



**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12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

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

 : 本日まで提示

# 1. 照射燃料集合体の概要

# 「常陽」における燃料照射試験

「常陽」の照射試験には、主に以下の燃料要素を使用する。

## ■特殊燃料要素

- ・ 開発中の燃料の設計寿命内模擬照射、バンドル挙動の検証等を目的とした確性試験に使用
- ・ 照射試験及び照射後試験結果を当該燃料の許可、設工認（寿命延長、信頼性向上）に反映

## ■試験用要素

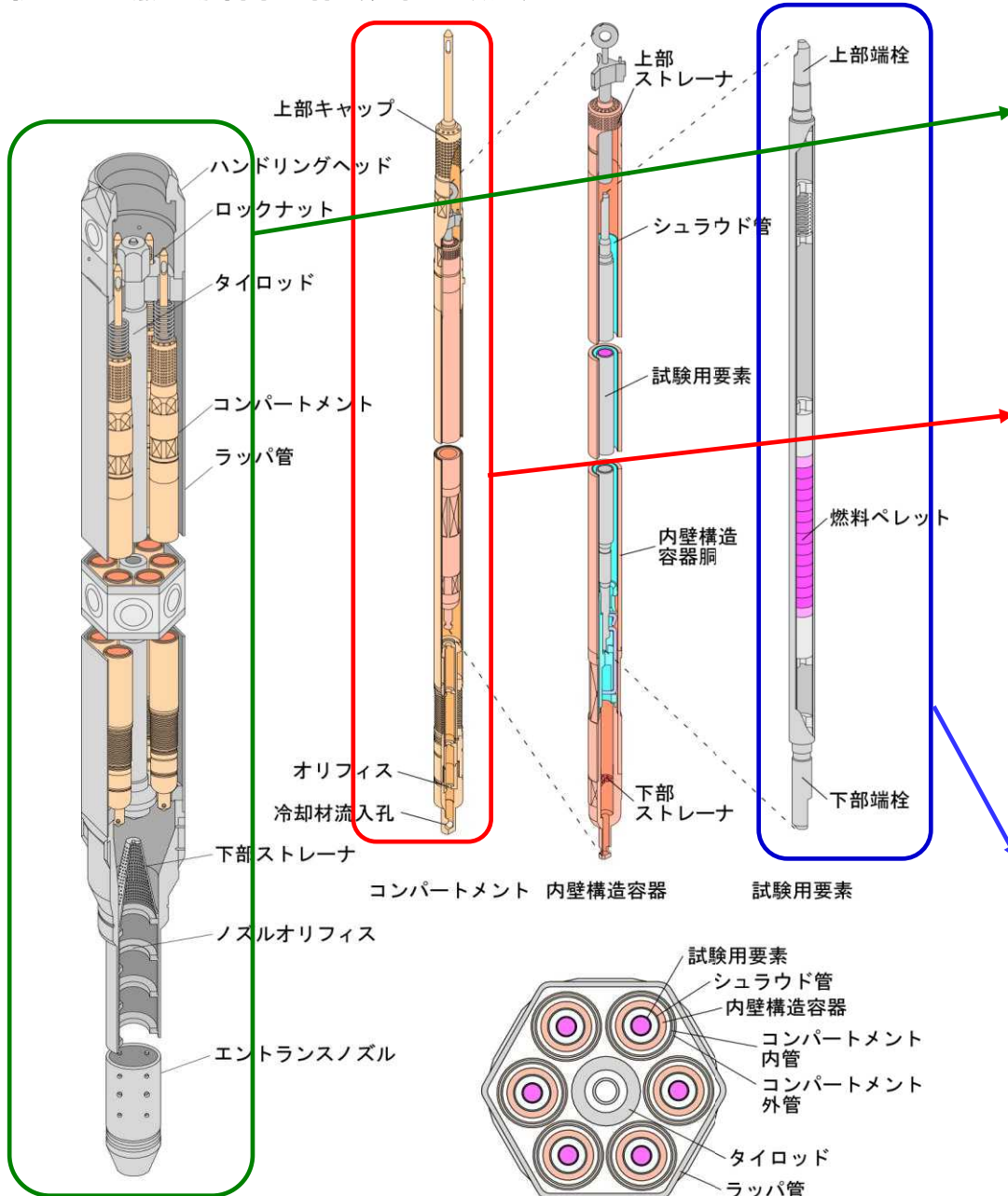
- ・ 燃料要素（ペレット、被覆管）の仕様、照射条件、燃焼度等をパラメータとした照射挙動確認等の基礎的な試験に使用
- ・ 設計限界見極めのためのPTM試験\*1、RTCB試験\*2等を使用

\*1 PTM試験： 燃料溶融限界線出力試験（Power-to-Melt）。燃料溶融面積を測定し、燃料温度評価精度を確認。

\*2 RTCB試験： 照射中に計画的に燃料破損を生じさせ、燃料破損検出系により破損時刻を検出することで、設計限界を確認する試験（Run-to-Cladding Breach）

# 「常陽」の照射燃料集合体の基本的な構成

例：B型照射燃料集合体（先行試験用）



## 集合体

- 試験目的に応じ、A型～D型照射燃料集合体に特殊燃料要素、試験用要素を装填

## コンパートメント

- A型（コンパートメントを使用しない場合あり）、B型、D型照射燃料集合体において、特殊燃料要素、試験用要素に応じた冷却材流量を設定するために使用。
- 構造に応じてα型～δ型に分類

## 燃料要素

- 特殊燃料要素（Ⅲ型、Ⅳ型）、試験用要素（先行試験用要素、基礎試験用要素、限界照射試験用要素）
- ほかに、照射試験を補助するためのA型用炉心燃料要素、限界照射試験用補助要素がある。

# 照射燃料集合体の種類と目的（1/3）

## 【燃料要素】

燃料要素	目的
I型特殊燃料要素	「常陽」炉心燃料要素仕様の燃料の試験用 <u>※炉心燃料要素仕様での今後の照射試験計画がないため許可から削除する</u>
II型特殊燃料要素	「もんじゅ」炉心燃料要素仕様の燃料の試験用 <u>※「もんじゅ」廃止措置により今後の照射試験計画がないため許可から削除する</u>
III型特殊燃料要素	大型炉想定燃料仕様（太径）の燃料の試験用
IV型特殊燃料要素	開発材料（フェライト系ステンレス鋼）被覆管燃料の試験用
I型限界照射試験用要素	I型特殊燃料要素仕様の限界照射（RTCB）試験用 <u>※I型特殊燃料要素と同じ理由で許可から削除する</u>
II型限界照射試験用要素	II型特殊燃料要素仕様の限界照射（RTCB）試験用 <u>※II型特殊燃料要素と同じ理由で許可から削除する</u>
III型限界照射試験用要素	III型特殊燃料要素仕様の限界照射（RTCB）試験用
IV型限界照射試験用要素	IV型特殊燃料要素仕様の限界照射（RTCB）試験用

# 照射燃料集合体の種類と目的（2/3）

## 【燃料要素（続き）】

燃料要素	目的
炭化物試験用要素	炭化物燃料の試験用 ※今後の炭化物燃料の照射試験と仕様が異なるため許可から削除する
窒化物試験用要素	窒化物燃料の試験用 ※今後の窒化物燃料の照射試験と仕様が異なるため許可から削除する
高線出力試験用要素	燃料熔融限界線出力（PTM）試験用 ※今後のPTM試験と仕様が異なるため許可から削除する
FFDL試験用要素 （スリット付／スリットなし）	破損燃料集合体検出装置（FFDL）の性能確認試験用 ※今後のFFDL試験計画がないため許可から削除する
先行試験用要素	照射実績の少ない材料を燃料材に用いた燃料の試験用
基礎試験用要素	照射実績の少ない材料を被覆材に用いた燃料の試験用
A型用炉心燃料要素 （内側／外側）	A型照射燃料集合体の照射試験時に、特殊燃料要素とともに集合体に装填する炉心燃料要素
限界照射試験用補助要素	限界照射試験実施時に限界照射試験用要素とともにコンパートメントに装填する燃料

今後の照射試験計画等を踏まえ、I型特殊燃料要素、II型特殊燃料要素、I型限界照射試験用要素、II型限界照射試験用要素、炭化物試験用要素、窒化物試験用要素、高線出力試験用要素、FFDL試験用要素（スリット付／スリットなし）を削減

# 照射燃料集合体の種類と目的（3/3）

## 【燃料集合体】 既許可から種類の変更なし

燃料集合体	目的
A型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 主に、特殊燃料要素を用いた確性試験用</li> <li>・ 特殊燃料要素に相応する仕様の限界照射試験にも使用可能</li> <li>・ コンパートメント*1も使用できる構造</li> <li>・ 高中性子束環境下での試験用</li> </ul>
B型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 6本のコンパートメント*1を用いたパラメトリックな試験用</li> <li>・ コンパートメント構造のため、相乗り・継続照射が可能</li> <li>・ 主に限界照射試験用、先行試験用、基礎試験用に使用 （基礎的な試験用）</li> </ul>
C型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ バンドル照射用（確性試験用）</li> <li>・ 計測線付き集合体は照射温度のオンライン測定にも対応可能</li> </ul>
D型照射燃料集合体	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 最大18本のコンパートメント*1を用いたパラメトリックな試験用</li> <li>・ コンパートメント構造のため、相乗り・継続照射が可能</li> </ul> <p>※ B型（最大6パラメータ）よりも多数（最大18パラメータ）でのパラメトリックな試験が可能。</p>

\*1 コンパートメント： 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断熱構造の二重の円筒管（ $\alpha$ 型コンパートメント（A型用）においては、外管に六角管を使用する場合あり）。コンパートメント毎に温度設定が可能。



# 照射燃料集合体に装填する燃料要素の主な仕様（1/2）

種類	装填可能な照射燃料集合体	燃料仕様
III型特殊燃料要素	A、B、C、D	燃料材 : プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット 燃料ペレット外径 : 5.3~7.5mm / 燃料ペレット内径 (中空) : 約2mm 最高燃焼度 : 130,000MWd/t Pu含有率 : 32wt%以下、Pu同位体組成比 : 原子炉級、U濃縮度 : 26wt%以下 被覆管材料 : オーステナイト系ステンレス鋼
IV型特殊燃料要素	A、B、C、D	燃料材 : プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット 燃料ペレット外径 : 5.18~6.18mm / 燃料ペレット内径 (中空) : 約2mm 最高燃焼度 : 130,000MWd/t Pu含有率32wt%以下、Pu同位体組成比 : 原子炉級、U濃縮度 : 24wt%以下 被覆管材料 : 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	A*1、B、D	燃料材 : プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット 燃料ペレット外径 : 5.3~6.6mm 最高燃焼度 : 200,000MWd/t*2 Pu含有率 : 32wt%以下、Pu同位体組成比 : 原子炉級、U濃縮度 : 26wt%以下 被覆管材料 : 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	A*1、B、D	燃料材 : プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット 燃料ペレット外径 : 5.18~6.18mm 最高燃焼度 : 200,000MWd/t*2 Pu含有率32wt%以下、Pu同位体組成比 : 原子炉級、U濃縮度 : 24wt%以下 被覆管材料 : 高速炉用フェライト系ステンレス鋼

\*1 : コンパートメント型を使用。

\*2 : B型又はD型照射燃料集合体装填時

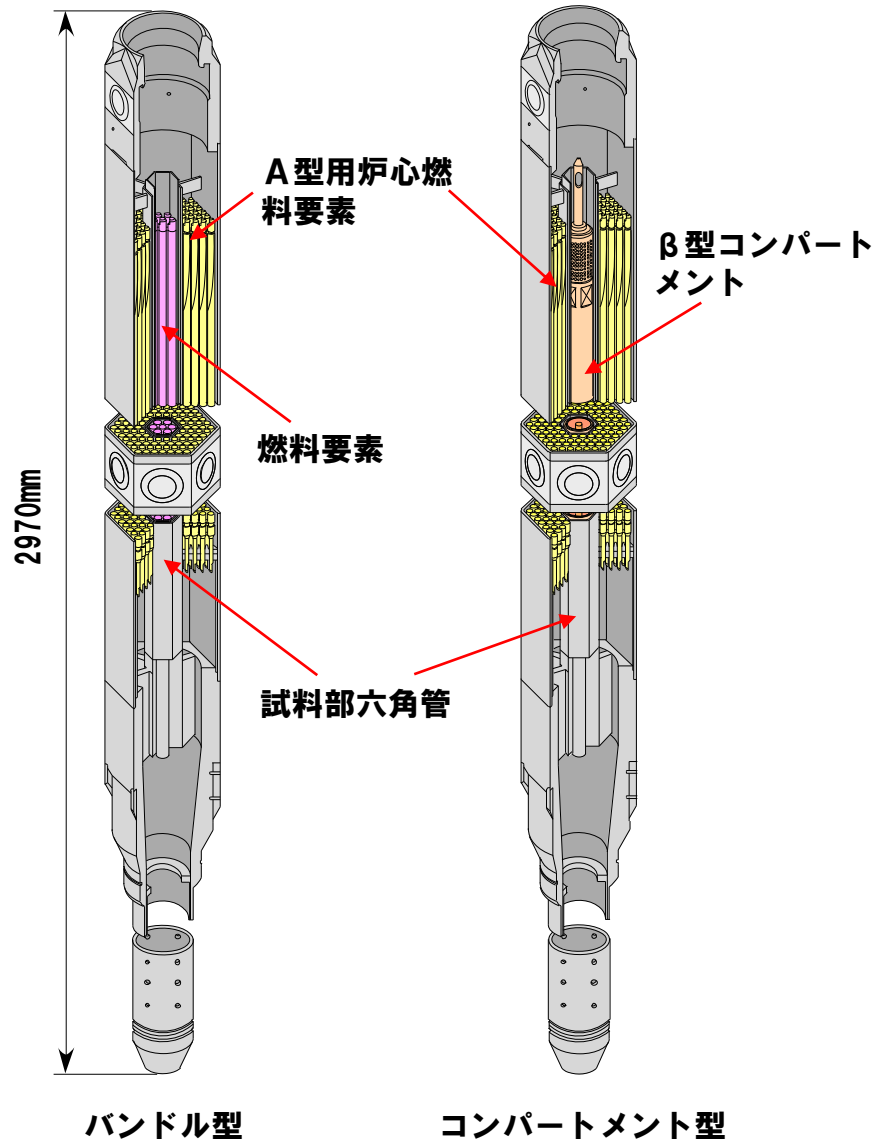
# 照射燃料集合体に装填する燃料要素の主な仕様 (2/2)

