



**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
＜指摘回答＞**

2022年3月15日

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所
高速実験炉部**

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。

→詳細を「照射燃料集合体の熱設計」にて説明する。

→運転管理段階の管理方法については、No. 266の回答の詳細説明「設工認段階及び運転段階の管理方法」（3/4 第433審査会合 資料2-3）にて説明済み。

（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。

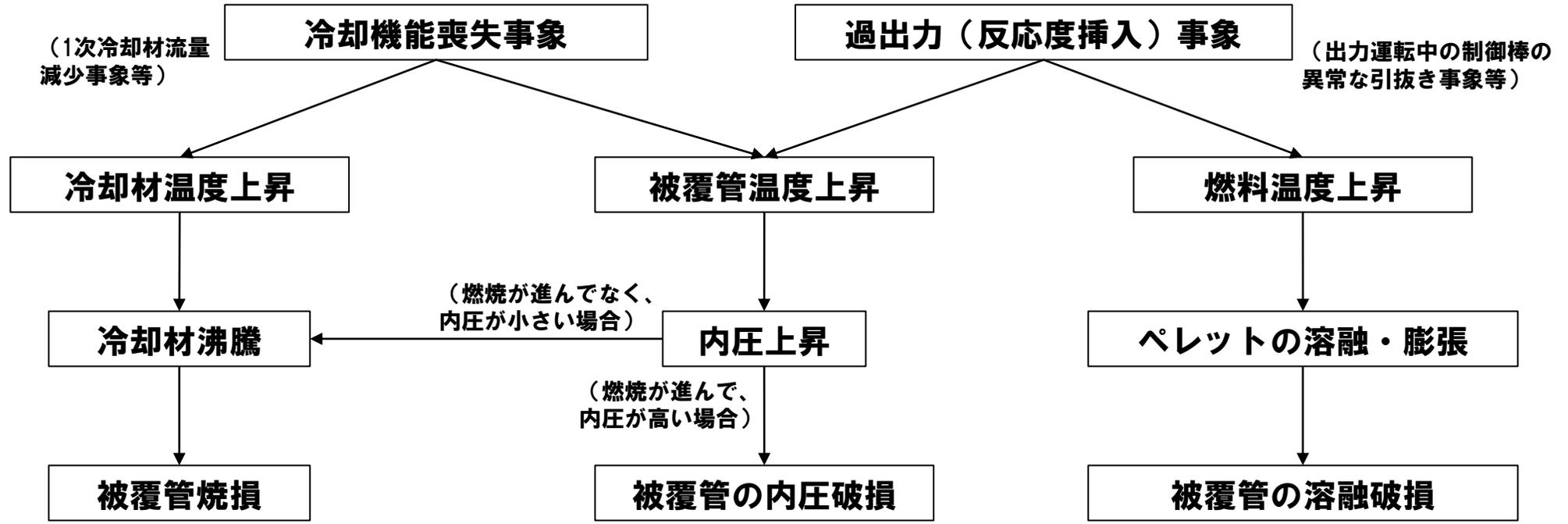
「熱設計基準値」＝許容設計限界

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。

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）⁵

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。

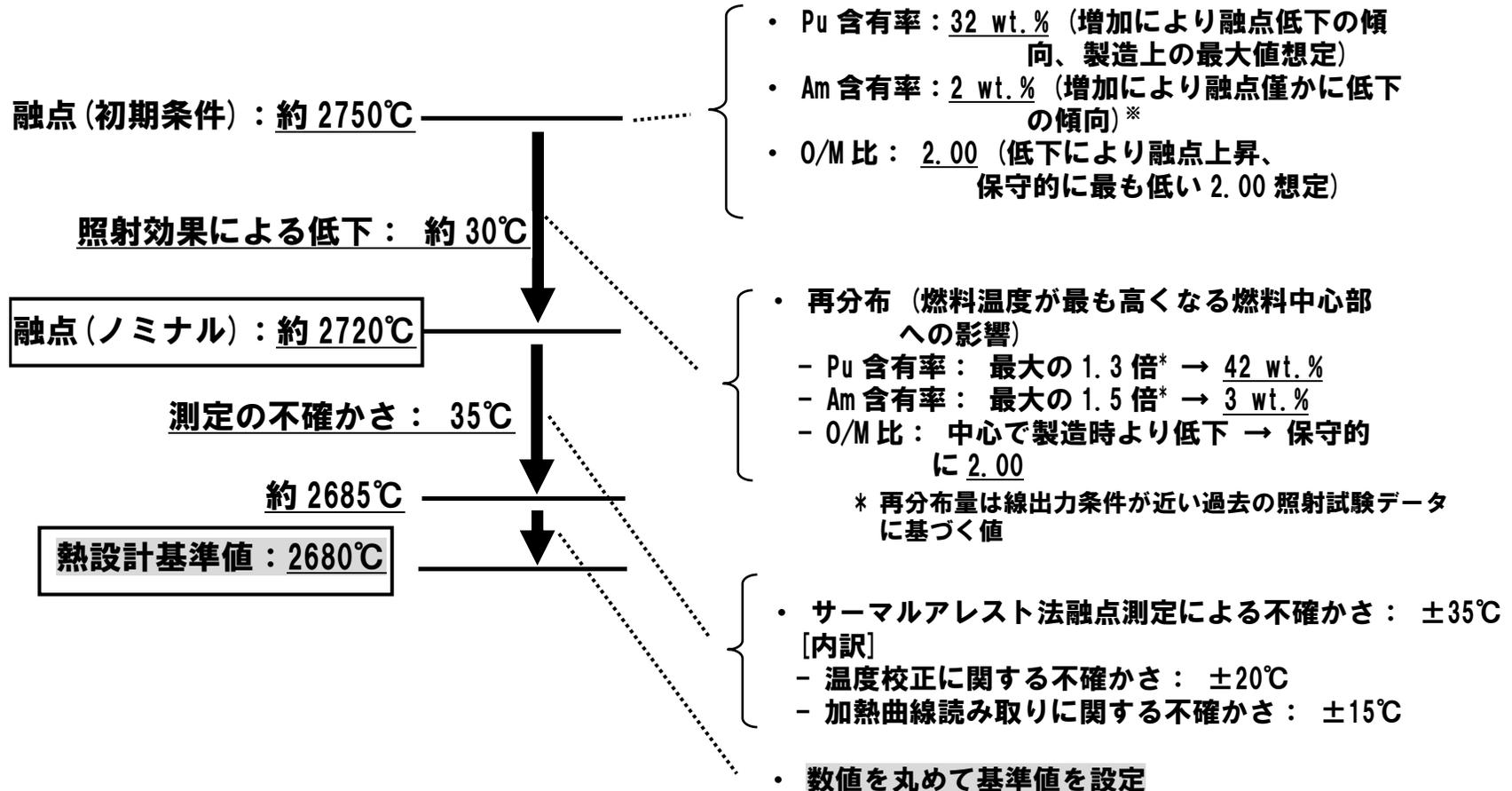
【照射燃料集合体】

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。

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

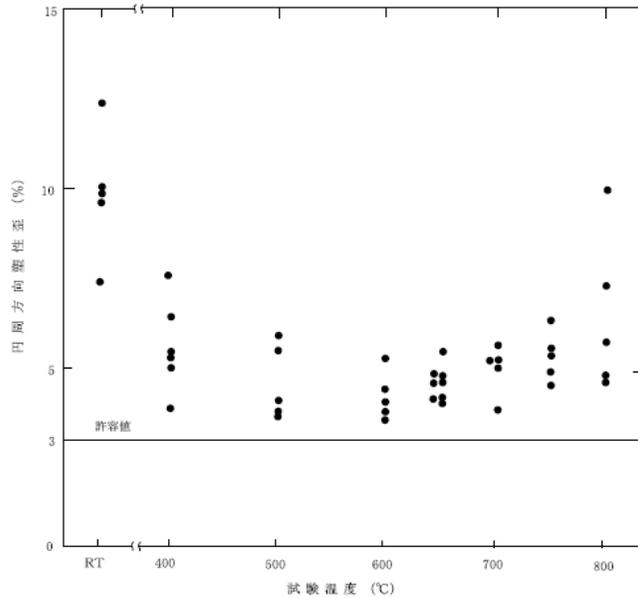
	従来		今回の変更		備考
	炉心燃料要素	Ⅲ型特殊燃料要素	炉心燃料要素	Ⅲ型特殊燃料要素	
Pu含有率	～40wt%	～40wt%	～42wt%	～42wt%	照射による再分布を考慮
O/M比	～1.99	～1.97	～2.00	～2.00	融点に関する最新知見を反映し、炉心燃料要素とⅢ型特殊燃料要素の設計条件を統一
Am含有率	未考慮	未考慮	～3wt%	～3wt%	照射による再分布を考慮
融点測定データ	E.A.Aitkenらのデータ*1, 2	E.A.Aitkenらのデータ*1, 2	加藤らのデータ*3	加藤らのデータ*3	最新知見の反映
融点	2, 675°C ≦	約2, 710°C	約2, 720°C	約2, 720°C	
測定誤差	25°C (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.

