



**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22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。

（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。

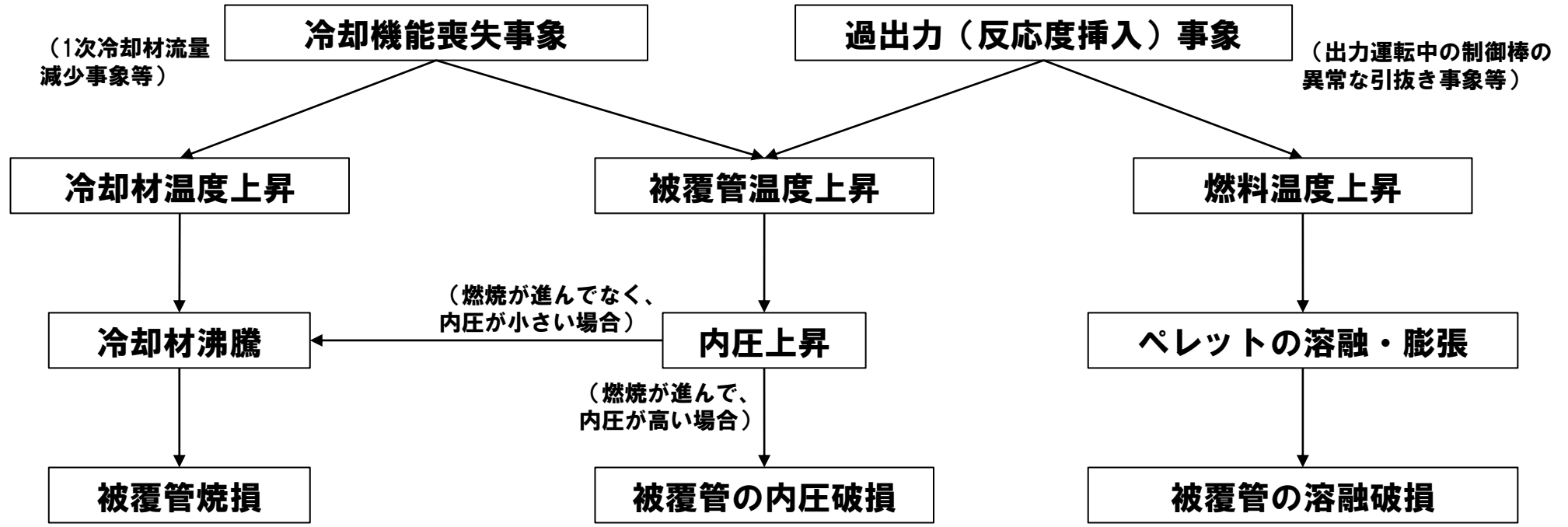
「熱設計基準値」＝許容設計限界

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）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。

