼 (A) (PNC1520)	126.8

【内圧に対する成立性】

被覆材種類、 肉厚 [mm]	プレナム ケース①	プレナム ケース②
PNC316、0.3	×	×
PNC316、0.45	×	○
PNC1520、0.3	×	○
PNC1520、0.45	×	○

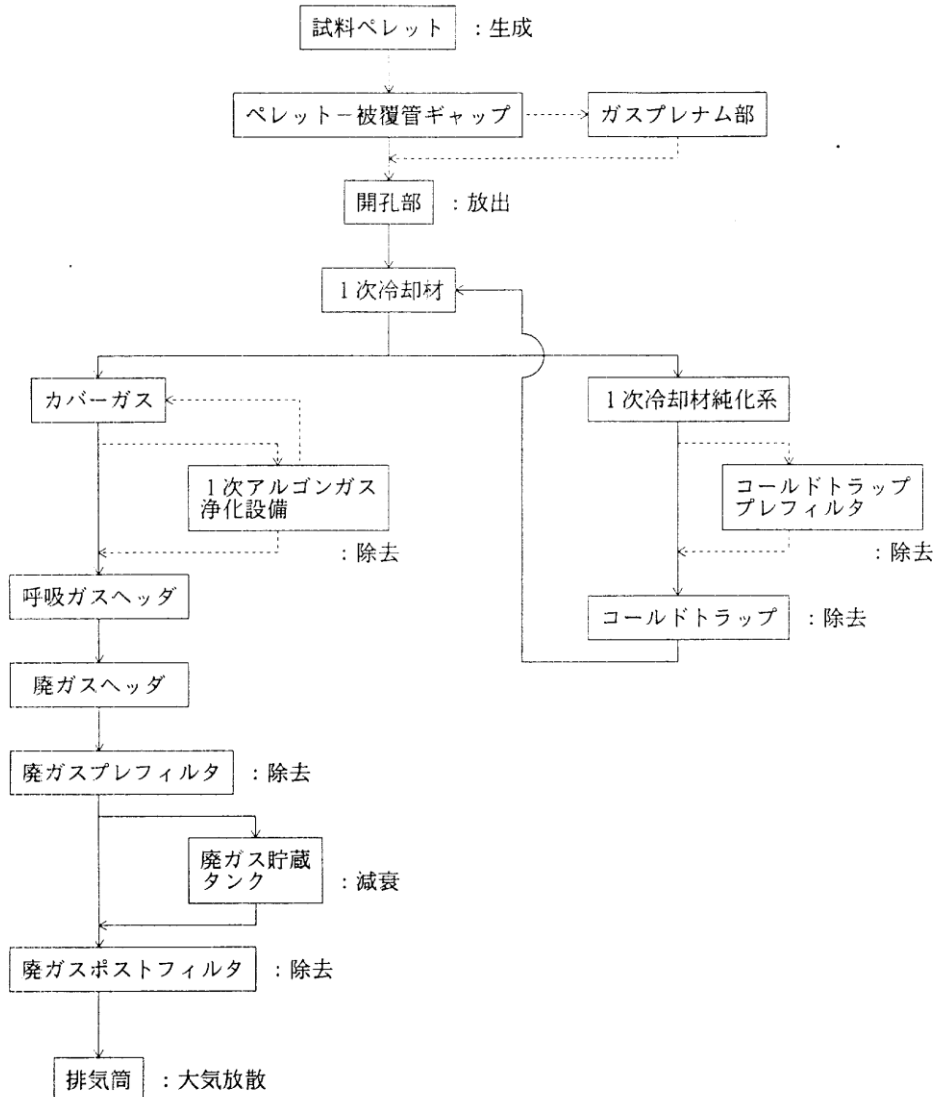
- ・仕様範囲の中でもペレット径、被覆管肉厚などの組合せによっては設計は成立しない。
- ・プレナム体積、被覆管肉厚などを適切に設定することで設計を成立させることができる。
- ・設置変更許可申請書には、定めた仕様範囲のなかで設計の成立例を示し（次ページ以降）、実際に製作する要素については設工認申請書で評価を実施する。

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (1/3)



- 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ワイヤスペーサ径 ($\Phi 0.9$) 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（2/3）