酸化物燃料を溶融させる場合の熱設計基準値の設定



SUS316の破断時の円周方向塑性歪

【被覆管過大歪の防止】

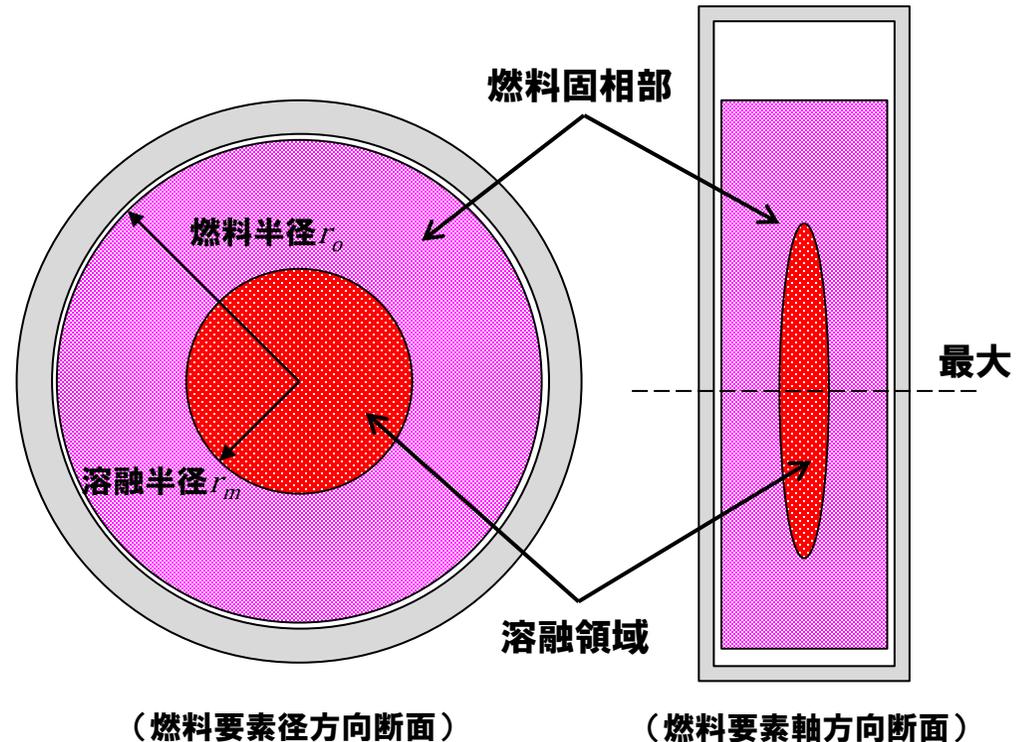
- ・被覆管の過大歪（燃料の「故障」）に対して、燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止として燃料温度に係る熱設計基準値を設定。
- ・燃料の一部溶融を伴う試験の場合は、燃料溶融割合を制限することで被覆管の機械的損傷防止を図る。
- ・被覆管の円周方向引張全歪は、SUS316の破断時の円周方向引張塑性歪の実験データに十分な設計余裕を考慮した3%以内とする。

【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。

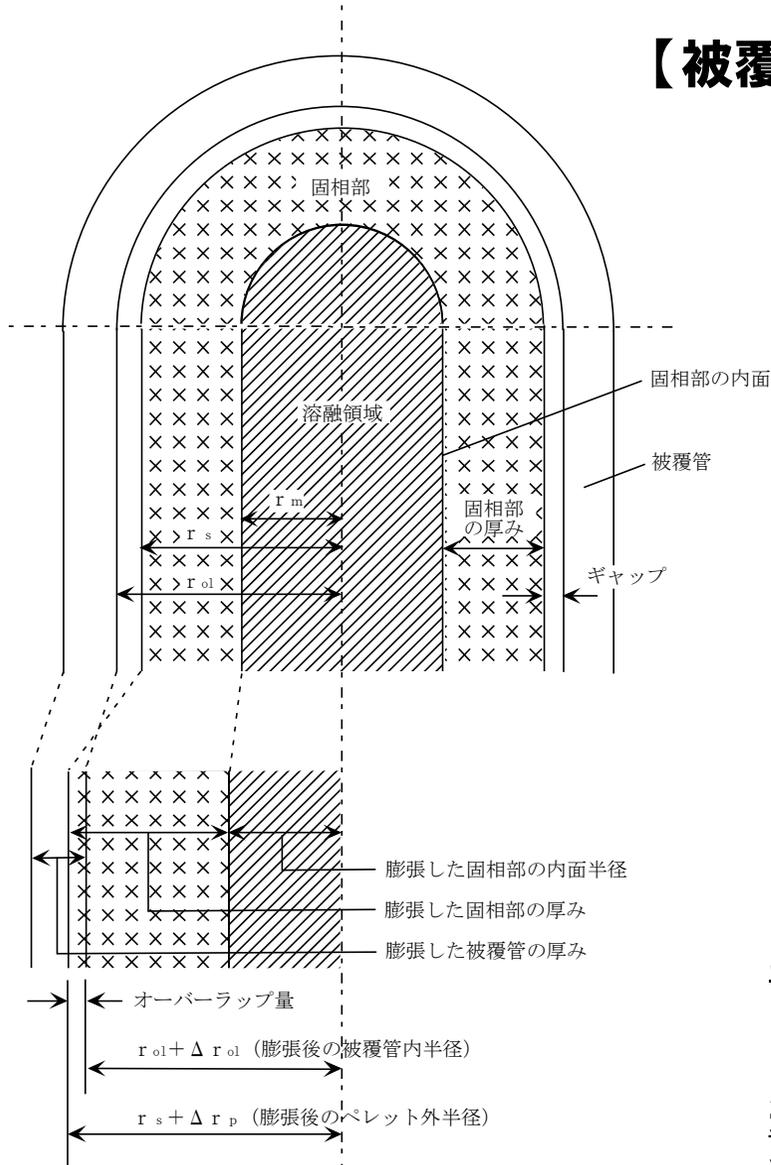
$$V_m = \frac{r_m^2}{r_o^2}$$

- ・軸方向の最大値を最大溶融割合とする。



酸化物燃料を溶融させる場合の熱設計基準値の設定

【被覆管歪の評価】



被覆管歪の評価モデル

- 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。

炭化物燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

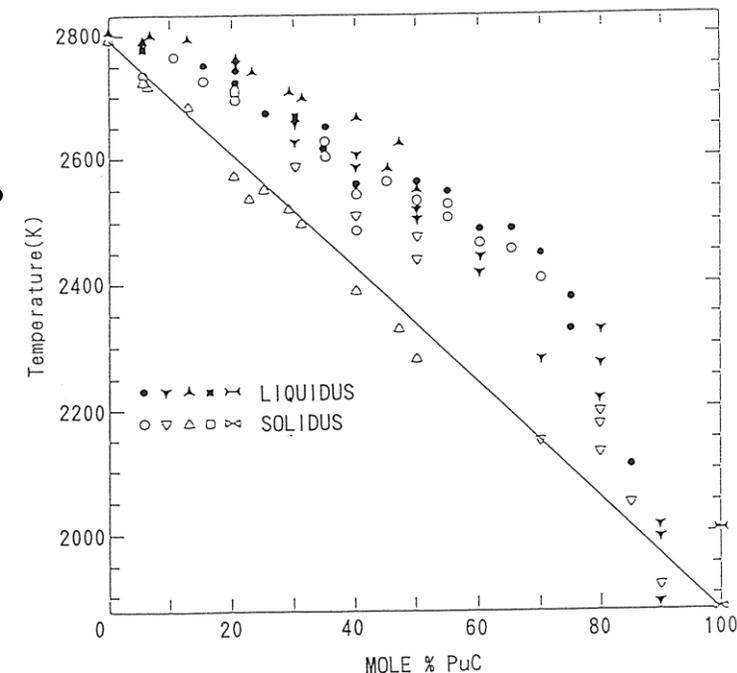
【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- 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。



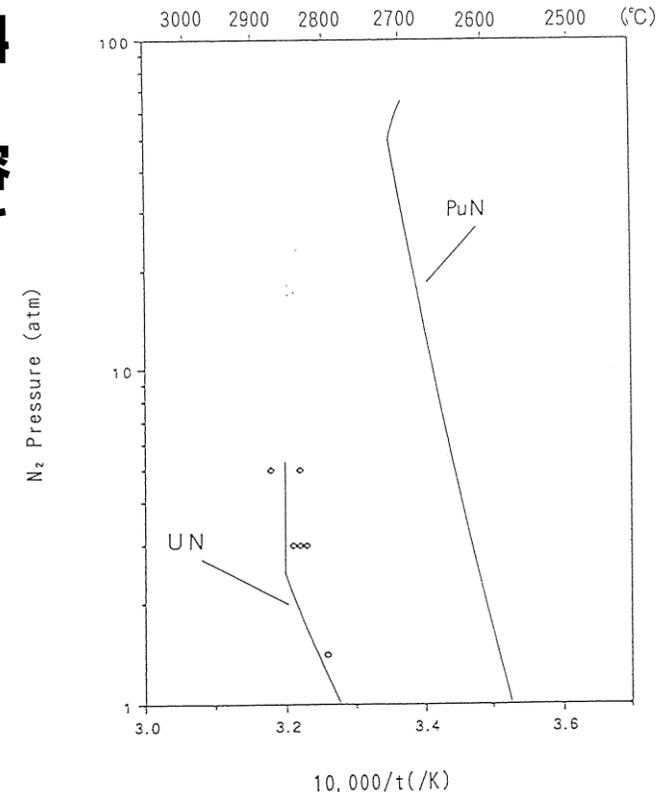
窒化物燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【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。



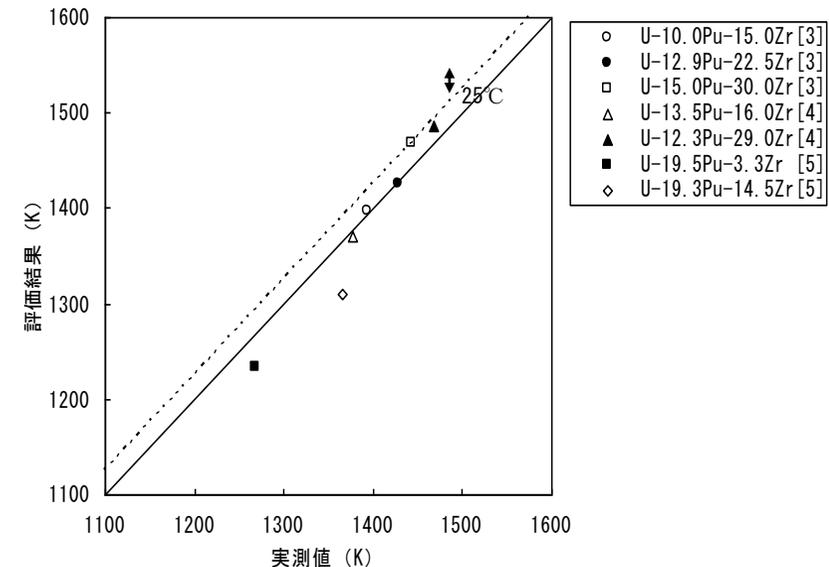
金属燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【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】

