

リサイクル燃料貯蔵株式会社	
提出日	2023年12月18日
管理表No.	1122-10 改03

項目	コメント内容
燃料被覆管の制限温度	実際に収納する使用済燃料について、燃料被覆管の制限値を満足することを説明すること。
	12月1日 追加コメント 今回申請キャスクに収納を予定している使用済燃料のデータから、燃料被覆管の周方向応力が基準を満たしていることを説明すること。また、基準を外れた使用済燃料が今回申請キャスクに収納されてRFSに貯蔵されないということが確実に運用されることについても説明すること。
	12月13日 追加コメント 燃料被覆管に発生する周方向応力の算定プロセスを丁寧に説明すること。
	12月15日 追加コメント BWR用大型キャスク（タイプ2A）に収納する使用済燃料についても、燃料被覆管の制限値を満足することを説明すること

(回答)

BWR用大型キャスク（タイプ2A）、BWR用中型キャスク（タイプ2）及びPWR用キャスク（タイプ1）（以下「RFS貯蔵キャスク」という。）には、事業変更許可や型式証明の収納条件\*1、2を満足する使用済燃料を実際に収納する。RFS貯蔵キャスクに実際に収納する使用済燃料が、燃料被覆管の制限値を満足することについて、以下の通り説明する。

- \*1：事業変更許可申請書本文「四、1. ハ、(3) 貯蔵する使用済燃料の種類及びその種類毎の最大貯蔵能力」
- \*2：使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請書 (MSF-52B型, L5-95HL100R2, H27. 8. 6) 又は (MSF-21P型, L5-95HN100R1, H28. 4. 27) 「3. 貯蔵する使用済燃料の種類及びその種類毎の最大貯蔵能力」

#### 1. 燃料被覆管の制限値について

今回申請キャスクに実際に収納する使用済燃料の燃料被覆管の制限値については、以下に示す経年変化要因を考慮して設定する。

##### (1) 燃料被覆管のクリープ

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°C程度、PWRで320°C程度となる。

今回申請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°C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。

また、今回申請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°C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。

##### (2) 燃料被覆管の水素化物再配向

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°C以下、50Gwd/t型及び55Gwd/t型ジルコニウムライナ有燃料では70MPa以下で300°C以下と示されている。(第1-1表)\*3

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°C以下と示されている。(第1-1表)\*3

- \*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）

第1-1表 水素化物再配向試験のまとめ\*<sup>3</sup>

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

(3) 燃料被覆管の照射硬化の回復

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。

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\*<sup>4</sup>されている。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。

\* 4 : 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)

(4) 燃料被覆管の制限値

以上の検討を踏まえ、燃料被覆管の制限値を次のとおり設定した。

- BWR燃料被覆管 (ライナ有\*<sup>5</sup>) : 300℃, 周方向応力 70MPa
- BWR燃料被覆管 (ライナ無\*<sup>6</sup>) : 200℃, 周方向応力 70MPa
- PWR燃料被覆管 : 275℃, 周方向応力 100MPa

\* 5 : 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

\* 6 : 新型8×8燃料

2. 実際に収納する使用済燃料の評価について

実際に収納する使用済燃料の燃料被覆管について、最高温度及び周方向応力の評価を行った結果を「第2-1表 RFS貯蔵キャスクに収納する燃料被覆管の評価結果」に示す。

第2-1表 RFS貯蔵キャスクに収納する燃料被覆管の評価結果

金属キャスク	対象となる部位	最高温度 (°C) *7, 8		周方向応力 (MPa)	
		解析値	設計基準値	評価値*9	制限値
BWR用大型キャスク (タイプ2A)	新型8×8燃料ジルコニウムライ ナ燃料, 高燃焼度8×8燃料の 燃料被覆管	259	300	66.1	70
	新型8×8燃料の燃料被覆管	189	200	58.8	70
BWR用中型キャスク (タイプ2)	新型8×8燃料ジルコニウムライ ナ燃料, 高燃焼度8×8燃料の 燃料被覆管	265	300	66.1	70
	新型8×8燃料の燃料被覆管	190	200	58.8	70
PWR用キャスク (タイプ1)	17×17燃料(A型及びB型)の 燃料被覆管	205	275	96.9	100

