

資料番号	R5－補－005
提出日	2023 年 11 月 17 日

リサイクル燃料備蓄センター
使用済燃料貯蔵事業変更許可申請書
(補足説明資料)

設計条件等の補足説明について

令和 5 年 11 月

リサイクル燃料貯蔵株式会社

目次

1. R F S 事業変更許可申請の補足説明事項一覧	1
2. 別紙	
・別紙－1 表面温度検出器の警報設定について	2
・別紙－2 燃料被覆管制限温度の設定について	3

第 1 表 R F S 事業変更許可申請の補足説明一覧

* 1 : 補正申請書（適合性説明資料含む。）に記載有を○、記載なしを×とした。

No.	項目	R F S により抽出した補足説明項目	補正 有無*1	説明箇所	備考
1	収納する使用済燃料の仕様	a . 収納する燃料仕様 b . 設定した使用済燃料のピーキングファクター評価における包絡性	× ×	a . R5－補－001 「燃料集合体の主要仕様及び評価条件の比較について」 b . R5－補－003「本申請にて追加した金属キャスクの設計で想定したピーキングファクターの包絡性について」	
2	全般：型式証明からの変更点の有無（型式証明をそのまま使っていない事項）	a . BWR 用中型キャスク（タイプ 2）：燃料仕様 A， B 個別に冷却期間を記載 b . 除熱（金属キャスク）の輻射率の設定について（型式指定の評価） c . 表面温度検出器の警報設定について	○ × ×	a . 補正申請書 本文「ハ(3) a . 使用済燃料の種類」 b . （R F S が貯蔵建屋の除熱評価で採用した輻射率は，型式証明申請から適用されている。関連コメント回答 No. 1016-01） c . 別紙－1	
3	全般：令和 2 年既許可で拡充した説明事項	a . 断面積ライブラリ M A T X S L I B による遮蔽評価 b . 経年変化（使用済燃料被覆管）（クリープ，水素化物再配向，照射硬化の回復等）	○ ×	a . 補正申請書 添付書類六「3.3(2) 遮蔽」 b . 別紙－2	
4	全般：解析コードの妥当性	a . 除熱（貯蔵建屋）の評価で使用する計算コードのバージョン変更	○	a . 適合性説明資料 第 6 条 除熱（貯蔵建屋）別添 1「3. F L U E N T の検証」	
5	全般：許可からの変更点	a . 津波：建屋（受入区域）損傷時の線量評価 b . 建屋除熱評価：崩壊熱量の高い PWR 用キャスク（タイプ 1）で評価 c . PWR 用キャスク（タイプ 1）の追加に伴い貯蔵能力を BWR， PWR 別に記載 d . 新知見の反映：航空機落下確率の見直しと関連する外部火災の評価 e . 記載の適正化①：本文の航空機落下確率の記載を実用炉等と整合。 f . 記載の適正化②：BWR 用大型キャスク（タイプ 2）の削除	○ ○ ○ ○ ○	a . 補正申請書 添付書類六 1.1.7.5 線量評価 b . 補正申請書 添付書類六 2.4.1 使用済燃料貯蔵建屋 c . 補正申請書 本文「ハ(3) b . 最大貯蔵能力」 d . 補正申請書 添付書類六「1.1.10.6 火災による金属キャスクへの熱影響」，「1.1.10.7 火災の重畳による影響」 e . 補正申請書 本文「四、1.ロ．(8) b . (h) 飛来物（航空機落下等）」， 補正申請書 添付書類六「1.2.10 2 について(1) 飛来物」（航空機落下等） f . 補正申請書 本文「四、1.ハ．(2)，(3)」	
6	運用・管理	a . 臨界防止（PWR 用キャスク）：注排水作業時において，運用管理上の要件は不要であるものの，流量計により管理すること。 b . 閉じ込め：三次蓋を取り付け，閉じ込め性能の回復を行う（取り付けることが可能な設計とすること） c . 安全機能：試験・検査及び保守・修理ができる設計	× × ×	a . 型式指定での説明では，非現実的な高い流量で注水した場合，臨界のおそれがある試算結果が確認されているため，金属キャスク搬出先の事業者に対し，金属キャスクへの注水作業時において注意すべき事項を伝達する。 b . 型式証明申請書本文 四 1.「ホ その他の主要な構造」(3) 項 c . （令和 2 年既許可*2から変更なし） * 2 : 申請書本文 四、1.ロ．「(8) その他の主要な構造」 f 項	a . L5-95HN201R3，三菱重工業株，H28.4.20 c . 許可基準規則第 13 条（金属キャスク）

表面温度検出器の警報設定について

BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の金属キャスク表面温度の警報設定値については、BWR用大型キャスク（タイプ2A）と同様に「貯蔵時外筒外面最高使用温度」を設定するものとしているが、警報設定については型式証明の範囲外であり、型式証明に「貯蔵時外筒外面最高使用温度」に関する記載が無いことから、「貯蔵時外筒外面最高使用温度」については、型式指定から引用している。

また、万が一、金属キャスク表面温度が警報設定値（貯蔵時外筒外面最高使用温度）を超えた場合においても、金属キャスクの各部材の設計基準温度は警報設定値と比較して十分な余裕を有していることを示すため、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）の各部材の温度（設計基準温度及び評価結果）について型式指定から引用している。

下表1に、「第17条 計測制御系統施設」において型式指定から引用した諸元を示す。

表1 型式指定から引用した諸元

別添	章・表	引用諸元	型式指定引用箇所
別添3	2. 表面温度の警報設定	123℃	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 17.5kW における解析値
		116℃	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 15.8kW における解析値
	添付1－1表	123℃	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 17.5kW における解析値
		116℃	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 15.8kW における解析値
別添5	別添5－1表	BWR 中型用（タイプ2）の諸元	MSF-52B 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 17.5kW における解析値
		PWR 用（タイプ1）の諸元	MSF-21P 型式指定申請書（三菱重工業株式会社）の添付書類5「使用済燃料等の除熱に関する説明書」に示す設計崩壊熱量 15.8kW における解析値

燃料被覆管制限温度の設定について

1. 使用済燃料集合体の経年変化要因の考慮

金属キャスクは、使用済燃料集合体を貯蔵する機能を有するとともに、使用済燃料集合体の事業所外運搬に用いる輸送容器としての機能を併せもつ鋼製の乾式容器であり、その設計においては、設計貯蔵期間（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じて、使用済燃料集合体の健全性を維持する観点から、燃料被覆管の経年変化要因に対して以下の通り考慮する。

- a. 燃料被覆管のクリープについては、燃料被覆管の温度を設計評価期間における累積クリープ歪み量が 1 %を超えない温度以下とする。
- b. 燃料被覆管の水素化物再配向については、燃料被覆管の温度を水素化物再配向による機械的特性への影響がない温度以下とする。
- c. 燃料被覆管の照射硬化の回復については、燃料被覆管の温度を照射硬化の回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度以下とする。

上記の経年変化要因を考慮し、燃料被覆管の制限温度を以下のとおりとする。

2. 使用済燃料集合体の健全性に影響を与える主な因子

(1) 累積クリープひずみについて

貯蔵中の使用済燃料集合体は不活性雰囲気中で貯蔵され、また燃料ペレット温度は運転中と比較して遥かに低い上、自重以外ほとんど荷重がかからない静的な状態で貯蔵される。このような状態で貯蔵される使用済燃料集合体では、瞬時に燃料被覆管が破損する形態は存在しないが、高温の環境下では、材料の降伏強度以下でも徐々にクリープが生じ、この変形の累積クリープひずみ量が限界を超えると破損する。したがって、設計評価期間中に破損しないレベルの累積クリープひずみとなるよう

に燃料被覆管温度を制限する必要がある。

クリープ破損に至らない累積クリープ量の基準は，国内外の燃料被覆管クリープ破断データ等から，燃料被覆管周方向の累積クリープ量を 1 % 以下とする。

BWR 燃料被覆管の燃料棒内圧により生じる燃料被覆管の累積クリープ量の累積量は，(財)電力中央研究所（以下「電中研」という。）の実験に基づく，下記の未照射ジルカロイ-2 被覆管のクリープひずみ算定式⁽¹⁾により計算し，計算結果を 1.43 倍する。計算結果を 1.43 倍するのは，二次クリープ領域のクリープひずみの上側 95%信頼区間が最確値の 1.43 倍と評価されている⁽²⁾ ことによる。また，電中研の実験に基づくクリープひずみ算定式は，燃料被覆管温度が 320℃～425℃，周方向応力が 178MPa 以下の領域で適用可能とされている。

第 1 項は，遷移領域におけるクリープひずみ，第 2 項は，定常領域におけるクリープひずみを表している。

$$\varepsilon = \varepsilon_T^S \left[1 - \exp \left\{ -\beta \left(\dot{\varepsilon}_S \cdot t \right)^n \right\} \right] + \dot{\varepsilon}_S \cdot t \quad \text{-----} \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_S = 2.1 \times 10^9 \cdot \left(\frac{E}{T} \right) \cdot \exp \left(\frac{2880\sigma}{E} \right) \cdot \exp \left(\frac{-53600}{RT} \right) \quad \text{-----} \quad (2)$$

$$\varepsilon_T^S = 5.0 \times 10^{-10} \cdot \exp(0.0428 \cdot T) \cdot (\dot{\varepsilon}_S)^{0.00543T-2.603} \quad \text{-----} \quad (3)$$

$$\beta = 2.24 \times 10^{10} \cdot \exp(-0.0275 \cdot T) \cdot \exp \left(-1200 \left(\frac{\sigma}{E} \right) \right) \quad \text{-----} \quad (4)$$