種類	装填可能な照射燃料集合体	燃料仕様
先行試験用要素	B	<p>燃料材：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*3            燃料材外径：4.6～7.5mm／燃料ペレット内径（中空）：約2mm            最高燃焼度：200,000MWd/t、Pu同位体組成比：原子炉級            被覆管材料：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）            ※先行試験用Y型コンパートメント（内壁構造容器：SUS316相当ステンレス鋼）に装填</p>
基礎試験用要素	B	<p>燃料材：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）            燃料ペレット外径：4.6～7.5mm／燃料ペレット内径（中空）：約2mm            最高燃焼度：200,000MWd/t、Pu同位体組成比：原子炉級            被覆管材料：ステンレス鋼            ※基礎試験用Y型コンパートメント（密封構造容器：SUS316相当ステンレス鋼）に装填</p>
A型用炉心燃料要素（内側／外側）	A	<p>燃料材：プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット            燃料ペレット外径：約4.6mm            最高燃焼度：90,000MWd/t            Pu含有率32wt%以下、Pu同位体組成比：原子炉級、U濃縮度：約18wt%            被覆管材料：オーステナイト系ステンレス鋼</p>
限界照射試験用補助要素	B、D	<p>燃料材：プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット            燃料ペレット外径：5.3～6.6mm            最高燃焼度：130,000MWd/t            Pu含有率：32wt%以下、Pu同位体組成比：原子炉級、U濃縮度：26wt%以下            被覆管材料：オーステナイト系ステンレス鋼</p>

\*3：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（ $\leq 50\text{wt}\%$ ）。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（ $\leq 10\text{wt}\%$ ）。

# 照射燃料集合体の構造概略（1/4）

## A型照射燃料集合体

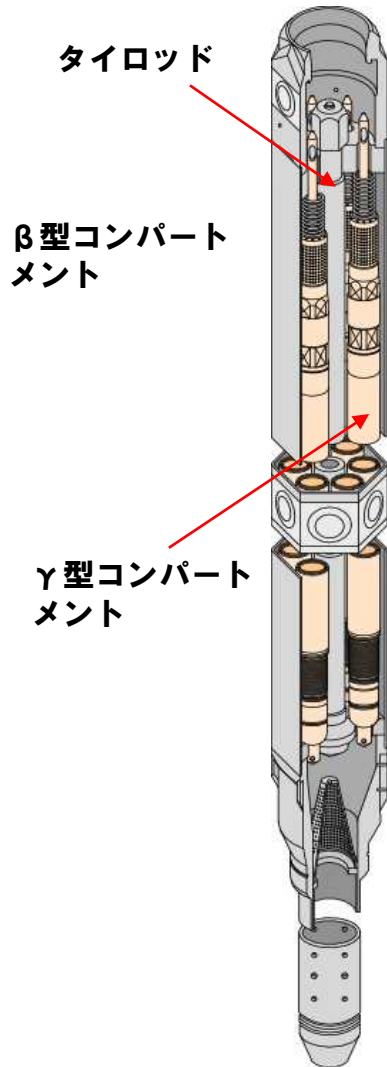


## A型

- ・ 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た構造。
- ・ 試料部は、燃料要素7本のバンドルとし、二重のステンレス鋼の試料部六角管に納めた「バンドル型」、α型コンパートメント1本又はβ型コンパートメント1本をステンレス鋼の試料部六角管に納めた「コンパートメント型」を使用。
- ・ コンパートメント型は、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確認可能。
- ・ 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可能。

# 照射燃料集合体の構造概略（2/4）

**B型照射燃料集合体**

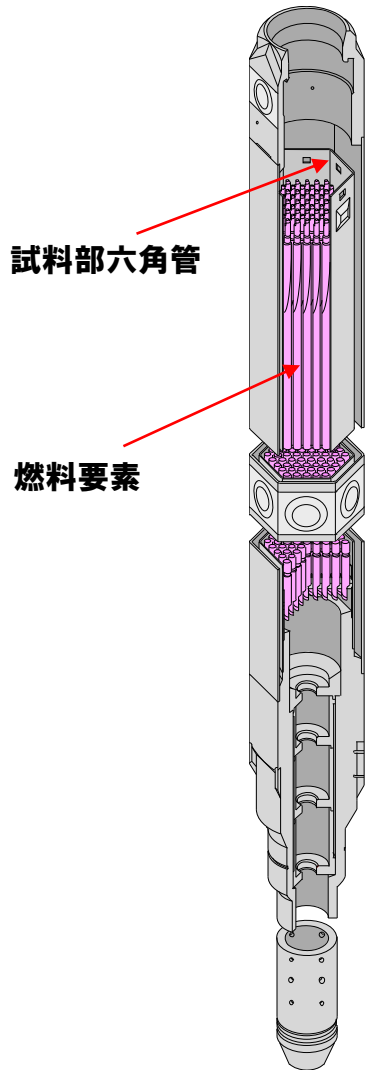


## B型

- 試料部を装填したγ型コンパートメント6本を、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配置した構造。
- ほぼ同一の照射条件下でパラメトリックなデータの取得が可能。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確認可能。
- 先行試験用、基礎試験用では、計画された範囲でその健全性を喪失させる試験において、破損時に原子炉の安全な停止及び炉心の冷却に支障を与えないよう、試験用要素を内壁構造容器（先行試験）、密封構造容器（基礎試験）に装填。

# 照射燃料集合体の構造概略（3/4）

C型照射燃料集合体

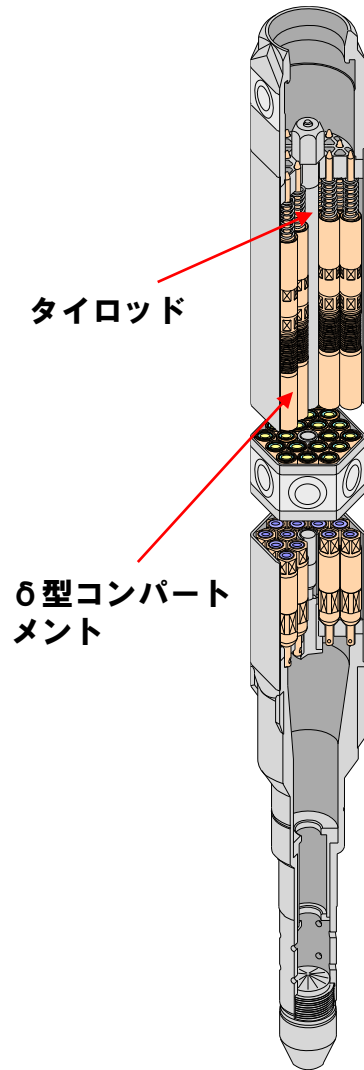


## C型

- 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た構造。
- 同時に多数の照射データを取得可能。燃料要素の健全性を統計的に確認可能。
- 照射条件をオンライン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。

# 照射燃料集合体の構造概略（4/4）

D型照射燃料集合体



【δ型18本装填時】

## D型

- 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、γ型コンパートメント6本、δ型コンパートメント18本、又は、混在させて配置した構造。
- 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取得可能。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確認可能。

# 照射燃料集合体のコンパートメントの概要

コンパートメントの種類		装填可能な燃料要素（燃料要素の本数）	装荷可能な照射燃料集合体（コンパートメントの本数）	
α型コンパートメント ※ 燃料要素最大5本をピンタイロッドの周囲に配置	ワイヤスペーサ型	Ⅲ型特殊燃料要素（最大5本）／Ⅳ型特殊燃料要素（最大5本）	A（最大1本）	
	グリッドスペーサ型	Ⅲ型特殊燃料要素（最大5本）／Ⅳ型特殊燃料要素（最大5本）		
β型コンパートメント ※ 燃料要素1本をシュラウド管に装填	ワイヤスペーサ型	Ⅲ型限界照射試験用要素（最大1本）*1 Ⅳ型限界照射試験用要素（最大1本）*1	A（最大1本）	
	シュラウド管型	Ⅲ型限界照射試験用要素（最大1本）*1 Ⅳ型限界照射試験用要素（最大1本）*1		
γ型コンパートメント ※ 燃料要素最大5本をピンタイロッドの周囲に配置、あるいは内壁構造容器1本または密封構造容器1本を収納	ワイヤスペーサ型 ※ 燃料要素最大5本をピンタイロッドの周囲に配置。		B（6本）  D（最大6本）	
	グリッドスペーサ型 ※ 燃料要素最大5本をピンタイロッドの周囲に配置。			
	先行試験用 ※ 内壁構造容器に燃料要素1本を装填。内壁構造容器1本を収納。	ワイヤスペーサ型		先行試験用要素（1本）*2
		シュラウド管型		先行試験用要素（1本）*2
	基礎試験用 ※ 密封構造容器に燃料要素1本を装填。密封構造容器1本を収納。	ワイヤスペーサ型		基礎試験用要素（1本）*3
		シュラウド管型		基礎試験用要素（1本）*3
δ型コンパートメント ※ 燃料要素1本をシュラウド管に装填	ワイヤスペーサ型	Ⅲ型特殊燃料要素（最大1本）／Ⅳ型特殊燃料要素（最大1本）	D（最大18本）	
	シュラウド管型	Ⅲ型特殊燃料要素（最大1本）／Ⅳ型特殊燃料要素（最大1本）		

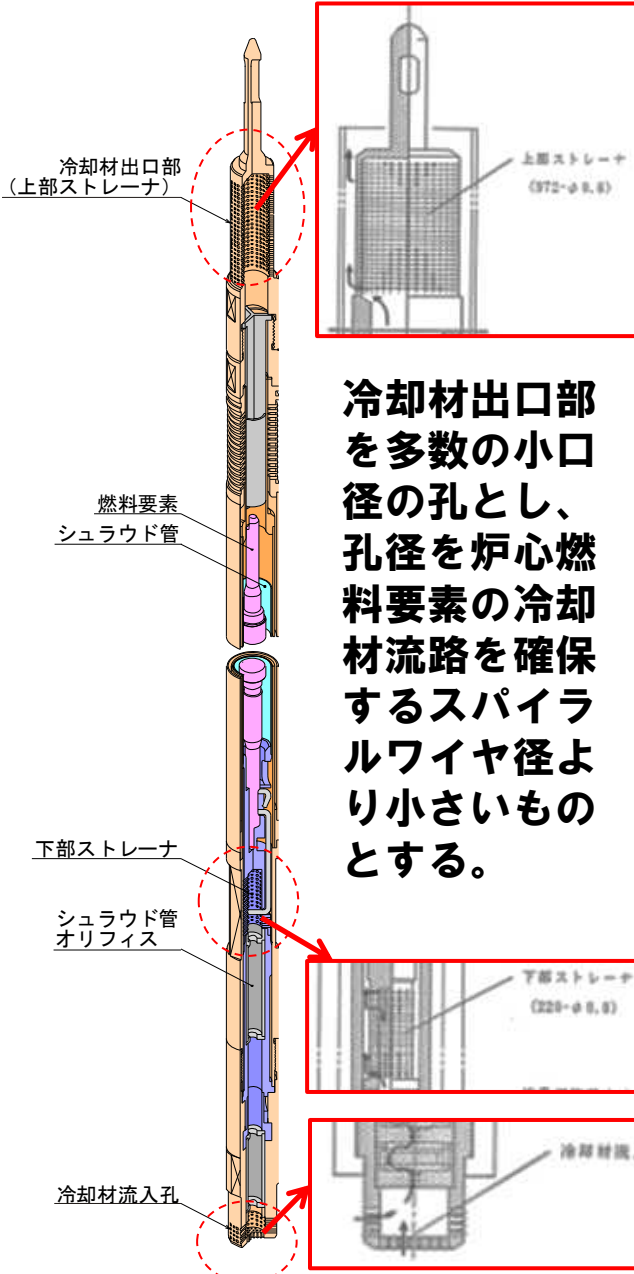
\*1：コンパートメントの冷却材出口部は多数の小口径の孔とし、万一、限界照射試験用要素の開孔部から燃料が放出された場合でも、炉心燃料集合体の冷却を阻害するおそれのある粒径の燃料粒子が照射燃料集合体の外側へ漏れ出ない構造とする。（次ページ）