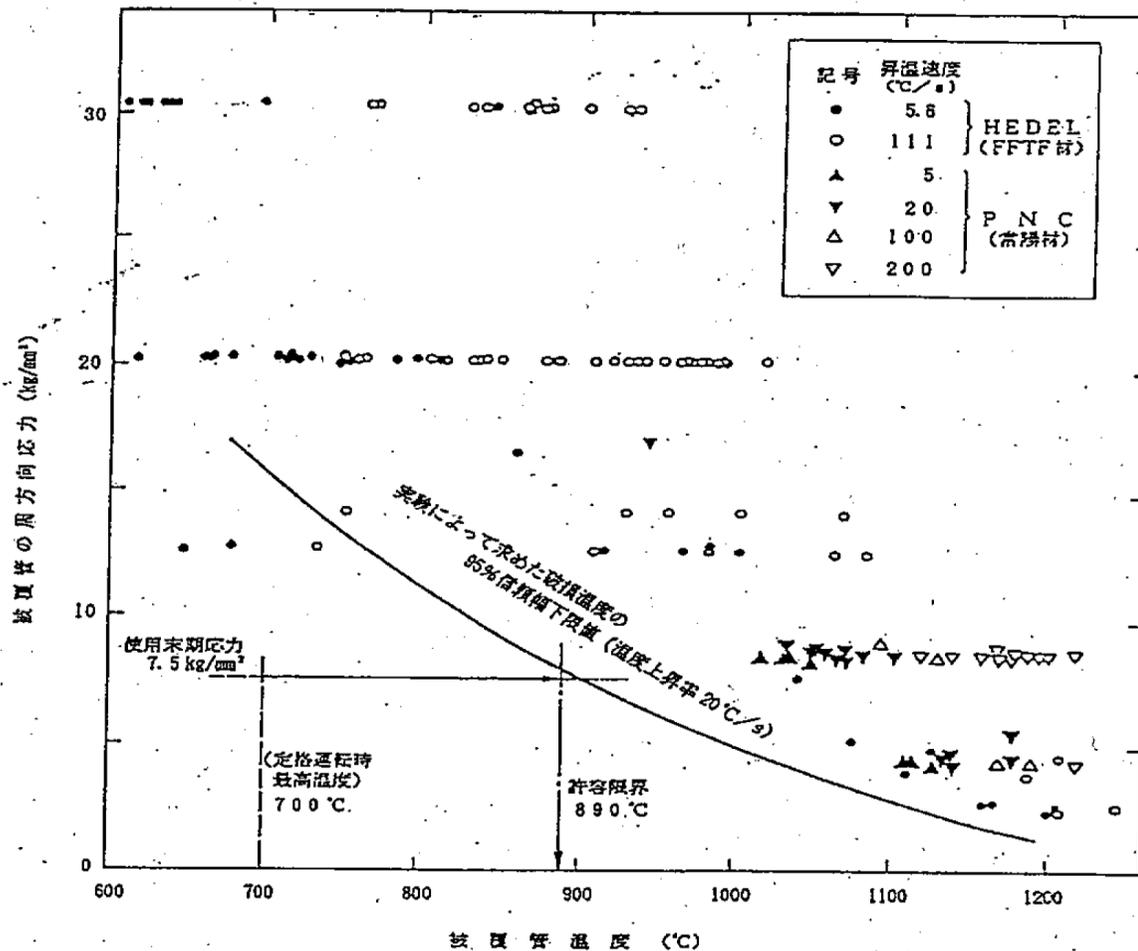
- 熔融温度を熱設計基準値とする。
- 融点は、U, Pu, Zrの組成によって決まる。
- U-Pu-Zr 3元系状態図よりU-Zr合金及びU-Pu-Zr合金の固相線温度が評価されており、燃料組成について整理して固相線温度を評価。
- 金属燃料の仕様範囲で最も固相線温度が低くなるのは、プルトニウム混合比21%、ジルコニウム混合比9%の場合で、固相線温度の評価は1,089℃。
- U-Pu-Zr合金の未照射材の融点測定値と固相線評価温度の比較（右図）から、不確かさ25℃を考慮し、熱設計基準値を1,064℃。



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)



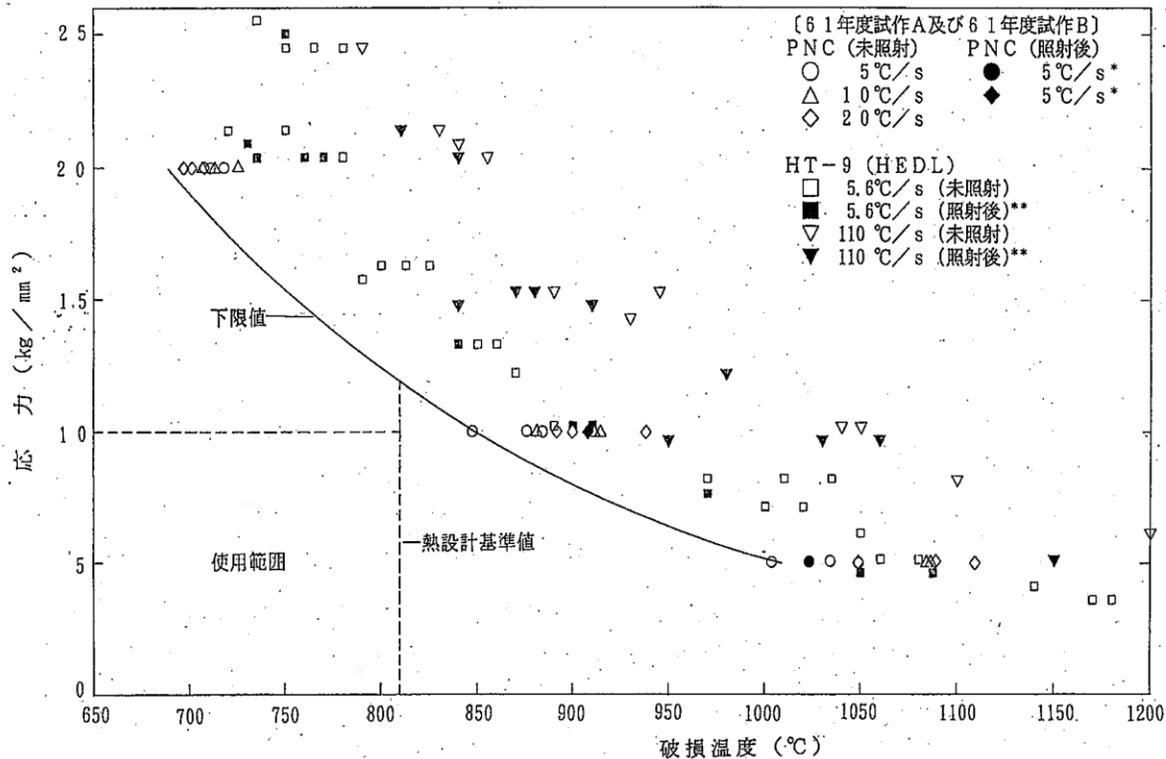
【急速加熱バースト試験結果と熱設計基準値】

- ・ 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】

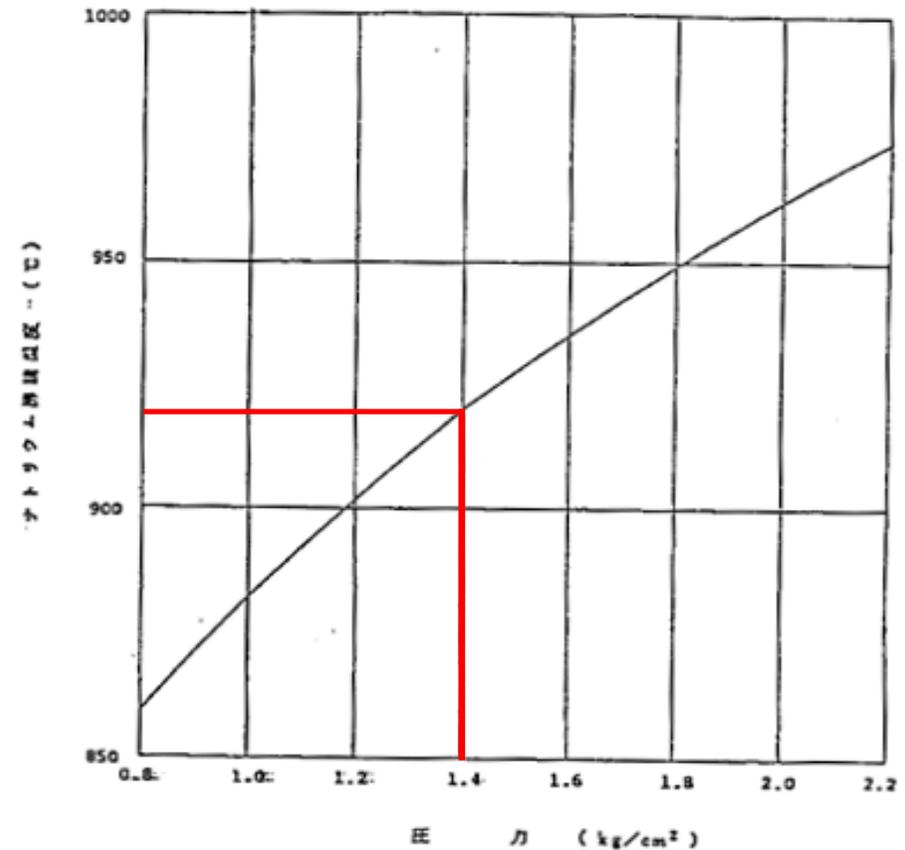
種類	炉心頂部（燃料集合体頂部）冷却材圧力
ナトリウム	約0.04N/mm ² （約0.4kgf/cm ² ）

