

資料 1-7

Doc No. L5-95JY215 R9

2022年4月8日

三菱重工業株式会社

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。

無断複製・転載禁止 三菱重工業株式会社

目 次

1. 要求事項	1
2. 要求事項への適合性	3
3. 参考文献	14

別紙1 特定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、特定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1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1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2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3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

(1) 設置許可基準規則への適合性

MSF-24P(S)型の材料・構造健全性については、以下のとおり設置許可基準規則に適合している。

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。

MSF-24P(S)型の設計貯蔵期間は60年である。

MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスクの構成部材について、設計貯蔵期間中の温度、放射線等の環境及びその環境下での腐食、クリープ、応力腐食割れ等の経年変化に対して十分な信頼性のある材料を選定し、その必要とされる強度及び性能を維持することで使用済燃料の健全性を確保する設計とする。

また、MSF-24(S)P型は、特定兼用キャスク本体内面、バスケット及び使用済燃料集合体の腐食等を防止するために、使用済燃料集合体を不活性ガスであるヘリウムガスとともに封入し、特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を施す。

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(S)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(S)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。

(2) 審査ガイドへの適合性

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、MSF-24P(S)型の材料・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。

第5表に示したとおり、構成部材は、最低使用温度における低温靱性破壊のおそれがない材料を使用している。

また、第5表に示した構成部材の経年変化の影響については、安全機能評価における設計入力値又は設計基準値として考慮し、安全機能が維持されることを確認している。（補足説明資料 16-2 「臨界防止機能に関する説明資料(L5-95JY211)」、補足説明資料 16-3 「遮蔽機能に関する説明資料(L5-95JY212)」、補足説明資料 16-4 「除熱機能に関する説明資料(L5-95JY213)」、補足説明資料 16-5 「閉じ込め機能に関する説明資料(L5-95JY214)」参照）。

なお、閉じ込め機能については、蓋間圧力を測定することにより閉じ込め機能を監視できる設計としており、蓋間圧力を測定するための圧力センサ（圧力計）及び圧力センサケーブルは、蓋間圧力を維持した状態で圧力センサ及び圧力センサケーブルの保守及び交換が可能な構造としている。蓋間圧力を維持することで、使用済燃料等を内封する空間を外部と隔離している状態を維持できる設計としていることから、閉じ込め機能に係る長期健全性は維持される（補足説明資料 16-5 「閉じ込め機能に関する説明資料(L5-95JY214)」参照）。

さらに、2.(1) 設置許可基準規則への適合性に示したとおり、特定兼用キャスク本体及び蓋部表面の必要な箇所には、塗装等による防錆措置を講じている。

[確認内容]

(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. (1) 設置許可基準規則への適合性に示したとおり、MSF-24P(S)型は、特定兼用キャスク本体内部、バスケット及び使用済燃料集合体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ガスとともに封入する。第5表に示すとおり、温度を制限される範囲に収めることにより、特定兼用キャスクに収納する使用済燃料の健全性が維持される設計としている。

第1表 MSF-24P(S)型の主要な構成部材の材質

構成部材	材質
特定兼用キャスク本体 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 ^(注5) 一次蓋ボルト 二次蓋ボルト 貯蔵用三次蓋ボルト ^(注5) 中性子遮蔽材（蓋部） 金属ガasket	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6) ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注6) ニッケルクロムモリブデン鋼（SNB23-3） ^(注6) レジン（エポキシ系樹脂） ニッケル基合金/アルミニウム

(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) 蓋部が金属部へ衝突しない設置方法においてのみ取り付けられる。

(注6) 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、貯蔵用三次蓋ボルトの表面には、メッキを施す。

第2表 MSF-24P(S)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) (°C)
特定 兼用 キャ スク	胴	155
	外筒	135
	底部中性子遮蔽材カバー	135
	下部端板	135
	トラニオン	140
	伝熱フィン	140
	中性子遮蔽材（蓋部、底部、側部）	145
	バスケットプレート	200
	中性子吸収材	200
	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	
使用済燃料（燃料被覆管）		225

