



**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10月29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

## **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℃	被覆管材質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

## 「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

※設定の考え方は炉心燃料集合体と同じ

# 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

## 【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

融点(初期条件) : 約 2750°C

照射効果による低下 : 約 30°C

融点(ノミナル) : 約 2720°C

測定の不確かさ : 35°C

約 2685°C

熱設計基準値 : 2680°C

- Pu 含有率 : 32 wt.% (増加により融点低下の傾向、製造上の最大値想定)
- Am 含有率 : 2 wt.% (増加により融点僅かに低下の傾向)
- O/M 比 : 2.00 (低下により融点上昇、保守的に最も低い 2.00 想定)

- 再分布 (燃料温度が最も高くなる燃料中心部への影響)
  - Pu 含有率 : 最大の 1.3 倍\* → 42 wt.%
  - Am 含有率 : 最大の 1.5 倍\* → 3 wt.%
  - O/M 比 : 中心で製造時より低下 → 保守的に 2.00

\* 再分布量は線出力条件に近い過去の照射試験データに基づく値

- サーマルアレスト法融点測定による不確かさ : ±35°C [内訳]
  - 温度校正に関する不確かさ : ±20°C
  - 加熱曲線読み取りに関する不確かさ : ±15°C

- 数値を丸めて基準値を設定

# 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.

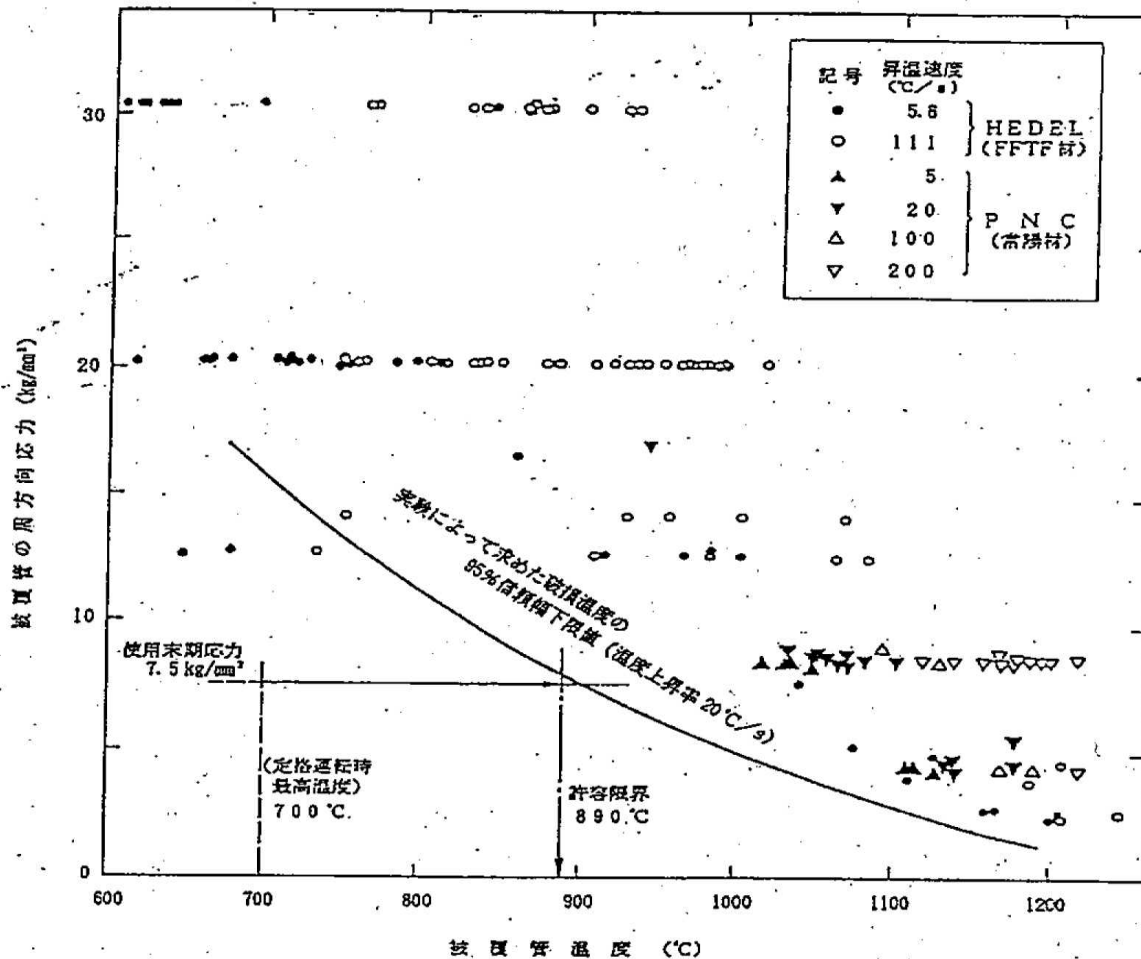
\*2 : E. A. Aitken and S.K. Evans, "A Thermodynamic Data Program Involving Plutonia and Urania at High Temperatures, Quarterly Report No. 16", GEAP-12229, 1971.