ε : クリープひずみ (-)	ε_T^S : 飽和遷移クリープひずみ (-)
β : 温度及び応力の関数 (-)	$\dot{\varepsilon}_S$: 定常クリープ速度 (h^{-1})
t : 時間 (h)	n : 定数 (=0.61)
E : ヤング率 (kgf/mm^2)	T : 絶対温度 (K)
R : 気体定数 (cal/mol/K)	σ : 応力 (kgf/mm^2)

※上記式は元文献の単位系で示している。(S I 単位系とすると、(2)式の定数が変更となる。)

別紙 3-1 図に BWR 用燃料被覆管に対する電中研の算定式の予測値と実測値との比較を示す。別紙 2-1 図の (a) からは形状がよく一致していること、(b) からは 0.1% から 10% のひずみ範囲で予測値と実測値がよく一致していることがわかる。

また、照射材のクリープは、別紙 2-2 図に示すように未照射材に比べ定常クリープ速度が小さいことから、燃料被覆管のクリープ評価において未照射材のクリープ式を用いて累積クリープ量を評価することは保守的である。したがって、本評価においても、電中研の未照射材に基づく算定式を用いることとする。なお、(独)原子力安全基盤機構(以下「機構」という。)においても同様にクリープの算定式を検討しており、電中研の算定式が保守的な結果を与えることが確認されている。

設計評価期間 60 年について計算した初期燃料被覆管温度と累積クリープひずみの関係(一例)を別紙 2-3 図に示す。累積クリープひずみ量が評価期間中に 1% を超えない燃料被覆管の初期温度は、BWR で

360℃程度となる。

金属キャスクの設計における燃料被覆管の制限温度を考慮して，BWR 燃料被覆管の初期温度を 300℃として保守的に評価しても累積クリープひずみ量 1 %を超えることはない（添付 1 ～添付 3 参照）。

PWR 燃料被覆管の燃料棒内圧により生じる燃料被覆管の累積クリープ量は，次式の機構の実験に基づくジルカロイ被覆管のクリープひずみ算定式⁽¹⁾により計算し，計算結果を 1.55 倍(燃焼度 30～53GWd/t)または 1.28 倍(燃焼度 0～30GWd/t)する。なお，1.55 倍及び 1.28 倍はクリープひずみ量(一次クリープ＋二次クリープ)の上側 95%信頼区間が最確値の 1.55 倍または 1.28 倍と評価されている⁽¹⁾ことによる。また，本クリープひずみ算定式は，被覆管温度が 420℃以下，周方向応力が 250MPa 以下において適用可能とされている。

第 1 項は飽和一次クリープひずみ，第 2 項は二次クリープひずみを表している。

$$\varepsilon = \varepsilon_p^S + \dot{\varepsilon}_s \cdot t \text{ ----- (5)}$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \dot{\varepsilon}_{s,L} + \dot{\varepsilon}_{s,H} \text{ ----- (6)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,L} = A_{s,L} \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_{s,L}} \cdot \exp\left(-\frac{Q_{s,L}}{RT}\right) \text{ ----- (7)}$$

$$\text{(燃焼度 30～53GWd/t)} \quad A_{s,L}=4.04 \times 10^1 \text{ (K/MPa/h)}, \quad n_{s,L}=0.48,$$

$$Q_{s,L}=109.9 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\text{(燃焼度 0～30GWd/t)} \quad A_{s,L}=2.51 \times 10^9 \text{ (K/MPa/h)}, \quad n_{s,L}=1.69,$$

$$Q_{s,L}=156.0 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,H} = A_{s,H} \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_{s,H}} \cdot \exp\left(-\frac{Q_{s,H}}{RT}\right) \text{ ----- (8)}$$

$$\text{(燃焼度 30～53GWd/t)} \quad A_{s,H}=2.50 \times 10^{35} \text{ (K/MPa/h)}, \quad n_{s,H}=7.39,$$

$$Q_{s,H}=297.7 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\text{(燃焼度 0～30GWd/t)} \quad A_{s,H}=1.70 \times 10^{34} \text{ (K/MPa/h)}, \quad n_{s,H}=6.12,$$

$$Q_{s,H}=313.7 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\varepsilon_p^S = B_p \cdot \left(\frac{E}{T}\right) \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E}\right)^{n_p} \cdot \exp\left(-\frac{Q_p}{RT}\right) \text{-----} \quad (9)$$

$$\text{(燃焼度 30} \sim 53 \text{GWd/t)} \quad B_p=6.58 \times 10^4 \text{ (K/MPa)}, \quad n_p=1.29,$$

$$Q_p=77.2 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\text{(燃焼度 0} \sim 30 \text{GWd/t)} \quad B_p=1.34 \times 10^7 \text{ (K/MPa)}, \quad n_p=1.75,$$

$$Q_p=80.6 \times 10^3 \text{ (J/mol)}$$

$$\varepsilon : \text{クリープひずみ}(-) \quad \varepsilon_p^S : \text{飽和一次クリープひずみ}(-)$$

$$\dot{\varepsilon}_s : \text{二次クリープ速度}(\text{h}^{-1}) \quad t : \text{時間}(\text{h})$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,L} : \text{低応力側機構による二次クリープ速度}(\text{h}^{-1})$$

$$\dot{\varepsilon}_{s,H} : \text{高応力側機構による二次クリープ速度}(\text{h}^{-1})$$

$$\sigma_\theta : \text{周応力}(\text{MPa}) \quad E: \text{ヤング率}(=1.148 \times 10^5 - 59.9 \times T) \text{ (MPa)}$$

$$R: \text{気体定数}(8.3144 \text{ J/mol/K}) \quad T: \text{絶対温度}(\text{K})$$

$$Q_{s,H} \text{ 及び } n_{s,H} : \text{高応力側機構二次クリープ速度の活性化エネルギー}(\text{J/mol}) \\ \text{及び応力指数}(-)$$

$$Q_{s,L} \text{ 及び } n_{s,L} : \text{低応力側機構二次クリープ速度の活性化エネルギー}(\text{J/mol}) \\ \text{及び応力指数}(-)$$

$$A_{s,H} : \text{高応力側機構による二次クリープ速度の比例定数}(\text{K/Pa/h})$$

$$A_{s,L} : \text{低応力側機構による二次クリープ速度の比例定数}(\text{K/Pa/h})$$

$$Q_p \text{ 及び } n_p : \text{飽和一次クリープひずみの活性化エネルギー}(\text{J/mol}) \text{ 及び応力} \\ \text{指数}(-)$$

$$B_p : \text{飽和一次クリープひずみの比例定数}(\text{K/Pa})$$

※上記式は元文献の単位系で示している。

別紙 2 - 4 図に PWR 用燃料被覆管に対する機構の算定式の予測値と実測値の比較を示す。0.1% から 1% (使用済燃料被覆管) 及び 0.1% から 10% (未照射燃料被覆管) のひずみ範囲で予測値と実測値がよく一致している。

また、照射材のクリープは、別紙 2－5 図に示すように未照射材に比べ定常クリープ速度が小さいことから、被覆管のクリープ評価において未照射材のクリープ式を用いて累積クリープ量を評価することは保守的である。したがって、本評価においても、未照射材に基づく算定式を用いることとする。

設計評価期間 60 年について計算した初期燃料被覆管温度と累積クリープひずみの関係（一例）を別紙 2－6 図に示す。累積クリープひずみ量が評価期間中に 1 %を超えない燃料被覆管の初期温度は、PWR で 320℃程度となる。

金属キャスクの設計における燃料被覆管の制限温度を考慮して、PWR 燃料被覆管の初期温度を 275℃として保守的に評価しても累積クリープひずみ量 1 %を超えることはない（添付 1～添付 3 参照）。

(2) 水素化物の再配向について

原子炉の運転中に燃料被覆管に吸収された水素は、燃料被覆管温度が低下して水素固溶度を超えた分はジルカロイ水素化物として析出する。このとき、ジルカロイ水素化物は燃料被覆管に周方向応力が作用していると応力に直角方向（燃料被覆管半径方向）に析出する性質がある。高温で燃料被覆管内圧が高く周方向応力が大きい状態から温度が低下すると、水素化物が燃料被覆管半径方向に析出して機械的特性が低下することが指摘されている。このため、貯蔵中に水素化物再配向により燃料被覆管の機械的特性が低下しない条件で設計する。

BWR 燃料の被覆管材料であるジルカロイ－2 について水素化物再配向の機械的特性への影響が調べられている。その結果、40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料、50GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料及び 55GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料を対象に、水素化物再配向の起きない条件及び機械的特性に影響のない条件が別紙 2－1 表に示すようにまとめられている。その結果、水素化物再配向による機械的特性に影響がない条件として、40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料では周方向応力が 70MPa 以下で 200℃以下、50GWd/t 型及び 55GWd/t 型ジルコニウムラ

ライナ有燃料では 70MPa 以下で 300℃以下と示されている。本キャスクの貯蔵対象燃料において、新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料は最高燃焼度 40GWd/t、高燃焼度 8 × 8 燃料は最高燃焼度 50GWd/t でジルコニウムライナ有のため 50GWd/t 型及び 55GWd/t 型ジルコニウムライナ有燃料に、8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料については最高燃焼度 40GWd/t でジルコニウムライナ無のため 40GWd/t 型ジルコニウムライナ無燃料に相当する。

