

補足説明資料 16-6

16 条

燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設

材料・構造健全性（長期健全性）に関する説明資料

枠囲みの範囲は、商業機密のため、非公開とします。

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	3
3. 参考文献	12

別紙1 兼用キャスク構成部材等の経年変化要因について

別紙2 参考文献の概要について

別紙3 中性子遮蔽材の質量減損率について

別紙4 緩衝材の経年変化要因について

1. 要求事項

特定機器の設計の型式証明申請において、兼用キャスクの材料・構造健全性（長期健全性）に関する要求事項は、以下のとおりである。

(1) 設置許可基準規則要求事項

a. 設置許可基準規則第16条第2項一号ハ

- ・燃料体等が臨界に達するおそれがないものとする。

b. 設置許可基準規則第16条第4項一号

- ・使用済燃料からの放射線に対して適切な遮蔽能力を有するものとする。

c. 設置許可基準規則第16条第4項二号

- ・使用済燃料の崩壊熱を適切に除去することができるものとする。

d. 設置許可基準規則第16条第4項三号

- ・使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込めることができ、かつ、その機能を適切に監視することができるものとする。

e. 設置許可基準規則解釈別記4第16条5項

- ・第16条第2項第1号ハ及び同条第4項各号を満たすため、兼用キャスクは、当該兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計とすること。ここで、「兼用キャスクを構成する部材及び使用済燃料の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性を確保する設計」とは、以下を満たす設計をいう。
 - ・設計貯蔵期間を明確にしていること。
 - ・設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境条件下での経年変化を考慮した材料及び構造であること。

(2) 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用乾式キャスクによる使用済燃料の貯蔵に関する審査
ガイド確認事項

「4. 自然現象等に対する兼用キャスクの設計 4.5 材料・構造健全性」には、以下のよう
に記載されている。

【審査における確認事項】

『

設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での兼用キャスクの経年変化
に対して十分な信頼性を有する材料及び構造であること。また、貯蔵建屋を設置しな
い場合は、雨水等により兼用キャスクの安全機能が喪失しないよう対策が講じられて
いること。輸送荷姿等の緩衝体を装着した状態で貯蔵を行う場合は、緩衝体の経年変
化についても考慮していること。

』

【確認内容】

『

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低
使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温
度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変
化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基
準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられ
ていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めること
により、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計で
あること。

』

2. 要求事項への適合性

審査ガイドでは、兼用キャスクの有する安全機能（臨界防止機能、遮蔽機能、除熱機能及び閉じ込め機能）に係る設計の基本方針の妥当性を確認することが定められており、兼用キャスクの材料・構造健全性については、以下のとおり審査ガイドの確認内容に適合している。

〔確認内容〕

- (1) 安全機能を維持する上で重要な兼用キャスクの構成部材は、兼用キャスクの最低使用温度における低温脆性を考慮したものであること。また、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化の影響を、設計入力値（例えば、寸法、形状、強度及び材料物性値）又は設計基準値の算定に際し考慮していること。さらに、必要に応じて防食措置等が講じられていること。
- (2) 兼用キャスク内部の不活性環境を維持し、温度を制限される範囲に収めることにより、兼用キャスクに収納される使用済燃料の経年変化を低減又は防止する設計であること。

MSF-24P 型は、主要な構成部材について、設計貯蔵期間（60 年）中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食等の経年変化に対して信頼性を有する材料（第 1 表）及び構造とし、**貯蔵用緩衝体の経年変化も**考慮した上で、使用済燃料の健全性を維持する設計とする。

また、MSF-24P 型は、キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料の腐食等を防止するために、使用済燃料収納時にその内部空間を真空乾燥し、使用済燃料を不活性ガスであるヘリウムとともに封入して貯蔵する設計とする。さらに、キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆処理を講ずる。

設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及び当該環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化要因に対する影響について、第 2 表から第 4 表に示す MSF-24P 型の構成部材の温度及び放射線照射量を条件として、別紙 1 に示す経年変化要因とその評価の観点に基づき、文献及び試験データに基づき評価した。MSF-24P 型の主要な構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の評価結果を第 5 表に示す。評価結果より、経年変化要因に対して、主要な構成部材の経年変化を考慮した上で、使用済燃料の健全性が維持されることを確認した。

なお、**貯蔵用緩衝体の長期健全性については、別紙 4 に示す緩衝材の経年変化要因を踏まえ、型式指定申請時にその詳細を説明する予定である。**

第1表 MSF-24P型の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
キャスク本体	
胴 外筒 底部中性子遮蔽材カバー 下部端板 トラニオン 伝熱フィン 中性子遮蔽材（底部、側部）	炭素鋼（GLF1） ^(注1) 炭素鋼（SGV480） ^(注2) ステンレス鋼（SUS304） ^(注3) ステンレス鋼（SUS304） ^(注3) 析出硬化系ステンレス鋼（SUS630） ^(注3) 銅（C1020） レジン（エポキシ系樹脂）
バスケット	
バスケットプレート 中性子吸収材	アルミニウム合金（MB-A3004-H112） ほう素添加アルミニウム合金
蓋部	
一次蓋 蓋部中性子遮蔽材カバー 二次蓋 貯蔵用三次蓋 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 貯蔵用三次蓋ボルト 中性子遮蔽材（蓋部） 金属ガスケット	炭素鋼（GLF1） ^(注4) 炭素鋼（SGV480） ^(注4) 炭素鋼（GLF1） ^(注4) ステンレス鋼（SUS304） ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注5) ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注5) ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注5) レジン（エポキシ系樹脂） ニッケル基合金/アルミニウム
貯蔵用緩衝体	
緩衝材 カバープレート・リブ 貯蔵用緩衝体ボルト	木材（オーク材・米スキ材・バルサ材） ステンレス鋼 ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注5)

(注1) 胴の表面のうち、一次蓋、二次蓋及び貯蔵用三次蓋との接触面は [] を、胴内面には [] を、また、胴外面のうち、大気に触れる部分については、塗装を施す。

(注2) 外筒の外表面には、塗装を施す。

(注3) 底部中性子遮蔽材カバー、下部端板及びトラニオンの外表面には、使用環境を考慮し、必要に応じ防錆措置を施す。

(注4) 一次蓋及び二次蓋のうち、胴との接触面は [] を、また、その他の表面には、メッキを施す。また、蓋部中性子遮蔽材カバーの外表面にはメッキを施す。

(注5) 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び貯蔵用緩衝体ボルトの表面には、メッキを施す。