【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】

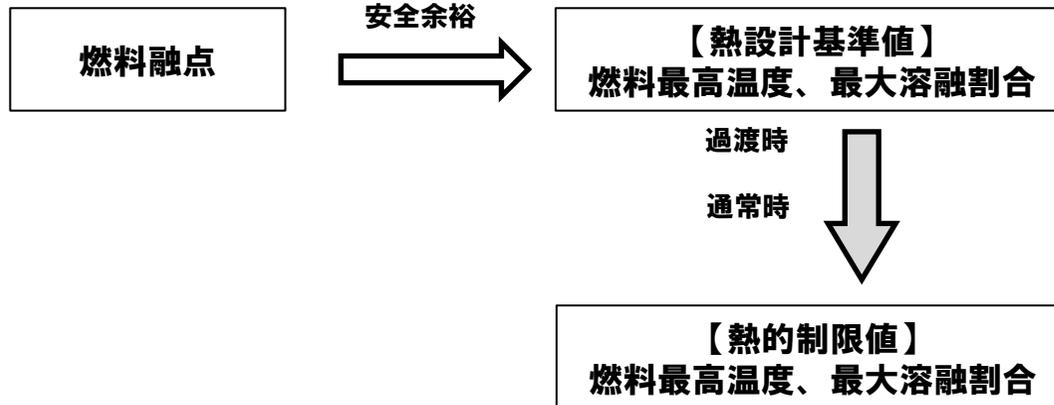
- ・ 炉内の燃料集合体頂部の冷却材圧力（水頭圧含む）における沸騰温度は**約920℃**。
- ・ 安全裕度を考慮して**910℃**と設定。
- ・ 炉心燃料要素の冷却材最高温度に係る熱設計基準値と同じ値。



ナトリウム沸騰温度

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

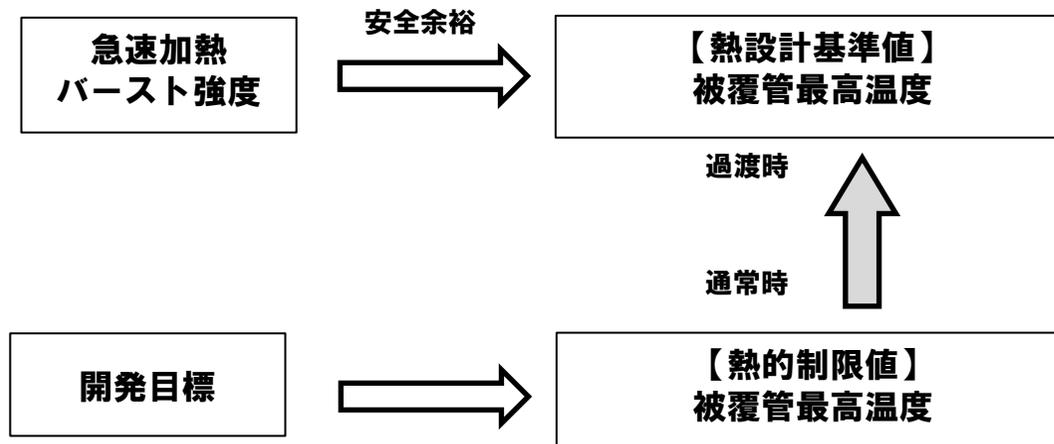
燃料最高温度：2,540℃

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℃

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)

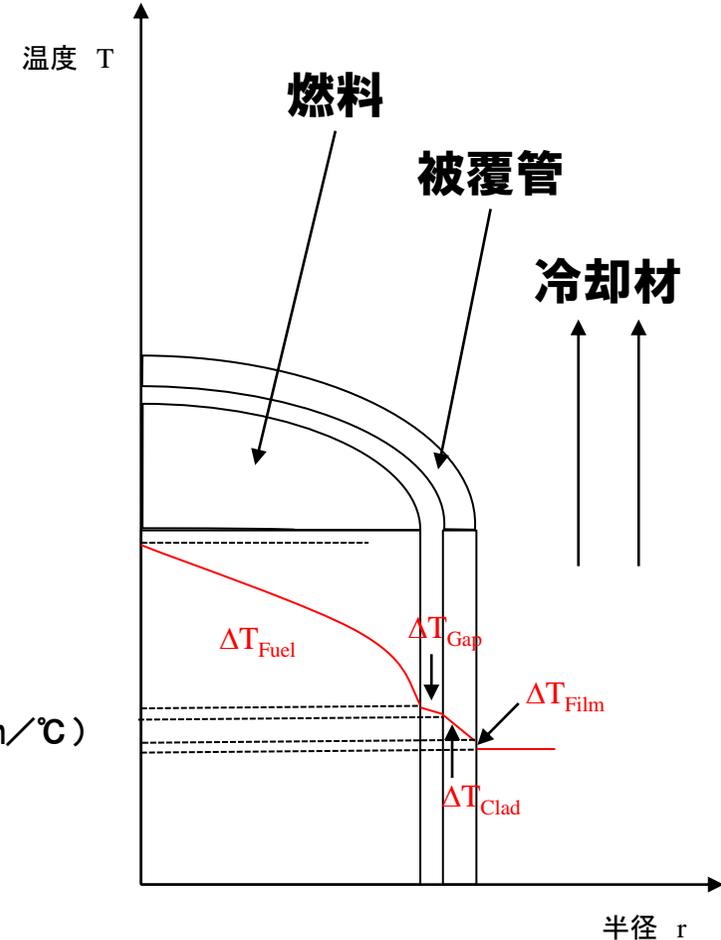
K_C : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C)

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/cm²/°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
 以下の通り組織変化を考慮した式により計算する。

a) 未変化領域

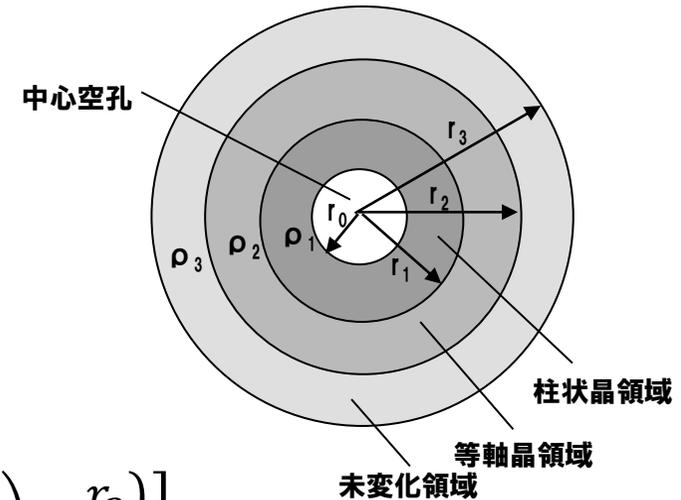
$$\int_{T_S}^{T_2} k(\rho_3, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right)$$

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)

ρ : ペレット密度 (g/cm³)

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） λ₀：100%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_p</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_p < 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_p < 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 _p	ρ = 0.97（等軸晶領域）	1,400°C ≤ T _p < 1,900°C	ρ = 燃料ペレット初期密度（不変化領域）	T _p < 1,400°C	加藤らの式
ρ = 0.99（柱状晶領域）	1,900°C ≤ T _p							
ρ = 0.97（等軸晶領域）	1,400°C ≤ T _p < 1,900°C							
ρ = 燃料ペレット初期密度（不変化領域）	T _p < 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/cm²/°C） G₀：製造時直径ギャップ幅（cm） D_{pin}：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/cm²/°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 ² /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	$\gamma = 0.9500 - 2.298 \times 10^{-4} T_N - 1.461 \times 10^{-8} T_N^2 + 5.638 \times 10^{-12} T_N^3$ γ : 冷却材密度 (g/cm ³) T_N : 冷却材温度 (°C) (100°C ~ 1,400°C)	ANL - 7323
冷却材粘性係数	$\log \mu = -1.4892 + 220.65 / T_N - 0.4925 \log T_N$ μ : 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には以下の特徴がある。

炉心燃料要素	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。
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）	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。

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

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。**
- **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。**

→先行試験用要素及び基礎試験用要素の燃料設計で考慮する点について、「先行試験用要素及び基礎試験用要素の仕様及び燃料設計の考え方」で説明する。

→熱設計基準値及び熱的制限値の設定の考え方については、No. 266の回答の詳細説明「照射燃料集合体の熱設計」にて説明する。

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及び燃料設計の考え方」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り範囲で設定している。項目1つ1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及び燃料設計の考え方」で説明する。