照射燃料集合体の熱設計基準値の一覧

被覆材種類、 肉厚 [mm]	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

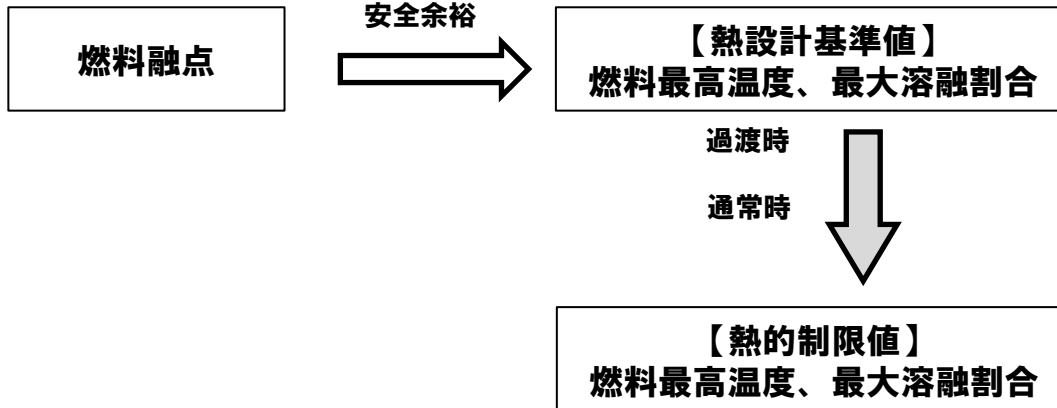
基礎試験：照射挙動が不明確な材料を被覆材に用いた燃料要素を照射する試験

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

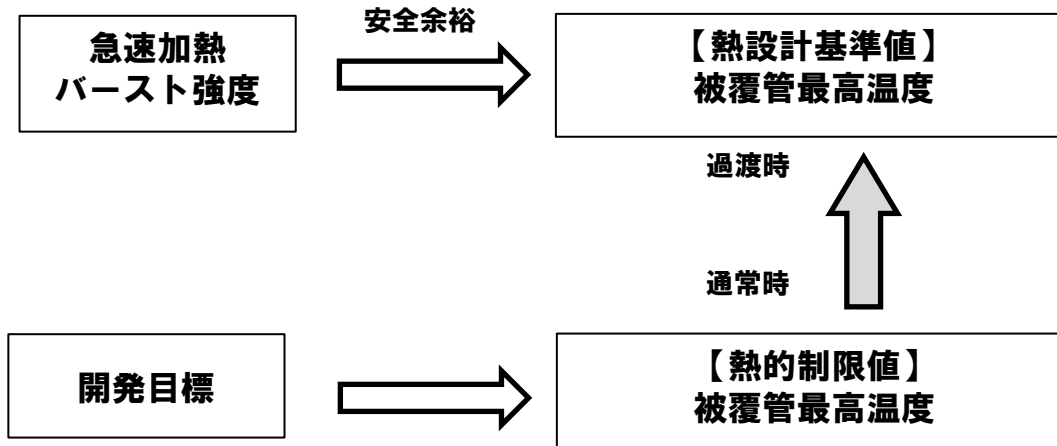
燃料最高温度：2,540℃

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℃

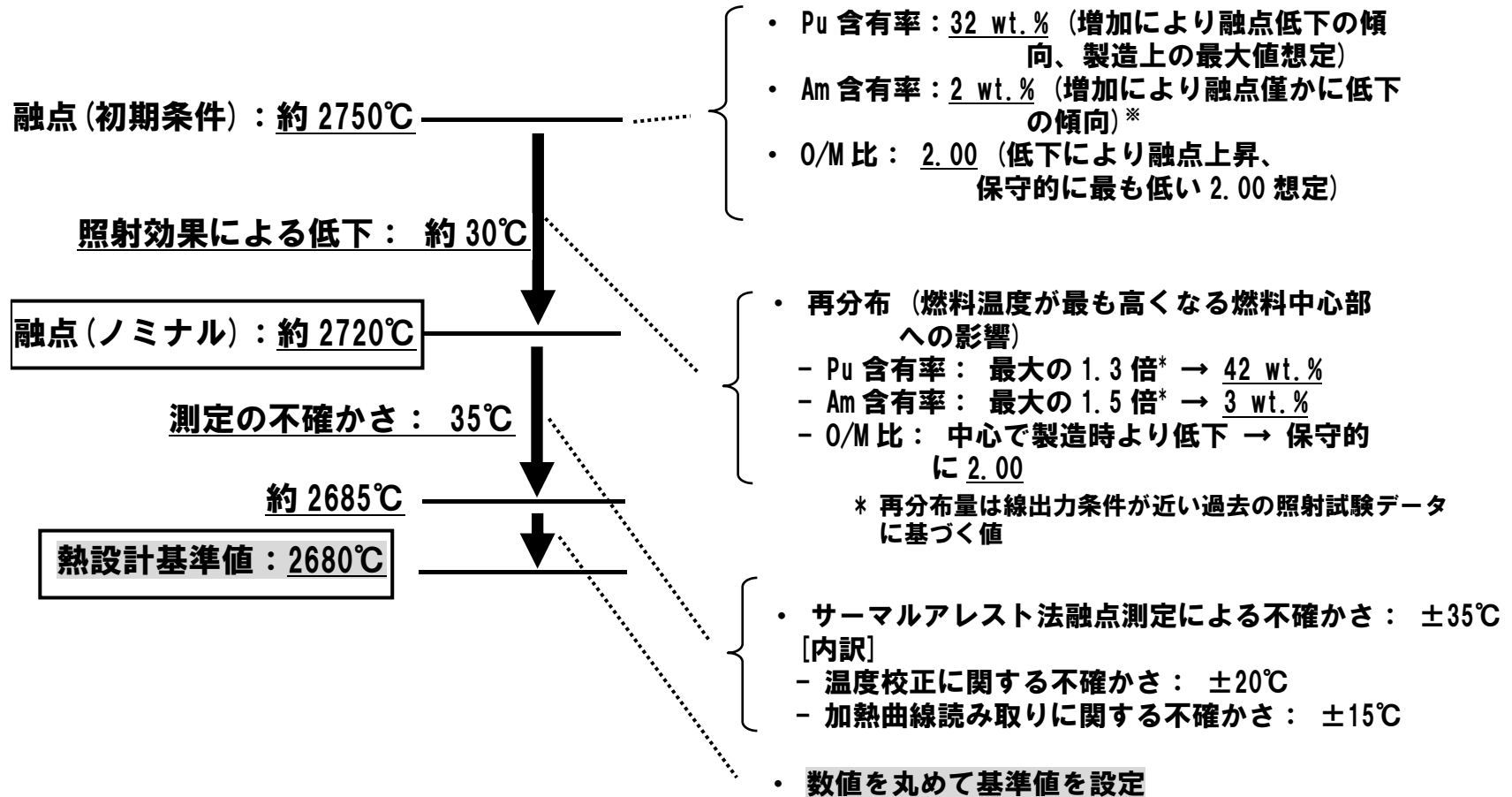
照射燃料集合体に係る熱設計の制限の管理方法

	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 許可 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、熱的制限値を定める。 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。 	<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、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。