\*2：燃料熔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。（次ページ）

\*3：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。

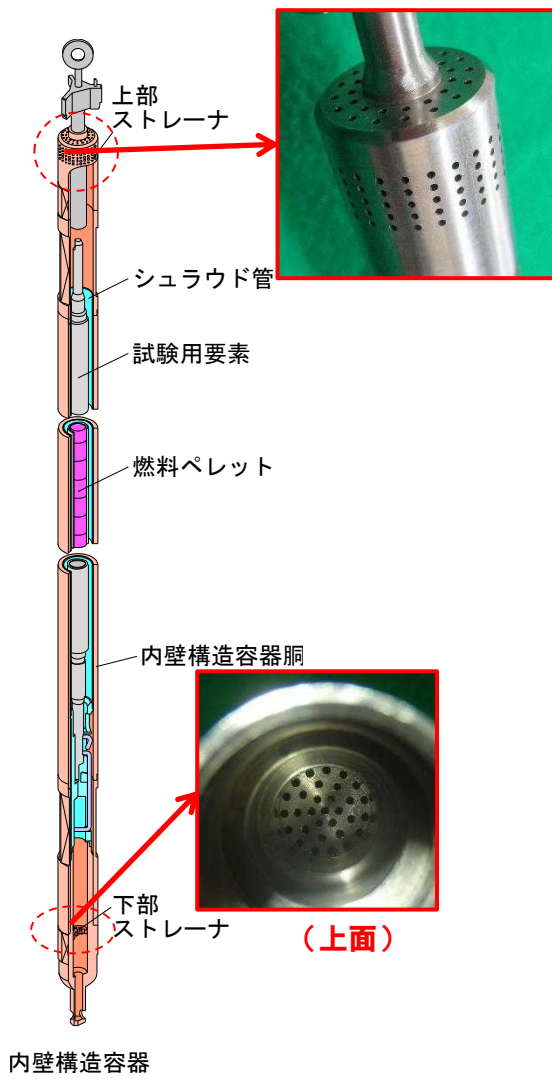


限界照射試験用のコンパートメント

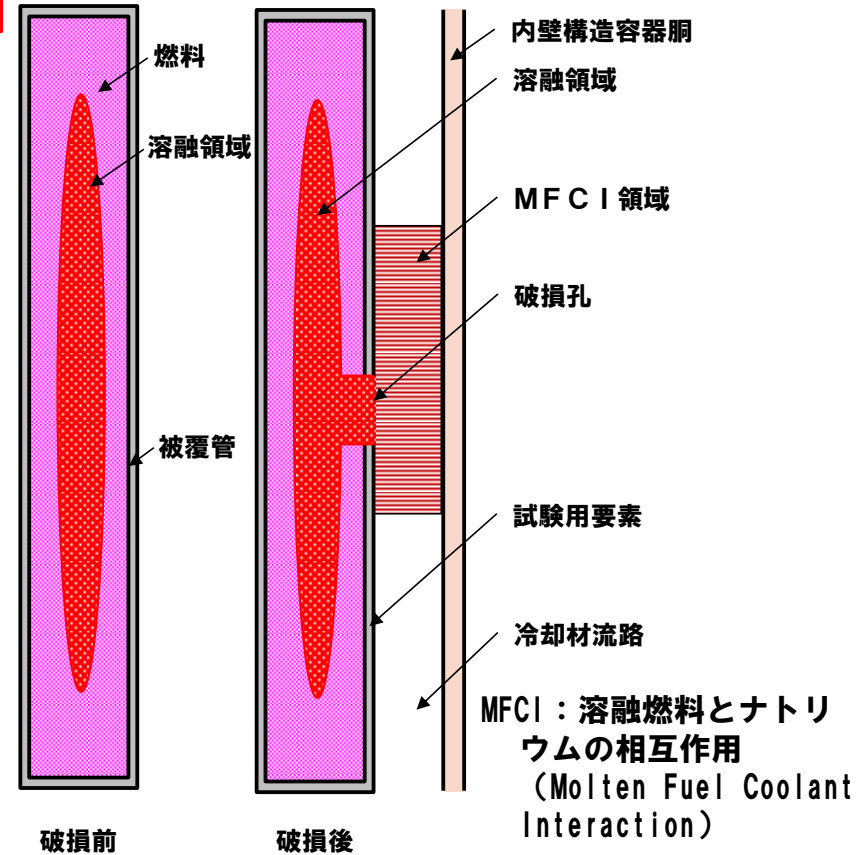


冷却材出口部を多数の小口径の孔とし、孔径を炉心燃料要素の冷却材流路を確保するスパイラルワイヤ径より小さいものとする。

先行試験用の内壁構造容器



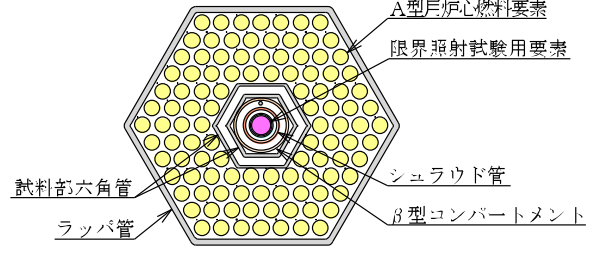
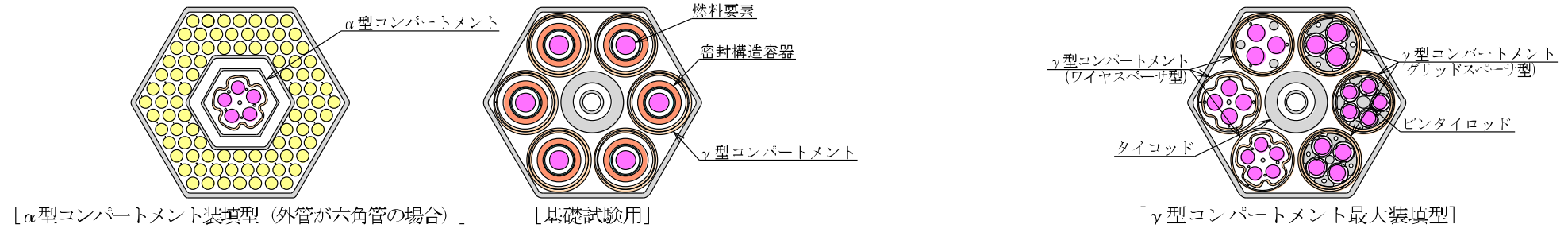
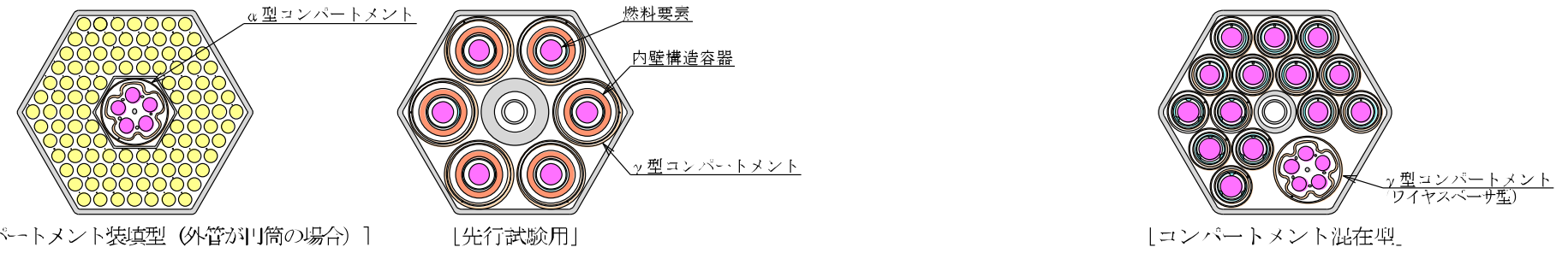
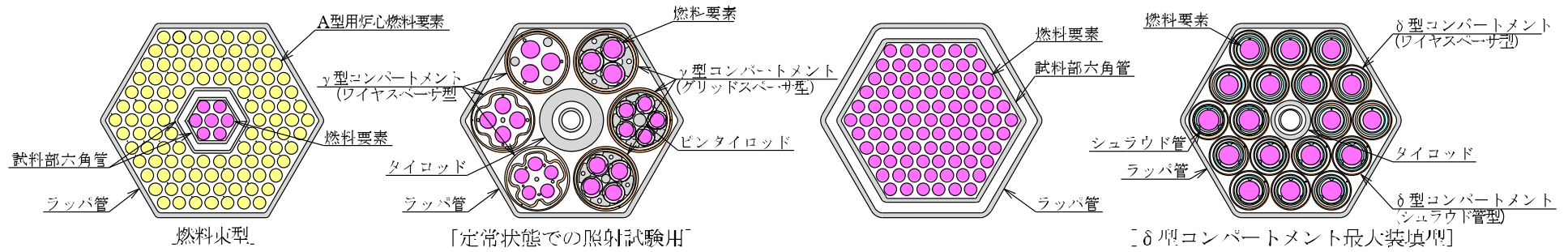
冷却材出口部にストレーナを設置し、多数の小口径の孔とする。ストレーナ孔径を炉心燃料要素の冷却材流路を確保するスパイラルワイヤ径より小さいものとする。



万一、熔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、熔融燃料とナトリウムの相互作用 (MFC I) による圧力が発生する。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で健全性が確保されるよう、肉厚2.8mm以上の厚肉構造とする。



# 集合体・コンパートメント・燃料要素の組合せ例



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

## 2. 安全設計の考え方

# 試験用燃料体の安全設計の考え方

健全性を喪失させない燃料要素	計画的にその健全性を喪失させる燃料要素	
燃料要素名	燃料要素名	健全性喪失の内容
III型特殊燃料要素	III型限界照射試験用要素	被覆材の開孔
IV型特殊燃料要素	IV型限界照射試験用要素	被覆材の開孔
A型用炉心燃料要素（内側／外側）	先行試験用要素	燃材料の溶融
限界照射試験用補助要素	基礎試験用要素	被覆材の開孔

- 既許可では試験炉安全設計審査指針の指針12（燃料要素）を適用
- 炉心燃料要素と同じ設計方針で設計

- 既許可では試験炉安全設計審査指針の指針13（試験用燃料要素）を適用
- 健全性喪失時にも燃料や炉心に影響を与えないように設計

# 設置許可基準規則と過去の参考指針の比較（1/2）

<p>試験炉設置許可基準規則 第43条</p>	<p>試験炉安全設計審査指針 (指針12, 13)</p>	<p>適合のための申請書記載概要</p>
	<p>【指針13】 1. 炉心への試験用燃料要素の装荷は、その数量を限定する設計であること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・照射燃料集合体の装荷個数を制限。</li> <li>・照射燃料集合体に装填する燃料要素個数を制限。</li> <li>・照射燃料集合体の1体当たりの核分裂性物質質量を炉心燃料集合体のそれを超えないように制限（照射燃料集合体は炉心燃料集合体と置き換えて装荷するため、炉心燃料集合体の反応度範囲以下になるように設定）。</li> </ul>
<p>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。</p>	<p>【指針12】 1. 燃料要素は、原子炉内における使用期間中に生じ得る種々の変化を考慮しても、その健全性を失うことのない設計であること。</p> <p>【指針13】 2. 試験用燃料要素は、計画された範囲内でその健全性を喪失しても、燃料要素の健全性に影響を与えない設計であること。</p> <p>【指針13】 3. 試験用燃料要素は、原子炉施設の設計とあいまって、運転時の異常な過渡変化時において、原子炉の安全性を損なわない設計であり、</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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実施することが基本。</li> <li>・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。</li> <li>・試験用要素*1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、その健全性の喪失により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。</li> </ul>
<p>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。</p>	<p>また、事故時においても試験用燃料要素の破損等により、原子炉の安全な停止及び炉心の冷却に支障を与えない設計であること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試験用要素を装填した照射燃料集合体は、設計基準事故時においてもその健全性の喪失により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を装填した照射燃料集合体について、設計方針を定め、その方針を満足するよう設計。</li> </ul>

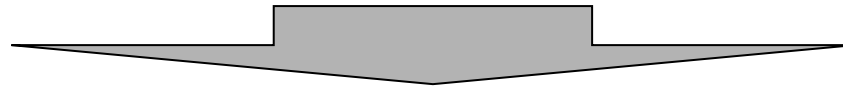
\*1 照射燃料集合体に装填する燃料要素のうち、Ⅲ型限界照射試験用要素、Ⅳ型限界照射試験用要素、先行試験用要素及び基礎試験用要素（指針13を適用する燃料要素）を「試験用要素」と呼ぶ。

# 設置許可基準規則と過去の参考指針の比較（2/2）

試験炉設置許可基準規則 第43条	試験炉安全設計審査指針 (指針12, 13)	適合のための申請書記載概要
<p>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。</p>	<p>【指針13】4. 試験用燃料要素は、原子炉施設の設計とあわせて、1次冷却材中への放射性物質の放出量を制限できる設計であること。</p> <p>【指針13】5. 原子炉施設は、試験用燃料要素から放出される放射性物質を加えても、環境への放射性物質の放出量を合理的に達成できる限り低く抑える設計であること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・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。</li> <li>・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おいては、年間照射試験回数を制限。</li> </ul>
<p>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。</p>	<p>【指針12】2. 燃料要素は、輸送及び取扱い中に過度の変形を生じない設計であること。</p> <p>【指針13】6. 試験用燃料要素は、輸送及び取扱い中に過度の変形を生じない設計であること。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・照射燃料集合体の機械設計は、炉心燃料集合体の設計方針に基づき実施することが基本。</li> </ul>

# 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"> <li>• 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。</li> <li>• 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。</li> </ul>
先行試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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。</li> <li>• 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物の内壁構造容器外への放出がないことを確認する。</li> </ul>
基礎試験用要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 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。</li> <li>• 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。</li> </ul>

# 放射性物質の漏えい量を抑制するための制限

- 照射燃料集合体の装荷により炉心の核熱特性に過大な影響を与えないように、装荷位置及び装荷個数を決定。

- > 照射燃料集合体は炉心燃料領域（右図）に装荷。
- > 照射燃料集合体の最大個数 4体

- ※ 炉心燃料集合体+照射燃料集合体+照射用実験装置（炉心燃料領域） $\leq 79$ 体
- ※ A型（限界照射試験用要素装填時） $\leq 2$ 体、  
B型（限界照射試験用要素装填時）又はD型（限界照射試験用要素装填時） $\leq 1$ 体