\*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】

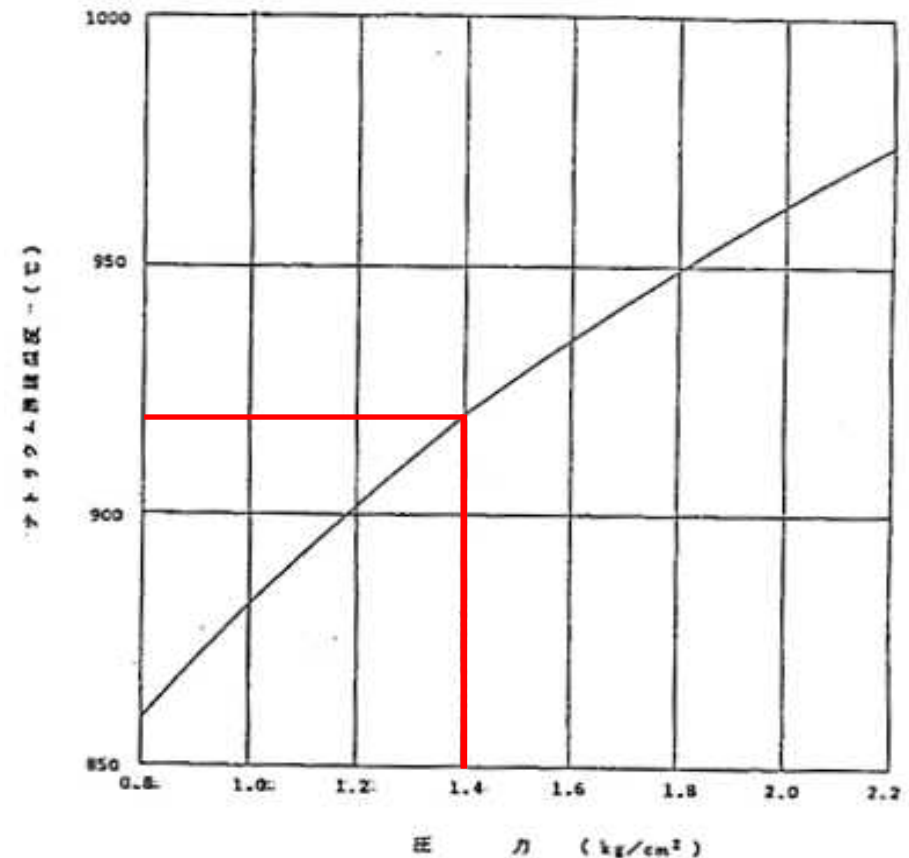
種類	炉心頂部（燃料集合体頂部）冷却材圧力
ナトリウム	約0.04N/mm <sup>2</sup> （約0.4kgf/cm <sup>2</sup> ）