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

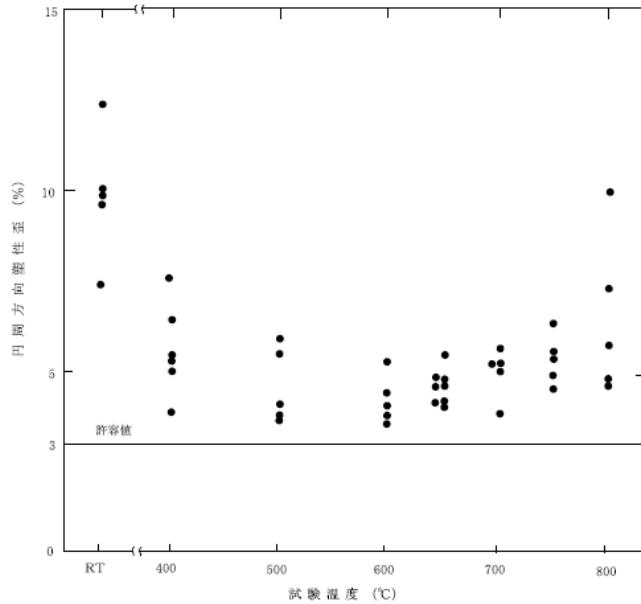
	従来		今回の変更		備考
	炉心燃料要素	照射燃料 (酸化物)	炉心燃料要素	照射燃料 (酸化物)	
Pu含有率	~40wt%	~40wt%	~42wt%	~42wt%	照射による再分布を考慮
O/M比	~1.99	~1.97	~2.00	~2.00	融点に関する最新知見を反映し、炉心燃料要素とIII型特殊燃料要素の設計条件を統一
Am含有率	未考慮	未考慮	~3wt%	~3wt%	照射による再分布を考慮
融点測定データ	E.A.Aitkenらのデータ*1, 2	E.A.Aitkenらのデータ*1, 2	加藤らのデータ*3	加藤らのデータ*3	最新知見の反映
融点	2, 675°C ≦	約2,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

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】

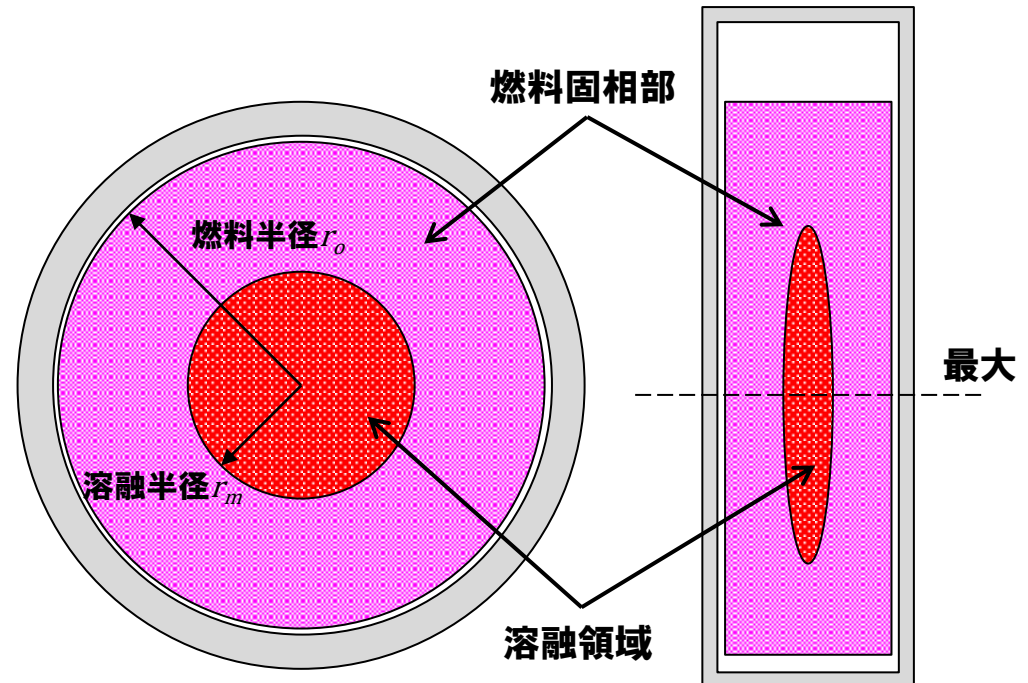
- ・被覆管の過大歪（燃料の「故障」）に対して、燃料溶融による被覆管の機械的損傷防止として燃料温度に係る熱設計基準値を設定。
- ・燃料の一部溶融を伴う試験の場合は、燃料溶融割合を制限することで被覆管の機械的損傷防止を図る。
- ・被覆管の円周方向引張全歪は、SUS316の破断時の円周方向引張塑性歪の実験データに十分な設計余裕を考慮した3%以内とする。