- 照射燃料集合体1体の核分裂性物質量は、炉心燃料集合体の核分裂性物質量を超えないように制限。

- 計画された範囲でその健全性を喪失する試験の実施可能な試験回数

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

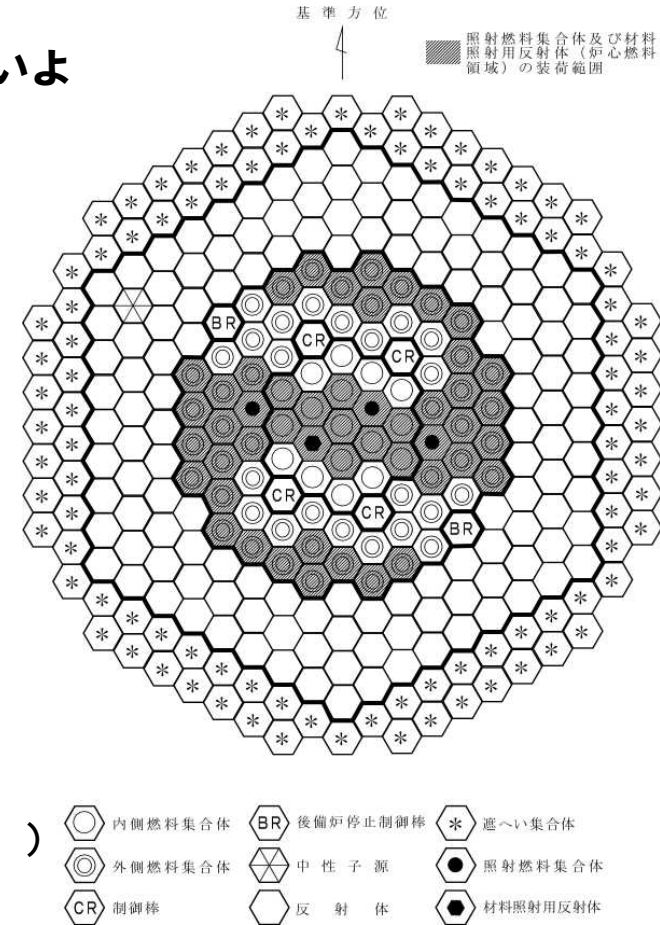
⇒ A型：年間最大4回、B又はD型：年間最大1回

照射拳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

⇒ B型：年間最大14回（定格出力を上回らない目標出力の場合がある。）

照射拳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

⇒ B型：年間最大14回



⇒ 照射燃料集合体1体の核分裂性物質量、装荷個数、限界照射試験用要素にあっては年間照射試験回数を制限することで、放射性物質の漏えい量を抑制。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。

# 設置変更許可申請、設工認申請、製作・使用段階における制限の考え方 23

	照射燃料集合体	(参考) 炉心燃料集合体
設置変更許可申請	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料材や被覆材の材質や組成等を<u>一定の範囲に限定</u>。</li> <li>被覆管肉厚やプレナム体積等の寸法を<u>一定の範囲に限定</u>。</li> <li>燃料要素仕様の範囲を考慮し、<u>代表性を有する熱設計基準値及び熱的制限値を設定</u>。</li> <li>熱出力誤差等に基づき燃料仕様によらない工学的安全係数を設定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料材や被覆材の材質や組成等を<u>決定</u>。</li> <li>決定された材質・組成等に基づき、<u>Sm値や設計疲労曲線を設定</u>。</li> <li>被覆管肉厚やプレナム体積等の寸法を<u>決定</u>。</li> <li>決定された燃料要素仕様を用いて、<u>熱設計基準値及び熱的制限値を設定</u>。</li> <li>工学的安全係数を、<u>製造公差等に基づき設定</u>。</li> </ul>
設工認申請	<ul style="list-style-type: none"> <li>燃料材や被覆材の材質や組成等を<u>決定</u>。</li> <li>決定された材質・組成等に基づき、<u>Sm値や設計疲労曲線を設定</u>。</li> <li>被覆管肉厚やプレナム体積等の寸法を<u>決定</u>。</li> <li>決定された燃料要素仕様を用いて、<u>熱設計基準値及び熱的制限値を設定</u>。</li> <li>決定された燃料要素仕様に基づき、<u>工学的安全係数を個別に設定</u>。</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>要求される照射条件に合わせて<u>装荷位置を設定</u>。</li> <li>所定の装荷位置において、<u>標準平衡炉心の核特性を用いて健全性を確保できることを評価</u>。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>装荷可能領域内において、<u>どこに装荷しても健全性を確保できることを評価</u>。</li> </ul>
製作・使用	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用前事業者検査により、照射燃料集合体の制限事項等を確認。</li> <li>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（個数、熱的制限値、核的制限値）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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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（個数、熱的制限値、核的制限値）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。</li> </ul>



# 設置変更許可申請書に記載する試験用燃料体の燃料設計

## ■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）

- ・高速炉用燃料開発のため様々な目的をもって照射される  
→その仕様は広範なもの

## ■設置変更許可申請書における燃料要素の評価

評価仕様として代表的な燃料要素をとりあげて、設計方針に定められている基準への適合性を評価する

この評価仕様の選定方針としては、直近の計画値のうち評価上最も厳しくなる値を用いることとしている。しかしながら、選定される評価仕様は、燃料要素の仕様範囲すべてを包絡するものではない、実際に照射する燃料要素が目的に応じて設置変更許可申請書の設計方針に定められている基準に適合しているかどうかについては、設工認段階において設計結果の確認を行う。

なお、新規制基準適合性の設置変更許可申請では、新たに試験用燃料要素を追加するものではないため、直近の計画値ではなく既許可の申請書の仕様をそのまま用いる。

### **3. III型特殊燃料要素の熱設計**

# 照射燃料集合体に係る熱設計基準値の設定

## 【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。
- ・照射燃料集合体は、その試験目的に応じて仕様を決定し、設工認を取得するものであり、熱出力の変更による影響は、当該審査時に評価されるため、既許可の熱設計基準値に変更は生じない。

## Ⅲ型特殊燃料要素の熱設計基準値の設定

### 【熱設計基準値】

	熱設計基準値	設定方法
燃料最高温度	燃料最高温度：2,680℃	燃料最高温度に係る主要仕様は炉心燃料集合体と同じであり、燃料融点に基づいて設定
被覆管最高温度	被覆管最高温度：890℃	被覆管材料がオーステナイト系ステンレス鋼であり、急速加熱バースト試験の結果に基づいて設定
冷却材最高温度	冷却材最高温度：910℃	炉心燃料集合体と同様に、ナトリウムの沸点を下回る値として設定

# 熱設計基準値の設定の考え方（1/2）

## 「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」

- ・被覆管の溶融
- ・被覆管の過大歪
- ・被覆管のクリープ破断

### 「燃料の許容設計限界」

- 冷却材の沸騰の防止
- 燃料溶融の防止、溶融割合の制限
- 被覆管クリープ損傷の防止

	燃料の「故障」	評価基準	設定理由	
①	被覆管の溶融	炉心ナトリウム温度<ナトリウム沸点 (冷却材の沸騰防止)	被覆管の焼損防止	冷却材温度に係る熱設計基準値
②	被覆管の過大歪	燃料最高温度<燃料融点 (燃料の溶融防止)	燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止	燃料温度に係る熱設計基準値
③	被覆管のクリープ破断	被覆管最高温度<制限値	被覆管の内圧破損防止	被覆管温度に係る熱設計基準値

※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

# 熱設計基準値の設定の考え方（2/2）

## 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。

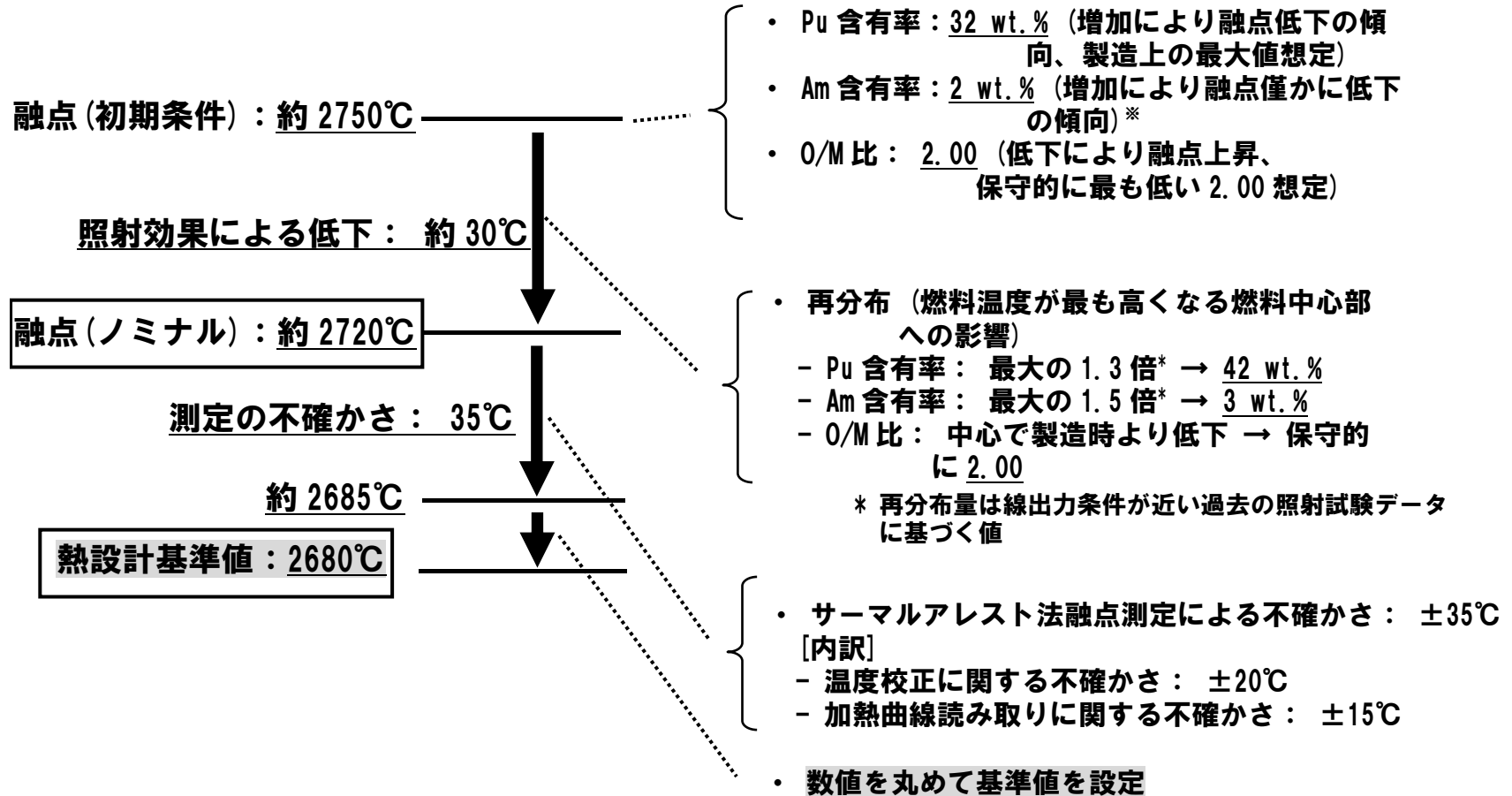
### 【照射燃料集合体】

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。

# III型特殊燃料要素における熱設計基準値の設定（1）燃料最高温度 29

## 【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 <sup>241</sup>Pu の崩壊も踏まえて制限をかける

# 燃料融点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	III型特殊燃料要素	炉心燃料要素	III型特殊燃料要素	
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	25°C	35°C	35°C	
	(2, 650°C ≦)	(約2, 685°C)	(約2, 685°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.

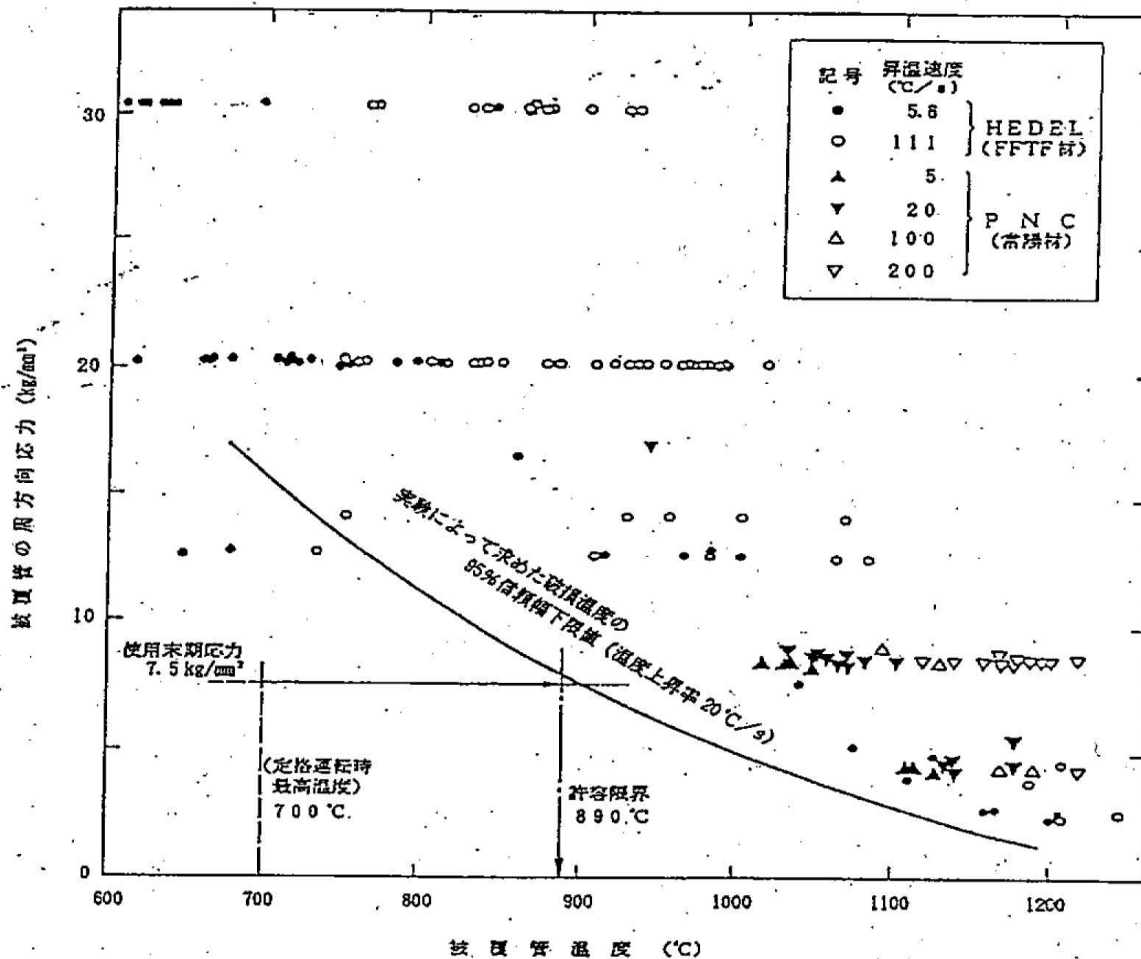
\*2 : E. A. Aitken and S. K. Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures, Quarterly Report No. 16", GEAP-12229, 1971.