[] 内は商業機密のため、非公開とします。

第2表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の温度条件（最高温度）

部材		最高温度 ^{〔注1〕} （℃）
MSF- 24P型	胴	140
	外筒	120
	底部中性子遮蔽材カバー	125
	下部端板	120
	トラニオン	125
	伝熱フィン	120
	中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	135
	バスケットプレート	185
	中性子吸収材	185
	一次蓋	115
	蓋部中性子遮蔽材カバー	115
	二次蓋	110
	貯蔵用三次蓋	110
	一次蓋ボルト	115
	二次蓋ボルト	110
	貯蔵用三次蓋ボルト	110
	金属ガスケット	115
	緩衝材	120
	カバープレート・リブ	120
	貯蔵用緩衝体ボルト	120
使用済燃料（燃料被覆管）		215

（注1）仕様上の最大崩壊熱量 15.8kW を上回る設計崩壊熱量 18.1kW を適用した除熱解析により得られた温度（設計温度）である。本温度は、屋外貯蔵時及び貯蔵建屋内貯蔵時を包絡する温度設定としている（補足説明資料 16-4 「除熱機能に関する説明資料(L5-95JY213)」参照）。

第3表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の中性子照射量

部材		中性子照射量 (n/cm ²) (注1)
MSF- 24P 型	胴	6.9×10^{14}
	外筒	3.7×10^{12}
	底部中性子遮蔽材カバー及び下部端板	8.4×10^{13}
	トラニオン	6.9×10^{14} (注2)
	伝熱フィン	1.6×10^{14}
	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	1.6×10^{14}
	バスケットプレート及び中性子吸収材	1.5×10^{15}
	蓋部 (注3)	2.5×10^{14}
	貯蔵用緩衝体 (注4)	9.8×10^{12}
使用済燃料 (燃料被覆管)		1.5×10^{15}

(注1) 遮蔽解析結果 (補足説明資料 16-3 「遮蔽機能に関する説明資料 (L5-95JY212)」参照) から得られた貯蔵初期の中性子束が減衰せず設計貯蔵期間 (60 年間) 中一定であると仮定して算出した設計貯蔵期間中の累積値。

(注2) トラニオンの中性子照射量は保守的に胴の値と同じとした。

(注3) 一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、二次蓋、貯蔵用三次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び金属ガスケットを含む。

(注4) 緩衝材、カバープレート・リブ及び緩衝体ボルトを含む。

第4表 MSF-24P 型のガンマ線照射量

部材		ガンマ線照射量 (Gy) (注1)
MSF- 24P 型	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	5.2×10^3
	貯蔵用緩衝体 (注2)	39

(注1) 遮蔽解析結果 (補足説明資料 16-3 「遮蔽機能に関する説明資料 (L5-95JY212)」参照) から得られた貯蔵初期のガンマ線が減衰せず設計貯蔵期間 (60 年間) 中一定であると仮定して算出した設計貯蔵期間中の累積値。

(注2) 緩衝材、カバープレート・リブ及び緩衝体ボルトを含む。

第5表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について (1/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
胴、外筒（内面）、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー、二次蓋（内面）、一次蓋ボルト 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロム モリブデン鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・1%燃料破損相当の燃料棒内ガス中のヨウ素ガスを含む実機模擬環境における、鉄系材料の最大腐食速度により、60年間の腐食量を推定しても0.5mm程度 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ・ヘリウム雰囲気 ・中性子遮蔽材と接触	・胴（内面）、一次蓋、蓋部中性子遮蔽材カバー（外面）、二次蓋（内面）及び一次蓋ボルトは、不活性雰囲気が維持される限り、腐食しない。仮に1%燃料破損相当の燃料棒内ガスの存在を考慮しても、胴（内面）の腐食による構造強度への影響はない。 ・胴（外面）、外筒（内面）及び蓋部中性子遮蔽材カバー（内面）は、中性子遮蔽材と接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、酸化鉄の生成により酸素の拡散障壁が形成されること、及び中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ （設計・建設規格（2007年追補版） ⁽³⁾ 適用）では、-30℃から350℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度（融点[絶対温度]の1/3に相当）は約300℃ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～140℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽⁷⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
外筒（外面）、二次蓋（外面）、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト 【材質】 炭素鋼 ニッケルクロム モリブデン鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・防錆効果を考慮せず炭素鋼の全面腐食を仮定して算出したところ、6mm程度（60年間×腐食進展速度0.1mm/年 ⁽⁸⁾ ）。	使用環境： 外気（海塩粒子雰囲気）、結露水	外筒（外面）、二次蓋（外面）、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルト及び貯蔵用緩衝体ボルトは防錆処理により腐食しない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ （設計・建設規格（2007年追補版） ⁽³⁾ 適用）では、-30℃から350℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度（融点[絶対温度]の1/3に相当）は約300℃ ⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～120℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽⁷⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
貯蔵用三次蓋、底部中性子遮蔽材カバー、下部端板、トラニオン 【材質】 ステンレス鋼 析出硬化系ステンレス鋼	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・0.2%耐力相当の応力を負荷した条件における海浜環境での長期曝露試験において、応力腐食割れは認められない ⁽⁹⁾ 。	使用環境： ・外気（海塩粒子雰囲気）、結露水 ・中性子遮蔽材と接触	・実機より厳しい使用環境（応力及び雰囲気）においても応力腐食割れは発生せず、腐食による構造強度への影響はない。 ・底部中性子遮蔽材カバー、下部端板及びトラニオンの内面は中性子遮蔽材と接しており、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、ステンレス鋼は耐食性に優れていることに加え、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・金属キャスク構造規格 ⁽²⁾ （設計・建設規格（2007年追補版） ⁽³⁾ 適用）では、-30℃から350℃又は425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。 ・クリープによる変形を考慮すべき温度（融点[絶対温度]の1/3に相当）は約280℃ ⁽⁴⁾ 。 ・-20℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～125℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・中性子照射量が 10^{17}n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽¹⁰⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
伝熱フィン 【材質】 銅	腐食	●除熱機能： 腐食によるき裂・破損	・胴（炭素鋼）-外筒（炭素鋼）の閉鎖環境であり、銅の電極電位は鉄に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である ⁽¹¹⁾ ため、銅は腐食しない。 ・密閉静止した淡水環境における銅が接続された鋼の腐食試験において、腐食速度は鋼単体の場合と同程度 ⁽¹²⁾ 。	使用環境： ・胴と外筒間の閉鎖環境 ・中性子遮蔽材と接触	銅に比べて鉄はイオン化傾向の高い金属であり、炭素鋼が選択的に腐食されることから、伝熱フィンがき裂・破損することはない。また、中性子遮蔽材の熱劣化により水が生じるが、中性子遮蔽材充填空間は閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、伝熱フィンと胴及び外筒との接合部において異種金属接触による腐食促進の影響は小さく、除熱機能への影響はない。
	熱	●除熱機能： 熱によるき裂・破損	・日本産業規格（JIS）では-30℃から200℃までの設計用強度・物性値が規定されている ⁽¹³⁾ 。	使用環境温度： -20℃～120℃	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、除熱機能への影響はない。
	照射	●除熱機能： 照射によるき裂・破損	・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 程度までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽¹⁴⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、除熱機能への影響はない。