【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。

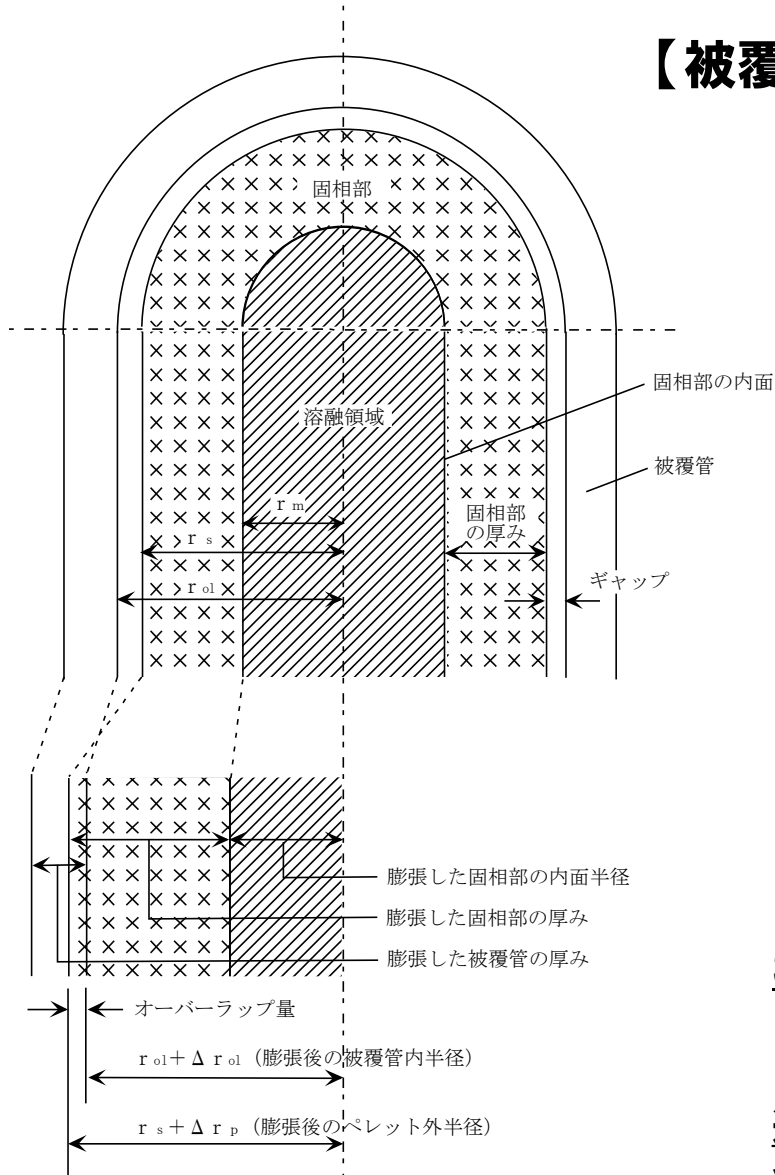


(燃料要素径方向断面)

(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

【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

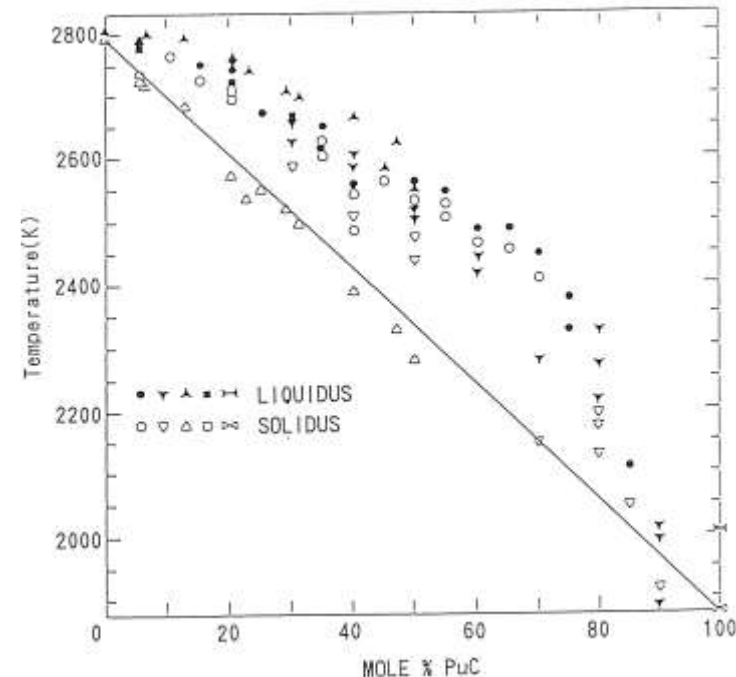
【プルトニウム・ウラン混合炭化物燃料の特徴】

- $(U, Pu)C$ 、 $(U, Pu)_2C_3$
- 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。