PWR 燃料の被覆管材料であるジルカロイ-4 についても同様に水素化物再配向の機械的特性への影響が調べられており、48GWd/t 型燃料及び 39GWd/t 型燃料を対象に、水素化物再配向の起きない条件及び機械的特性に影響のない条件が別紙 2-1 表に示すようにまとめられている。その結果、水素化物再配向による機械的特性に影響がない条件として、48GWd/t 型燃料及び 39GWd/t 燃料共に、周方向応力が 100MPa 以下で 275℃以下と示されている。

以上から、水素再配向による機械的特性に影響がない温度として、BWR 燃料被覆管のジルコニウムライナ有の新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料と高燃焼度 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で 300℃以下、ジルコニウムライナ無の 8 × 8 燃料、新型 8 × 8 燃料については周方向応力が 70MPa 以下で保守的に 200℃以下、PWR 燃料被覆管については周方向応力が 100MPa 以下で 275℃以下を設定した。

(3) 照射硬化の回復について

原子炉内での照射により燃料被覆管は硬化し、強度が未照射材のものより高くなる。したがって、燃料被覆管の強度評価においては照射硬化した燃料被覆管の強度を用いることができる。

ただし、別紙 2-7 図及び別紙 2-8 図に示すように、燃料被覆管が炉内温度より高い温度に一定時間以上保持されると、焼きなまし効果によって照射硬化が回復し、強度が低下する。したがって、金属キャスクに収納する燃料被覆管温度がこのような温度範囲になる場合、燃料被覆管の強度計算に当たっては、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下を考慮する必要がある。

別紙 2－9 図に示すように BWR 燃料被覆管については、300℃以下では照射硬化の回復による機械特性の著しい低下はないが、強度計算にあたっては、降伏応力の低下を回復予測式により評価する（添付 4 参照）。

一方、PWR 燃料被覆管については、305℃以下では 100 年間貯蔵しても照射硬化の回復は生じないと報告されている⁽²⁾。また、別紙 2－10 図でも 300℃、3600 時間加熱した結果、照射硬化の回復の発生は認められなかったことから、PWR 燃料被覆管の強度計算にあたっては、照射硬化の回復については考慮不要である。

別紙 2－2 表に、要因別の制限温度をまとめる。

3. まとめ

以上の検討を踏まえ、次のとおり制限温度を設定した。

- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ有^{*1}） 300℃
- ・ BWR 燃料被覆管（ライナ無^{*2}） 200℃
- ・ PWR 燃料被覆管 275℃

* 1：新型 8×8 燃料ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度 8×8 燃料

* 2：新型 8×8 燃料

【水素化物再配向】

別紙 2－1 表 水素化物再配向試験のまとめ⁽³⁾

燃料被覆管の種類		機械特性が低下しない条件	
		温度	周方向応力
BWR	40GWd/t ライナ無	200℃以下	70MPa 以下
	50GWd/t ライナ有	300℃以下	70MPa 以下
	55GWd/t ライナ有	300℃以下	70MPa 以下
PWR	39GWd/t	275℃以下	100MPa 以下
	48GWd/t	275℃以下	100MPa 以下

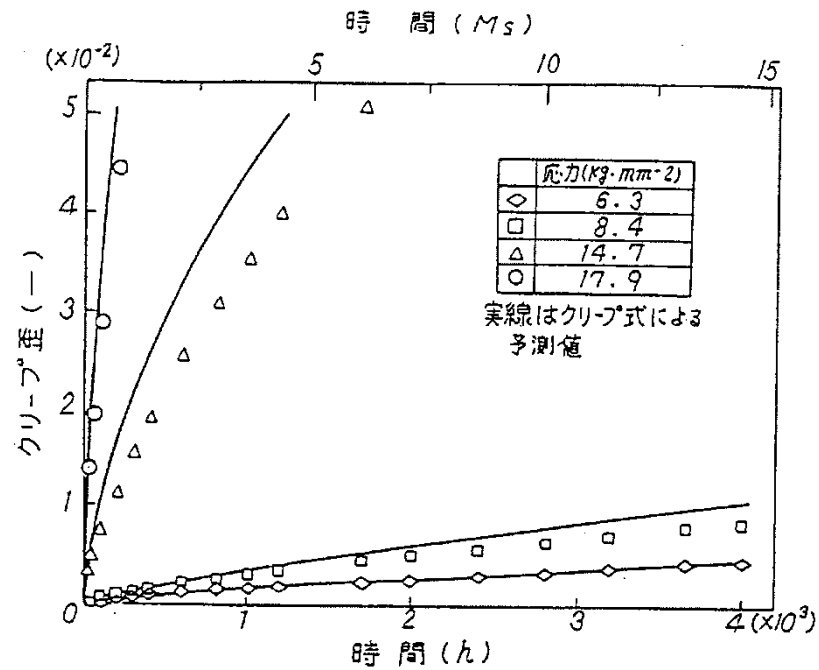
別紙 2－2 表 各要因における制限温度

要因	BWR	PWR
累積 1 % クリープ	360℃程度 (例) 300℃	320℃程度 (例) 275℃
水素再配向 による機械強度低下*	制限温度 ライナ有 300℃ ライナ無 200℃	制限温度 275℃
照射硬化の回復による 機械特性の著しい低下	照射硬化の回復を考慮	300℃以下の 範囲では考慮不要

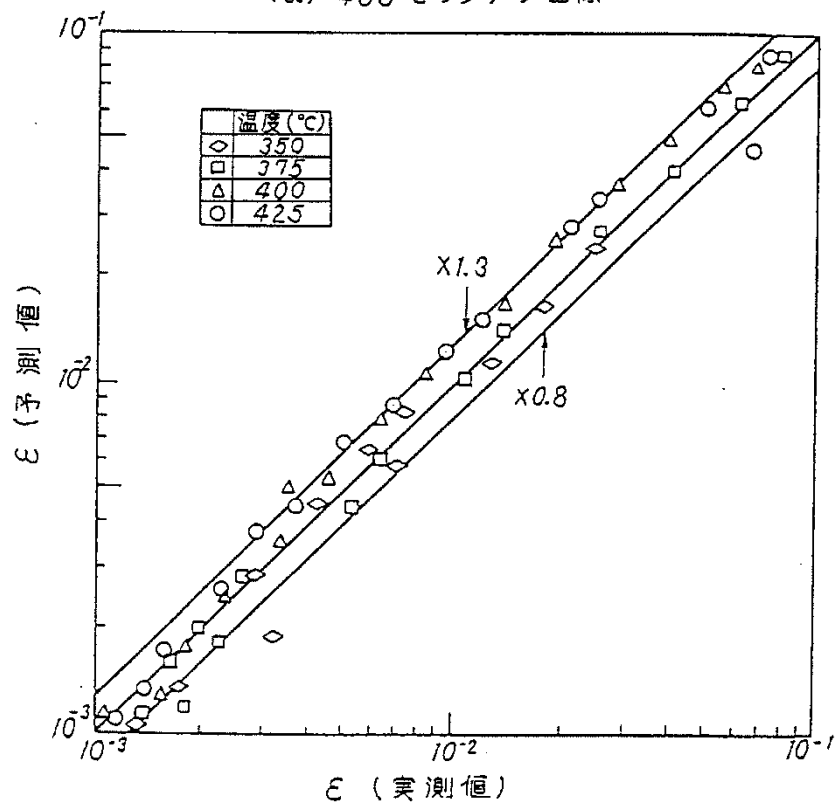
*：燃料被覆管の制限温度において，BWR 燃料被覆管の周方向応力は，制限値 70MPa 以下，PWR 燃料被覆管の周方向応力は，制限値 100MPa 以下となる（添付 2 参照）。

<燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ>

【累積クリープ】

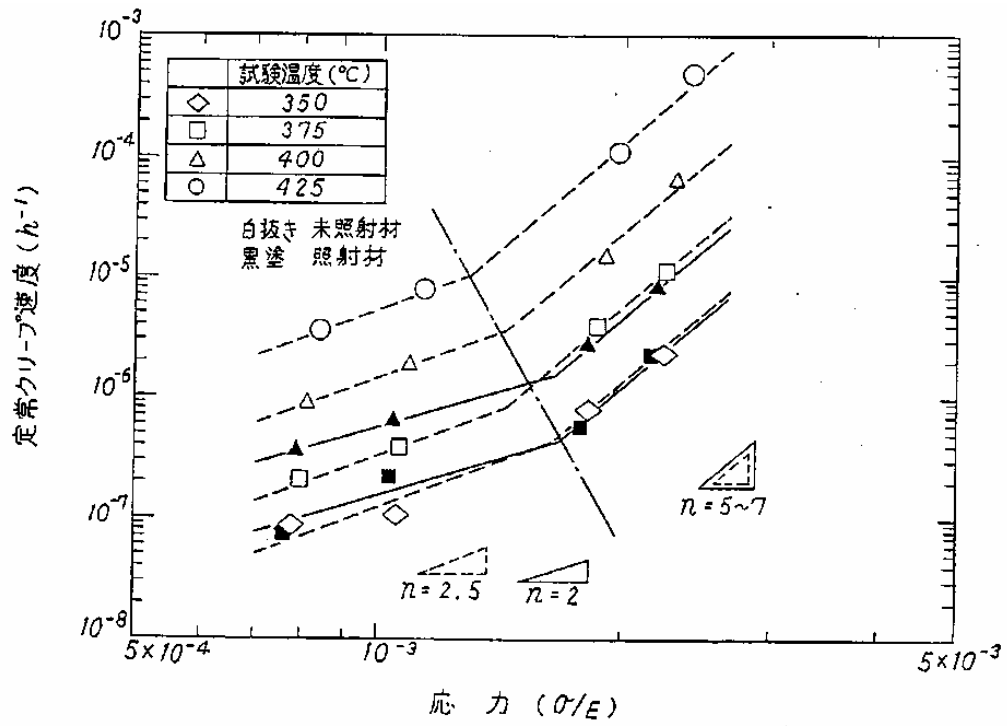


(a) 400°Cのクリープ曲線



(b) 全試験温度でのクリープ歪

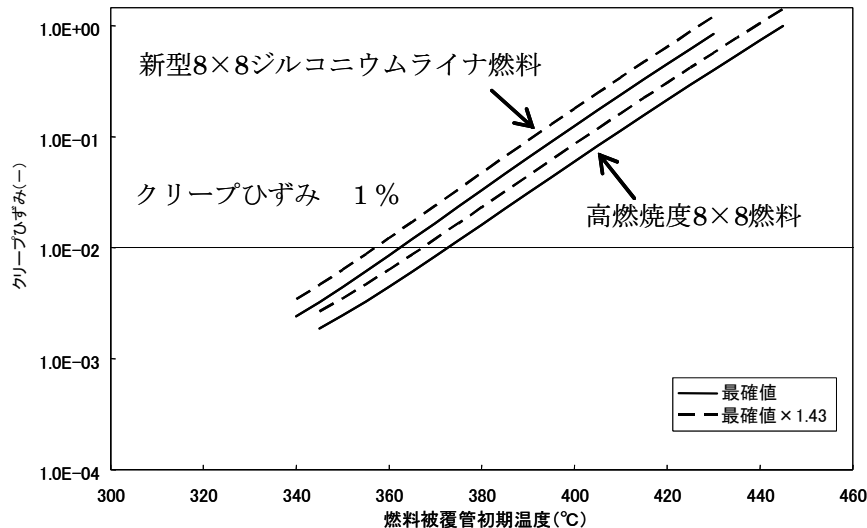
別紙2-1図 クリープひずみの予測値と実測値の比較 (BWR) ⁽⁴⁾



別紙 2 - 2 図 照射材と未照射材の定常クリープ速度の比較 (BWR) ⁽⁴⁾

＜燃料被覆管制限温度の設定に用いたデータ＞

【クリープ】



BWR 燃料評価条件

・ 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料

最大燃焼度：40GWd/t

冷却期間：18 年

評価期間：60 年

温度履歴：次の式により貯蔵中の温度低下を考慮

$$Ti = [(Toi - Ta) \times (Ts - Ta) / (Toi - Ta)] + Ta$$

ここに、 Ti ：時刻 i における想定温度(°C) Toi ：時刻 i における実際の温度(°C)

Ta ：貯蔵雰囲気気温度(=45°C)

Ts ：想定する温度低下履歴計算において与える貯蔵初期温度入力値(°C)

Toi ：貯蔵初期時の実際の温度(°C)

・ 高燃焼度 8 × 8 燃料

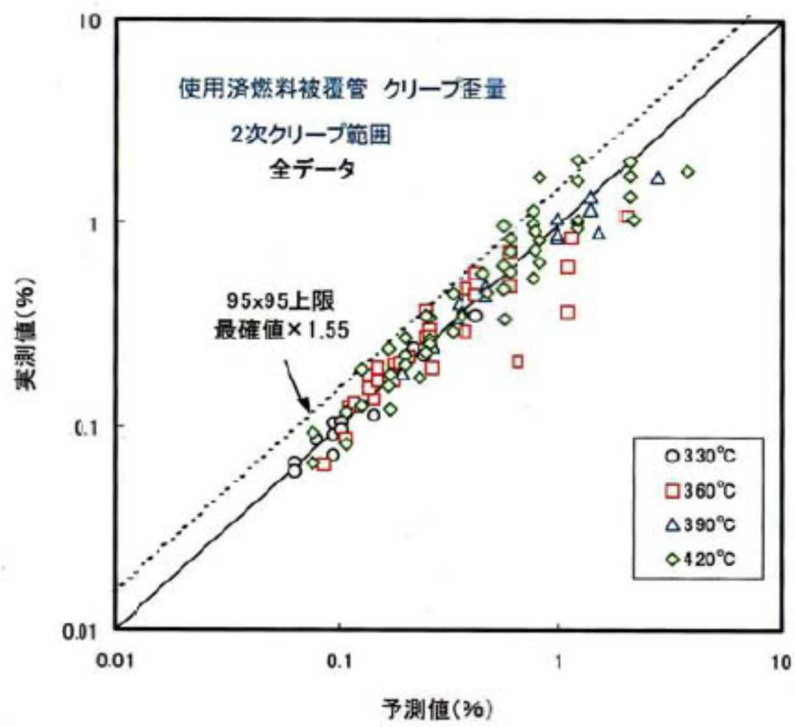
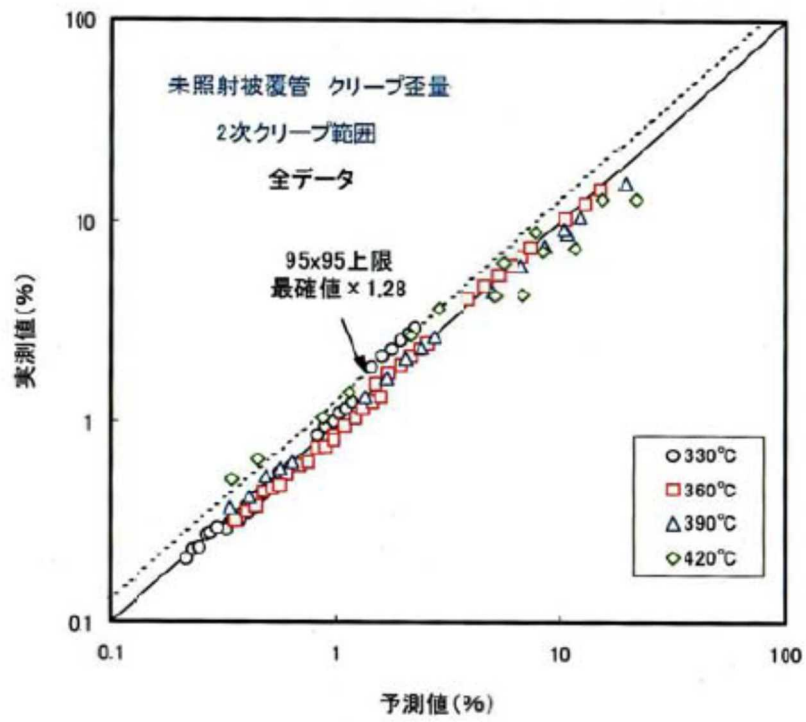
最大燃焼度：50GWd/t