（先行試験用要素及び基礎試験用要素の仕様及び燃料設計の考え方）

先行試験及び基礎試験の概要

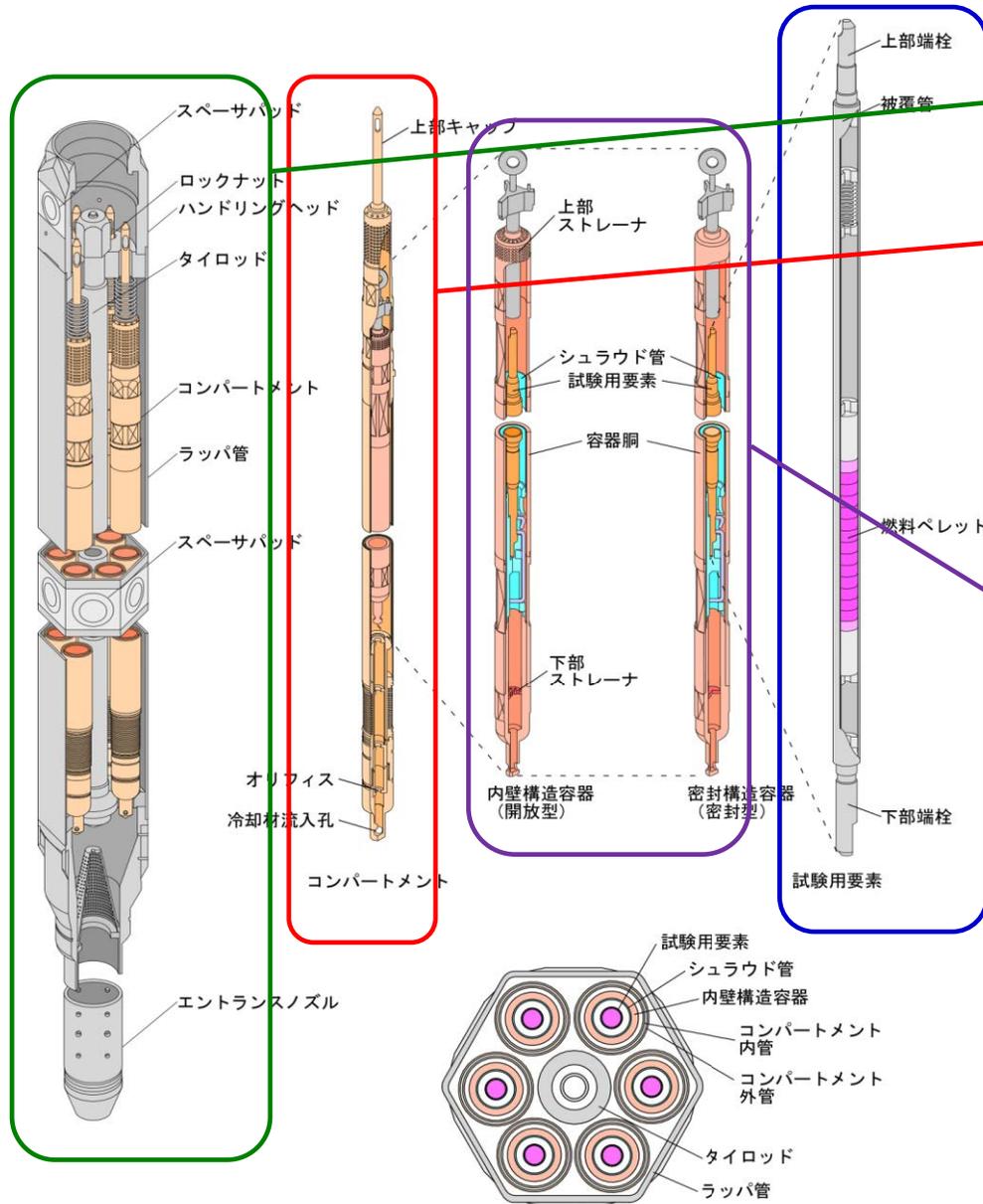
先行試験：照射挙動が不明確な材料を燃料材に用いた燃料要素を照射する試験

基礎試験：照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料要素を照射する試験

燃料要素	燃料材	被覆材
先行試験用要素	プルトニウム又はウランの単体又は混合物の酸化物、炭化物、窒化物又は金属 (試験目的に応じて、マイナーアクチニドや核分裂生成物を混入(≦50wt%)。また、ペレットでない酸化物において、ウラン金属を混入し、O/M比を調整可能(≦10wt%))	オーステナイト系ステンレス鋼又は高速炉用フェライト系ステンレス鋼(酸化物分散強化型を含む)
基礎試験用要素	プルトニウム・ウラン混合酸化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合炭化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合窒化物焼結ペレット、プルトニウム・ウラン混合金属スラグ(Pu含有率それぞれ32wt%以下、25wt%以下、30wt%以下、20wt%以下)	ステンレス鋼 (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、高速増殖炉の開発目的を踏まえて選定し、設工認段階でその仕様を明確にするとともに健全性を評価する。

照射燃料集合体（先行試験及び基礎試験用）



集合体

- ・ B型照射燃料集合体

コンパートメント

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

キャプセル

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

燃料要素

- ・ 先行試験用要素
- ・ 基礎試験用要素

B型照射燃料集合体

先行試験用要素/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	制限なし	≤ 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 / 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)	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5.5mm	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0.35mm	0.3~0.8		
燃料-被覆ギャップ [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られ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。

炭化物燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の一般的な特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- プルトニウム・ウラン混合酸化物燃料と比較して
 - 核分裂性物質密度が約30%大きい
 - 3~5倍高い熱伝導度
- FPガス放出率は、MOX燃料に比べて低い。
- 核分裂性物質密度がMOX燃料より高く、スエリングが大きい。
- MOX燃料のような被覆管腐食は起きず、被覆管との浸炭が見られる。

【燃料設計における考慮】

- 熱設計では、安全側に組織変化の効果を考慮しない設計を行う。
- 燃焼とともにFPガス放出率は上昇するが、設計においては保守的に50%一定とする。
- 被覆管歪は約2at%の燃焼度でペレットと被覆管のギャップが完全に埋まったことがわかり、スエリングは約1.5%/at%BUであったと評価されて保守的に2%/at%BUで設計する。
- 浸炭層を100 μm とし、この浸炭層を減肉とみなす。

窒化物燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合窒化物燃料の一般的な特徴】

- (U, Pu)N
- 高い重金属元素密度、高い融点、優れた熱伝導度。
- 燃料に比べ低いFPガス放出率。
- 核分裂性物質密度がMOX燃料より高く、スエリングは大きな値を示す。
- MOX燃料のような被覆管腐食は起きず、被覆管の窒化が起きる。
- 燃料の高温分解。

【燃料設計における考慮】

- 炭化物燃料と同様に組織変化が生じにくいことから、組織変化の効果を考慮しない設計を行う。
- FPガス放出率は、設計においては保守的に50%一定とする。
- 約3at%の燃焼度でペレットと被覆管のギャップが完全に埋まったことがわかり、スエリングは約1.8%/at%BUであったと評価されている。設計では保守的に2%/at%BUとする。
- 保守的に窒化層を100 μm とし、設計においてはこの窒化層を減肉とみなして評価する。

金属燃料の燃料設計における考慮

【プルトニウム・ウラン混合金属燃料の一般的な特徴】

- U-Pu-Zr合金。
- 射出鑄造・乾式再処理技術の適用による経済性向上。
- 被覆管と燃料スラグの間のギャップにナトリウムを充填。
- 燃料スラグ成分と被覆管成分との共晶反応によって境界部に液相が形成し、被覆管が侵食され、減肉する（被覆管液相腐食）。

【燃料設計における考慮】

- U-Pu-Zr合金の熱伝導度は、FPガス生成によるガス気孔形成に伴う熱伝導度の低下を考慮する。なお、燃焼が進むと燃料スラグ中のガス気孔の成長と拡散が進み、燃料スラグ外部と通じる開気孔が形成され、燃料スラグ内部にボンドナトリウムが浸入することにより熱伝導度が上昇するが、ナトリウムの燃料スラグへの浸入は考慮せず、燃焼に伴う効果を保守側に評価する。
- 被覆管-燃料スラグの熱伝達は、ボンドナトリウム部の熱伝達率をナトリウムの熱伝導のみを考慮して計算する。
- FP腐食と液相腐食を被覆管内面腐食として考慮する。

振動充填燃料の燃料設計における考慮

【振動充填燃料（バイパック、スフェアパック）の特徴】

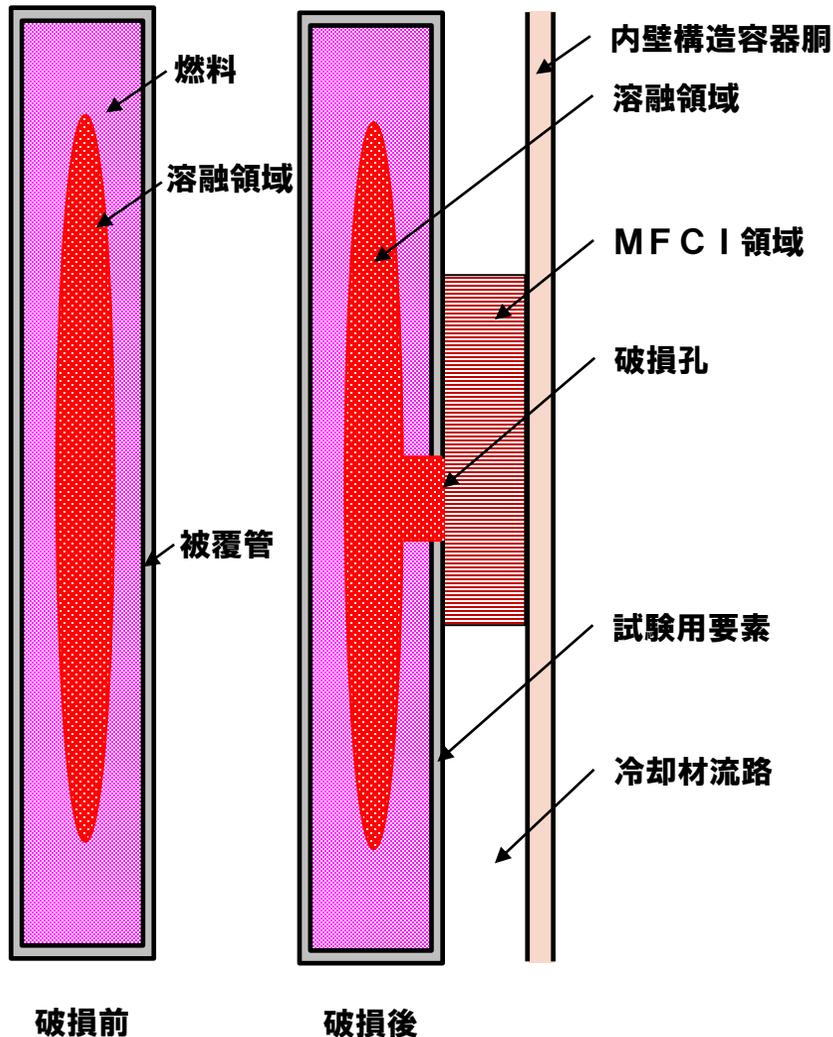
- 先行試験用要素では燃料の形状をペレットまたはスラグに限定しておらず、振動充填燃料も想定している。
- 製造工程が簡素化。
- 球状粒子燃料（スフェアパック粒子燃料）、非球状粒子燃料（バイパック顆粒燃料）。
- 熱伝導度がペレット燃料より小さい。
- 照射拳動（組織変化開始温度、組織変化領域密度、FP放出拳動）がペレット燃料と異なる。