（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、蓋部が金属部へ衝突しない設置方法及び基礎等に固定する設置方法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(S)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)
特定 兼用 キャ スク	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	8.6×10^{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)	1.7×10^{14}
	バスケットプレート及び中性子吸収材	1.6×10^{15}
	蓋部 (注3)	2.5×10^{14}
使用済燃料 (燃料被覆管)		1.6×10^{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 (蓋部が金属部へ衝突しない設置方法及び基礎等に固定する設置方法の最大値) 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。

第4表 MSF-24P(S)型のガンマ線照射量

部材		ガンマ線照射量 (Gy) (注1)
特定 兼用 キャ スク	中性子遮蔽材 (蓋部、底部、側部)	9.0×10^3

(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 (蓋部が金属部へ衝突しない設置方法及び基礎等に固定する設置方法の最大値) 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。

第5表 MSF-24P(S)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、不活性雰囲気下で維持される限り、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℃～155℃	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)、二次蓋ボルト及び貯蔵用三次蓋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℃～135℃	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、トランニオン 【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、下部端板及びトラン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℃～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^{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℃～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、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5表 MSF-24P(S)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℃～200℃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： -20～200℃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^{-9} 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認試験)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、2.0%と評価(別紙3参照)。	使用環境温度： -20～145℃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(2.0%)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^{16}n/cm^2)の耐熱試験結果によれば、照射による質量減損への影響は熱による影響に比べ無視し得る ⁽¹⁾⁽²²⁾ 。 ・ガンマ線照射後(10 ⁶ Gy程度)の耐熱試験結果によれば、照射による質量減損への影響は熱による影響に比べ無視し得る ⁽¹⁾ 。	中性子照射量： 10^{16}n/cm^2 以下 ガンマ線照射量： 10 ⁶ 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5表 MSF-24P(S)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 ⁽²⁴⁾ 。	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ウン・ミラー・パラメータ (LMP) は約 11.0×10^3 (150℃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、130～140℃ (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℃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℃～115℃以下	使用環境温度は、130℃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 $10^{17} \text{n}/\text{cm}^2$ 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5表 MSF-24P(S)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⁽²⁹⁾。 	使用環境温度： -20℃～225℃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, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (一財)電力中央研究所, (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.S.Byun, K.Farrell, "Tensile Properties of Inconel 718 after Low Temperature Neutron Irradiation", Journal of Nuclear Materials, 318, (2003).
- (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 特定兼用キャスク構成部材等の経年変化要因について

1. 特定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

特定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

特定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特定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. 特定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、特定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 特定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	特定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	特定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	特定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