冷却期間：8 年

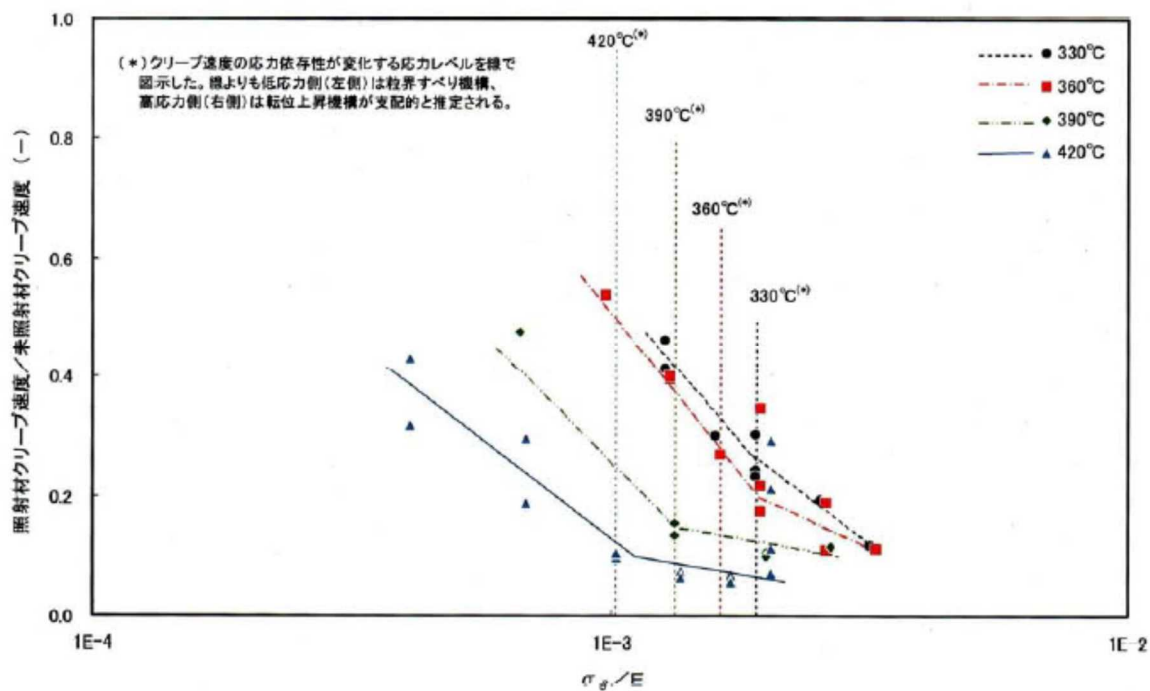
評価期間：60 年

温度履歴：貯蔵中の温度低下を新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料の場合と同様に考慮

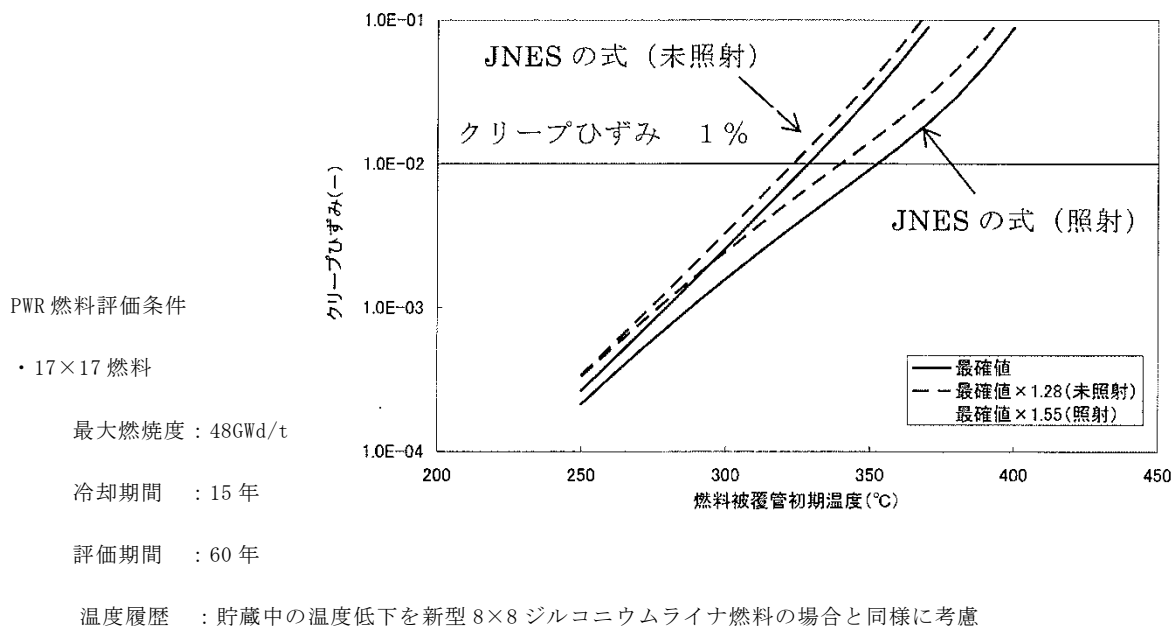
別紙 2－3 図 BWR 燃料被覆管初期温度と累積クリープひずみの関係の評価例⁽⁵⁾