\*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.

# III型特殊燃料要素における熱設計基準値の設定（2）被覆管最高温度

## 【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 <sup>2</sup> （約74N/mm <sup>2</sup> ）



## 【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。



# III型特殊燃料要素における熱設計基準値の設定（3）冷却材最高温度

## 【冷却材の主要仕様】

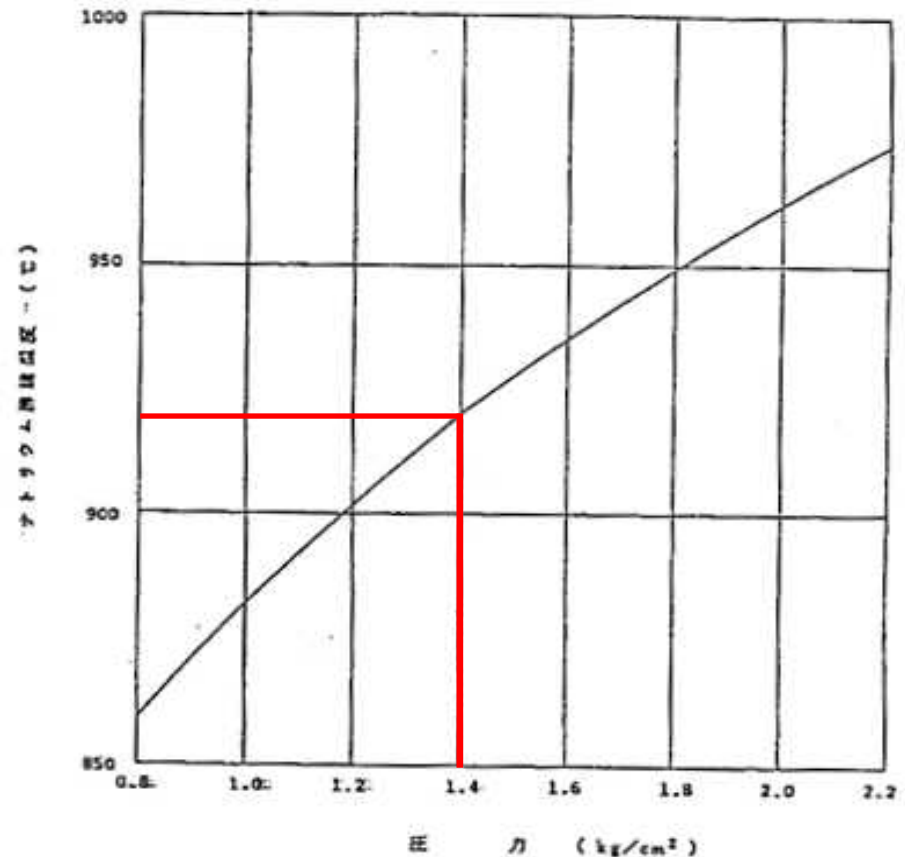
種類	炉心頂部（燃料集合体頂部）冷却材圧力
ナトリウム	約0.04N/mm <sup>2</sup> （約0.4kgf/cm <sup>2</sup> ）

## 【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】

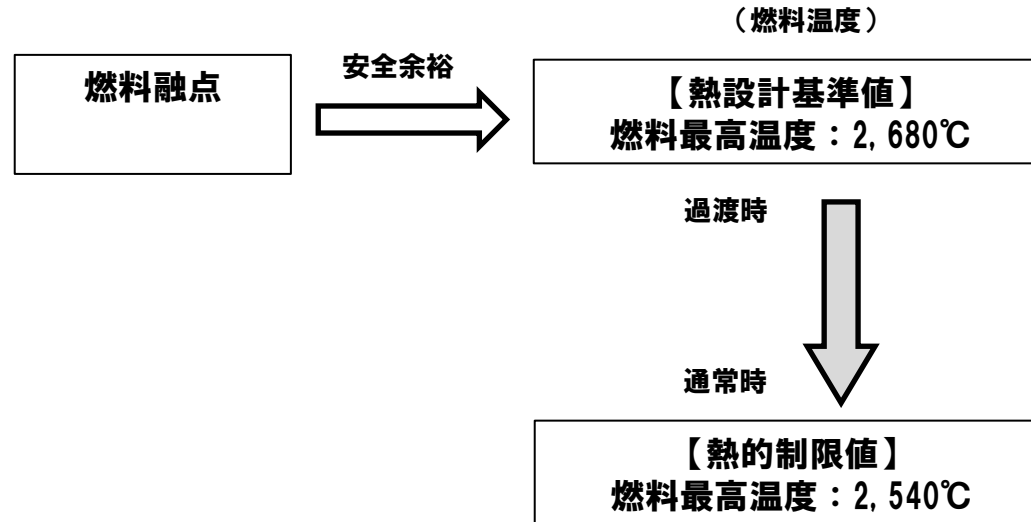
- ・ 炉内の燃料集合体頂部の冷却材圧力（水頭圧含む）における沸騰温度は**約920℃**。
- ・ 安全裕度を考慮して**910℃**と設定。
- ・ 炉心燃料要素の冷却材最高温度に対する熱設計基準値と同じ値。



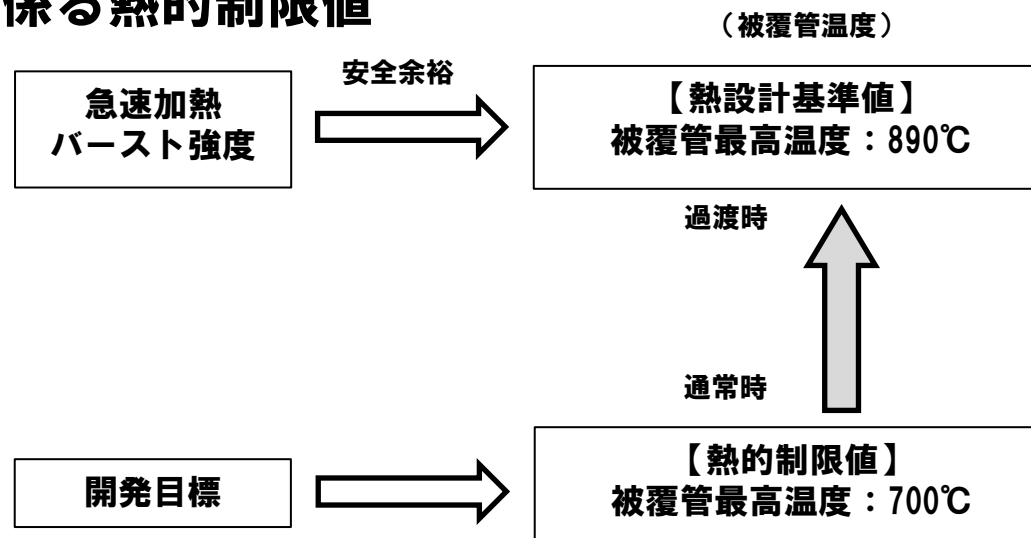
ナトリウム沸騰温度

# III型特殊燃料要素における熱的制限値の設定

## (i) 燃料温度に係る熱的制限値



## (ii) 被覆管温度に係る熱的制限値



# 燃料温度及び被覆管温度計算方法（1/2）

温度計算方法は炉心燃料要素と同じ。

( i ) 冷却材温度

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

( ii ) 被覆管表面温度

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

( iii ) 被覆管内面温度

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

( iv ) 燃料表面温度

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

$T_{In}$  : 冷却材入口温度 (°C)

$T_{Co}$  : 被覆管表面温度 (°C)

$T_{Na}$  : 冷却材温度 (°C)

$W$  : 冷却材流量 (g/s)

$C_p$  : 冷却材比熱 (Ws/g°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

$ql$  : 線出力密度 (W/cm)

$T_{Ci}$  : 被覆管内面温度 (°C)

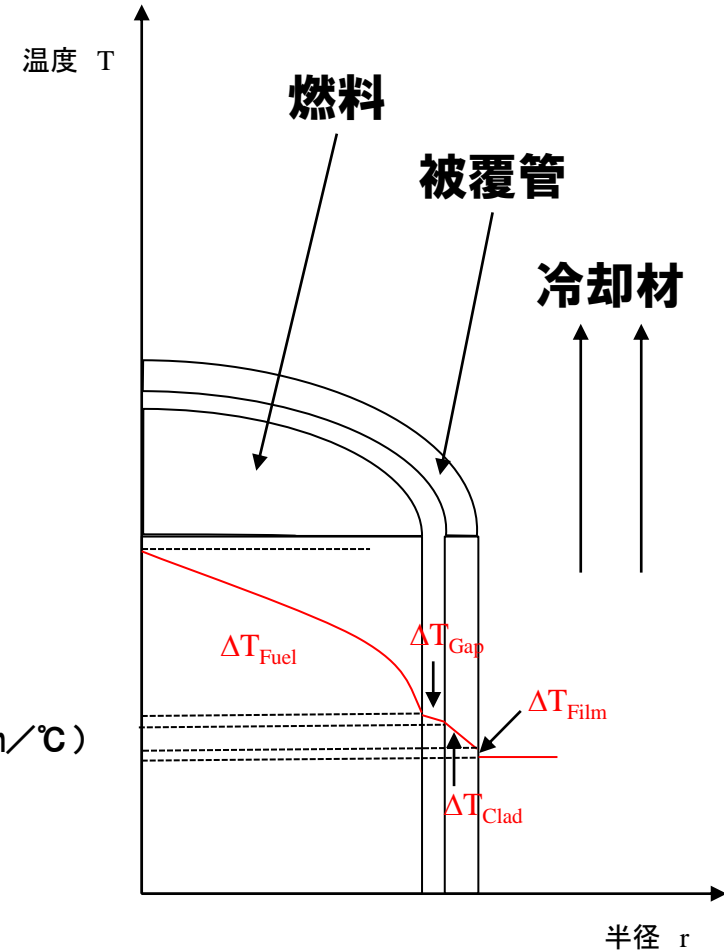
$K_C$  : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C)

$d_{Ci}$  : 被覆管内径 (cm)

$T_S$  : 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)



# 燃料温度及び被覆管温度計算方法（2/2）

(v) 燃料最高温度  
 溶融温度に達しない範囲の燃料最高温度は  
 以下のとおり組織変化を考慮した式により計算する。

## a) 未変化領域

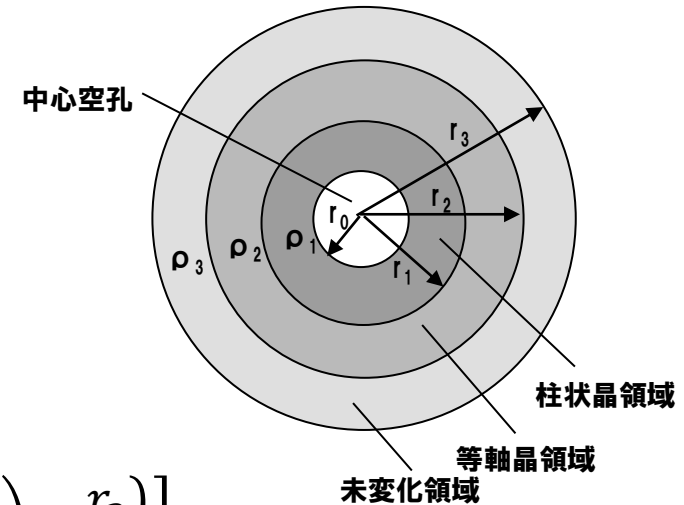
$$\int_{T_S}^{T_2} k(\rho_3, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right)$$

## b) 等軸晶領域

$$\int_{T_2}^{T_1} k(\rho_2, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left[ \frac{r_2^2}{r_3^2} \left\{ \frac{\rho_2}{\rho_3} \left( 1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) + 2 \left( 1 - \frac{\rho_2}{\rho_3} \right) \ln \frac{r_2}{r_1} \right\} \right]$$

## c) 柱状晶領域

$$\int_{T_1}^{T_p} k(\rho_1, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left[ \frac{r_0^2}{r_3^2} \left\{ \frac{\rho_1}{\rho_3} \left( \frac{r_1^2}{r_0^2} - 1 - 2 \ln \frac{r_1}{r_0} \right) \right\} \right]$$