## 【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】

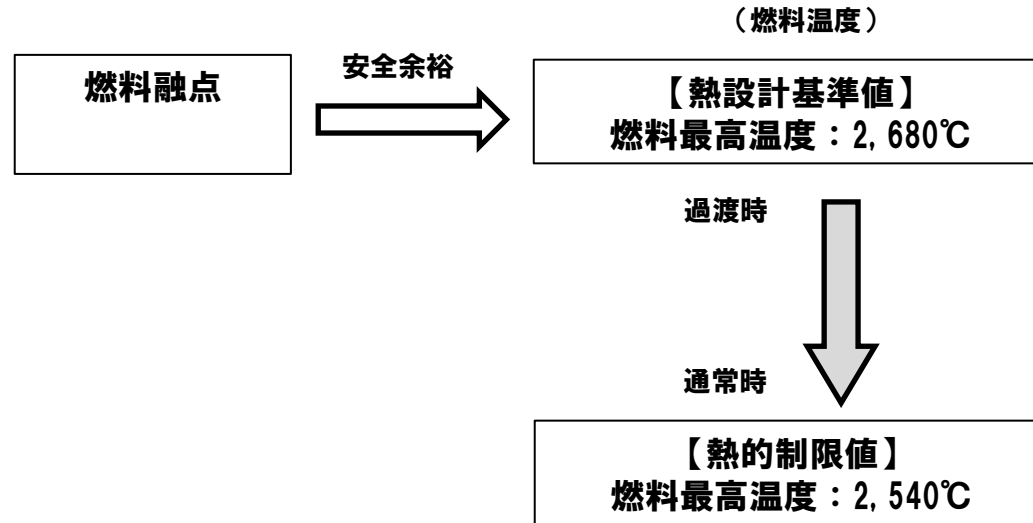
- ・ 炉内の燃料集合体頂部の冷却材圧力（水頭圧含む）における沸騰温度は**約920℃**。
- ・ 安全裕度を考慮して**910℃**と設定。
- ・ 炉心燃料要素の冷却材最高温度に対する熱設計基準値と同じ値。