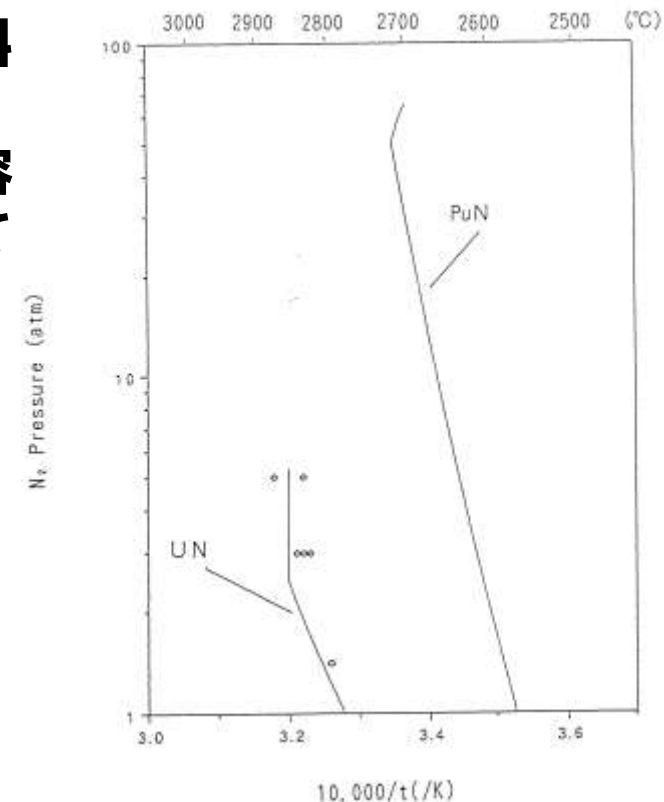
窒化物燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【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℃。実験値の不確かさ50℃を考慮し、熱設計基準値を2,390℃。



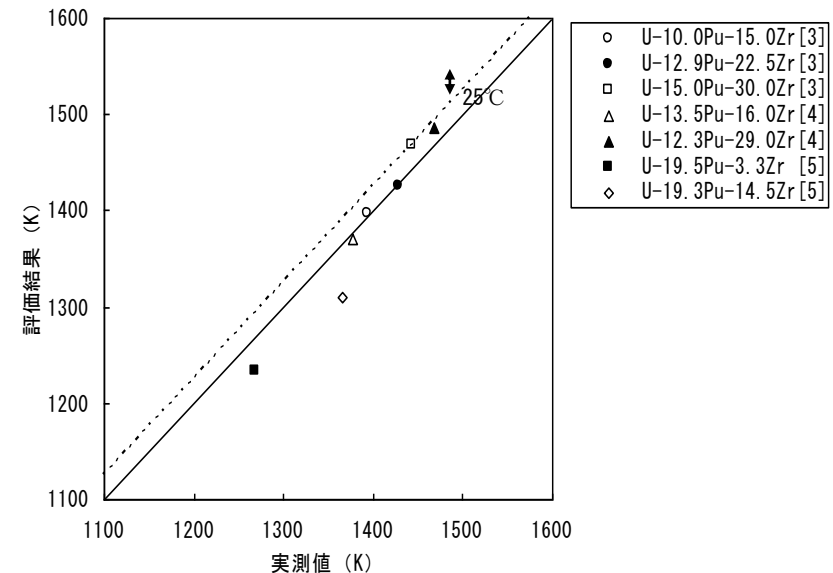
金属燃料の燃料最高温度に係る熱設計基準値の設定

【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】

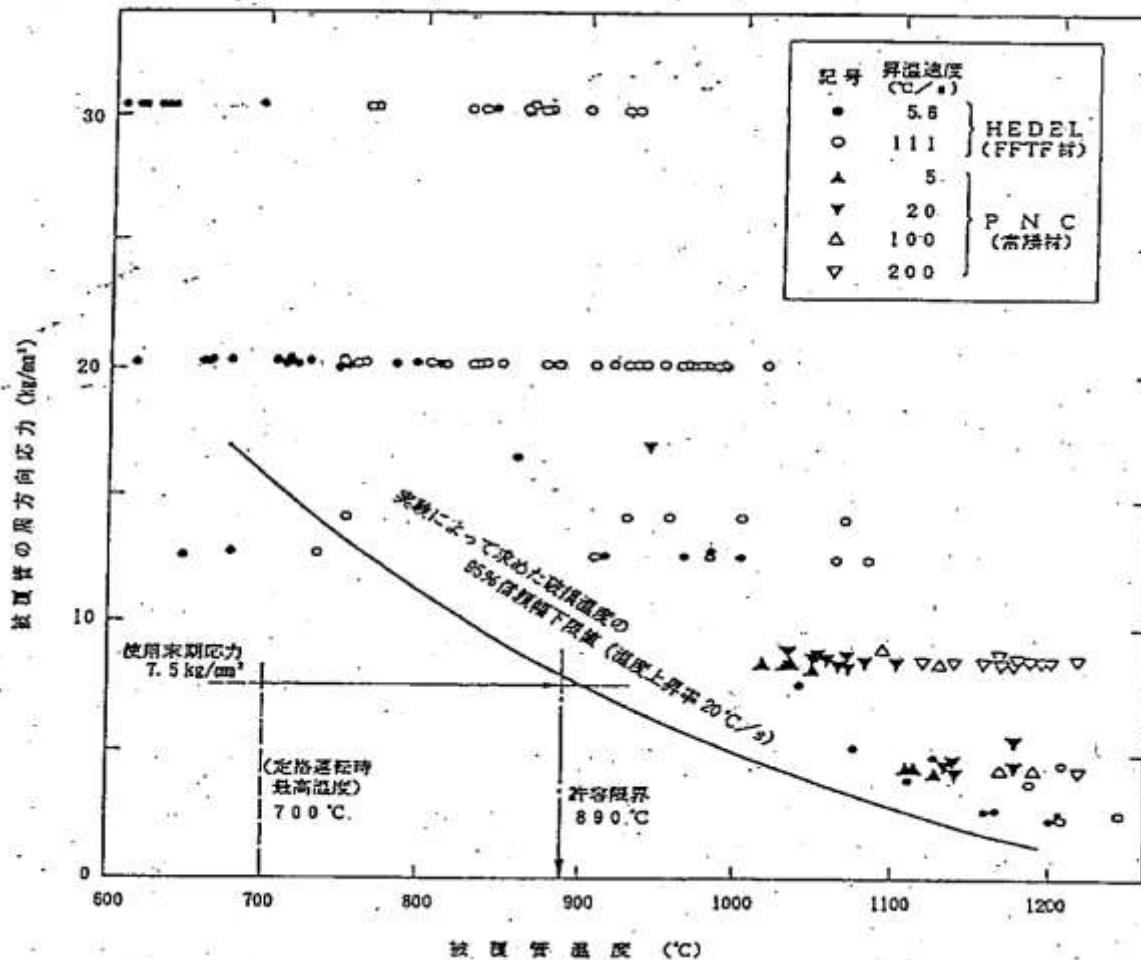
- 熔融温度を熱設計基準値とする。
- 融点は、U, Pu, Zrの組成によって決まる。
- U-Pu-Zr 3元系状態図よりU-Zr合金及びU-Pu-Zr合金の固相線温度が評価されており、燃料組成について整理して固相線温度を評価。
- 金属燃料の仕様範囲で最も固相線温度が低くなるのは、プルトニウム混合比21%、ジルコニウム混合比9%の場合で、固相線温度の評価は1,089℃。
- U-Pu-Zr合金の未照射材の融点測定値と固相線評価温度の比較（右図）から、不確かさ25℃を考慮し、熱設計基準値を1,064℃。