第6表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について (2/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
バスケットプレート 【材質】 アルミニウム合金	腐食	●構造強度： 腐食による構造強度の低下	・使用済燃料収納時における使用済燃料プール水(ほう酸水)による腐食量は0.127mm/年以下 ⁽¹⁵⁾ 。 ・金属キャスク内部に残留する酸素量が全てバスケットの腐食に費やされたとして評価しても、腐食量は1μm以下 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。なお、使用済燃料収納時に使用済燃料プール水中に置かれる期間は最大でも数日程度であり腐食による構造強度への影響はない。
	熱	●構造強度： 熱によるき裂・破損	・バスケットプレートに用いるアルミニウム合金は-40℃から250℃までの温度において、設計貯蔵期間中の熱による材料特性変化を考慮した材料特性試験データに基づき設計用強度・物性値を設定 ⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ 。 ・バスケットプレートに用いるアルミニウム合金は、クリープひずみが0.1%から1.0%程度の範囲において、クリープひずみが材料の機械的特性に影響を与えることはない ⁽¹⁾ 。 ・設計貯蔵期間経過後のクリープひずみが0.1%となるためには10MPa以上の応力が必要 ⁽¹⁶⁾ であるが、貯蔵中にバスケットプレートに発生する応力は1MPa以下。 ・初期材及び設計貯蔵期間中の熱による材料変化を考慮した材料においても、-40℃において低温脆性破壊のおそれはない ⁽¹⁶⁾ 。	使用環境温度： -20℃～185℃以下	設計用強度・物性値が規定されており、熱により亀裂・破損することはない温度範囲で使用するため、構造強度への影響はない。
	照射	●構造強度： 照射による機械的特性の変化	・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は認められない。 ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾	中性子照射量： 10^{16}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、構造強度への影響はない。
中性子吸収材 【材質】 ほう素添加 アルミニウム合金	腐食	●臨界防止機能： 腐食による臨界防止機能の低下	・中性子吸収材内に存在する炭化ほう素は耐化学薬品性も大きいことから酸・アルカリに侵されることはない ⁽²⁰⁾ 。 ・使用済燃料収納時における使用済燃料プール水(ほう酸水)による腐食量は0.127mm/年以下 ⁽¹⁵⁾ 。 ・金属キャスク内部に残留する酸素量が全てバスケットの腐食に費やされたとして評価しても、腐食量は1μm以下 ⁽¹⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気維持される限り、腐食しない。なお、使用済燃料プール水中に置かれる期間は最大でも数日程度であり、腐食による臨界防止機能への影響はない。
	熱	●臨界防止機能： 熱による臨界防止機能の低下	・中性子吸収材内に存在する炭化ほう素の融点は約2350℃であり、熱に対して安定性を有している ⁽²⁰⁾ 。 ・アルミニウム及びアルミニウム合金の融点は約600℃である ⁽¹⁵⁾ 。	使用環境温度： -20～185℃以下	使用環境温度は、600℃よりも十分低く、臨界防止機能への影響はない。
	照射	●臨界防止機能： 中性子照射による臨界防止機能の低下	・ ¹⁰ Bの設計貯蔵期間(60年間)中の減損割合は、保守的に全中性子束を用いて評価しても 10^{-5} 程度。 ・中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 までは、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾ 。	中性子照射量： 10^{16}n/cm^2 以下	¹⁰ Bの減損割合は無視でき、また、中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、臨界防止機能への影響はない。
中性子遮蔽材 【材質】 エポキシ樹脂	熱・腐食	●遮蔽機能： 重量減少の有無	・(独)原子力安全基盤機構「平成14年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験)報告書」 ⁽²¹⁾ に記載されているデータ及び熱解析結果に基づき、熱による設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率は、1.9%と評価(別紙3参照)。	使用環境温度： -20～135℃以下 使用環境： 閉鎖環境	遮蔽設計では、設計貯蔵期間及び使用環境温度を考慮した質量減損率(1.9%)を評価したうえで、これに余裕を加えて2.5%の質量減損があるとして、中性子遮蔽材の原子個数密度を保守的に設定し、遮蔽機能への影響を考慮している。
	照射	●遮蔽機能： 重量減少の有無	・中性子照射後(10^{15}n/cm^2)の耐熱試験結果によれば、照射による質量減損は認められない ⁽¹⁾⁽²²⁾ 。 ・ガンマ線照射後(10 ⁴ Gy程度)の耐熱試験結果によれば、照射による質量減損は認められない ⁽¹⁾ 。	中性子照射量： 10^{15}n/cm^2 以下 ガンマ線照射量： 10 ⁴ Gy以下	中性子照射量及びガンマ線照射量は、質量減損が認められない条件以下であり、遮蔽機能への影響はない。

第6表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について (3/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
金属ガスケット 【材質】 ニッケル基合金 アルミニウム	腐食	●閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能の低下	・蓋部縮小モデルにおける約3年間の塩水噴霧試験では、漏えい率に変化はない ⁽²³⁾ 。	使用環境： 一次蓋、二次蓋内側： ヘリウム雰囲気 二次蓋外側： 外気（海塩粒子雰囲気）、結露水	一次蓋及び二次蓋の金属ガスケット内側は、不活性雰囲気は維持される限り、腐食しない。二次蓋の金属ガスケット外側は、実機の使用環境より厳しい塩水噴霧環境においても漏えい率に変化はなく、閉じ込め機能への影響はない。
	熱	●閉じ込め機能： 熱による閉じ込め機能の低下	・初期の閉じ込め機能 ($1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$) を保持できる限界ラーソン・ミラー・パラメータ (LMP) は約 11.0×10^3 (150°C で100年以上閉じ込め機能を維持可能に相当) ⁽²⁴⁾ 。 ・長期密封性能試験において、 $130 \sim 140^\circ\text{C}$ (19年以上) で閉じ込め性能維持した ⁽²⁵⁾ 。設計貯蔵期間を60年とした場合に長期密封性能試験と同じLMPとなる金属ガスケットの初期温度は 134°C であり、この温度以下とすれば閉じ込め機能は維持される ⁽²⁵⁾ 。	使用環境温度： $-20^\circ\text{C} \sim 115^\circ\text{C}$ 以下	使用環境温度は、 130°C よりも低く、閉じ込め機能への影響はない。
	照射	●閉じ込め機能： 照射による機械的特性の変化	・ニッケル基合金は、中性子照射量が $10^{21} \text{n}/\text{cm}^2$ 程度までは顕著な機械的特性変化は認められない ⁽²⁶⁾ 。 ・アルミニウムは、中性子照射量が $10^{19} \text{n}/\text{cm}^2$ 程度以下では、顕著な機械的特性変化は認められない ⁽²⁷⁾ 。	中性子照射量： $10^{15} \text{n}/\text{cm}^2$ 以下	中性子照射量は、各材料の機械的特性に変化が認められる値以下であり、閉じ込め機能への影響はない。