\*7: 事業変更許可申請書 (RFS発官2第8号) 添付書類六, 第3.3-6表 金属キャスクの基本的安全機能に係る評価結果

\*8: 使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器等の設計の型式証明申請書 (MSF-52B型, L5-95HL100R2, H27.8.6) 添付書類一, 第1-5表 MSF-52B型評価結果及び同 (MSF-21P型, L5-95HN100R1, H28.4.27) 添付書類一, 第1-5表 MSF-21P型評価結果

\*9: (参考) 「燃料被覆管に発生する応力評価について」

3. RFS貯蔵キャスクへの使用済燃料の収納管理について

RFS貯蔵キャスクへの使用済燃料の収納については, RFS搬入前に, 事業変更許可や型式証明の収納条件を満足するように収納されたことを, 原子炉設置者が作成する記録により確認する。

4. 燃料被覆管の健全性について

以上から, RFS貯蔵キャスクに収納する使用済燃料は燃料被覆管の制限値を超えることはない。

以上

燃料被覆管に発生する応力評価について

1. 評価方法

燃料被覆管を円筒とみなすと、周方向応力 $\sigma_{\theta}$ は次式で表される。

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

ここで、

$\sigma_{\theta}$  : 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 $\sigma_{\theta}$ を求める。

## 2. 評価条件及び評価結果

燃料被覆管内圧 (P) \*<sup>1</sup>と燃料被覆管のデータ\*<sup>2</sup>の評価条件を用いて、「1. 評価方法」に示す式 (1) によって算定したBWR燃料被覆管及びPWR燃料被覆管に生じる周方向応力の評価結果を第2-1表「周方向応力 (MPa)」欄に示す。

\* 1 : BWR燃料については、第3.(2)項を踏まえて8MPaに設定し、PWR燃料については、添付2-3図による寿命末期の燃料棒内圧 (146 kg/cm<sup>2</sup>G) を除熱解析の評価結果 (205℃) に余裕を考慮した温度 (評価温度 210℃) に換算した11 MPaに設定。

\* 2 : 燃料被覆管平均半径 ( $r_m$ ) については、第2-1表の燃料被覆管内径 (D) と燃料被覆管厚 (t) を用いて、式 (2) によって算定する。

第2-1表 BWR及びPWR燃料被覆管に生じる周方向応力の評価条件及び評価結果

	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 D (mm)	10.55	10.55	10.55	8.36
燃料被覆管厚 t (mm)				
燃料被覆管内圧 P (MPa)				
評価温度 (℃)				
周方向応力 $\sigma_{\theta}$ (MPa)	58.8	66.1	66.1	96.9

## 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<sup>(1)</sup>) から設定。なお、米国PNLによる照射済み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/cm<sup>2</sup>)

である<sup>(2)</sup>。

(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\*)<sup>(3)</sup>。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/cm<sup>2</sup>G(=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)<sup>(4)</sup>この値を、除熱解析の評価結果(MSF-21P型の型式証明申請書<sup>(5)</sup>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<sup>(1)</sup>)