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)



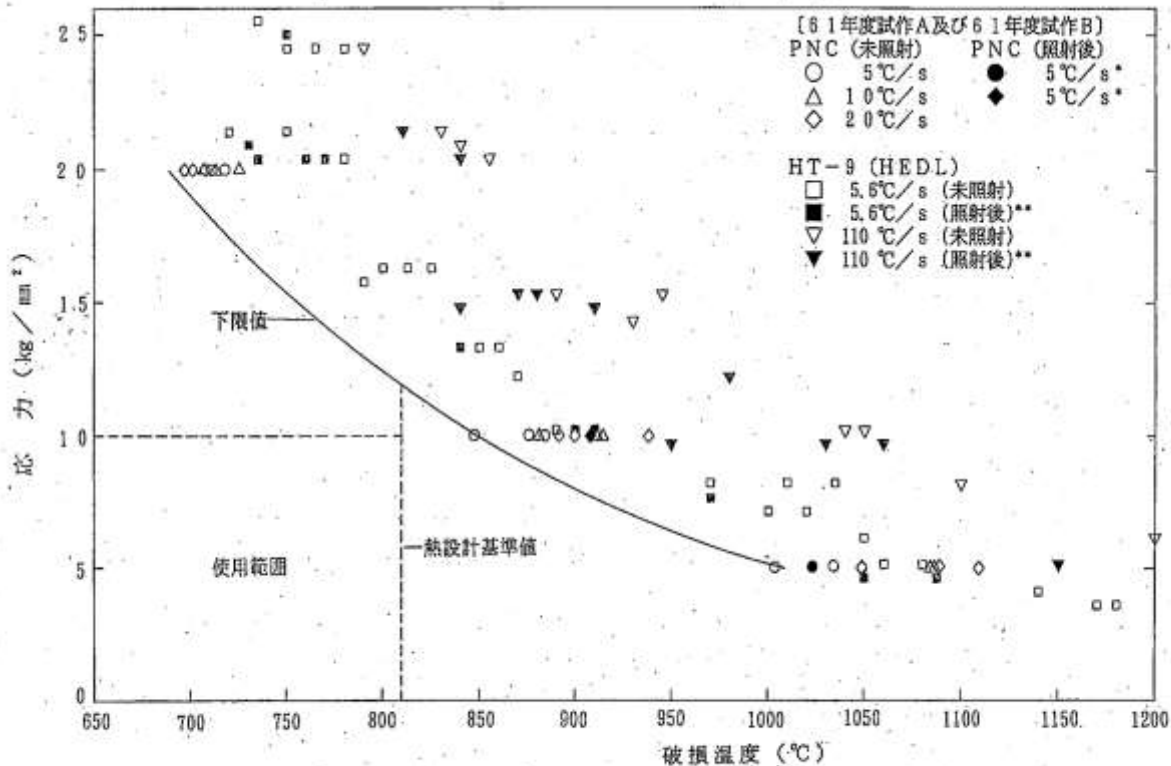
【急速加熱バースト試験結果と熱設計基準値】

- 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4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 $9.8 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2 (\text{E} < 0.1 \text{ MeV})$
 ** FFTF 370°C~620°C $1 \sim 16 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2 (\text{E} < 0.1 \text{ MeV})$