第6表 MSF-24P型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年変化に対する評価について (4/4)

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部材の材質に対する経年変化に係わるデータ	設計条件	評価
燃料被覆管 【材質】 ジルカロイ	腐食	●腐食による亀裂・破損	・残留水分が 10wt%以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい ⁽¹⁸⁾ 。	使用環境： ヘリウム雰囲気	燃料被覆管は、不活性雰囲気が維持される限り、腐食による影響はなく、亀裂・破損しない。
	熱	●熱による亀裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> ・熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある⁽²⁸⁾。 ・クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損については、予測式に基づく累積クリープひずみが 1%以下となるよう温度を制限することで防止できる⁽²⁸⁾。以下に示す燃料被覆管の水素化物再配向に係る制限範囲では、累積クリープひずみが 1%を超えることはない。 ・照射硬化の回復については、国内軽水炉で照射された PWR 照射済被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、硬化の回復のしきい値は、300℃近傍である⁽²⁸⁾。しきい値以下であれば照射硬化の回復の可能性は小さく、使用済燃料被覆管の温度を制限することにより照射硬化の回復を防止できる。 ・燃料被覆管中の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料の燃料被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械的特性試験の結果、燃料被覆管の周方向機械的特性が低下しない燃料被覆管の温度が 275℃以下、周方向応力が 100MPa 以下と求められており、燃料被覆管温度と周方向応力を制限することによって、機械的特性の劣化を防止できる⁽²⁸⁾。 ・応力腐食割れについては、燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない⁽²⁸⁾。 	使用環境温度： -20℃～215℃以下	熱による経年変化要因のうち、燃料被覆管中の水素化物再配向を防止することにより、他の発生も同時に防ぐことができる。設計貯蔵期間中の燃料被覆管の温度及び周方向応力は、275℃及び 100MPa を超えないことから、熱による影響はなく、亀裂・破損しない。
	照射	●照射による亀裂・破損	・ジルコニウム合金は、中性子照射量が炉内の中性子照射量($10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm ²)に対して十分低い場合、照射の影響は無視し得る ⁽²⁸⁾ 。	中性子照射量： 10 ¹⁶ n/cm ² 以下	中性子照射量は、機械的特性に変化が認められる値以下であり、亀裂・破損しない。

3. 参考文献

- (1) (独)原子力安全基盤機構, 「平成 15 年度 金属キャスク貯蔵技術確証試験 報告書 最終報告」, (2004).
- (2) (一社)日本機械学会, 「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」, (2007).
- (3) (一社)日本機械学会, 「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005 年版) <第 I 編 軽水炉規格> (JSME S NC1-2005 (2007 年追補版含む))」, (2007).
- (4) ステンレス協会, 「ステンレス鋼便覧 (第 3 版)」, 日刊工業新聞社, (1995).
- (5) (一社)日本金属学会, 「金属便覧 (改訂 6 版)」, 丸善(株), (2000).
- (6) (一社)日本原子力学会, 「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準: 2013 (AESJ-SC-F006: 2013)」, (2013).
- (7) K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, “An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 210, (1994).
- (8) (公社)腐食防食協会編, 「腐食・防食ハンドブック CD-ROM 版 第 2 版」, 丸善(株), (2005).
- (9) R. R. Gaugh, “Stress Corrosion Cracking of Precipitation-Hardening Stainless Steels”, *Materials Performance*, Vol.26, No.2, (1987).
- (10) 土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その 2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (一財)電力中央研究所, (1997).
- (11) 北村義治, 鈴木紹夫, 「防蝕技術 (第 2 版)」, (2002).
- (12) 能登谷武紀, 「密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食」, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).
- (13) (一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267: 2015)」, (2015).
- (14) S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, *ASTM STP888*, (1986).
- (15) (一社)日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック (第 8 版)」, (2017).
- (16) 三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).
- (17) 前口貴治, 川原慶幸, 山本隆一, 崎間公久, 玉置廣紀, 「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」, 軽金属, 第 68 巻 第 12 号, (2018).
- (18) (一社)日本原子力学会, 「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 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).

- (19) T. Maeguchi, Y. Kamiwaki, D. Ishiko, T. Yamamoto, “Development and Reliability Verification of Aluminum Alloys for Basket of Transport and Storage Cask for Spent Nuclear Fuel”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
- (20) 吉村壽次, 「化学辞典 (第2版)」, (2009).
- (21) (財)原子力発電技術機構, 「平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- (22) T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, “Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment”, Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).
- (23) 小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株)日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).
- (24) 加藤治, 伊藤千浩, (一財)電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (1992).
- (25) (一財)電力中央研究所, 「平成21年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」, (2010).
- (26) T. T. Claudson, “Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report”, HEDL-TME 75-77, (1975).
- (27) H. Yoshida, et al., “Reactor Irradiation Effects on Al 1100”, Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).
- (28) 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 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」, (2009).

別紙1 兼用キャスク構成部材等の経年変化要因について

1. 兼用キャスク構成部材及び使用済燃料の経年変化要因と設計対応

兼用キャスクの構成部材及び使用済燃料について、設計特性上考慮すべき経年変化要因は以下とされている⁽¹⁾。

(1) 腐食

全面腐食、隙間腐食、応力腐食割れ、異種材料接触部の化学反応及びジルカロイにおける水素吸収・酸化

(2) 熱

低温又は高温での材料組成・材料組織の変化、強度・延性・脆性・クリープ・その他物性値の変化及び質量減少

(3) 放射線照射

ガンマ線及び中性子照射による材料組成・材料組織の変化及び強度・延性・脆性・その他物性値の変化

兼用キャスクの構成部材及び使用済燃料については、安全機能（安全機能部材）及び構造強度（構造強度部材及び使用済燃料）への影響について、経年変化の影響を防止するための兼用キャスクの設計対応（防食措置等）を踏まえ、経年変化を考慮する必要の有無を文献や試験データに基づき判定する。また、設計対応を考慮した上でも経年変化による安全機能及び構造強度への影響が生じることが考えられるものについては、経年変化の影響を考慮して設計及び評価を行う。