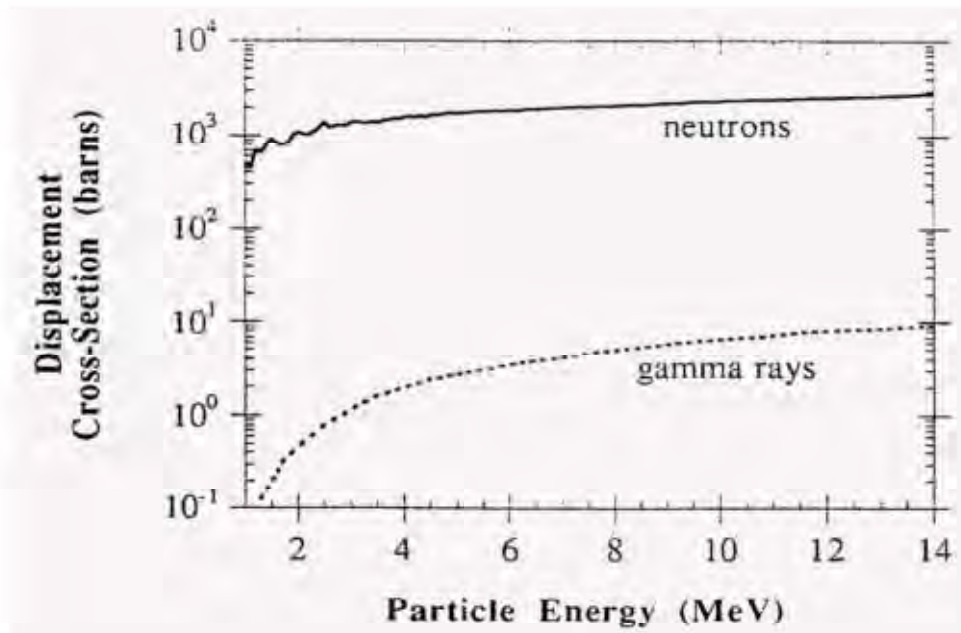
(1) 中性子照射による金属材料の特性変化

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⁾。

特定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、電子の生成の始どは、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(S) 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 金属キヤスク貯蔵技術 確証試験 報告書 最終報告」,(2004).	<ul style="list-style-type: none"> 鉄系材料 (A3501P5) の腐食速度は、6ヶ月間の腐食試験 (ヨウ素ガス濃度 $3g/m^3$; 1%の燃料破損率相当) では最大 $2.3\mu m/年$ であり、この腐食速度が 60年間維持されたとしても $138\mu m$ 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 ($20.5g/m^3$) でも $8\mu m/年$ 程度であり、60年間の腐食量は $500\mu m$ 程度となり、問題となる腐食量ではない。 アルミ系材料は、キヤスク内に残留する酸液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 $1\mu m$ 以下である。 エポキシ系レジン製の照射材 (中性子照射量 $1.5 \times 10^{15} n/cm^2$ 及びガンマ線照射量 $3.9 \times 10^6 Gy$) の質量減損率は、未照射の加熱試験後に比べ、質量減損率がオーダーが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。 	<p>参考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%破損の条件及び特定兼用キヤスク内部の最高温度 (燃料集合体最高温度: $225^\circ C$) に対して、試験温度が $270^\circ C$ の条件のもと得られた結果であり、特定兼用キヤ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。</p> <p>○ 本文献におけるキヤスクと MSF-24P (S) 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。</p> <p>○ 本文献での試験は、特定兼用キヤスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、特定兼用キヤスクと同じ閉鎖系条件で行われている。本文献は、特定兼用キヤスクの設計貯蔵期間中の中性子線量 ($10^{16} n/cm^2$ 以下) 及びガンマ線照射量 ($10^6 Gy$ 以下) を上回る中性子照射量 ($1.5 \times 10^{15} n/cm^2$) 及びガンマ線照射量 ($3.9 \times 10^6 Gy$ 以下) で実施されており、参考文献として妥当である。</p>
2	(一社)日本機械学会,「使用済燃料貯蔵施設規格 金属キヤスク構造規格 (JSME S FA1-2007)」,(2007).	炭素鋼及びニッケルクロムモリブデン鋼は、 $-30^\circ C \sim 350^\circ C$ の温度範囲において、ステンレス鋼は、 $-30^\circ C \sim 350^\circ C$ 又は $375^\circ C$ 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。	<p>○ 本文献には、特定兼用キヤスク各部位の設計用強度 (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、特定兼用キヤ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。</p>
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1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、 $1398^\circ C \sim 1453^\circ C$ である。	<p>○ 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。</p>
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、 $1492^\circ C$ である。	<p>○ 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。</p>

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・混合酸化新燃料・高レベル放射性廃棄物輸送容器的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℃において低温脆化が生じない材料である。	○本文献は、特定兼用キヤスタク各部位の最低使用温度である-20℃を含む低温特性評価が示されており、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 $10^{16}n/cm^2$ 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、特定兼用キヤスタクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 ($10^{16}n/cm^2$ 以下) を上回る中性子照射量あり、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浜環境での腐食速度は 0.1mm/年である。	○炭素鋼及び低合金鋼の海浜環境での腐食影響を示した文献である。特定兼用キヤスタ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。特定兼用キヤスタクの使用環境(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) -熱敏感化材の 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 $10^{17}n/cm^2$ 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、特定兼用キヤスタ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 ($10^{17}n/cm^2$) 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銅-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、銅の腐食速度は、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、銅単独の場合の腐食速度と同程度となる。	○本文献には、特定兼用キヤスタクの伝熱フィン及び銅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, 「压力容器の設計 (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、特定兼用キヤスタ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 $10^{16}n/cm^2$ 以下では、未照射材に対する機械的特性(ビッカース硬さ)の有意な差は見られない。	○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、特定兼用キヤスタ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(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 (MB-A3004-H112) は、中性子照射量が $10^{16}n/cm^2$ 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 (MB-A3004-H112) 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。 アルミニウム合金 (MB-A3004-H112) は、-40℃における破壊靱性試験結果を基にした許容欠陥寸法評価の結果、弾性状態に留めることにより、延性き裂進展に対して十分な余裕を有する。 	<ul style="list-style-type: none"> ○パステ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、特定兼用キヤスタクの設計貯蔵期間中の中性子照射量 ($10^{16}n/cm^2$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、パステ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等が示されている。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