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】

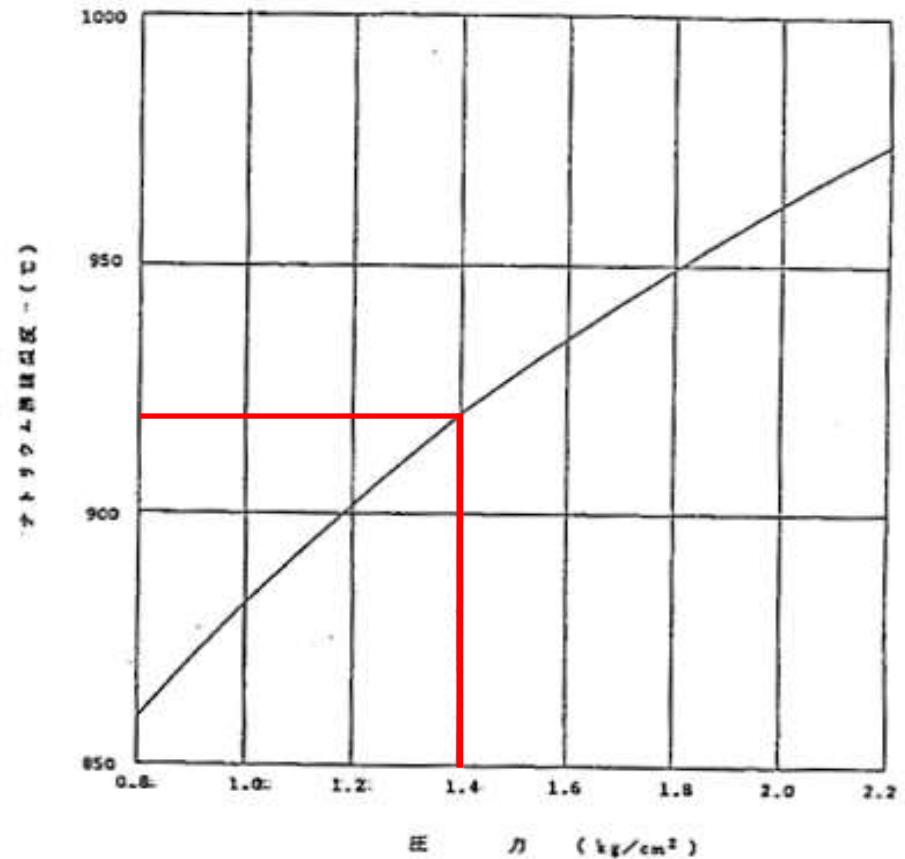
種類	炉心頂部（燃料集合体頂部）冷却材圧力
ナトリウム	約0.04N/mm ² （約0.4kgf/cm ² ）