2. 兼用キャスク構成部材の経年変化の評価の観点

1. の(1)～(3)に示した3つの経年変化要因に対して、兼用キャスクの構成部材及び使用済燃料の評価における、主な評価の観点について別紙1-1表に示す。

別紙1-1表 兼用キャスクの構成部材及び使用済燃料の主な評価の観点

経年変化要因	主な評価の観点
腐食	兼用キャスク構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の材質及び使用環境を踏まえ、腐食の有無又は腐食の程度を算定し、腐食による構造強度（構造強度部材）又は安全機能（安全機能部材）への影響について評価する。
熱	兼用キャスク構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の材質及び使用温度を踏まえ、主に強度部材に対しては、低温での脆性破壊、高温でのクリープの有無について、また、安全機能部材に対しては、熱による物性値や質量等への影響について評価する。
放射線照射	兼用キャスク構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の材質及び放射線照射量を踏まえ、主に強度部材に対しては、照射による機械的特性の変化への影響、また、安全機能部材に対しては、照射による安全機能への影響について評価する ^(注1) 。

(注1) 放射線照射の影響について、金属材料については、以下の補足説明に示すとおりガンマ線の影響は中性子に比べて小さいため、中性子照射に対する影響について評価する。

(補足説明) 金属材料の照射損傷について

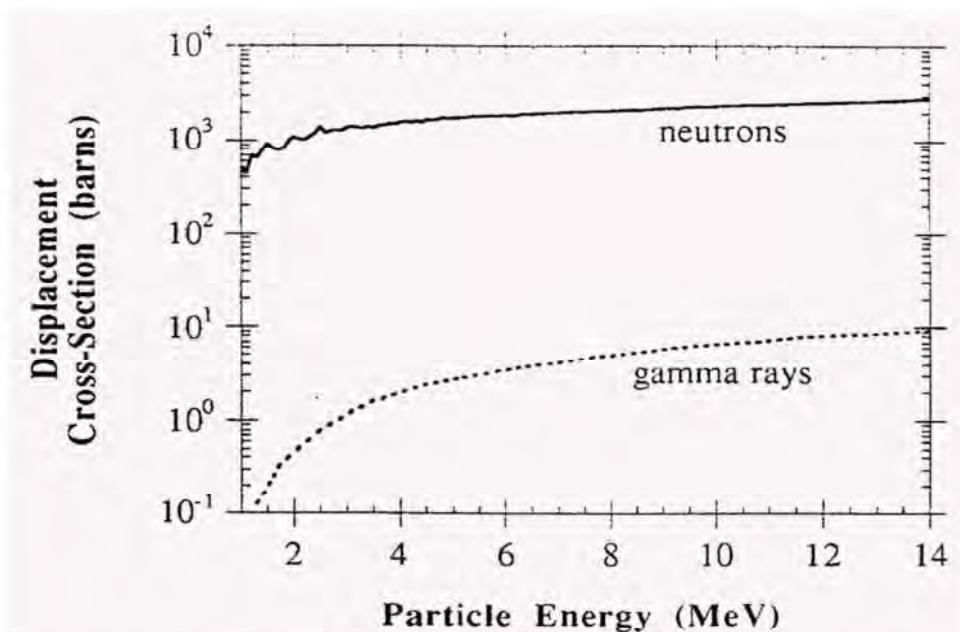
(1) 中性子照射による金属材料の特性変化

金属材料では、中性子照射を受け、格子原子がはじき出される。格子位置からはじき出された格子間原子及びその跡に生じた空格子点は、照射前から存在している格子欠陥へ移動し消滅するほか、それぞれが転移ループあるいはボイドとして集合する。これらの影響により、金属材料の機械的性質に大きな影響を及ぼすことが知られている⁽²⁾。

(2) 金属材料の特性変化に与えるガンマ線の影響

電磁波であるガンマ線は、直接格子原子をはじき出すことはないが、コンプトン散乱、光電効果及び電子対生成によって、比較的エネルギーの高い電子を作り出し、この電子が格子原子をはじき出す⁽²⁾。

兼用キャスクのガンマ線エネルギーは、約 1MeV 以下である。エネルギーが 1MeV 程度のガンマ線では、電子の生成の殆どは、コンプトン散乱により生じる⁽²⁾。中程度の原子番号で構成される合金のガンマ線によるはじき出し断面積金属材料では、同じエネルギーを持つ中性子と比べ 2~3 桁程度小さい(別紙 1-1 図参照)⁽³⁾。したがって、ガンマ線による照射影響は、非常に小さいことから、金属材料については、中性子による影響について考慮する。



別紙 1-1 図 中程度の原子番号を持つ合金での中性子とガンマ線(コンプトン散乱)のはじき出し断面積の比較⁽³⁾

(参考文献)

- (1) (一社)日本原子力学会, 「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 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).
- (2) 日本材料科学学会編, 「照射効果と材料」, 裳華房, (1994).
- (3) D.E. Alexander, and L.E. Rehn, “Analysis of Gamma Ray Displacement Damage in Light Water Reactor Pressure Vessels.” ANL/MSD/CP-86640, Argonne National Laboratory, (1995).