- ・ 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

限界照射試験の被覆管開孔時の放出物に対する処置 (3/3)

解析条件

	III型要素	IV型要素
直径 (mm)	0.66	0.618
スタック長 (mm)	500	500
初期密度 (%TD)	95	95
最大線出力 (W/cm)	480	500
軸方向ピーキング係数	1.17	1.17
最高燃焼度 (MWD/t)	150,000 (A型) 200,000 (B型)	150,000 (A型) 200,000 (B型)

放出量が最大となる最大寸法・最大線出力密度・最高燃焼度の条件で評価。
主排気筒からの放出量が大きくなるようIV型要素を代表に最大年間放出量を算出。

年間放出量は、
A型 (1要素×4試験) 及び
B型 (6要素×1試験)
の合算値より、
希ガス 8.3×10^{12} Bq、
よう素 1.0×10^7 Bq

A型：A型照射燃料集合体
B型：B型照射燃料集合体
III型要素：III型限界照射試験用要素
IV型要素：IV型限界照射試験用要素

解析結果 (主排気筒からの放出量)

		A型		B型	
		III型要素	IV型要素	III型要素	IV型要素
1要素あたりの放出量	希ガス (Bq)	7.9×10^{11}	7.9×10^{11}	8.6×10^{11}	8.5×10^{11}
	よう素 (Bq)	9.7×10^5	1.0×10^6	9.7×10^5	1.0×10^6
年間放出量	希ガス (Bq)	3.2×10^{12}	3.2×10^{12}	5.2×10^{12}	5.1×10^{12}
	よう素 (Bq)	3.9×10^6	4.1×10^6	5.8×10^6	6.1×10^6

（照射燃料集合体の通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、設計基準事故時の考え方）

照射燃料集合体の過渡及び事故時の安全確保の考え方

		通常運転時及び 運転時の異常な過渡変化時	設計基準事故時
(参考) 炉心燃料要素		・燃料要素の健全性を確保するように設計する。	・燃料要素が破損しないことで原子炉の安全性を確保する。
照射 燃料 集合体	特殊燃料要素	(炉心燃料要素と同じ)	(炉心燃料要素と同じ)
	限界照射試験用要素	・計画的な開孔以外に燃料要素が破損しないように設計する。 ・燃料要素を計画的に開孔した場合でも、他への影響がないようにコンパートメントを設計する。	・被覆管の開孔を検知した時点で原子炉を停止する。 ・他集合体への影響がないようにコンパートメントを設計することで原子炉の安全性を確保する。
	先行試験用要素	・燃料を熔融させる(健全性の喪失)こともあるが、燃料要素が破損しないように設計する。	・内壁構造容器の健全性を確保するように設計する。 ・健全性を喪失させた状態で、万一、燃料要素が破損した場合でも、他集合体への影響がないように内壁構造容器を設計することで原子炉の安全性を確保する。
	基礎試験用要素	・計画的な開孔以外に燃料要素が破損しないように設計する。 ・燃料要素を計画的に開孔した場合でも、他への影響がないように密封構造容器を設計する。	・密封構造容器の健全性を確保するように設計する。 ・健全性を喪失させた状態で、燃料要素が破損した場合でも、他集合体への影響がないように密封構造容器を設計することで原子炉の安全性を確保する。