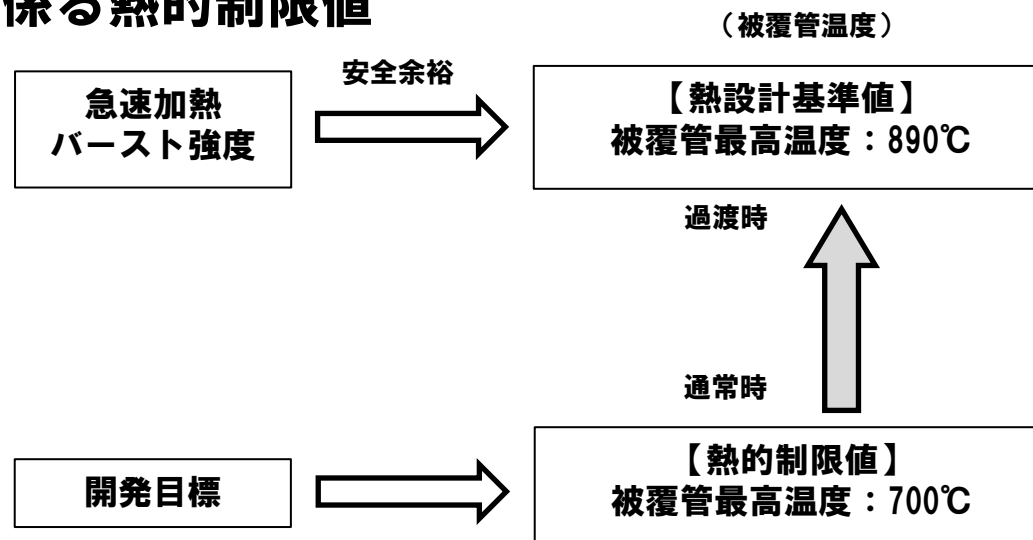
ナトリウム沸騰温度

# 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)

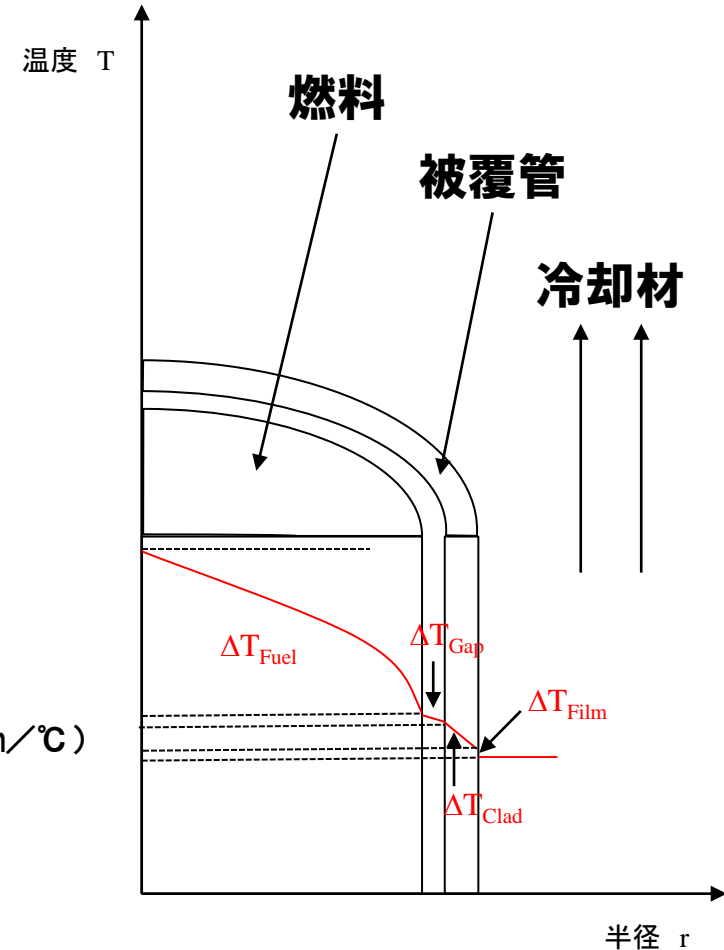
$K_C$  : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C)

$d_{Ci}$  : 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

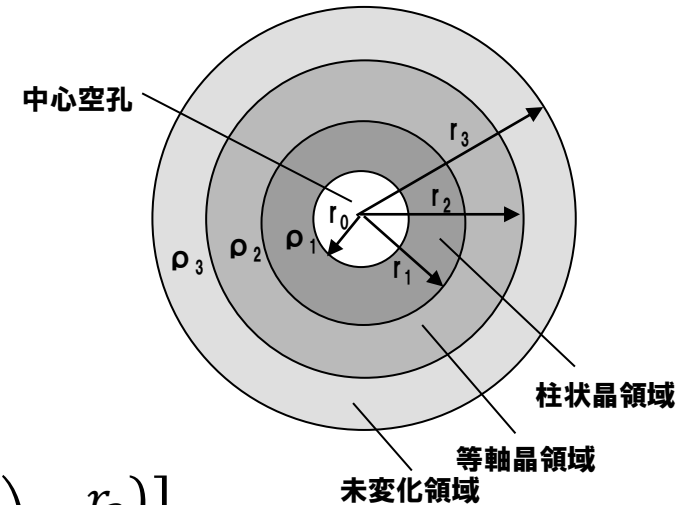
$$\int_{T_S}^{T_2} k(\rho_3, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left( 1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right)$$

### 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)  p : 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)</p> <p>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

照射燃料集合体にあつては、燃料仕様によらず共通する原子炉熱出力の測定誤差等を含む。  
 なお、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」の第27条に基づく設計及び工事の計画の認可申請の段階において、製作する燃料要素の仕様を踏まえ、燃料仕様に依存する項目について個別に工学的安全係数を定める。

照射燃料集合体の工学的安全係数：1.05

## 燃料要素の熱設計結果

### Ⅲ型特殊燃料要素

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プ破断
- 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プ変形
- ⑤ 疲労破損
- ⑥ クリープ疲労破損
- 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。