$T_S$  : 燃料表面温度 (°C)

$T_2$  : 等軸晶形成温度 (°C)

$T_1$  : 柱状晶形成温度 (°C)

$T_p$  : 燃料中心温度 (°C)

$k$  : ペレット熱伝導度 (W/cm/°C)

$\rho$  : ペレット密度 (g/cm<sup>3</sup>)

# 熱計算に用いる物性値（1/2）

項目	物性定数	出典						
燃料ペレット熱伝導度	<p>プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料</p> $\lambda = \frac{1-p}{1+0.5p} \cdot \lambda_0$ $\lambda_0 = \frac{1}{0.01595 + 2.713x + 0.3583Am + 0.06317Np + (2.493 - 2.625x) \times 10^{-4}T} + \frac{1.541 \times 10^{11}}{T^{2.5}} \cdot \exp\left(-\frac{15220}{T}\right)$ <p>λ：気孔率pにおける燃料ペレット熱伝導度（W/m/K）  λ<sub>0</sub>：100%TDにおける熱伝導度（W/m/K）  ρ：気孔率 (=1-ρ)</p> <table border="0" style="margin-left: 40px;"> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 5px;">ρ = 0.99（柱状晶領域）</td> <td style="padding-left: 20px;">1,900°C ≤ T<sub>p</sub></td> </tr> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 5px;">ρ = 0.97（等軸晶領域）</td> <td style="padding-left: 20px;">1,400°C ≤ T<sub>p</sub> &lt; 1,900°C</td> </tr> <tr> <td style="border-left: 1px solid black; padding-left: 5px;">ρ = 燃料ペレット初期密度（不変化領域）</td> <td style="padding-left: 20px;">T<sub>p</sub> &lt; 1,400°C</td> </tr> </table> <p>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>	ρ = 0.99（柱状晶領域）	1,900°C ≤ T <sub>p</sub>	ρ = 0.97（等軸晶領域）	1,400°C ≤ T <sub>p</sub> < 1,900°C	ρ = 燃料ペレット初期密度（不変化領域）	T <sub>p</sub> < 1,400°C	加藤らの式
ρ = 0.99（柱状晶領域）	1,900°C ≤ T <sub>p</sub>							
ρ = 0.97（等軸晶領域）	1,400°C ≤ T <sub>p</sub> < 1,900°C							
ρ = 燃料ペレット初期密度（不変化領域）	T <sub>p</sub> < 1,400°C							
ギャップ熱伝達率	<p>照射燃料集合体の場合</p> $hg = \frac{C1 + C2Q}{G_0 - C3D_{pin}Q + C4}$ <p>hg：ギャップ熱伝達率（W/cm<sup>2</sup>/°C）  G<sub>0</sub>：製造時直径ギャップ幅（cm）  D<sub>pin</sub>：製造时被覆管内径（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：ギャップ部のガス熱伝導度由来する係数（W/cm<sup>2</sup>/°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：温度ジャンプ距離由来する係数（cm）</p>							

## 熱計算に用いる物性値（2/2）

項目	物性定数	出典
被覆管熱伝導度	オーステナイト系ステンレス鋼 $K_C = 0.132 + 1.3 \times 10^{-4} T_C$ $K_C$ : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C) $T_C$ : 被覆管温度 (°C)	International Nickel Company
被覆管表面熱伝達率	$h_{film} = \left[ \frac{K_N}{D} \right] Nu$ $h_{film}$ : 被覆管表面熱伝達率 (cal/cm <sup>2</sup> /s/°C) $D$ : 水力等価直径 (cm) $K_N$ : 冷却材熱伝導度 (cal/cm/s/°C) $Nu$ : ヌセルト数 $Nu = 7.0 + 0.025 Pe^{0.8}$ $Pe$ : ペクレ数	Dwyerの式  Lyonの式
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
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
冷却材粘性係数	$\log \mu = -1.4892 + 220.65 / T_N - 0.4925 \log T_N$ $\mu$ : 冷却材粘性係数 (g/cm/s) $T_N$ : 冷却材温度 (K)	ANL - 7323
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
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

各物性値も基本的に炉心燃料要素と同じ。下線箇所は今回の申請で変更。  
 ギャップ熱伝達率は燃料要素の仕様に依存するため、式で与えている。

# 工学的安全係数

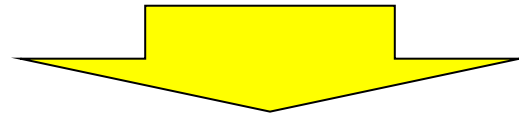
照射燃料集合体では、試験ごとに燃料要素の寸法、材料等の仕様が異なる。そのため、炉心燃料要素のように一律に工学的安全係数を設定することができない。

■炉心燃料要素と照射燃料集合体に装填する燃料要素（特殊燃料要素及び試験用要素）の熱設計における方針

企業秘密が含まれている  
ため公開できません

# 工学的安全係数の内訳

企業秘密が含まれている  
ため公開できません



照射燃料集合体の工学的安全係数：1.05



## III型特殊燃料要素の熱設計結果

### 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%
被覆管	SUS316相当ステンレス鋼
被覆管外径	8.5mm
被覆管肉厚	0.4mm
燃料要素有効長さ	550mm

### 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 定格出力時 過出力時	480W/cm 520W/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℃

### 設計結果

出力条件	燃料最高温度	制限値	成立性
定格出力時	2,477℃	2,540℃	○
過出力時	2,587℃	2,680℃	○

## **4. III型特殊燃料要素の機械設計**

# 照射燃料集合体の機械設計において想定する破損様式

照射燃料集合体の機械設計においても、炉心燃料集合体と同様、ASME Sec. IIIを参考に使用期間中の燃料集合体の構造健全性の保証を目的として、使用材料の特性を考慮し、以下の破損様式を防止するために制限を設ける。

- ① 一次応力による引張破断
- ② 一次応力によるクリーブ破断
- ③ 一次及び二次応力による過大な塑性変形
- ④ 一次及び二次応力による過大なクリーブ変形
- ⑤ 疲労破損
- ⑥ クリーブ疲労破損
- ⑦ 座屈

# 荷重に対する応力の制限 (1/3)

## (1) 一次応力による引張破断の防止

延性破断防止の観点から一次一般膜応力強さに対して制限を設け、塑性崩壊防止の観点から一次曲げ応力を加えた全一次応力強さに対して制限を設ける。

### a. 一次一般膜応力に対する制限

$$P_m \leq S_m$$

### b. 一次膜応力+一次曲げ応力強さに対する制限

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

$P_m$  : 一次一般膜応力強さ

$P_L$  : 一次局部膜応力強さ

$P_b$  : 一次曲げ応力強さ

$S_m$  : 設計応力強さ

## (2) 一次応力によるクリーブ破断の防止

一次応力によるクリーブ破断については、次式を用いて評価する。

$$\sum_i \frac{t_{mi}}{t_i} \leq B$$

$i$  : 負荷サイクル数

$t_i$  : 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 $(P_m)_i$ である負荷サイクル $i$ の累積持続時間

$t_{mi}$  : 温度 $T_i$ 、応力強さ $(P_m)_i$ に対する許容時間

$B$  : 使用分数の制限値 (1.0)

## 荷重に対する応力の制限（2/3）

### (3) 一次及び二次応力による過大な塑性変形と一次及び二次応力による過大なクリープ変形の防止

進行性ひずみ防止及び疲労評価の観点から、以下の制限を設ける。

#### a. クリープ温度未満

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$$

#### b. クリープ温度以上

$$P_L + P_b + Q \leq S_q$$

$Q$  : 二次応力強さ

$S_q$  : 使用期間中の最高及び最低温度のそれぞれに対して定める設計降伏点 ( $S_y$ ) の平均値

### (4) 疲労損傷

疲労評価については、次式を用いて評価する。

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{di}} \leq 1.0$$

$n_i$  : 負荷サイクル $i$ の回数

$N_{di}$  : 負荷サイクル $i$ に対する許容繰返し数

## 荷重に対する応力の制限 (3/3)

### (5) クリープ疲労破損の防止

次式の線形損傷則で評価する。 $D_f$ の算出でクリープの影響を考慮する。

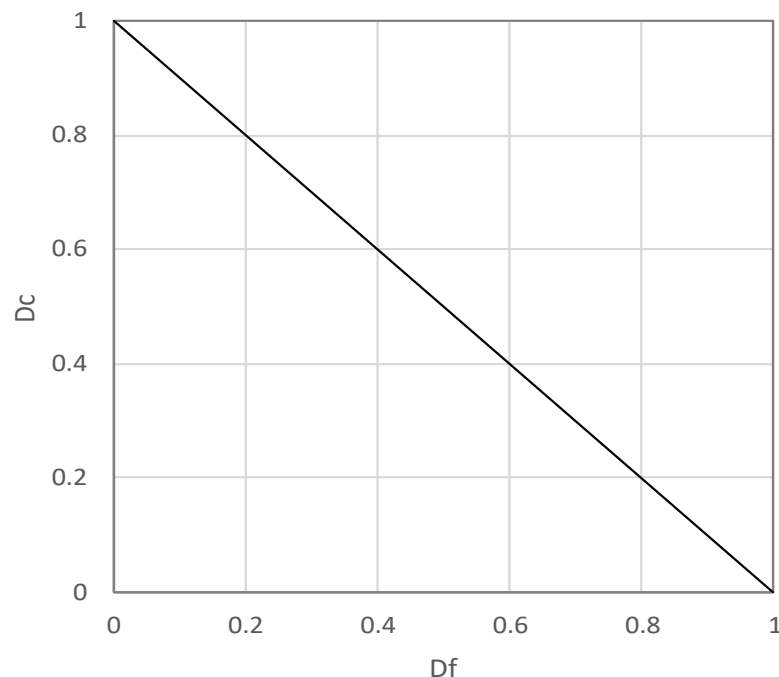
$$D_f + D_c \leq D$$

$D$  : 累積クリープ疲労損傷制限値

$D_f$  : 累積疲労損傷係数

$D_c$  : 累積クリープ損傷係数

累積クリープ疲労損傷係数の制限値 $D$ は下図を用いる。



# 設計応力強さSmの設定

照射燃料集合体の設計応力強さ（Sm）設定は、基本的に炉心燃料集合体の燃料設計での設定と同じとする。

なお、照射燃料集合体においては照射挙動が不明確な材料を被覆材等に用いる試験もあり、物性式を設工認段階において最新知見をもとに個別に設定することがある。

$$S_m = \min \left( \frac{1}{2} S_u^{RT}, \frac{3}{4} S_y^{RT}, \frac{1}{2} S_u^{HT}, \frac{3}{4} S_y^{HT} \right)$$

$S_u^{RT}$  : 室温での規格引張強さ

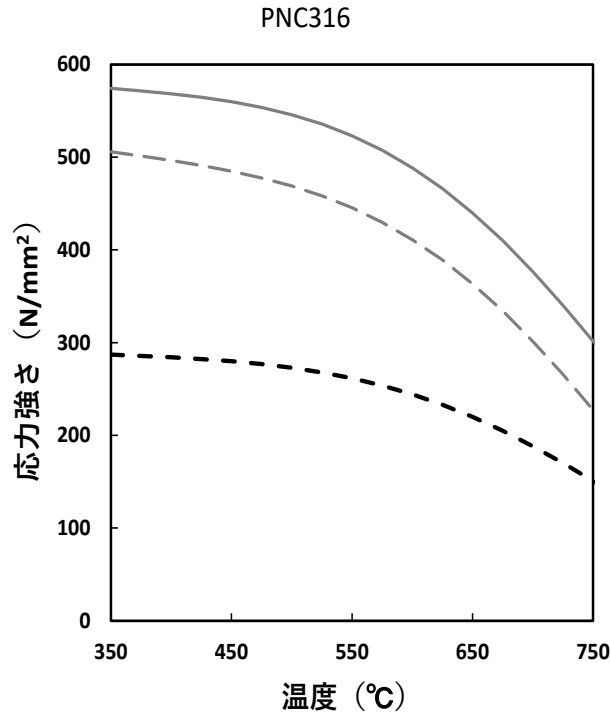
$S_y^{RT}$  : 室温での規格降伏点

$S_u^{HT}$  : 当該温度における設計引張強さ

$S_y^{HT}$  : 当該温度における設計降伏点

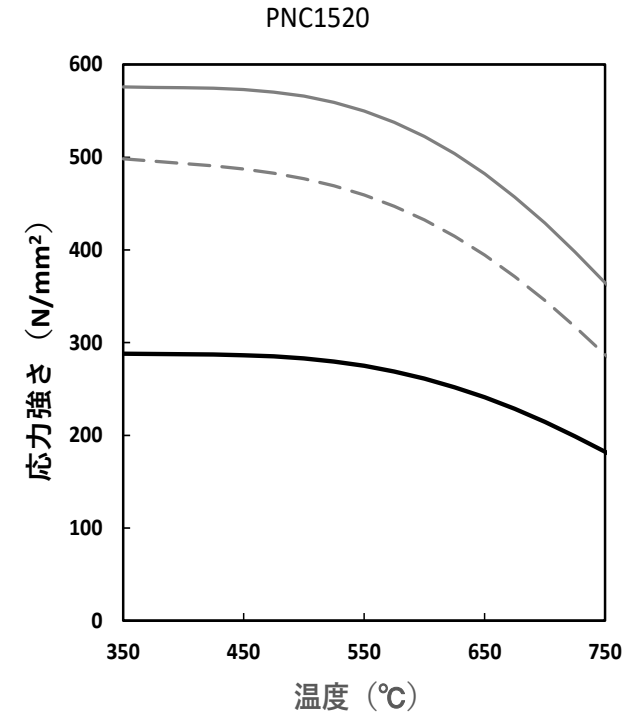
**Ⅲ型特殊燃料要素の被覆材：  
オーステナイト系ステンレス鋼**

(1) SUS316相当ステンレス鋼



--- Sy — Su - - - Sm

(2) 高Niオーステナイト系  
ステンレス鋼 (A)