【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。

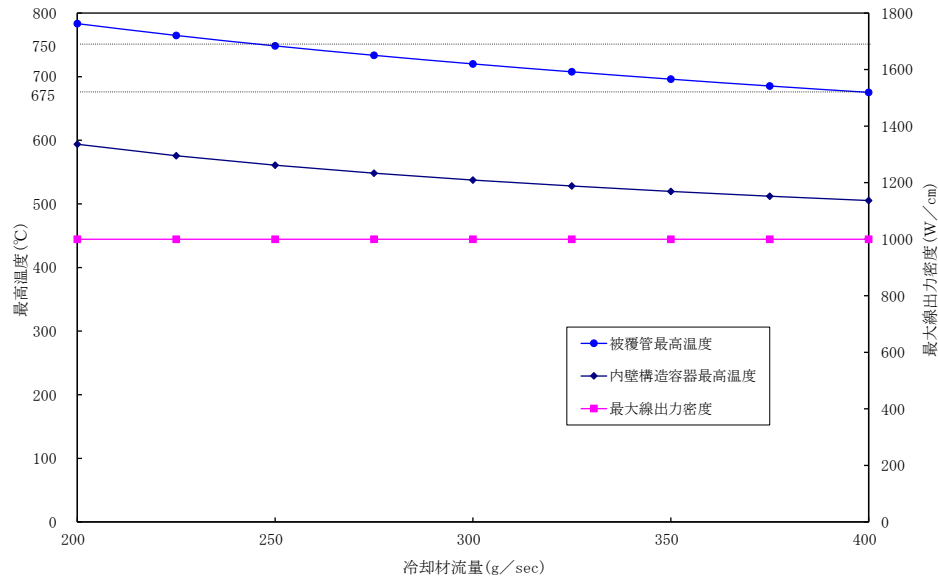
【冷却材沸点と熱設計基準値】

- ・ 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。

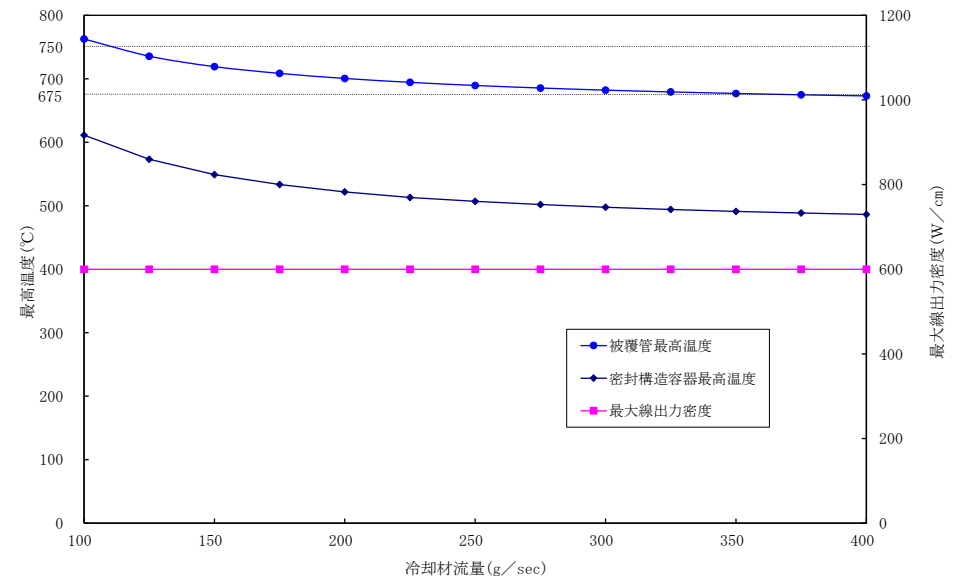


ナトリウム沸騰温度

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

（熱設計計算手法と物性定数）

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)

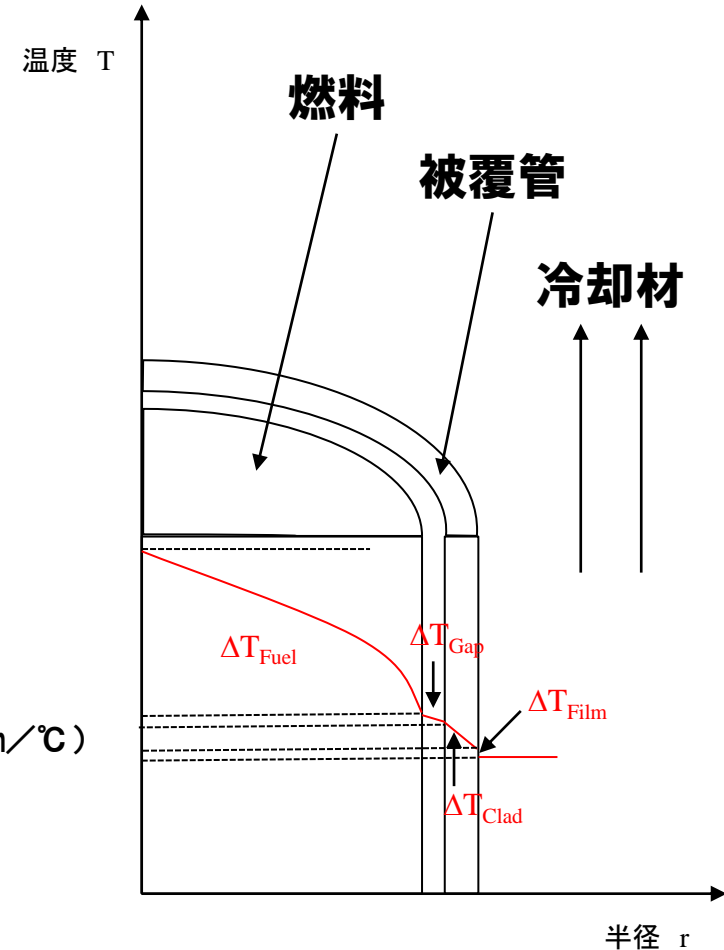
K_C : 被覆管熱伝導度 (W/cm/°C)

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

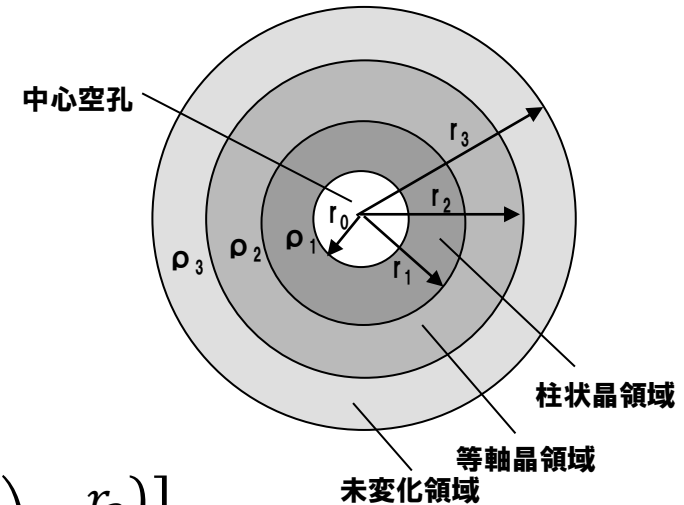
$$\int_{T_S}^{T_2} k(\rho_3, T) dT = \frac{ql}{4\pi} \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2} \right)$$

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。