反応度挿入事象 (TOP型)、冷却機能喪失事象 (LOF型) にわけて次ページ以降に整理する。

反応度挿入事象（TOP型）

過出力係数を考慮して、燃料温度評価を実施。過出力時においても熱設計基準値を超えないことを確認する。

	燃料最高温度 (溶融割合)	熱設計基準値 (燃料最高温度、 最大溶融割合)	被覆管 最高温度	熱設計基準値 (被覆管最高温 度)
III型特殊燃料要素 (燃料初期温度2540℃、オーステナイト系被覆管初期温度700℃)	約2,590℃	2,680℃	約730℃	890℃
IV型特殊燃料要素 (燃料初期温度2540℃、フェライト系被覆管初期温度610℃)	約2,630℃	2,680℃	約640℃	810℃
III型限界照射試験用要素 (燃料初期温度2540℃、オーステナイト系被覆管初期温度700℃)	約2,560℃	2,680℃	約730℃	890℃
IV型限界照射試験用要素 (燃料初期温度2540℃、フェライト系被覆管初期温度610℃)	約2,630℃	2,680℃	約640℃	810℃
先行試験用要素（溶融あり）（燃料初期溶融割合20%、オーステナイト系被覆管初期温度650℃）	約30%	30%	約680℃	急速加熱による 破断温度以下 (890℃)
先行試験用要素（溶融なし）、基礎試験用要素（燃料初期温度2540℃、オーステナイト系被覆管初期温度700℃）	約2,510℃	2,680℃	約730℃	急速加熱による 破断温度以下 (890℃)

冷却機能喪失事象（LOF型）（1/2）

冷却機能喪失事象を以下の2つにわけて整理する。

①冷却材流量低下事象

②局所閉塞事象

■冷却材流量低下事象

冷却材流量低下事象で、被覆管温度上昇への影響が大きい事象として

・ 1次冷却系主循環ポンプ軸固着事故

を対象として各事象の温度を評価し、制限（熱設計基準値）を超えないことを確認。

	1次冷却系主循環ポンプ 軸固着事故	熱設計基準値
III型特殊燃料要素 （オーステナイト系、初期温度700℃）	約830℃	約890℃
IV型特殊燃料要素 （フェライト系、初期温度610℃）	約720℃	約810℃
密封構造容器 （オーステナイト系、初期温度675℃）	約800℃	約890℃