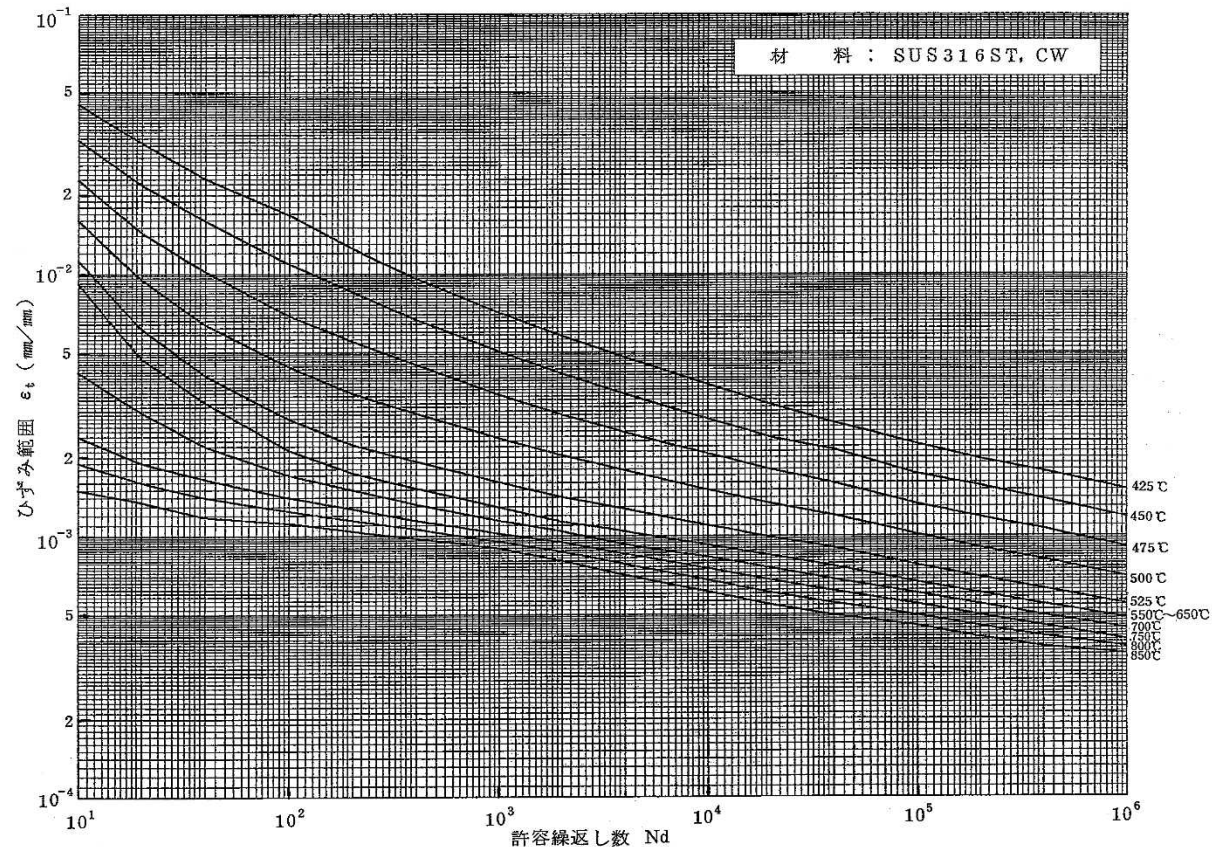
--- Sy — Su — Sm

# 疲労損傷和の許容繰り返し数 (Nd)

照射燃料集合体の疲労特性も、基本的に炉心燃料集合体の燃料設計と同じとする。

なお、照射燃料集合体の使用材料の疲労特性については、設工認段階において最新知見をもとに個別に設定することがある。

## III型特殊燃料要素の被覆材：オーステナイト系ステンレス鋼



※ASME Code Case N-47の316ステンレス鋼弾性解析用疲労線図を準用



## 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定される。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%
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
燃料要素有効長さ	550mm
ガスプレナム長さ	900mm

### 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℃

## 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 <sup>2</sup> )	
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 <sup>2</sup> (7.4 kg/mm <sup>2</sup> )	Sm値：11.4 kg/mm <sup>2</sup>

## **5. IV型特殊燃料要素**

## IV型特殊燃料要素の特徴

燃料材	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット
燃料ペレット直径（中実）または 外径（中空）	5.18～6.18mm
燃料ペレット内径（中空）	約2mm
燃料要素有効長さ	50cm以下 ※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
最高燃焼度	130,000MWd/t
Pu含有率	32wt%以下
Pu同位体組成比	原子炉級
U濃縮度	24wt%以下
被覆管外径	6.5～7.5mm
被覆管内径	0.56～0.76mm
被覆管材料	<a href="#">高速炉用フェライト系ステンレス鋼</a>

炉心燃料要素やIII型特殊燃料要素（被覆管材料：オーステナイト系ステンレス鋼）と異なり、被覆管材料に[フェライト系ステンレス鋼](#)を使用

# 高速炉用フェライト系ステンレス鋼の概要

## 【フェライト系ステンレス鋼の一般的な特徴】

- 12～25%Crを含有するFe-Cr系合金
  - 体心構造
  - オーステナイト系ステンレス鋼（面心構造）と比較して
    - ＞熱伝導率が良い
    - ＞熱膨張率が小さい
    - ＞耐スエリング性に優れる
- 熱応力を低減できる

## 【高速炉用フェライト系ステンレス鋼（PNC-FMS鋼）】

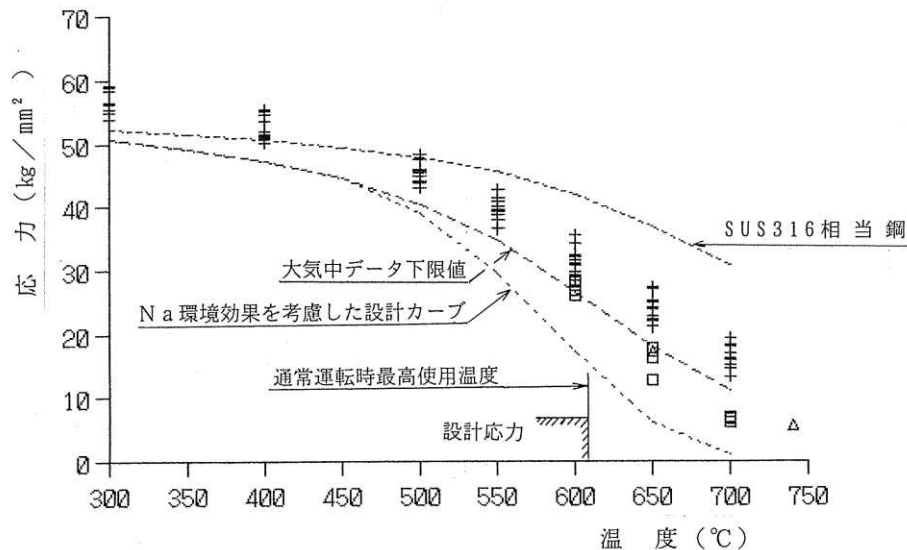
- Fe-12Crを主成分
- 高温強度（主に耐クリープ強度）を改良  
（JIS鋼（405、410L）と比較すると、固溶強化元素としてMo、Wを、析出強化元素としてV、Nbを添加することで高温強度（主にクリープ強度）を向上させている。）

# 高速炉用フェライト系ステンレス鋼被覆管材料の特性

## 【引張強さ】

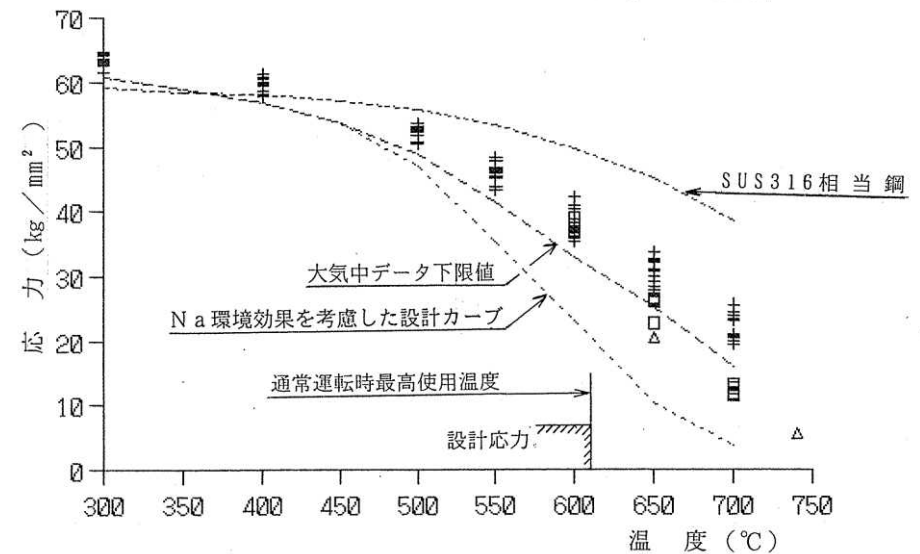
- ・高温域ではSUS316相当ステンレス鋼（PNC316）より低い値。
- ・通常運転時の最高使用温度（熱的制限値）を610℃と低く制限することで健全性を確保する。

高速炉用フェライト系ステンレス鋼  
〔61年度試作A及び61年度試作B〕  
+大気中データ  
□Na中データ（約2500hr浸漬）  
△照射データ（ $3.7 \sim 3.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）



(1) 降伏強さ (Sy)

高速炉用フェライト系ステンレス鋼  
〔61年度試作A及び61年度試作B〕  
+大気中データ  
□Na中データ（約2500hr浸漬）  
△照射データ（ $3.7 \sim 3.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$ ,  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ）



(2) 引張強さ (Su)

## Ⅳ型特殊燃料要素の熱設計基準値・熱的制限値

### 【熱設計基準値】

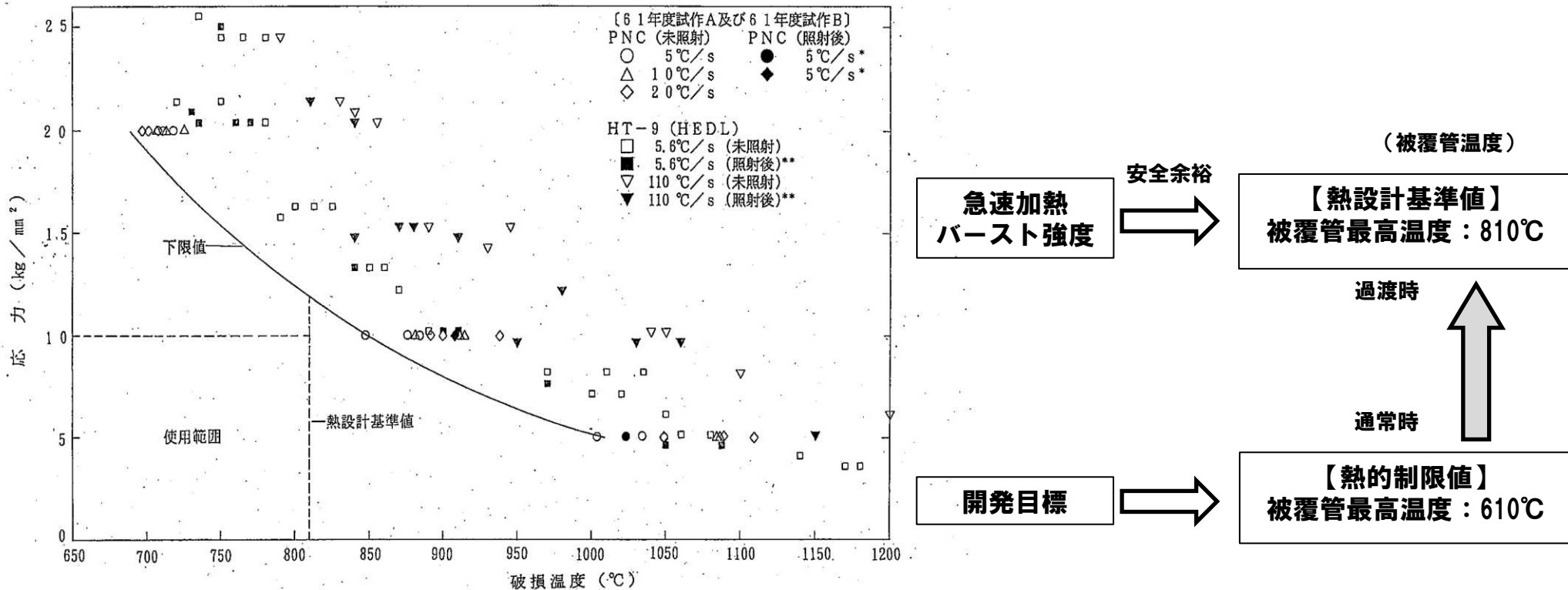
	熱設計基準値	設定方法
燃料最高温度	燃料最高温度：2,680℃	Ⅲ型特殊燃料要素と同じ
被覆管最高温度	<b>被覆管最高温度：810℃</b>	被覆管材料が <b>フェライト系ステンレス鋼</b> であり、急速加熱バースト試験の結果に基づいて設定
冷却材最高温度	冷却材最高温度：910℃	Ⅲ型特殊燃料要素と同じ