【燃料設計における考慮】

- 物性式は最新知見も考慮し、ペレット燃料と独立に設定する。
- 組織変化開始温度や組織変化領域密度をペレット燃料より低く設定するなど、ペレット燃料とは独立に設定する。
- 設計に使用する物性式や組織変化モデルは設工認段階で定め、申請書に記載する。
- ペレット燃料と同様に被覆管の健全性を確保する設計であり、さらに万一の事故に備えて内壁構造容器を使用する。

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (1/3)

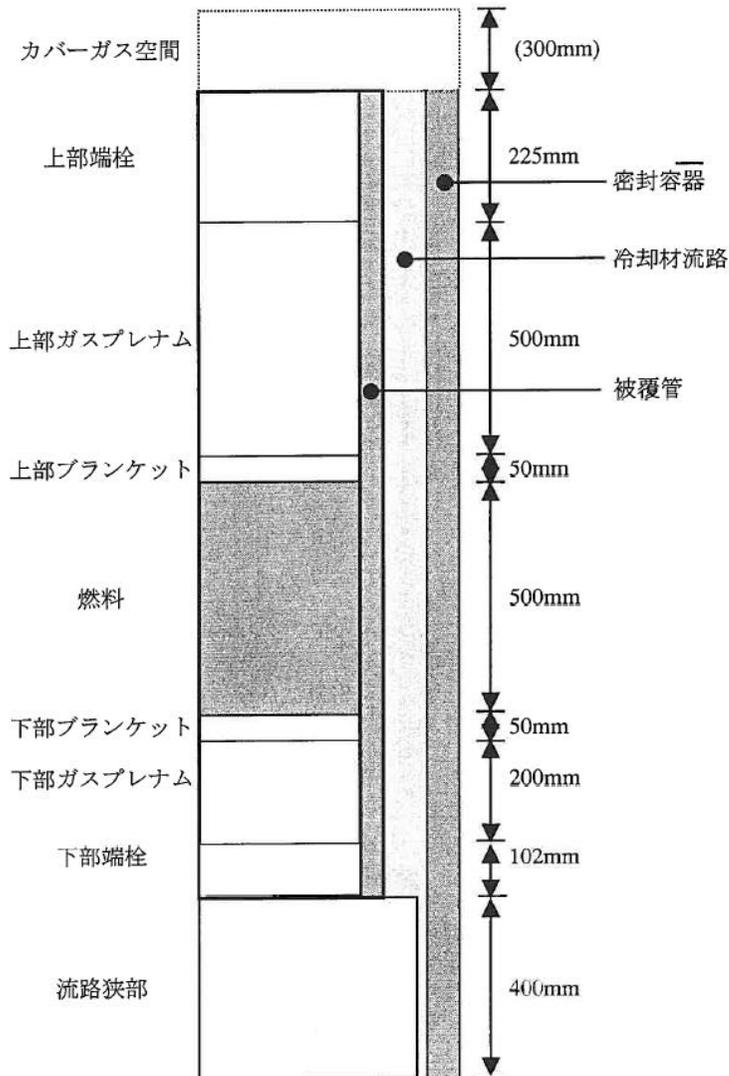
被覆管の健全性を確保する設計とするが、万一被覆管が破損しても、内壁構造容器が健全であることを確認する。



- ・ 万一、溶融燃料が内壁構造容器内のナトリウム中に放出された場合、
 - > 先行試験用要素内の核分裂性生成ガス（FPガス）が内壁構造容器内のナトリウム中へ放出。
 - > 燃料部が溶融していることもあるため、溶融燃料とナトリウムの相互作用（Molten Fuel Coolant Interaction: MFC I）による圧力が発生（左図）。
- ・ 内壁構造容器内で発生する圧力を計算コード 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。

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (2/3)

SAS4A解析モデル



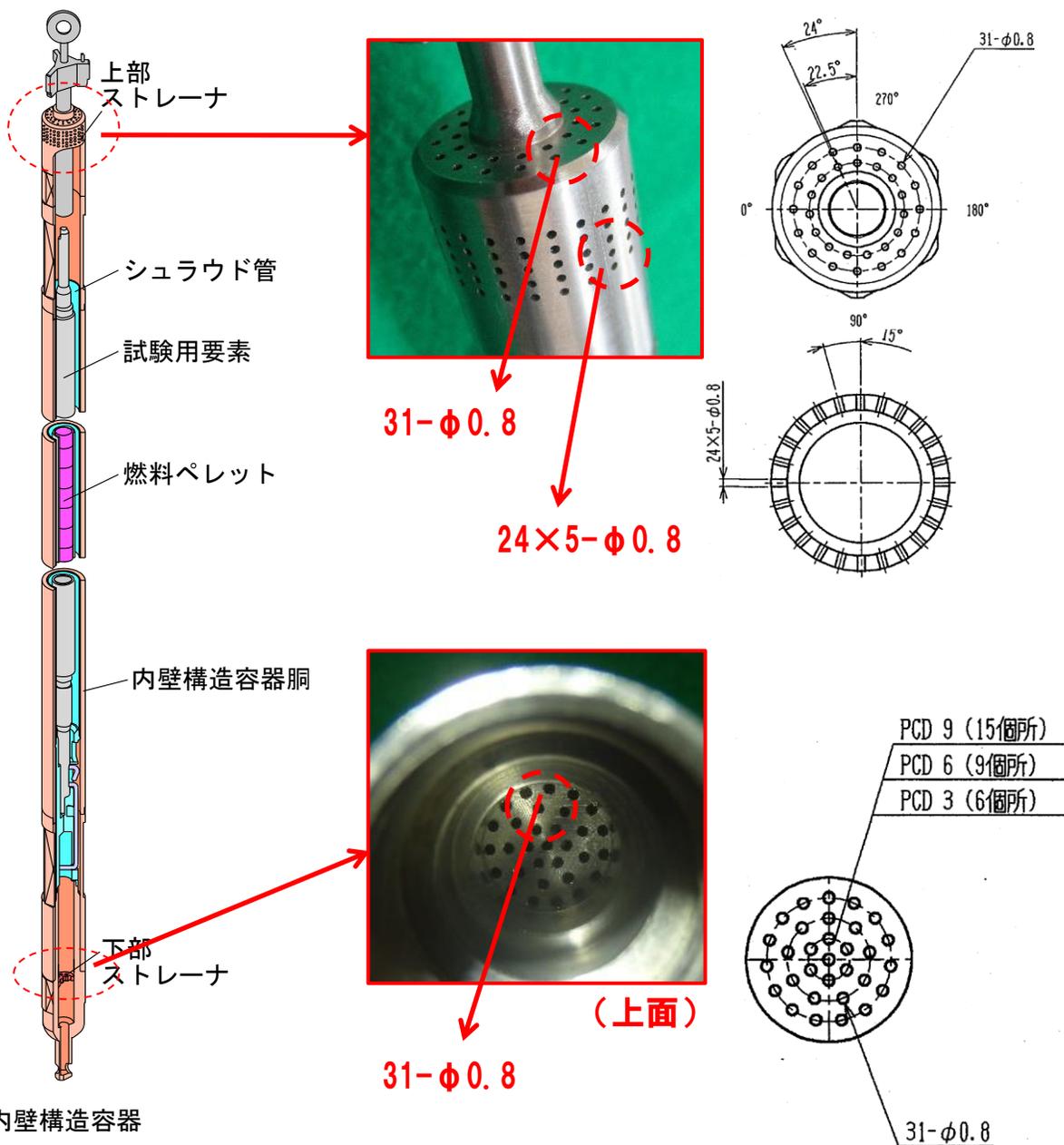
解析条件

- ・ 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

計画的に燃料を溶融させる場合の燃料設計における考慮 (3/3)



炉心の冷却を阻害する物の内壁構造容器外への放出がないことを確認する。

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

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮（1/3）

【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）】

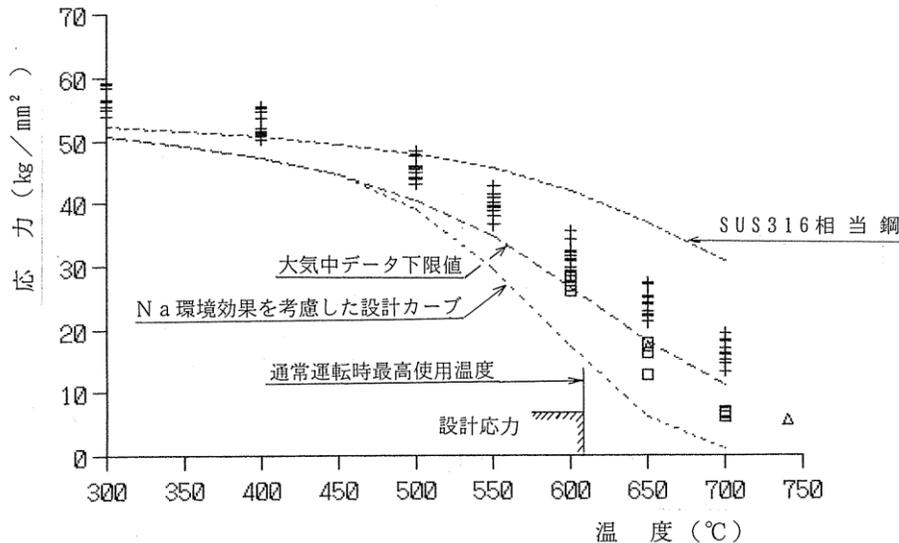
- Fe-12Crを主成分
- 高温強度（主に耐クリープ強度）を改良
（JIS鋼（405、410L）と比較すると、固溶強化元素としてMo、Wを、析出強化元素としてV、Nbを添加することで高温強度（主にクリープ強度）を向上させている。）

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮 (2/3)

【引張強さ】

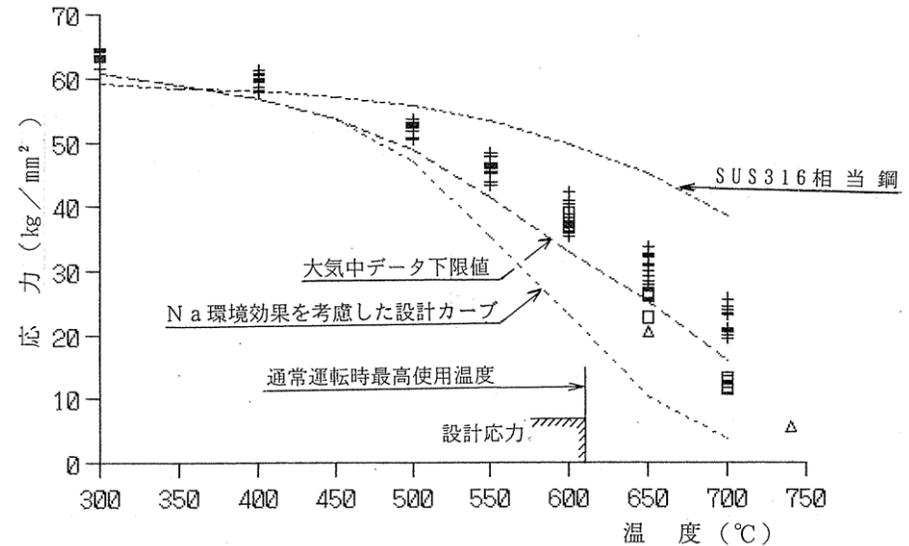
- 高温域ではSUS316相当ステンレス鋼 (PNC316) より低い値。
- 通常運転時の最高使用温度 (熱的制限値) を610℃と低く制限することで健全性を確保する。

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 ($3.7 \sim 3.9 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$, $E > 0.1 \text{ MeV}$)



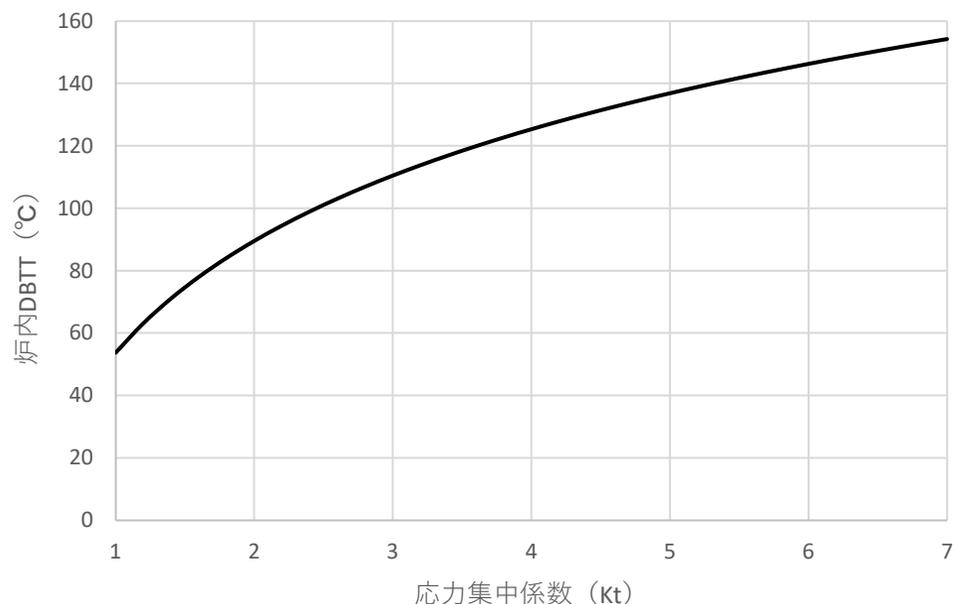
(2) 引張強さ (Su)

フェライト系ステンレス鋼の燃料設計における考慮 (3/3)³⁹

【衝撃特性】

- フェライト系ステンレス鋼は高温及び低温環境下において脆化が起こることがある。
- 運転期間中において脆化しないように設計する。

炉内でのDBTT (照射温度350°C)



- 照射温度範囲350°C～650°Cにおいて最も高いDBTT*を示す照射温度350°Cで応力集中係数を横軸に「延性-脆性遷移温度」(DBTT)を整理(左図)。
- 応力集中係数を3.0(被覆管最大)とし、被覆管肉厚最大0.8mmを考慮して試験片1mmの値で考えると、最大のDBTTで約110°Cとなる。これは運転期間中の最低温度を下回るなので、運転期間中においてその破壊形態が脆性側に遷移することはない。

*1 DBTT: 延性-脆性遷移温度 (Ductile-Brittle Transition Temperature)。温度低下により、金属の破壊挙動が延性破壊から脆性破壊に遷移する温度。

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】

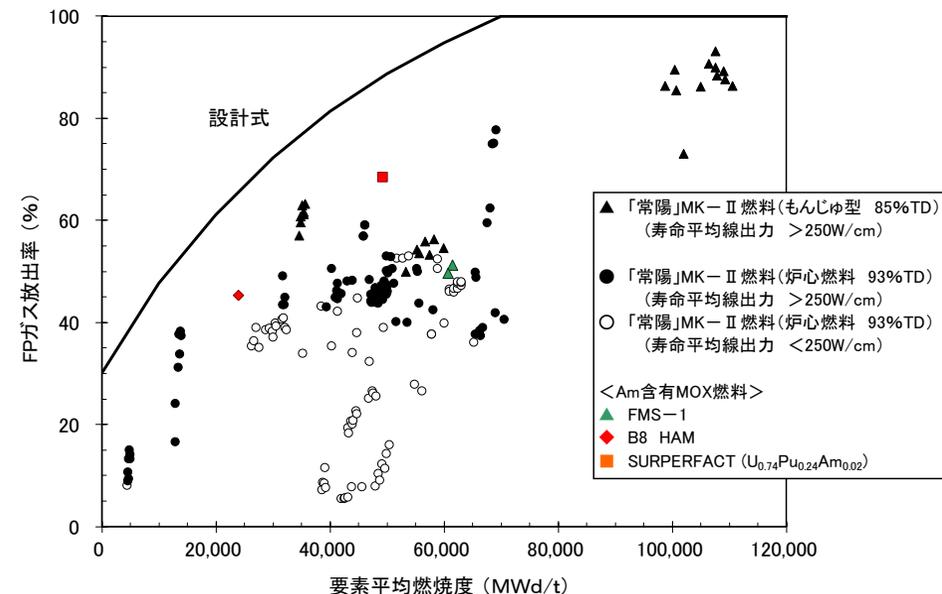
項目	値
燃料材種類	PuU混合酸化物燃料
Pu含有率 [wt%]	30
ペレット外径 [mm]	7.32
初期理論密度 [%TD]	95
ペレット密度 [g/cm ³]	10.50
O/M比	1.97
蒸発性不純物量	150 μL/g
水分	30ppm

【照射条件】

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

【計算条件】

・FPガス放出率

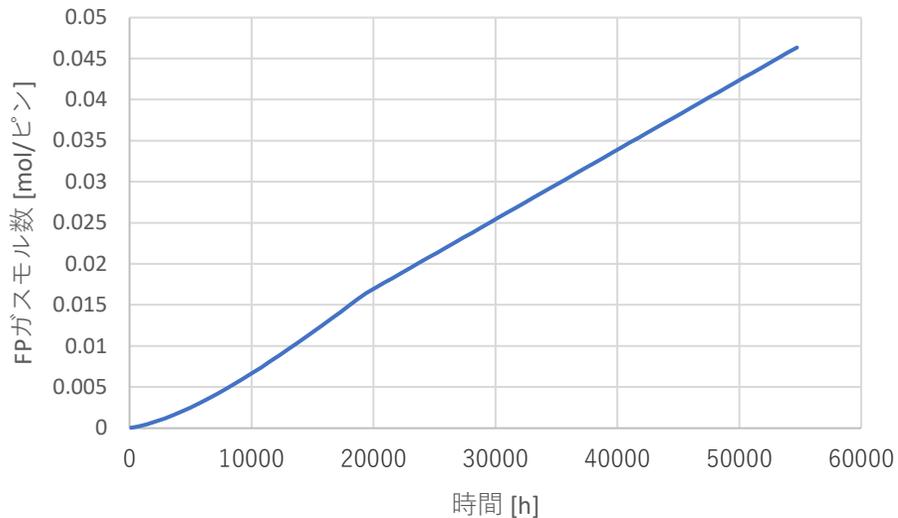


先行試験用要素の燃料仕様検討例 (2/3)

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 [g/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
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。

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
直径ギャップ [mm]	0.18	0.16	0.18
初期理論密度 [%TD]	95	95	95
被覆管種類	高Niオーステナイト 系ステンレス鋼 (A)	高Niオーステナイト 系ステンレス鋼 (A)	SUS316相当ステンレ ス鋼
被覆管外径 [mm]	8.5	7.5	8.5
被覆管肉厚 [mm]	0.5	0.45	0.5
O/M比	1.97	1.97	1.97
最大線出力密度 [W/cm]	450	640	450
被覆管最高温度	700	650	700