冷却機能喪失事象（LOF型）（2/2）

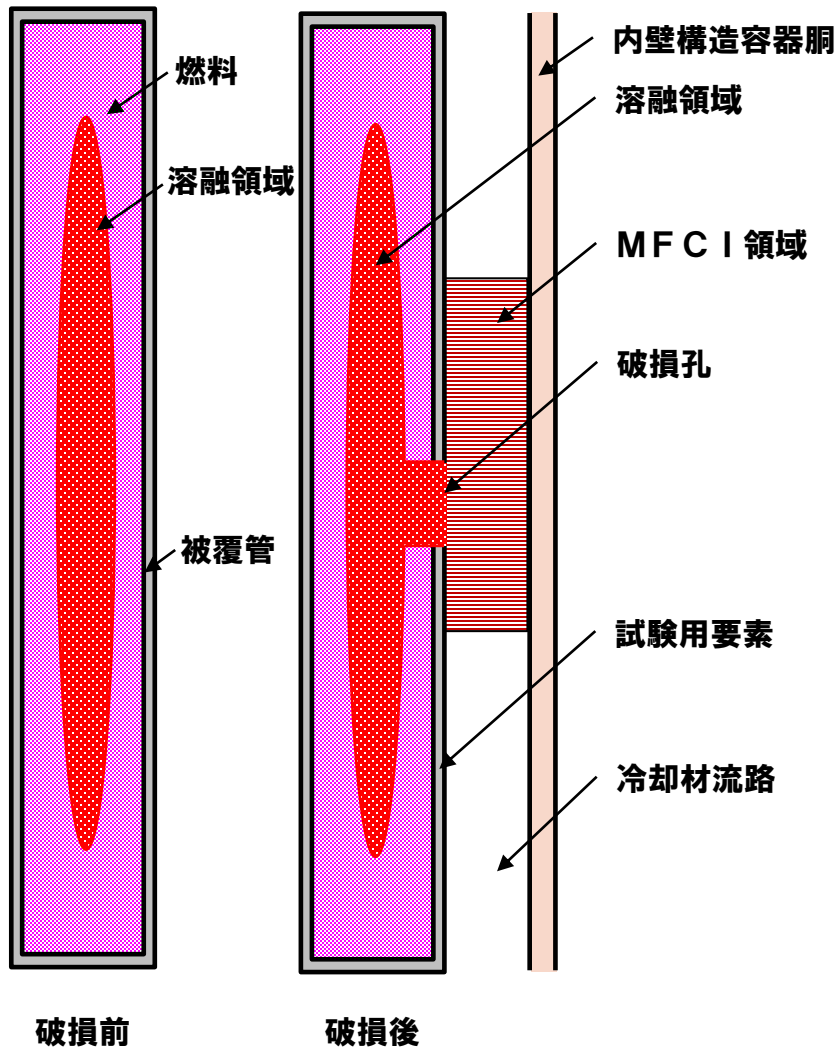
■局所閉塞事象

局所閉塞事象に対しては、照射燃料集合体の構造によって閉塞挙動が異なるため、集合体ごとに整理する。

	概要
A型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・ A型照射燃料集合体は、試料部の周囲に炉心燃料要素と同一のA型用炉心燃料要素を配置したもの。中心部以外は炉心燃料集合体と同様。 ・ 中心部については、バンドル型はC型照射燃料集合体と、コンパートメント型はB、D型照射燃料集合体と同様。
B型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・ B型照射燃料集合体はコンパートメントを配した構造。コンパートメントまでの流路に下部ストレーナがある。コンパートメント流入管の孔径は下部ストレーナ孔径より大きく、コンパートメント入口で閉塞することはない。
C型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・ C型照射燃料集合体は、特殊燃料要素をバンドル状に配置した構造であり、寸法以外は炉心燃料集合体と同様。 ・ 炉心燃料集合体と同様、エントランスノズルを通過した場合は、ワイヤ巻き付け開始位置にポーラス状に閉塞する。 ・ 燃料要素寸法や配列ピッチは個々に設工認において確認。
D型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> ・ D型照射燃料集合体はコンパートメント型で、B型と類似した構造であり、B型と同様。

内壁構造容器の健全性評価（1/3）

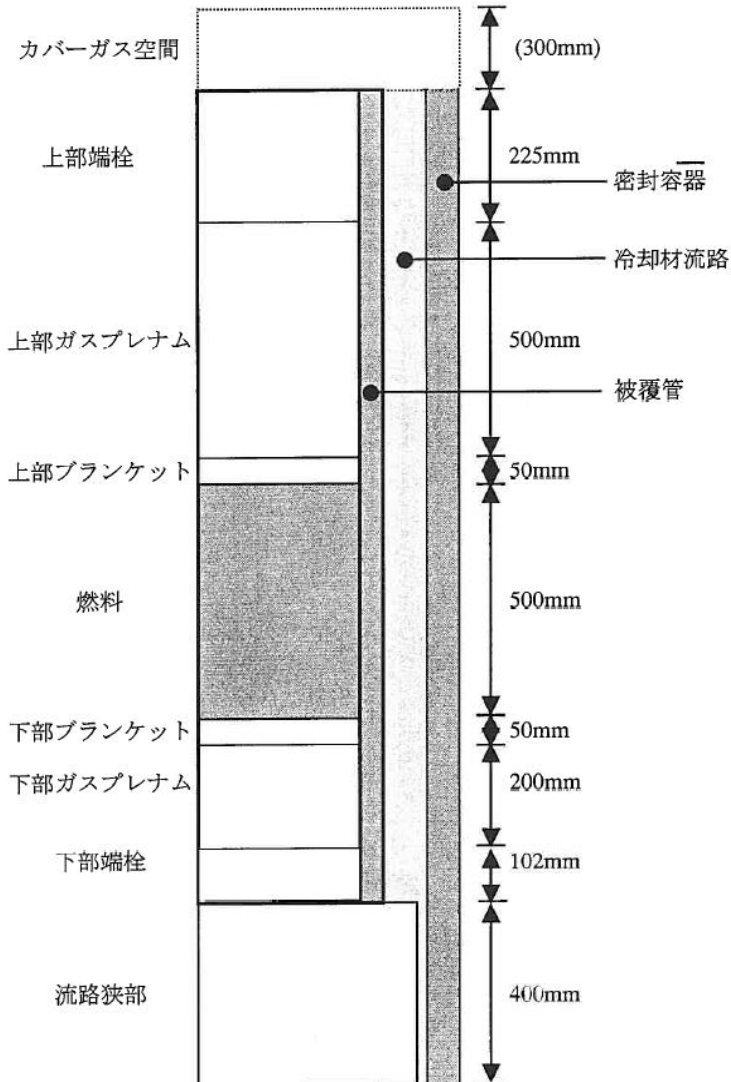
被覆管が破損しても、内壁構造容器が健全であることを確認する



- ・ 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: MFCI）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。