別紙 2 - 4 図 クリープひずみの予測値と実測値の比較 (PWR) ⁽¹⁾

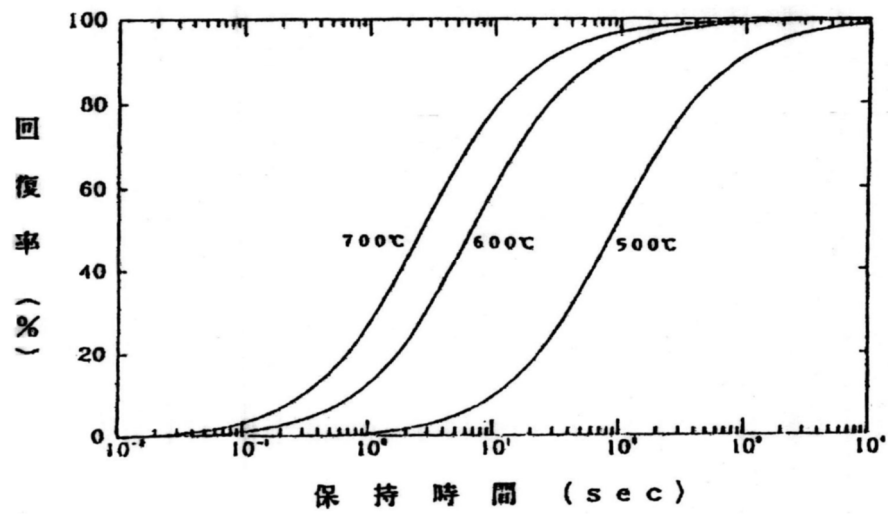


別紙 2 - 5 図 照射材と未照射材の定常クリープ速度の比較 (PWR) ⁽¹⁾

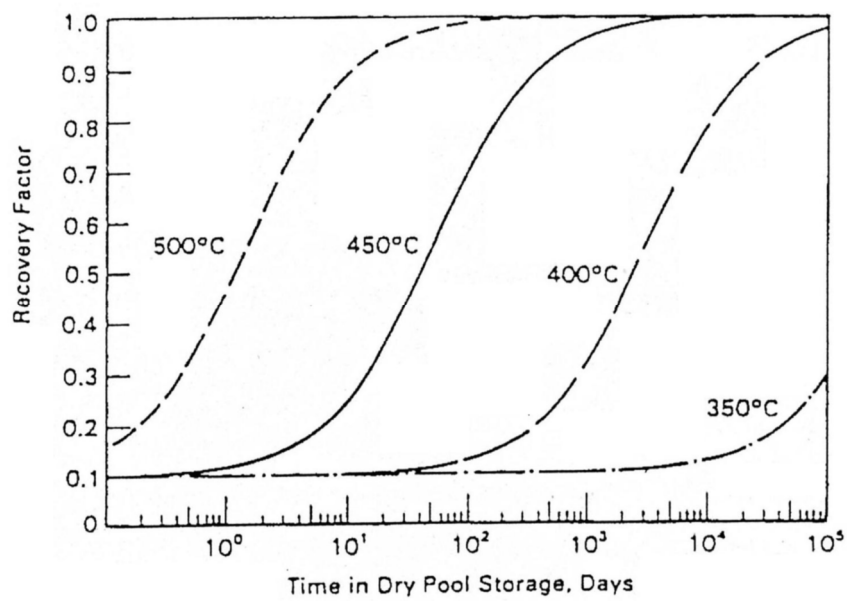


別紙 2 - 6 図 PWR燃料被覆管初期温度と累積クリープひずみの関係の評価例 ⁽⁵⁾

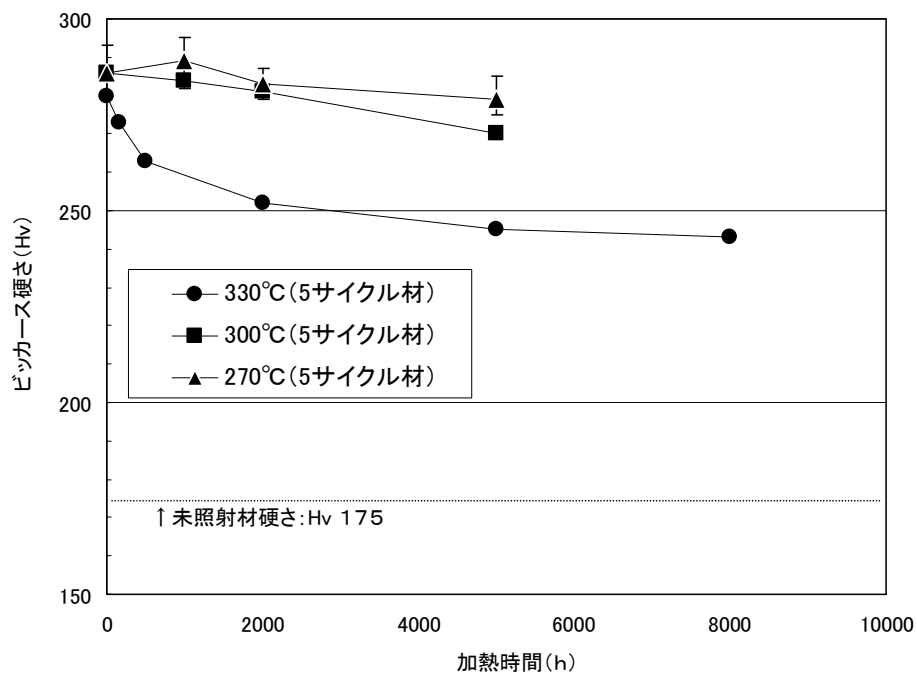
【照射硬化の回復】



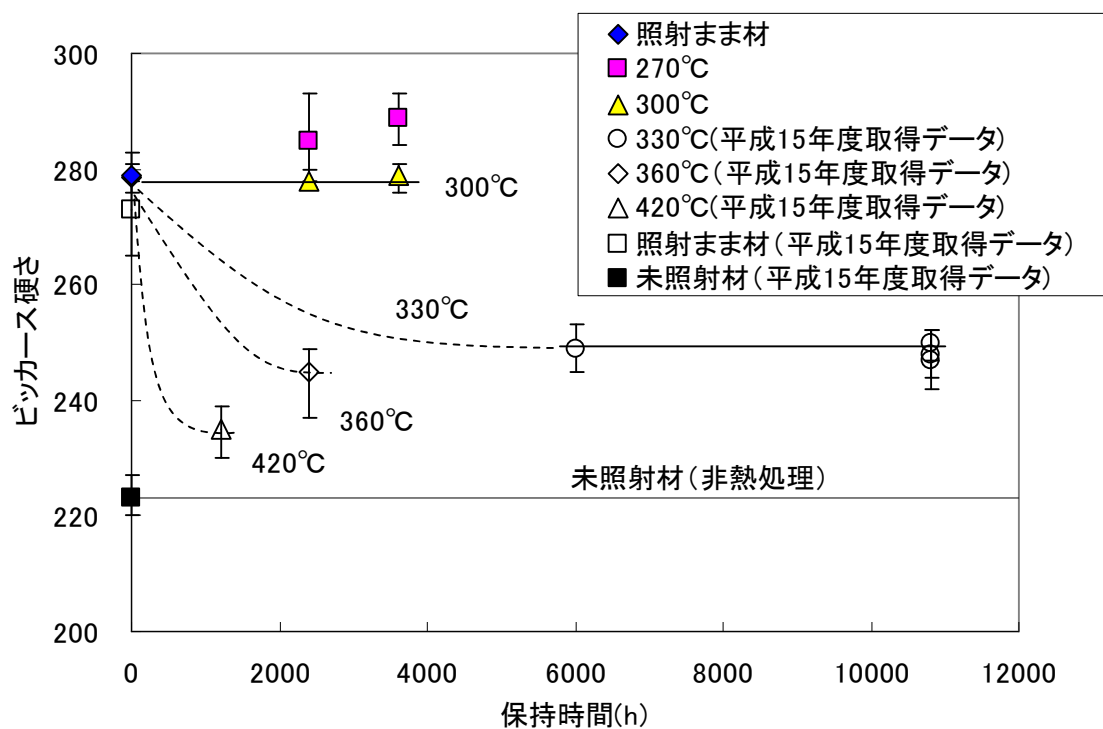
別紙 2 - 7 図 燃料被覆管の照射硬化の回復率 (BWR) ⁽⁶⁾



別紙 2 - 8 図 燃料被覆管の照射硬化の回復率 (PWR) ⁽⁷⁾



別紙 2 - 9 図 BWR 燃料被覆管の照射硬化回復挙動⁽⁸⁾



別紙 2 - 10 図 PWR 燃料被覆管の照射硬化回復挙動⁽⁹⁾

参考文献

- (1) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵施設 安全解析コード改良試験 (燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 16 年 6 月)
- (2) (R.E.Einzigner R.Kohli, “Low-temperature Rupture Behavior of Zircaloy Clad Pressurized Water Reactor Spent Fuel Rods under Dry Storage Conditions”, HEDL-7400, Hanford Engineering Development Laboratory, (1983)
- (3) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保全部会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ, 「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式キャスクとその収納物の長期健全性について」, 総合資源エネルギー調査会 (平成 21 年 6 月 25 日)
- (4) (財)電力中央研究所, 「乾式貯蔵時の BWR 燃料被覆管許容温度の検討」 T88068, (財)電力中央研究所 (平成元年 5 月)
- (5) (一社) 日本原子力学会, 「日本原子力学会標準 使用済燃料中間貯蔵施設用金属キャスクの安全設計及び検査基準:2010 附属書 P(参考)」(AESJ-SC-F002:2010), (一社) 日本原子力学会 (2010 年 7 月)
- (6) T.Torimaru, T.Yasuda, M.Nakatsuka, “Changes in mechanical properties of irradiated Zircaloy-2 fuel cladding due to short term annealing”, J. Nucl. Materials, Vol. 238, 169~174 (1996)
- (7) B.A.Chin, et.al., “Deformation and Fracture Map Methodology for Predicting Cladding Behavior During Dry Storage”, PNL5998.43, Pacific Northwest Laboratory, (1986)
- (8) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 19 年 3 月)
- (9) “平成 18 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終成果報告書)”, (独)原子力安全基盤機構 (平成 19 年 3 月)

累積クリープひずみ量の評価例

	BWR 燃料（新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料/高燃焼度 8×8 燃料 ⁽¹⁾ ）	PWR 燃料 （48GWd/t 型燃料 ⁽³⁾ ）
計算条件	<ul style="list-style-type: none"> 評価温度 320℃⁽²⁾ 評価周方向応力 70MPa （添付 2 参照） 温度，応力 60 年間一定 軸方向温度分布無視 未照射材の予測式 予測式による計算結果を 1.43 倍 	<ul style="list-style-type: none"> 評価温度 275℃ 評価フープ応力 100MPa （添付 2 参照） 温度，応力 60 年間一定 軸方向温度分布無視 未照射材の予測式 予測式による計算結果を 1.28 倍
計算条件 の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> 設計貯蔵期間（50 年間）に加えて事業所外運搬に係る期間等を考慮した十分な余裕を有する 60 年間を通じて，温度，応力は上記の値以下に維持されるため，評価温度，応力の設定は妥当。 貯蔵中の崩壊熱減衰に伴う温度，応力の低下を無視することは保守的な設定。 軸方向温度分布無視は保守的な設定。 未照射材の予測式を用いることは保守的。 	
計算結果	累積クリープひずみ量 0.55%	累積クリープひずみ量 0.46%

- (1) 新型 8×8 については，燃料被覆管制限温度が 200℃と低いことから，上記対象燃料の評価に包含される。
- (2) 燃料被覆管制限温度は 300℃であるが，クリープひずみ量計算式の適用可能温度範囲は 320℃～425℃であるため，320℃として評価した。
- (3) 39GWd/t 型燃料は，崩壊熱量が小さく温度が低いため，48GWd/t 燃料の評価に包含される。

添付 2

燃料被覆管に発生する応力評価例

1. 評価方法

燃料被覆管を円筒とみなすと，周方向応力 σ_{θ} は次式で表される。

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \cdot r_m}{t} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで，
 σ_{θ} : 燃料被覆管周方向応力 (MPa)
 P : 燃料被覆管内圧 (MPa)
 r_m : 燃料被覆管平均半径 (mm)
 t : 燃料被覆管厚 (mm)

また，燃料被覆管平均半径 r_m は，次式で表される。

$$r_m = \frac{D+t}{2} \quad \dots \dots \dots (2)$$

D : 燃料被覆管内径 (mm)

(1) 及び (2) 式より，周方向応力 σ_{θ} を求める。

2. 評価条件及び結果

下表に示す通り，BWR 燃料被覆管及び PWR 燃料被覆管に生じる周方向応力は，水素化物再配向による機械強度低下を防止する基準以下である。

	BWR 燃料			PWR 燃料
	新型 8×8	新型 8×8 ジルコニウムライナ	高燃焼度 8×8	17×17 燃料 48,000MWd/t 型
燃料被覆管内径 (mm)				
燃料被覆管厚 (mm)				
燃料被覆管内圧 (MPa)				
評価温度 (℃)	200	300	300	210
周方向応力 (MPa)	60 以下	70 以下	70 以下	100 以下

3. 評価の保守性

- (1) 燃料被覆管厚は設計厚に対し、10%の減肉を考慮して設定。なお、BWRライナ有り燃料は、保守的にライナを無視して設定。
- (2) BWR燃料の内圧は、添付 2-1 図に示す照射済みBWR燃料要素データ (PNL-4835⁽¹⁾) から設定。なお、米国 PNL による照射済BWR燃料棒の内圧を解析した条件は、燃焼度 50GWd/t であり、国内の高燃焼度 8×8 燃料に相当する。BWR燃料の高燃焼度 8×8 燃料の寿命末期の内圧解析結果は約 6.5MPa (約 66kgf/cm²) である⁽²⁾。

(独) 原子力安全基盤機構の調査結果によれば、9×9 燃料を除いた燃料要素の内圧は、最大でも 2.8MPa (20℃換算) を超えないことが報告されている (添付 2-2 図参照*)⁽³⁾。この値を 300℃に換算すると約 5.5MPa となり、“2. 評価条件及び結果” に示す燃料被覆管内圧 MPa) は、これに比べても安全側に設定されている。

*：添付 2-2 図の凡例は以下のようになっており、貯蔵する燃料タイプを包含している。

- ・実証試験燃料 : 8×8 燃料
- ・島根燃料 : 8×8 燃料
- ・高性能燃料 : 新型 8×8 燃料 (ジルコニウムライナ管を含む)
- ・高燃焼度確証用燃料 : 高燃焼度 8×8 燃料

- (3) 発電所の設置変更許可申請書によれば、PWR燃料の内圧は、寿命末期の評価では 146kg/cm²G (=14.4MPa, 被覆管表面最高温度 349℃) であることが確認されている。(添付 2-3 図参照)⁽⁴⁾ この値を、除熱解析の評価結果 (MSF-21P 型の型式証明申請書⁽⁵⁾ 添付書類一, 第 1-6 表の燃料被覆管の最高温度 205℃) に余裕を考慮した評価温度 (210℃) に換算すると約 11MPa となり、燃料被覆管の最高温度 205℃の PWR燃料の内圧に比べても安全側に設定されている。
- (4) BWR燃料及びPWR燃料の評価温度については、除熱解析モデルで評価した貯蔵中の燃料被覆管温度を包含した温度として設定しており保守的である。

<参考>照射済みBWR燃料要素データ (PNL-4835⁽¹⁾)