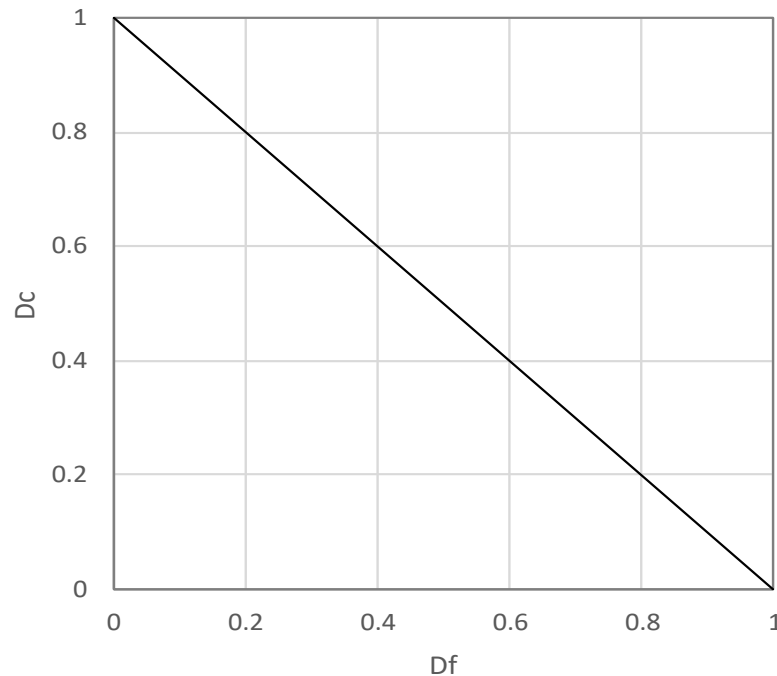
$$D_f + D_c \leq D$$

$D$  : 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

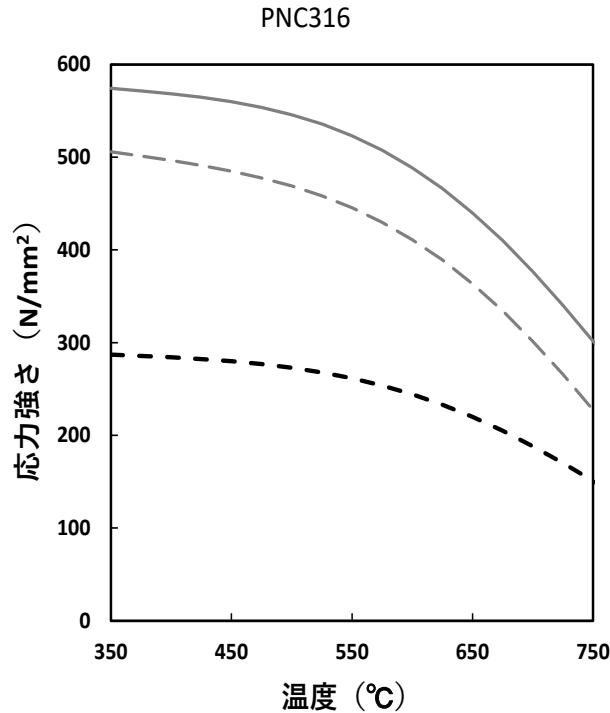
$S_y^{RT}$  : 室温での規格降伏点

$S_u^{HT}$  : 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

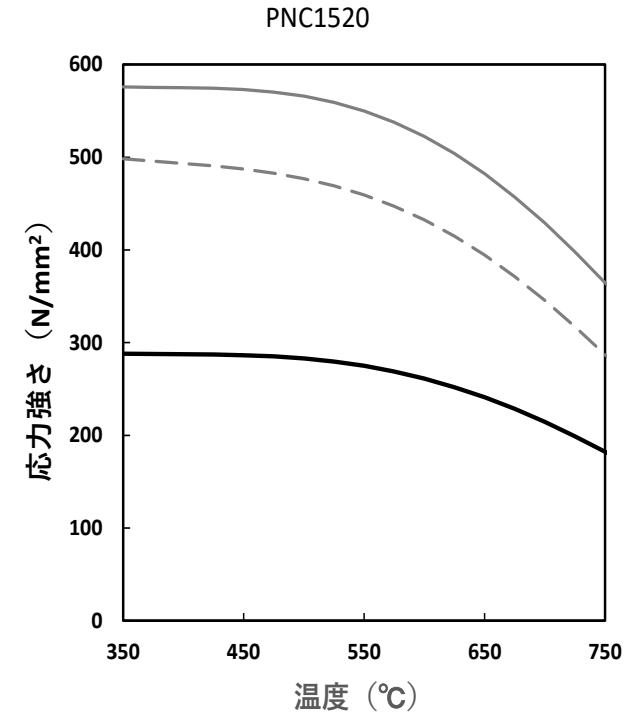
**Ⅲ型特殊燃料要素の被覆材：  
オーステナイト系ステンレス鋼**

(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)