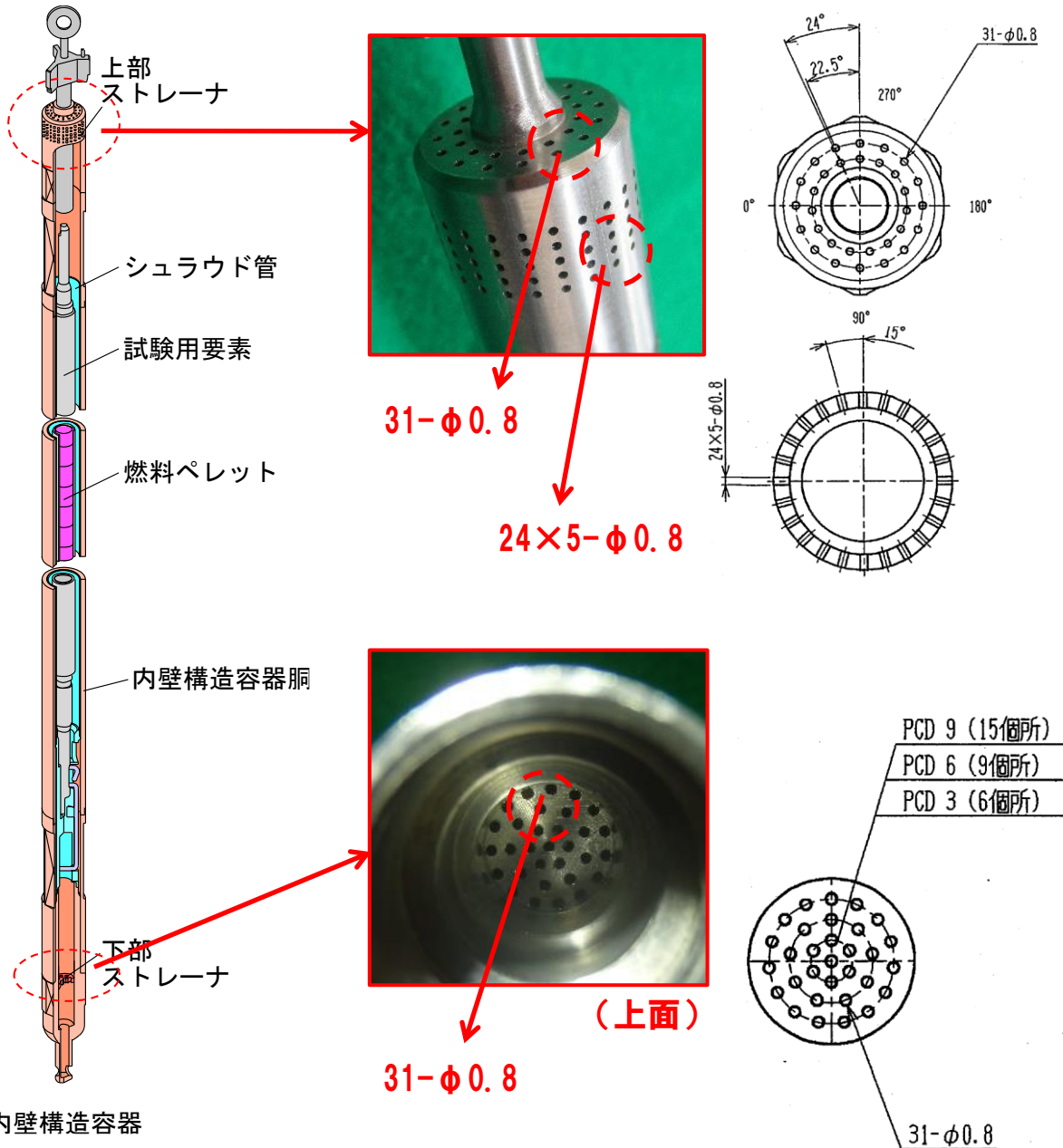
評価結果

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ワイヤスペーサ径 ($\Phi 0.9$) 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。