別紙 2 参考文献の概要について

第 5 表に示した MSF-24P 型の主要な構成部材及び使用済燃料の経年要因に対する評価に用いた参考文献の概要を別紙 2-1 表に示す。

別紙 2-1 表 参考文献の概要

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
1	(独)原子力安全基盤機構,「平成15年度 金属キャスク貯蔵技術 確証試験 報告書 最終報告」,(2004).	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄系材料 (A350LF5) の腐食速度は、6ヶ月間の腐食試験 (ヨウ素ガス濃度 $3\text{g}/\text{m}^3$; 1%の燃料破損率相当) では最大 $2.3\mu\text{m}/\text{年}$ であり、この腐食速度が 60年間維持されたとしても $138\mu\text{m}$ 程度となり、問題となる腐食量ではない。容器底部の高濃度条件下 ($20.5\text{g}/\text{m}^3$) でも $8\mu\text{m}/\text{年}$ 程度であり、60年間の腐食量は $500\mu\text{m}$ 程度となり、問題となる腐食量ではない。 ・アルミ系材料は、キャスク内に残留する酸素が全てバスケットの腐食に使用されたとしても、平均被膜厚さは $1\mu\text{m}$ 以下である。 ・エポキシ系レジン照射材 (中性子照射量 $1.5 \times 10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$ 及びガンマ線照射量 $3.9 \times 10^4\text{Gy}$) の質量減損率は、未照射の加熱試験後に比べ、質量減損率でオーダーが2桁異なるほど小さい。また、中性子照射後加熱試験及びガンマ線照射後加熱試験と未照射加熱試験の比較においても有意な違いはなく、照射の影響は、加熱による影響に比べ無視し得る。 	<ul style="list-style-type: none"> ○本文献の腐食試験結果は、設計上の燃料破損率 0.1%に対して 1%破損の条件及び兼用キャスク内部の最高温度 (燃料集合体最高温度: 215°C) に対して、試験温度が 270°C の条件のもと得られた結果であり、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて厳しい条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。 ○本文献におけるキャスクと MSF-24P 型で、空間容積が同等であるため、適用することは妥当である。 ○本文献での試験は、兼用キャスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、兼用キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 ($10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下) 及びガンマ線照射量 (10^4Gy 以下) を上回る中性子照射量 ($1.5 \times 10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$) 及びガンマ線照射量 ($3.9 \times 10^4\text{Gy}$ 以下) で実施されており、参考文献として妥当である。
2	(一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キャスク 構造規格 (JSME S FA1-2007)」,(2007).	炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、 $-30^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ の温度範囲において、ステンレス鋼は、 $-30^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ 又は 375°C の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。	○本文献には、兼用キャスク各部材の設計用強度 (クリープの影響を考慮) 及び物性値の規格値が示されている。文献の温度範囲は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。
3	(一社)日本機械学会,「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版) <第I編 軽水炉規格> (JSME S NC1-2005 (2007年追補版含む))」,(2007).		
4	ステンレス協会,「ステンレス鋼 便覧 (第3版)」,日刊工業新聞社,(1995).	金属材料は、融点(絶対温度)の $1/3$ を超えるとクリープによる変形量が無視できなくなる。また、SUS304 の融点は、 $1398^\circ\text{C} \sim 1453^\circ\text{C}$ である。	○本文献は、金属材料においてクリープを考慮すべき温度、及び SUS304 材の基礎データ (融点) を示すものであり、参考文献として妥当である。
5	(一社)日本金属学会,「金属便覧 (改訂6版)」,丸善(株),(2000).	炭素鋼の融点は、 1492°C である。	○本文献は、炭素鋼の基礎データ (融点) を示すものであり、参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
6	(一社)日本原子力学会,「使用済燃料・混合酸化物新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器の安全設計及び検査基準:2013 (AESJ-SC-F006:2013)」, (2013).	炭素鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼及びステンレス鋼は、 -20°C において低温脆性が生じない材料である。	○本文献は、兼用キャスク各部材の最低使用温度である -20°C を含む低温脆性が示されており、参考文献として妥当である。
7	K. Farrell, S. T. Mahmood, R. E. Stoller, L. K. Mansur, "An Evaluation of Low Temperature Radiation Embrittlement Mechanisms in Ferritic Alloys", Journal of Nuclear Materials, Vol. 210, (1994).	様々な組成の鋼及び合金鋼の照射材を用いたシャルピー衝撃試験の結果、中性子照射量が $10^{16}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下では、未照射材の機械的特性(遷移温度)との有意な差はみられない。	○炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼と同等の組成の鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量($10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下)を上回る中性子照射量($10^{16}\text{n}/\text{cm}^2$)と遷移温度変化の関係が示されており、機械的特性へ影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
8	(公社)腐食防食協会編,「腐食・防食ハンドブック CD-ROM版 第2版」,丸善(株), (2005).	炭素鋼及び低合金鋼の海岸環境での腐食速度は $0.1\text{mm}/\text{年}$ である。	○炭素鋼及び低合金鋼の海岸環境での腐食影響を示した文献である。兼用キャスクの設置が想定される最も厳しい環境での腐食影響を示すものであり、参考文献として妥当である。
9	R. R. Gaugh, "Stress Corrosion Cracking of Precipitation-Hardening Stainless Steels", Materials Performance, Vol. 26, No. 2, (1987).	0.2%耐力相当の応力を負荷した条件におけるステンレス鋼の海浜環境での長期曝露試験において、応力腐食割れは認められない。	○ステンレス鋼の応力腐食試験結果を示す文献である。兼用キャスクの使用環境(応力及び雰囲気)よりも厳しい環境での試験結果を示すものであり、参考文献として妥当である。
10	土肥謙次, 秀耕一郎, 黛正己, 恩地健雄, 大岡紀一, 「304 ステンレス鋼の SCC 特性に及ぼす中性子照射効果 (その2) - 熱鋭敏化材の SCC 感受性に及ぼす照射影響 -」, (一財)電力中央研究所, (1997).	ステンレス鋼の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が $10^{17}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下では、未照射材に対する機械的特性(0.2%耐力及び一様伸び)の有意な差はみられない。	○ステンレス鋼への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献結果には、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量($10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下)を上回る中性子照射量($10^{17}\text{n}/\text{cm}^2$)と0.2%耐力及び一様伸びの関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
11	北村義治, 鈴木紹夫, 「防蝕技術 (第2版)」, (2002).	銅の電極電位は炭素鋼(鉄)に比べて高く、イオン化傾向の低い金属である。	○本文献は、金属の熱力学的貴卑を示す基礎データであり、参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
12	能登谷武紀, 「密閉系淡水における鋼-銅系のガルバニック腐食」, 伸銅技術研究会誌 33 巻, (1994).	密閉した水道水において銅を接続した鋼の腐食試験の結果、鋼の腐食速度は、1 週間以内に約 2 桁減少した。銅を接続した鋼の腐食速度は、比液量、表面積比、溶液の電気伝導度等に依存するが、腐食反応に伴う溶存酸素の消費により、鋼の腐食速度は短時間に減少し、鋼単独の場合の腐食速度と同程度となる。	○本文献には、兼用キャスクの伝熱フィン及び胴又は外筒と同じ材料である銅及び炭素鋼を用いた腐食試験の結果が示されている。本試験は、貯蔵中の伝熱フィンと同じ淡水条件(中性子遮蔽材により生じる水分に相当)及び密閉環境であるため、参考文献として妥当である。
13	(一財)日本規格協会, 「圧力容器の設計 (JIS B 8267 : 2015)」, (2015).	-30℃~200℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。	○本文献には、銅の設計用強度及び物性値の規格値が示されている。文献の温度範囲 (-30℃~200℃) は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。
14	S. J. Zinkle, G. L. Kulcinski, “Low-Load Microhardness Changes in 14-MeV Neutron Irradiated Copper Alloys”, ASTM STP888, (1986).	銅の照射材を用いた硬さ試験の結果、中性子照射量が $10^{16}\text{n}/\text{m}^2$ 以下では、未照射材に対する機械的特性(ビッカース硬さ)の有意な差はみられない。	○本文献は、銅への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 ($10^{15}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下) を上回る中性子線量 ($10^{16}\text{n}/\text{cm}^2$) とビッカース硬さの関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
15	(一社)日本アルミニウム協会, 「アルミニウムハンドブック (第 8 版)」, (2017).	アルミニウムのほう酸水に対する腐食量は、0.127mm/年以下である。	○本文献は、アルミニウムのほう酸水に対する腐食量を示す文献である。PWR 使用済燃料プールのほう酸濃度を上回る濃度 100%までのデータであり、参考文献として妥当である。
16	三菱重工業(株), 「型式設計特定容器等の型式指定申請書 本文及び添付書類の一部補正について」, (2017).	<ul style="list-style-type: none"> アルミニウム合金は、中性子照射量が $10^{16}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下では、未照射材との機械的特性変化の有意な差は見られない。 アルミニウム合金は、-40℃~250℃の温度範囲において、設計用強度と物性値が規定されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ○バスケットプレートに使用するアルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献であり、本文献には、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 ($10^{16}\text{n}/\text{cm}^2$ 以下) を上回る中性子照射量と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響がない中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。 ○本文献には、バスケットプレートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定値が示されている。設計用強度は、設計貯蔵期間中の熱ばく露条件 (250℃) を模擬した条件での材料試験により得られた材料特性を保守的に包絡する