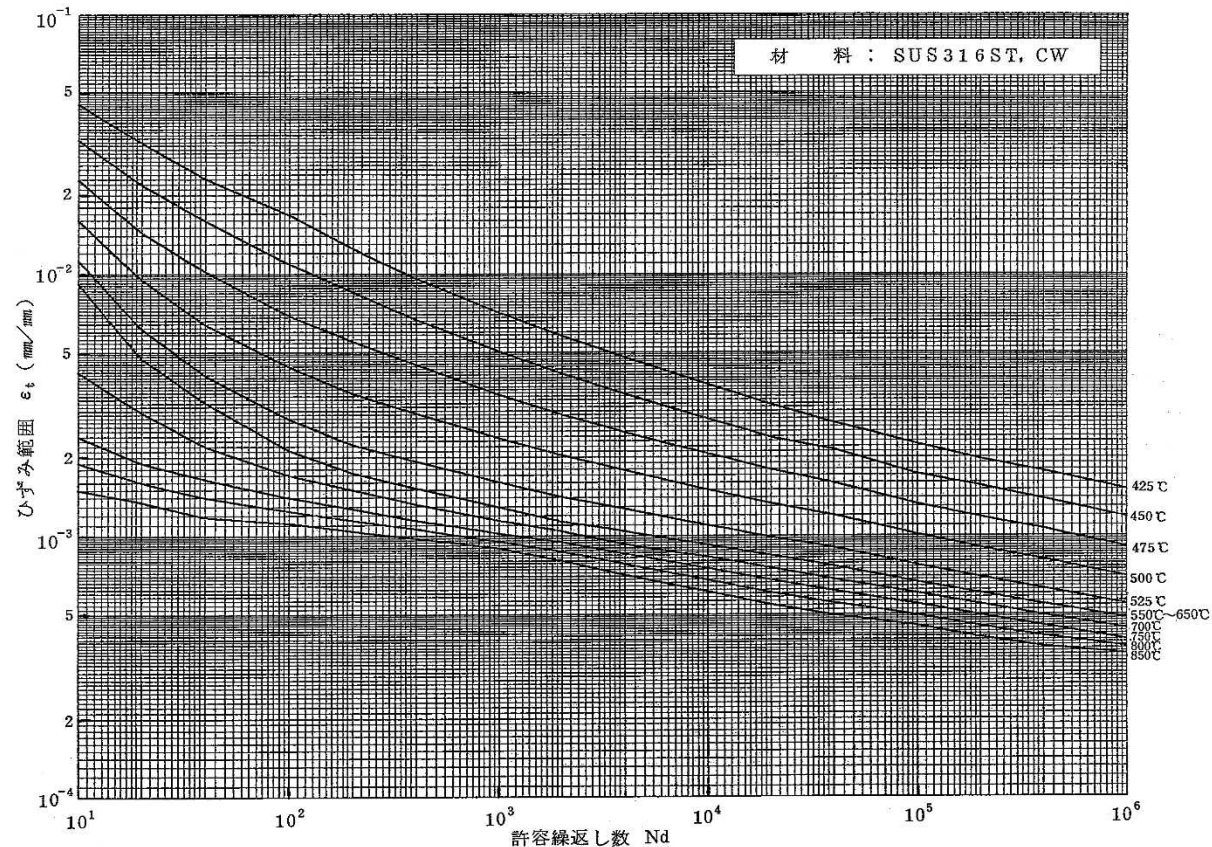
--- Sy — Su — Sm

# 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。

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

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	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

## 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。

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>