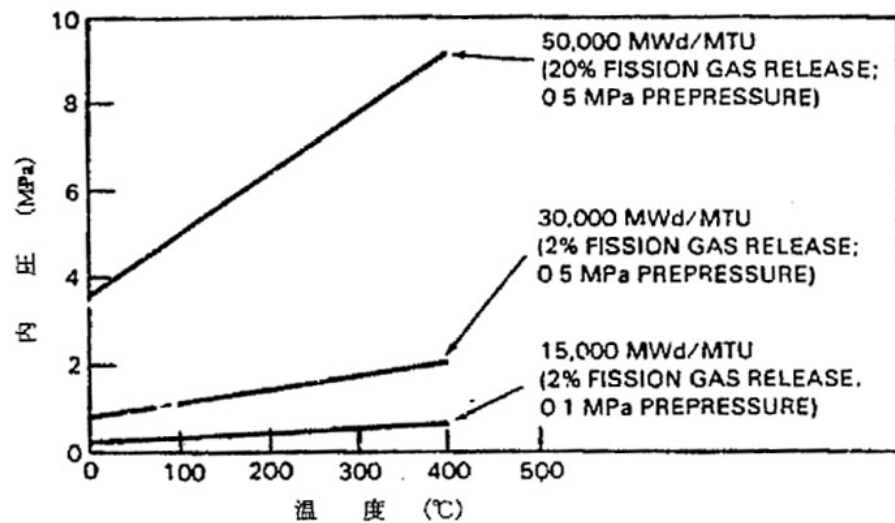
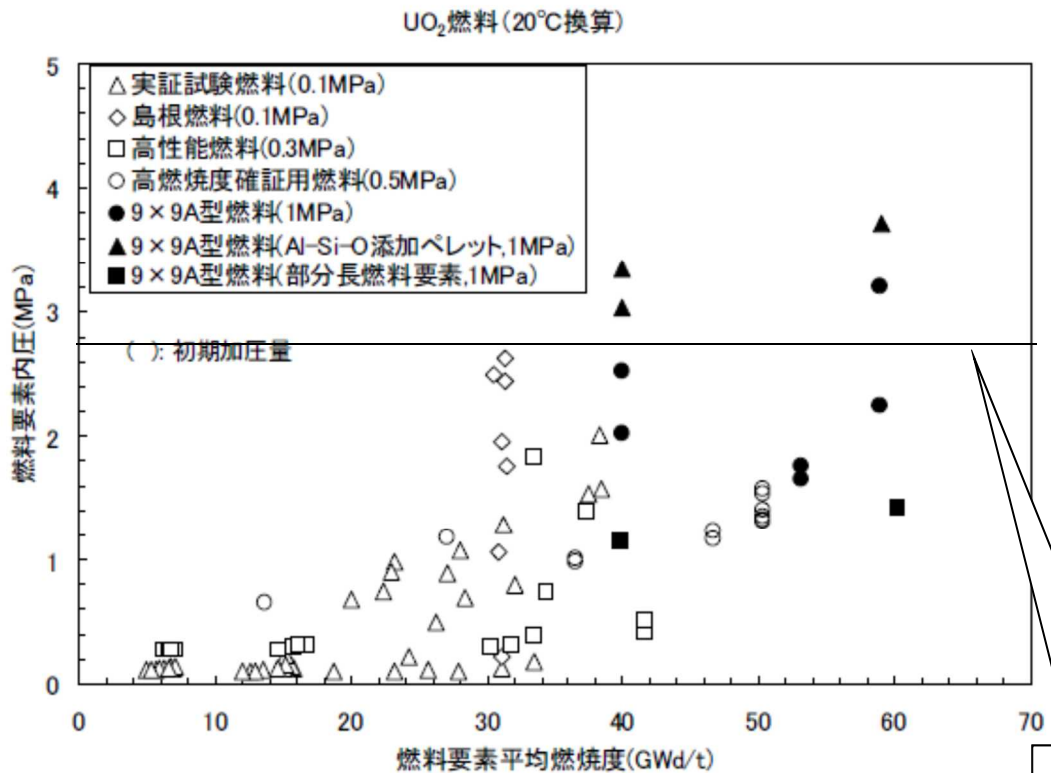


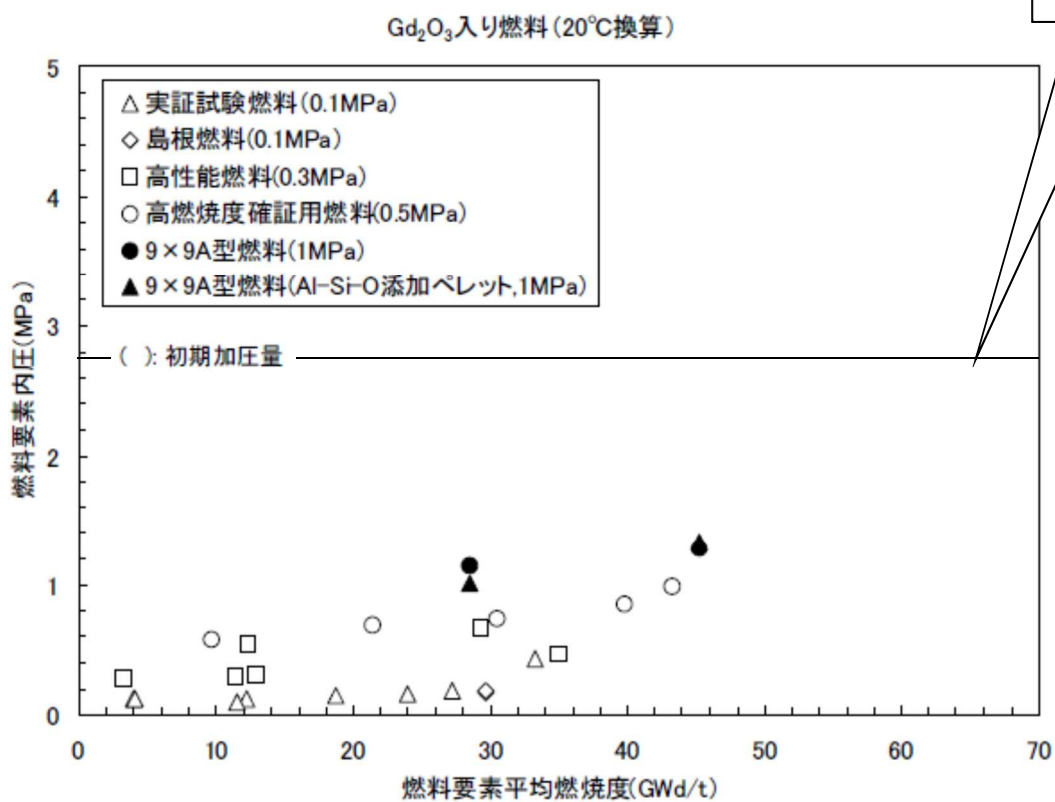
FIGURE 8.2. Plenum Gas Pressure for BWR Spent Fuel Computed from Measured EOL Void Volumes and Indicated Fission as Release Assumptions (pressure/temperature relationship from GAPCON-2)

(米国 PNL が照射後試験によって得られた照射燃料棒の空隙体積測定結果から、燃焼度と FP ガス放出率をパラメータとして燃料棒内圧を解析した結果)

添付 2 - 1 図 照射済み BWR 燃料要素のプレナムガス圧力

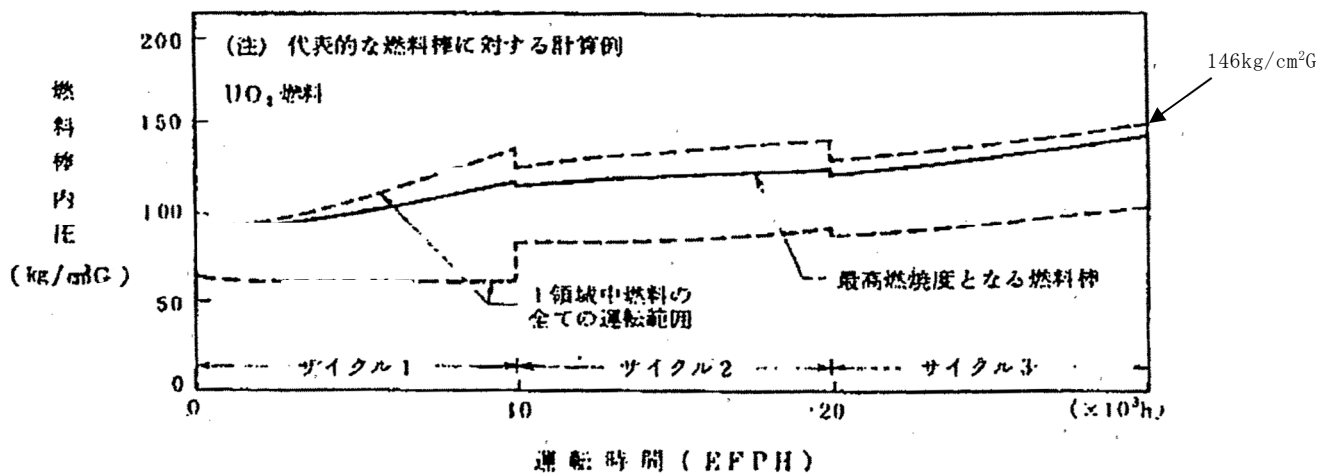


添付 2 - 2 図① UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20℃換算)



添付 2 - 2 図② Gd₂O₃入り UO₂燃料要素内圧の燃焼度変化 (20℃換算)

9×9A型燃料を除いた最大から2.8MPaと読み取り



添付 2 - 3 図 燃料棒内圧の燃焼度変化

〔敦賀発電所 2 号機原子炉設置変更許可申請書
 添付書類八⁽⁶⁾ 第 3.2.5(1) 図に一部加筆〕

参考文献

- (1) A. B. Johnson, Jr., et. al., "Technical Basis for Storage of Zircaloy-clad Spent Fuel in Inert Gases", PNL-4835. B.3, Pacific Northwest Laboratory, (1983)
- (2) 東京電力株式会社, 「福島第一原子力発電所 原子炉設置変更許可申請書」, 東京電力株式会社 (平成 3 年 5 月)
- (3) (独) 原子力安全基盤機構, 「平成 18 年度 高燃焼度 9×9 型燃料信頼性実証成果報告書 付録 1 (9×9 A 型燃料照射後試験結果)」, (独) 原子力安全基盤機構 (平成 19 年 12 月)
- (4) 敦賀発電所発電用原子炉設置許可申請書 (2 号発電用原子炉施設の変更) 添付書類八, 日本原子力発電株式会社
- (5) 特定容器等の設計の型式証明申請書 (L5-95HN100 R1), 三菱重工業株式会社, 平成 28 年 4 月 27 日