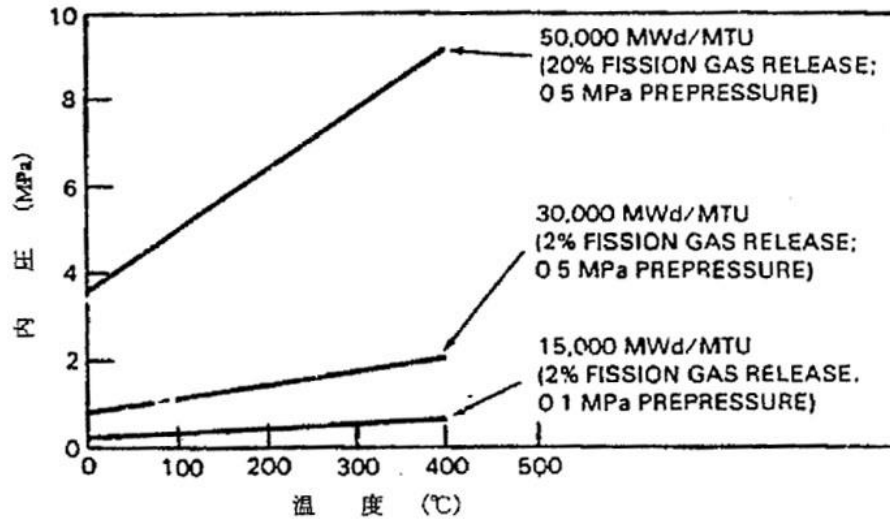
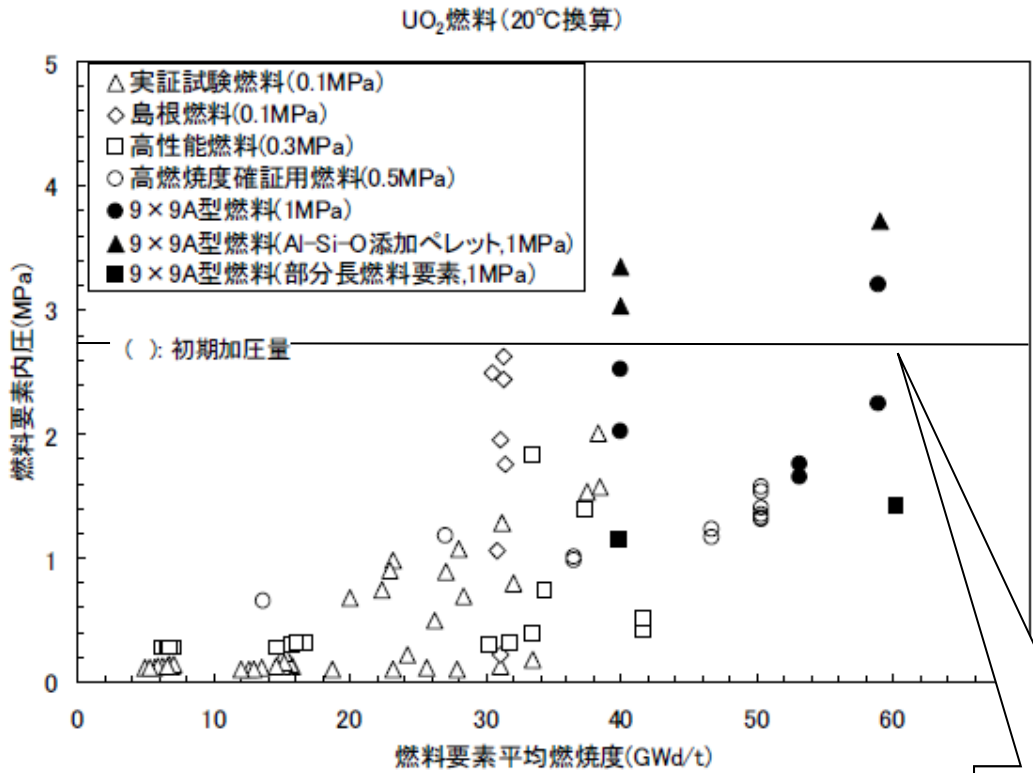


FIGURE B.2. Plenum Gas Pressure for BWR Spent Fuel Computed from Measured EOL Void Volumes and Indicated Fission as Release Assumptions (pressure/temperature relationship from GAPCON-2)