事故と相まって健全性を喪失した場合 の密封構造容器の健全性

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、事故時の密封構造容器の健全性は確保される。

No. 263

・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原子炉の停止機能及び炉心の冷却機能を損なわないことについて、局所閉塞事象も含めて説明すること。

- ・照射燃料集合体に装填する燃料要素のうち特殊燃料要素（Ⅲ型、Ⅳ型）については、炉心燃料要素と同様に、設計基準事故時においては燃料要素が破損しないことで原子炉の安全性を確保する。
- ・照射燃料集合体に装填する燃料要素のうち限界照射試験用要素（Ⅲ型、Ⅳ型）については、計画的にその健全性を喪失させることがあるが、設計基準事故時においても計画的な開孔以外に燃料要素が破損しないこと、及び他集合体への影響がないようにコンパートメントを設計することで原子炉の安全性を確保する。
- ・先行試験用要素及び基礎試験用要素では、設計基準事故時に内壁構造容器及び密封構造容器の健全性が確保されること、及び他への影響がないように内壁構造容器及び密封構造容器を設計することで原子炉の安全性を確保する。

No. 264

- **燃料の最大溶融割合の定義を明確にするとともに、30%で制限する根拠について技術資料中に説明を加えること。また、燃料溶融割合の運転段階での管理方法についても説明すること。**

- **燃料を溶融させるのは「先行試験用要素（酸化物燃料）」で、計画的に燃料を溶融させる場合、熱設計基準値及び熱的制限値を「燃料の最大溶融割合」で定める。**
- **燃料の溶融割合は、径方向の断面積割合で定義する。溶融割合の軸方向最大を最大溶融割合とする。**
- **照射燃料集合体の熱設計基準値は、被覆管の溶融破損防止の観点から燃料最高温度に係る熱設計基準値を定めている。**
- **燃料の最大溶融割合も同様に被覆管の溶融破損防止の観点から設定。**
- **熱的制限値は、運転時の異常な過渡変化時に熱設計基準値を超えない通常運転時の制限として設定している。**
- **保安規定には、運転計画書の確認事項として燃料集合体の熱的制限値を確認することを明確に記載する。**

No. 265

- ・年間試験回数の制限の考え方について説明すること。

- ・限界照射試験では計画的に被覆管を開孔させるため、1次冷却材中へ放射性物質が放出され、揮発性FPは排気筒から大気放散される。許可基準規則により放射性物質の漏えい量を抑制するため、年間の試験回数を制限する。

No. 267

- ・設置変更許可段階で仕様の幅が広い先行試験用要素に対して代表性を有する値を設定できるのか。振動充填燃料などデータの少ない燃料についてもどういった基準で熱的制限値を定めるのか説明すること。

- ・先行試験では照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料の照射試験を実施し、基礎試験では照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料の照射試験を実施する。
- ・酸化物以外にも、炭化物、窒化物、金属を使用。それぞれの材料の融点に対応した熱設計基準値を設定する。
- ・先行試験用要素では、燃料を「ペレット」に限定していない。振動充填燃料も想定。熱伝導度や被覆管からの熱伝達率の物性の違いを考慮した熱設計を実施する。熱設計基準値はペレット同様、形状に依らず融点に対応した値を設定する。

No. 300

- ・ 個別の試験用燃料要素の説明において、設置変更許可段階での制限値を逸脱する具体的な組み合わせを説明し、設置変更許可段階での制限の範囲が妥当であることを説明すること。

- ・ 先行試験用要素及び基礎試験用要素について、いくつかの具体的な組み合わせ例に対する評価結果を説明する。

→ 「先行試験用要素及び基礎試験用要素の仕様の考え方及び評価例」に評価例を記載。

No. 301

- ・ 設置変更許可段階で制限することが可能な範囲について再度検討すること。

- ・ 先行試験用要素の仕様及び基礎試験用要素の仕様は、炉心燃料要素の仕様で制限している項目と同様に制限することが基本であるが、試験目的を踏まえ、炉心燃料要素とは異なる範囲で設定している。項目ひとつひとつについて制限の考え方を説明する。

→ 先行試験用要素及び基礎試験用要素の仕様における制限について、「先行試験用要素及び基礎試験用要素の仕様の考え方及び評価例」で説明する。