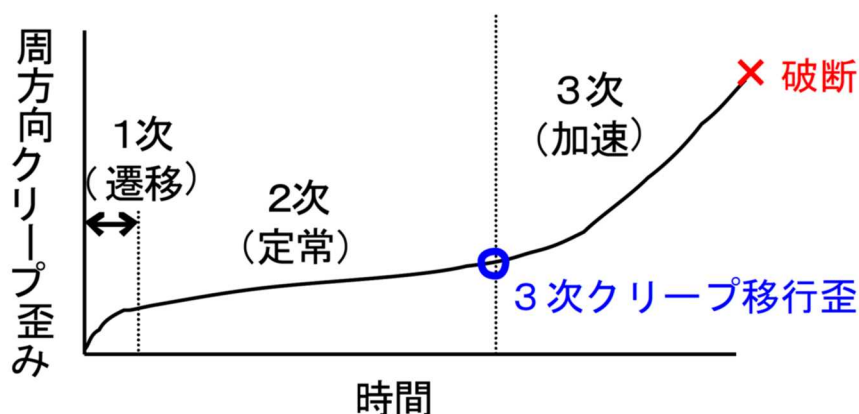
累積クリープひずみ量の根拠について

燃料被覆管のクリープ破損は、材料の降伏応力以下でも高温では徐々に塑性変形（クリープ）が生じ、この変形量（累積クリープひずみ）が限界を超える（添付 3－1 図）と燃料被覆管が破断する現象である。

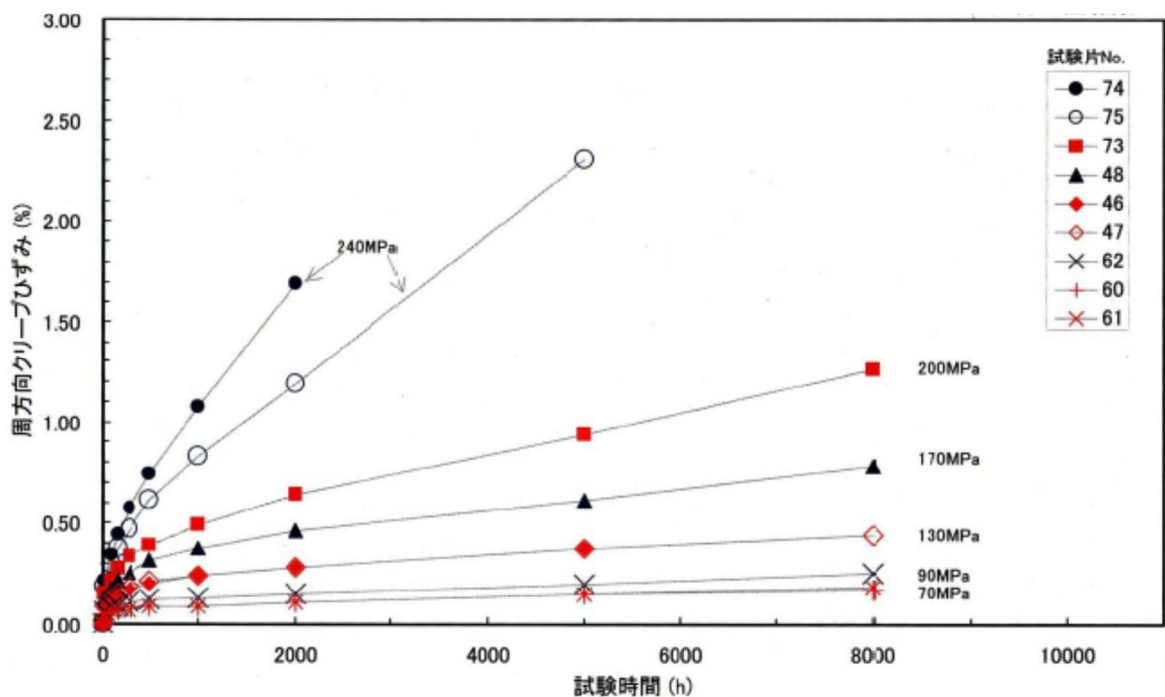
国内の軽水炉で照射された BWR 50GWd/t のジルカロイ－2 燃料被覆管、PWR 48GWd/t のジルカロイ－4 燃料被覆管を用いたクリープ試験の結果、燃料被覆管は 1 % 以上のクリープ変形能力を有する（累積クリープひずみが 1 % を超えると燃料被覆管が破損することを意味するものではない）ことが確認されている。（添付 3－2 図，添付 3－3 図）

本結果を基に、累積クリープ量が設計評価期間中に 1 % を超えないことを制限としている。

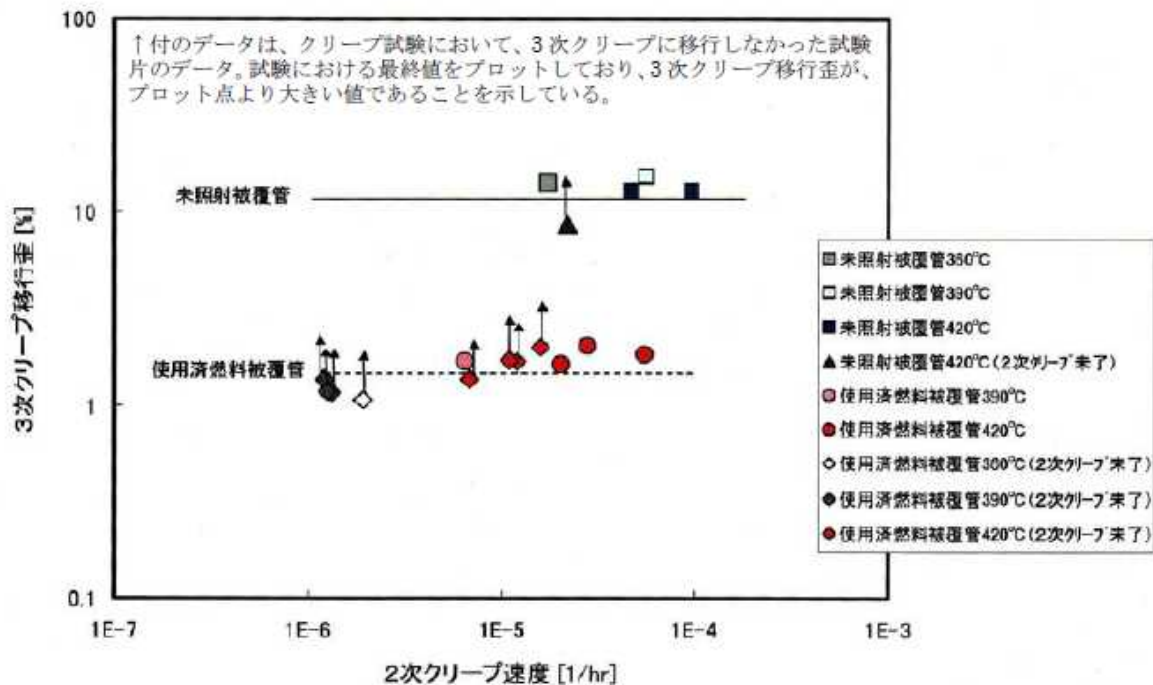
貯蔵中の地震や通常輸送中の振動・衝撃によって燃料被覆管には主に軸方向の圧縮応力や曲げ応力（～10MPa 程度）が付加されるが、軸方向の応力は燃料棒内圧により定常的に生じている応力（周方向には～70MPa 程度（BWR 燃料の場合）、～100MPa 程度（PWR 燃料の場合））に比べて小さく、作用する時間も短時間であることから、これら事象による影響は小さい。



添付 3－1 図 クリープ曲線の概略⁽¹⁾



添付 3 - 2 図 BWR 燃料被覆管のクリープ曲線 (390°C) ⁽¹⁾



添付 3 - 3 図 PWR 燃料被覆管の 3 次クリープ移行ひずみ ⁽¹⁾

参考文献

- (1) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保全部会 核燃料サイクル安全
小委員会 中間貯蔵ワーキンググループ 輸送ワーキンググループ「金属
製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設における金属製乾式
キャスクとその収納物の長期健全性について」, 総合資源エネルギー調査
会 (平成 21 年 6 月 25 日)

照射硬化回復の予測評価例

1. 評価式

5 サイクル照射された燃料被覆管の照射硬化回復試験結果より，照射硬化の回復挙動は，以下のとおり定式化⁽¹⁾されている。

$$\begin{aligned} \text{照射硬化残存率} & : F = \exp \left(- (K \cdot t)^{n_r} \right) \\ & K = A_r \cdot \exp \left(-Q_r / (RT) \right) \\ \text{定数 } n_r & : 2.08 \times 10^{-1} \\ \text{定数 } A_r & : 1.17 \times 10^{19} \text{ (1/h)} \\ \text{活性化エネルギー } Q_r & : 2.86 \times 10^5 \text{ (J/mol)} \\ t : \text{時間 (h)}, R : \text{気体定数 (J/mol/K)}, T : \text{温度 (K)} \end{aligned}$$

(1) 「平成 15 年度 リサイクル燃料資源貯蔵施設安全解析コード改良試験（燃料の長期安全性に関する試験最終成果報告書）」式 (4.1.4)

2. 照射硬化回復考慮評価例

評価条件

BWR 燃料被覆管：ジルカロイ－2

貯蔵時温度 : 300°C 一定

評価期間 : 60 年間

照射硬化残存率 F : 約 0.6

回復率 $(1 - F)$: 約 0.4 (40% 回復)