【応力及びクリープ寿命 分数和の計算】

- 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

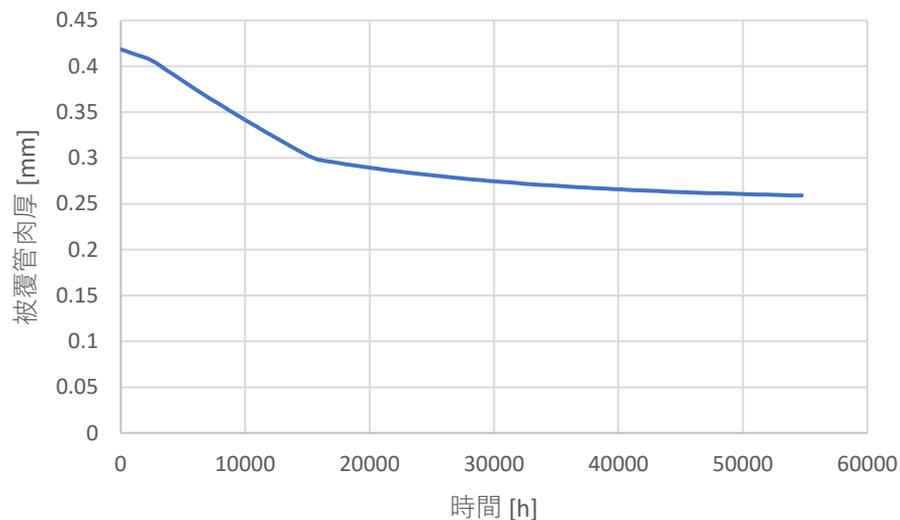
クリープ寿命分数和

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

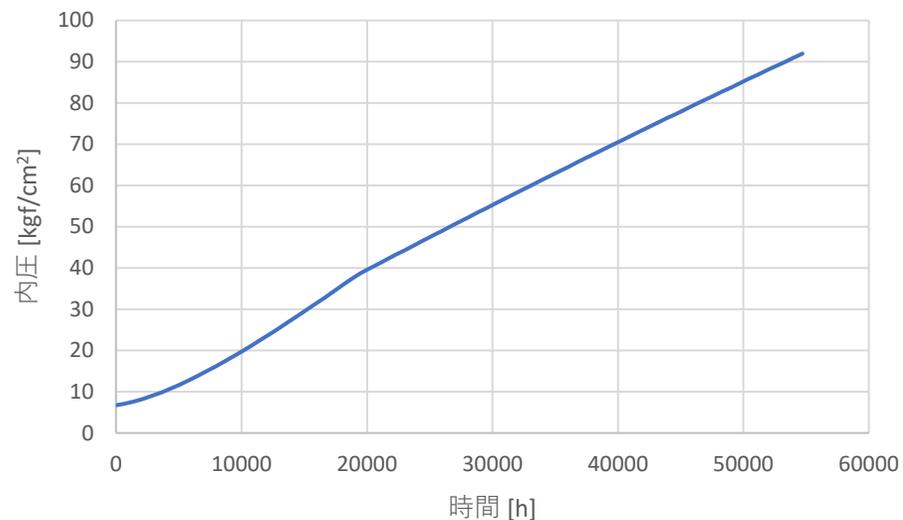
i : 負荷サイクル数
 Δt_i : 全寿命のうち、平均温度 T_i において一次一般膜応力強さが $(\sigma_r)_i$ である負荷サイクル i の累積持続時間
 t_{ri} : 温度 T_i 、応力強さ $(\sigma_r)_i$ に対する許容時間

先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計例（3/4）

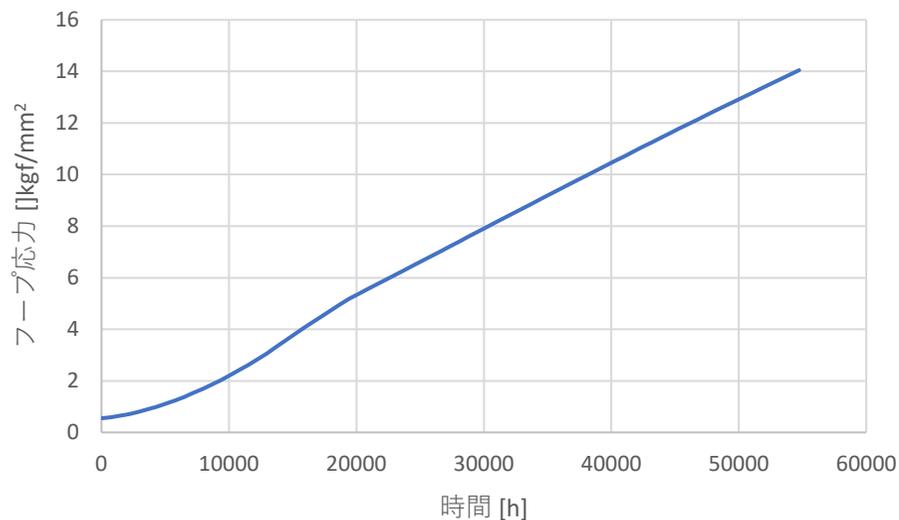
被覆管肉厚



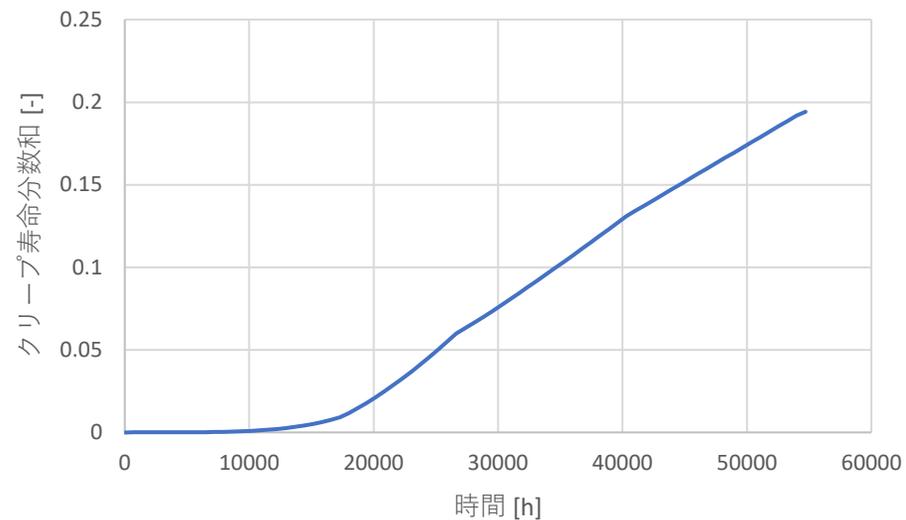
被覆管内圧



被覆管応力



クリープ寿命分数和

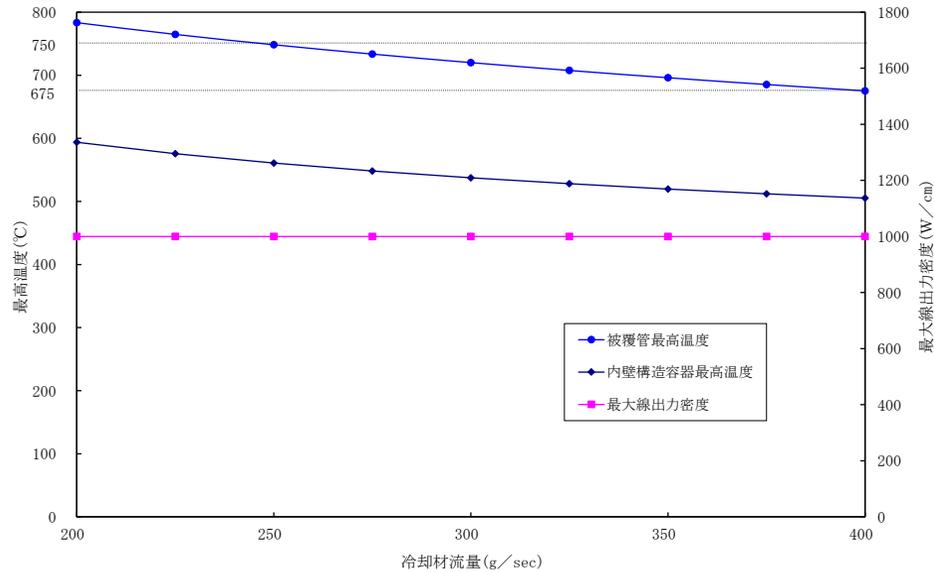


先行試験用要素・基礎試験用要素の燃料設計例（4/4）

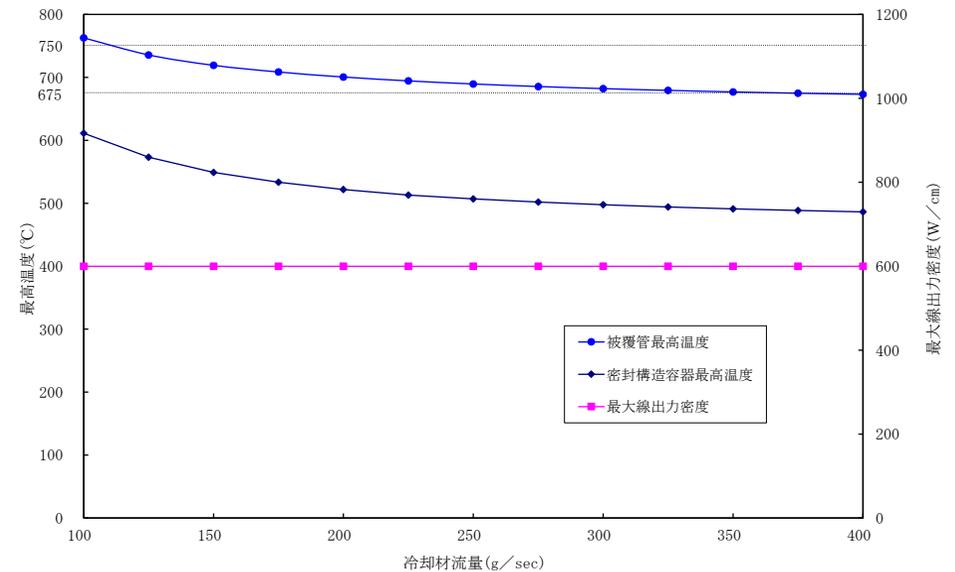
燃料要素評価結果

	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°C	約30%	約2,510°C
被覆管の歪(燃料と被覆管の相互作用)	—	約1%	—
被覆管内圧	約9.02MPa	—	約7.09MPa
クリープ寿命分数和	約0.2	—	約2.0
被覆管一次膜応力 (過出力時)	約143.3N/mm ² (Sm : 153.5N/mm ²)	約6.8N/mm ² (Sm : 228.4N/mm ²)	約113.0N/mm ² (Sm : 118.3N/mm ²)

内壁構造容器・密封構造容器の熱設計



内壁構造容器の最高温度と冷却材流量の関係



密封構造容器の最高温度と冷却材流量の関係

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

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