照射済み BWR 燃料要素のプレナムガス圧力

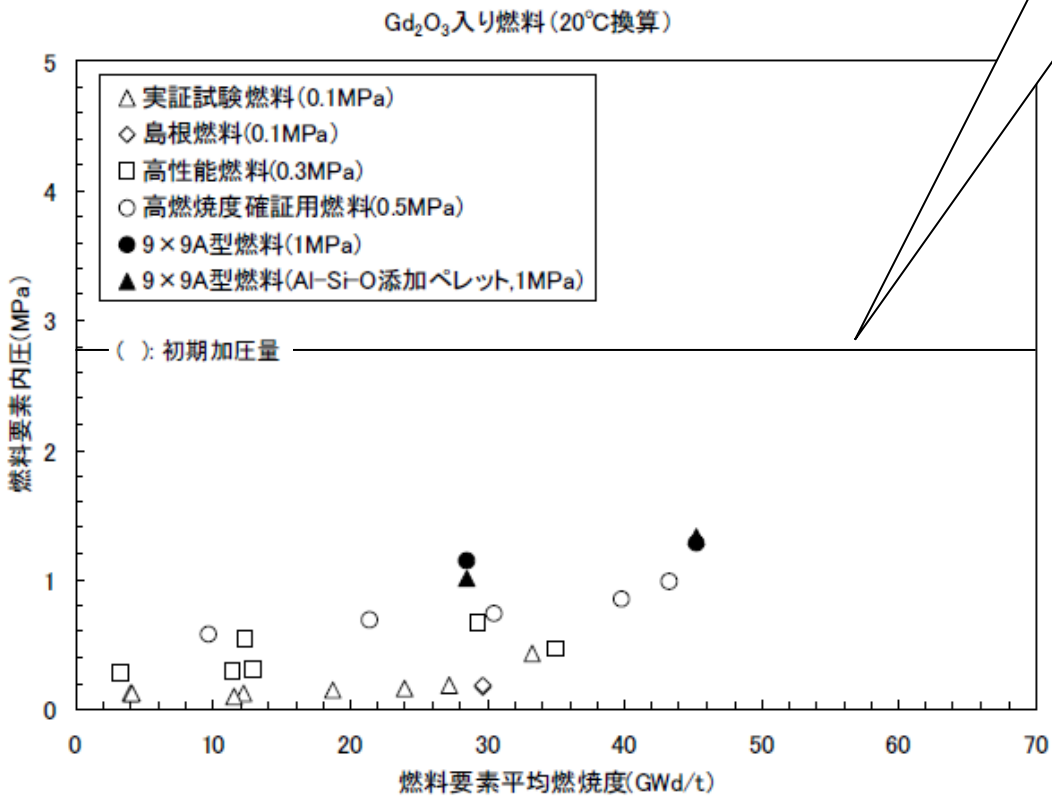
(米国 PNL が照射後試験によって得られた照射燃料棒の空隙体積測定結果から、  
燃焼度と FP ガス放出率をパラメータとして燃料棒内圧を解析した結果)

添付 2-1 図 照射済み BWR 燃料要素のプレナムガス圧力



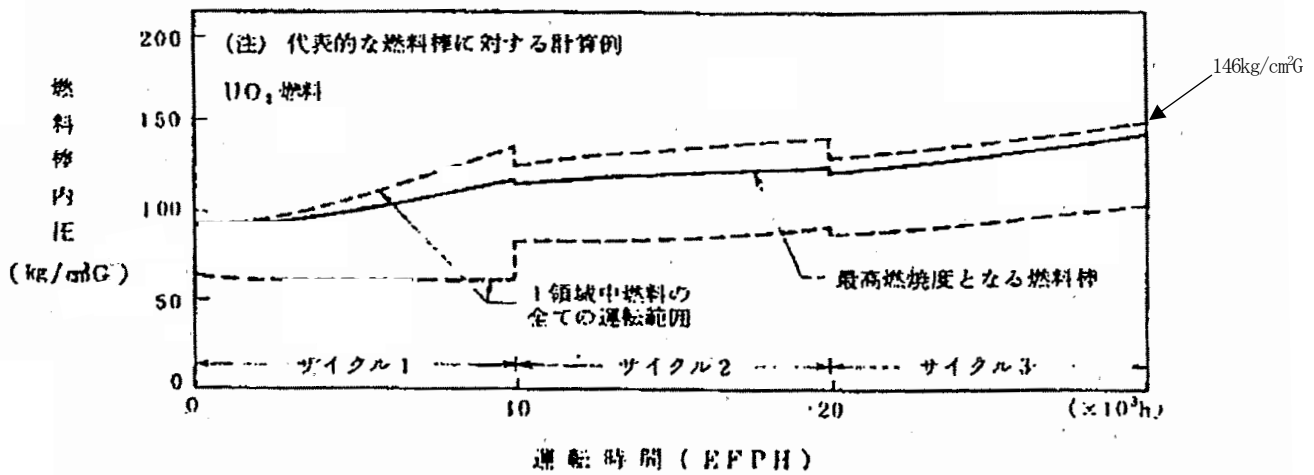
添付2-2 図① UO<sub>2</sub>燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)

9×9A型燃料を除いた最大から2.8MPaと読み取り



添付2-2 図② Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>入りUO<sub>2</sub>燃料要素内圧の燃焼度変化 (20°C換算)





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<sup>(4)</sup> 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 (9×9A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