### 【熱的制限値】

	熱設計基準値	設定方法
燃料最高温度	燃料最高温度：2,540℃	Ⅲ型特殊燃料要素と同じ
被覆管最高温度	<b>被覆管最高温度：610℃</b>	被覆管材料が <b>フェライト系ステンレス鋼</b> であり、開発目標と過渡時に熱設計基準値を超えない通常時の温度として設定

- ・燃料材はⅢ型特殊燃料要素と同じプルトニウム・ウラン混合酸化物燃料
- ・被覆材はⅢ型特殊燃料要素（被覆管材料：オーステナイト系ステンレス鋼）と異なり**フェライト系ステンレス鋼**を使用  
→被覆管の熱設計基準値・熱的制限値がⅢ型特殊燃料要素と異なる

# IV型特殊燃料要素の熱設計基準値・熱的制限値の設定



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  $3.8 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E<0.1MeV)

\*\* PPTF 370°C~620°C  $1 \sim 16 \times 10^{22}$  n/cm<sup>2</sup> (E<0.1MeV)

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。

また、開発目標を考慮し、過渡時に熱設計基準値を超えない通常時の温度として、**610°C**を熱的制限値とする。



## 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℃

## 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 <sup>2</sup> )	
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 <sup>2</sup> (7.0kg/mm <sup>2</sup> )	Sm値：14.2kg/mm <sup>2</sup>

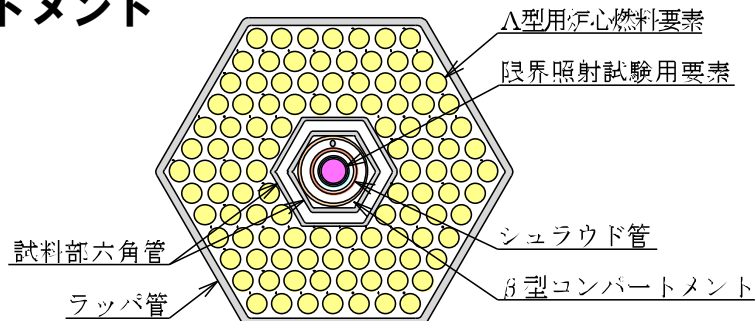
## **6. 限界照射試験用要素**

# 限界照射試験の概要

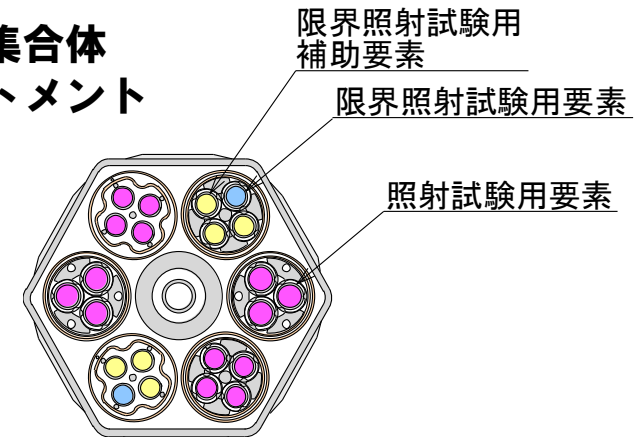
限界照射試験では、燃料の設計限界を見極めるため、被覆管がクリープ破損により開孔するまで照射を継続する。RTCB (Run-to-Cladding Breach) 試験。

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

### 【指針の要求】

- 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。

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、

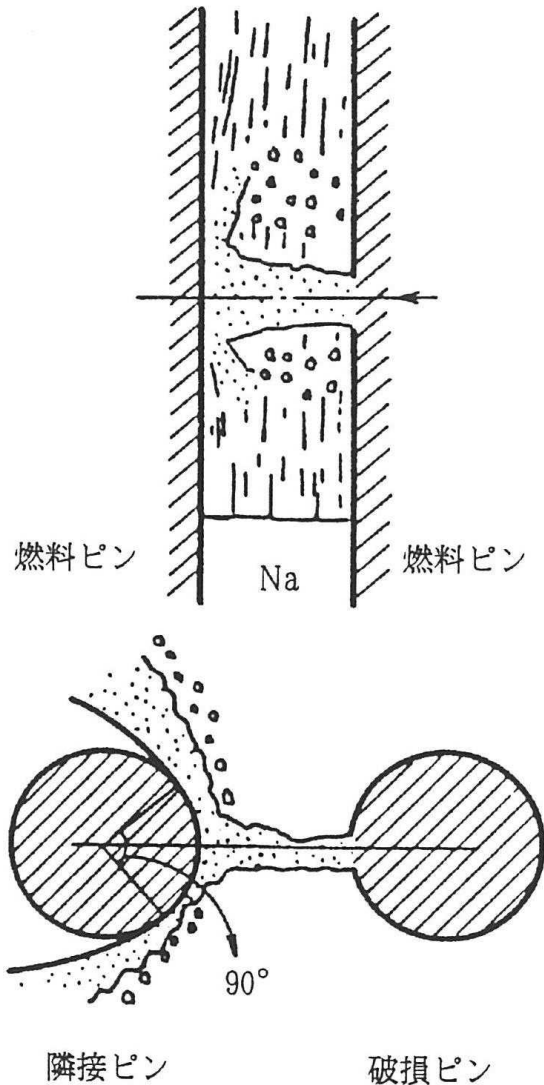
- 被覆管の開孔に係る設計では、クリープ寿命分数和は1を超えるが、被覆管に発生する応力は許容応力を超えないことを確認する。
- 炉心の冷却を阻害する物のコンパートメント外への放出がないことを確認する。

# 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	備考
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：700℃ (被覆管開孔時：890℃)	Ⅲ型特殊燃料要素と同じ※
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℃ (被覆管開孔時：810℃)	Ⅳ型特殊燃料要素と同じ※
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℃)	Ⅲ型特殊燃料要素と同じ

※限界照射試験用要素の被覆管温度の熱設計基準値は、被覆管が開孔した場合で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、被覆管の溶融や破砕等の防止を目的に定められたものであり、補助要素等の他の開孔する可能性のない燃料要素の場合とはその目的が異なる。ただし、被覆管の溶融や破砕等を防止するためのしきい値に関するデータはなく、このため保守的に通常の開孔する可能性のない燃料に関する熱設計基準値を準用している。

# 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

# 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 [%]	95	95
ペレット直径 [mm]	7.50	6.18
直径ギャップ [mm]	0.20	0.20
被覆管外径 [mm]	8.5	7.5
被覆管肉厚 [mm]	0.4	0.56
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	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

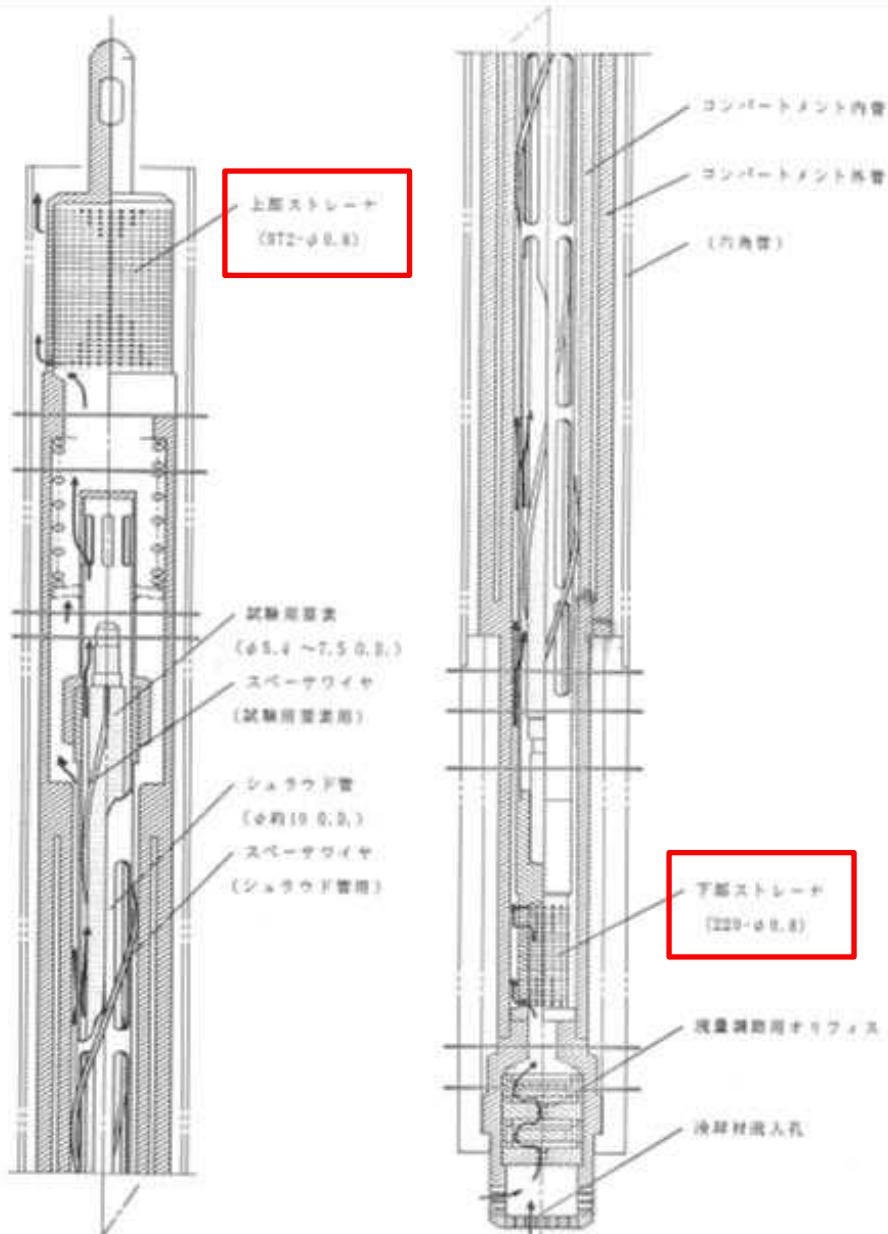


# 限界照射試験における熱設計評価結果

## 燃料要素評価結果

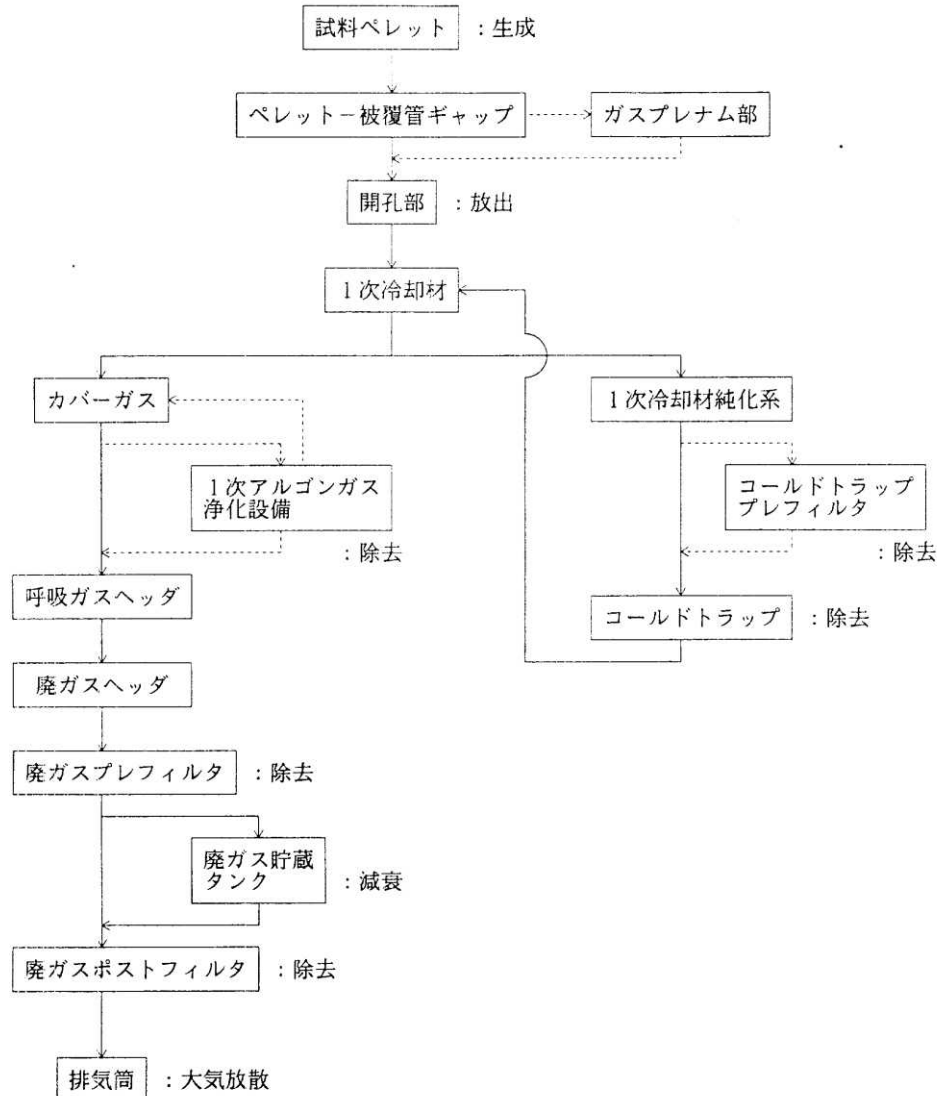
		燃料最高温度 [°C]	制限値 [°C]
定格出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,480	約2,540
	IV型限界照射試験用要素	約2,520	約2,540
過出力時	III型限界照射試験用要素 限界照射試験用補助要素	約2,590	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,630	約2,680
試験用要素の 被覆管開孔時	III型限界照射試験用要素	約2,510	約2,680
	IV型限界照射試験用要素	約2,540	約2,680
	限界照射試験用補助要素	約2,530	約2,680

# 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