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
			ように設定しており、設計貯蔵期間中の熱ばく露による強度低下を適切に考慮している。また、温度範囲(-40℃~250℃)は兼用キャスク設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として妥当である。
17	前口貴治, 川原慶幸, 山本隆一, 崎間公久, 玉置廣紀, 「A3004-H112 合金の機械的性質に及ぼす長時間加熱および焼きなましの影響」, 軽金属, 第 68 巻 第 12 号, (2018).	アルミニウム合金の強度は、高温保持によって低下するため、設計用強度は、この低下の影響を適切に反映する必要がある。キャスクのバスケット用構造材料である A3004-H112 材合金の引張特性に及ぼす熱処理条件の影響、及び各強化因子の引張特性への寄与を確認し、設計用強度の設定に必要な長時間加熱と焼きなまし条件を見出した。	○本文献は、バスケットプレートに使用するアルミニウム合金の設計用強度及び物性の規定するための適切な試験条件を示している。本文献で対象とした材料は、兼用キャスクと同じ材料であり、また、温度条件は、兼用キャスクの温度を包絡しており、参考文献として妥当である。
18	(一社)日本原子力学会, 「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 (AESJ-SC-F002: 2010)」, (2010).	<ul style="list-style-type: none"> 種々のアルミニウム合金を用いた機械試験の結果、中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 以下では、顕著な機械的特性変化は認められない。 残留水分が 10wt%以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量及び水素吸収量は無視し得るほど小さい。 	<p>○本文献は、様々な種類のアルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{16} n/cm^2 以下) を上回る中性子線量 (10^{19} n/cm^2) と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。</p> <p>○本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べ、キャスク内部雰囲気、キャスク内部体積及び燃料有効部の被覆管表面積が同等の条件で得られた結果であり、参考文献として妥当である。</p>
19	T. Maeguchi, Y. Kamiwaki, D. Ishiko, T. Yamamoto, "Development and Reliability Verification of Aluminum Alloys for Basket of Transport and Storage Cask for Spent Nuclear Fuel", Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and	ほう素添加アルミニウム合金を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{16}n/cm^2 では、顕著な機械的特性 (0.2%耐力及び伸び) の変化は認められない。	○本文献は、ほう素添加アルミニウム合金への中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{16} n/cm^2 以下) を上回る中性子線量 (10^{16} n/cm^2) と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
	Transportation of Radioactive Materials, (2007).		
20	吉村壽次, 「化学辞典 (第2版)」, (2009).	<ul style="list-style-type: none"> 炭化ほう素は耐化学薬品性も大きく、酸・アルカリに侵されることはない。 炭化ほう素の融点は約 2350℃である。 	○本文献は、中性子吸収材に含まれる炭化ほう素の基礎データ (安定性・融点) を示すものであり、参考文献として妥当である。
21	(財) 原子力発電技術機構, 「平成 14 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).	<p>閉鎖系環境でのエポキシ系レジンの加熱試験及び照射試験により、エポキシ系レジン の質量減損率には、照射の影響は認められなかった。また、質量減損率は、温度及び加熱時間を基に劣化パラメータを用いた整理による以下の式で評価ができる。</p> $\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$ <p> Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%) E_p : 劣化パラメータ = $T \times (77.6 + \ln(t))$ T : 中性子遮蔽材温度 (K) t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h) </p>	○本文献での試験は、兼用キャスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、兼用キャスクと同じ閉鎖系条件で行われており、参考文献として妥当である。
22	T. Ichihashi, D. Ishiko, A. Ogawa, M. Morishima, "Verification Tests of Neutron Shielding Materials and Shielding Assessment", Proceedings of the 15th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials, (2007).	エポキシ系レジン の照射材 (中性子照射量 $10^{15}n/cm^2$) 及び未照射材の加熱試験の結果、照射材と未照射材で質量減損率に有意な差は認められなかった。以上のことから、照射による劣化は有意ではなく、熱的劣化が支配的である。	○本文献での試験は、兼用キャスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、兼用キャスクと同じ閉鎖系条件で行われている。本文献は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 ($10^{15}n/cm^2$ 以下) を上回る中性子線量 ($10^{15}n/cm^2$) で実施されており、参考文献として妥当である。
23	小崎明朗, 「使用済燃料貯蔵中の耐久性に関する海外動向他」, (株) 日本原子力情報センター主催セミナー「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、実機より厳しい環境である塩水噴霧環境において 3 年間漏えい率に変化がないことを確認している。	○本文献での試験は、兼用キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材質で行われている。また、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい塩水噴霧環境下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
24	加藤治, 伊藤千浩, (一財) 電力中央研究所, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (1992).	<ul style="list-style-type: none"> 金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の応力緩和による漏えい率の影響について、金属ガスケットの漏えい率と LMP の関係が示されており、金属ガスケットの LMP が約 11.0×10^3 を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 LMP は以下の式のとおり示され、温度 150°C では、LMP が 11.0×10^3 となる時間 t は約 190 年となる。 $\text{LMP} = T (20 \times \log(t))$ $T: \text{温度 (K)}$ $t: \text{時間 (h)}$ 	○本文献での試験は、兼用キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、試験に用いた金属ガスケット断面の外径 ($\phi 5.5\text{mm}$) は、兼用キャスクの一次蓋のカバープレート用金属ガスケットの断面外径と同等である一方、一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径よりも小さい。したがって、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて、バルブカバー用金属ガスケットに対しては、同等の条件下で得られた結果であり、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットに対しては、より厳しい条件下で得られた結果である。さらに、兼用キャスクの設計貯蔵期間を上回る金属ガスケットの LMP と漏えい量の関係が示されており、参考文献として妥当である。
25	(一財) 電力中央研究所, 「平成 21 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等報告書」, (2010).	金属ガスケット (外被材: アルミニウム、内被材及びコイルスプリング: ニッケル基合金) の性能について、ガスケット部の温度を約 130°C ~ 約 140°C で一定とし、定期的に密封性能を測定した結果、試験開始から 19 年以上が経過しても密封部の漏えい率の変化はなく、良好な密封性能を保持していることが確認された。また、設計貯蔵期間を 60 年とした場合に、本試験と同じ LMP となる金属ガスケットの初期温度は 134°C であり、この初期温度を 134°C 以下とすれば閉じ込め機能は維持される。	○本文献での試験は、兼用キャスクで使用する金属ガスケットと同じ材料で行われている。また、金属ガスケット断面の外径 ($\phi 6.1\text{mm}$) は、兼用キャスクの一次蓋及び二次蓋のガスケット断面外径よりも小さい。さらに、試験におけるガスケット部の温度 (約 130°C ~ 140°C) は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の熱解析結果で得られた金属ガスケット部温度 (約 115°C) より高い。したがって、一次蓋及び二次蓋用金属ガスケットにおいて、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境より厳しい条件下で得られた結果であり、参考文献として妥当である。
26	T. T. Claudson, "Cladding and Structural Materials Semi-Annual Progress Report", HEDL-TME 75-77, (1975).	ニッケル基合金の照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{21}n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性 (引張強さ及び降伏応力) の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用するニッケル基合金に対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 (10^{15}n/cm^2 以下) を上回る中性子照射量 (10^{21}n/cm^2) と機械的特性の関係が示されており、機械的特性への影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
27	H. Yoshida, et al., "Reactor Irradiation Effects on Al 1100", Proc. Jpn. Congr. Mater. Res., Vol.24, (1981).	アルミニウムの照射材を用いた引張試験の結果、中性子照射量が 10^{19}n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性（引張強さ及び伸び）の有意な差はみられない。	○金属ガスケットに使用するアルミニウムに対する、中性子照射による機械的特性への影響を示した文献である。本文献には、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{15}n/cm^2 以下) を上回る中性子照射量 (10^{19}n/cm^2) と機械的特性の関係が示されており、機械的特性へ影響が無い中性子照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。
28	総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会 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」, (2009).	<ul style="list-style-type: none"> ・熱による経年変化としては、クリープひずみの進行による燃料被覆管の破損、照射硬化の回復による燃料被覆管強度の低下、燃料被覆管中の水素化物再配向による燃料被覆管の脆化、及び応力腐食割れについて評価する必要がある ・クリープ 国内の軽水炉で照射された照射済ジルカロイ4被覆管を用いたクリープ試験が実施され、1%以上の変形能力を有することが確認されている。設計貯蔵期間中には温度を制限することにより、クリープひずみが1%以下に制限でき、クリープ破損を防止することができる。 ・照射硬化 国内の軽水炉で照射された照射済ジルカロイ4被覆管を用いたクリープ試験が実施され、被覆管は炉内照射により強度が増し、延性が低下するが、高温条件に長時間保持されると照射効果が徐々に回復する。約 300℃では照射硬化の回復の可能性は小さいことが確認されている。 ・水素化物再配向 貯蔵中は燃料棒の内圧が外圧より高いため、被覆管には周方向応力が発生している。国内の軽水炉で照射された照射済ジルカロイ4被覆管を用いた水素化物再配向試験及び機械特性試験を行い、被覆管温度を 275℃以 	○本文献には、兼用キャスクに収納する PWR39Gwd/t 燃料及び 48Gwd/t 燃料を対象とし、実燃料と同じ材料を用いた試験結果に基づく評価結果が示されている。また、本文献結果に示す中性子照射量及び燃焼度等の試験条件は、兼用キャスクの設計貯蔵期間中の環境を包絡する条件下で得られた結果であるため、参考文献として妥当である。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
		<p>下、周方向応力を 100MPa 以下に制限することにより、機械特性の劣化を防止することができる。</p> <ul style="list-style-type: none">• 応力腐食割れ 燃料棒ペレットの温度上昇による腐食性核分裂生成ガスの放出はなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されたよう素はヨウ化セシウムとして安定に存在することから応力腐食割れが発生する化学的雰囲気となっていない。• 照射劣化 貯蔵期間中の中性子照射量は、$10^{15}\sim 10^{16}\text{cm}^{-2}$程度と評価されており、炉内照射に伴う中性子照射量 $10^{21}\sim 10^{22}\text{cm}^{-2}$ に比べて無視できるものであり、貯蔵中の中性子照射は機械特性に影響しないと評価する。	

別紙3 中性子遮蔽材の質量減損率について

設計貯蔵期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率の評価を行い、経年劣化を考慮した原子個数密度を遮蔽解析に用いている。

質量減損率は、劣化パラメータにより次式で表される⁽¹⁾。

$$\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$$

ここで、

Δw : 中性子遮蔽材の質量減損率 (%)

E_p : 劣化パラメータ

$$E_p = T \times (77.6 + \ln(t))$$

T : 中性子遮蔽材温度 (K)

t : 中性子遮蔽材加熱時間 (h)

貯蔵中は、使用済燃料の崩壊熱量の低下に伴い、中性子遮蔽材の温度も低下するが、設計評価期間経過後の中性子遮蔽材の質量減損率算定においては、保守的に貯蔵開始直後の中性子遮蔽材の最高温度が設計評価期間にわたり一定として質量減損率を算定する。設計貯蔵期間初期の中性子遮蔽材の設計温度は 135℃である。

上記を基にすれば、質量減損率は 1.9 %と算定される。遮蔽解析ではこれを切り上げて 2.5 %の質量減損があるとして評価する。

なお、中性子遮蔽材から放出される成分は、熱分解により生じる水分が支配的であり、その他として、炭酸ガスを多く含む空気成分が確認された。また、有機酸濃度は検出限界以下であった⁽²⁾。したがって、遮蔽解析においては、中性子の遮蔽性能を安全側に設定するため、中性子遮蔽材の質量減損の成分を全て水とし、この質量減損分を遮蔽体として無視している。

(参考文献)

- (1) (財)原子力発電技術機構, 「平成 14 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- (2) (財)原子力発電技術機構, 「平成 12 年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等 (金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2001).

別紙4 緩衝材の経年変化要因について