番号	参考文献		参考文献概要	参考文献の適切性
	文献名			
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。キヤ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、特定兼用キヤスクと同じ材料であり、また、温度条件は、特定兼用キヤ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ヤスクの安全設計及び検査基準: 2010 (AESJ-SC-F002; 2010)」, (2010).		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。	○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、特定兼用キヤ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。 ○本文献は、特定兼用キヤスクの設計貯蔵期間中の環境に比べ、キヤスク内部雰囲気、キヤ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。
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、特定兼用キヤ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。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
20	Transportation of Radioactive Materials, (2007). 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 (金属キヤ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> $\Delta w = 5.69 \times 10^{-4} \times E_p - 19.2$ $\Delta w : \text{中性子遮蔽材の質量減損率 (\%)}$ $E_p : \text{劣化パラメータ} = T \times (77.6 + \ln(t))$ $T : \text{中性子遮蔽材温度 (K)}$ $t : \text{中性子遮蔽材加熱時間 (h)}$	○本文献での試験は、特定兼用キヤスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、特定兼用キヤ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、特定兼用キヤスクの中性子遮蔽材と同じエポキシ系レジンを用い、特定兼用キヤスクと同じ閉鎖系条件で行われている。本文献は、特定兼用キヤ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) 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 催セミナール「使用済燃料貯蔵技術の現状と課題」, (1998).	金属ガスクケット (外被材: アルミニウム、内被材及びビニルスフリング; 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、特定兼用キヤスクで使用する金属ガスクケットと同じ材質で行われている。また、特定兼用キヤ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, 「使用済燃料貯蔵容器用ガスケットの長期密封特性」, (一財) 電力中央研究所, (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、特定兼用キヤ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 (φ5.5mm) は、特定兼用キヤ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、特定兼用キヤスクの設計貯蔵期間中の環境に比べて、バルブカハール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、特定兼用キヤ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、特定兼用キヤ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 (φ6.1mm) は、特定兼用キヤ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、特定兼用キヤ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を包絡する。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、特定兼用キヤ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. S. Byun, K. Farrell, "Tensile Properties of Inconel 718 after Low Temperature Neutron Irradiation", Journal of Nuclear Materials, 318, (2003).	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^{17} n/cm^2 以下では未照射材に対する機械的特性 (強度及び伸び) 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、特定兼用キヤ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^{17} 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. Congt. 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、特定兼用キヤ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・保安委員会 核燃料サイクル安全小委員会 中間貯蔵センターグループ、輸送ローキンググループ、「金属製乾式キヤ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ヤ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 <ul style="list-style-type: none"> 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 照射硬化 <ul style="list-style-type: none"> 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 <ul style="list-style-type: none"> 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 	○ 本文献には、特定兼用キヤスクに収納する 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き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、特定兼用キヤ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	文献名	参考文献 文献概要	参考文献の適切性
		<p>機械特性試験を行い、被覆管温度を 275℃以下、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 <ul style="list-style-type: none"> 燃料棒ベ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ベレットから放出されたヨウ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 <ul style="list-style-type: none"> 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最高温度^(注)は136°Cである。

上記を基にすれば、質量減損率は2.0%と算定される。遮蔽解析ではこれに余裕を加えて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。

(注) 質量減損率の評価は、最高温度を包絡するように設定した設計温度ではなく、除熱解析により得られた最高温度を使用する。

(補足説明) 中性子遮蔽材の質量減損データについて

前頁に示した中性子遮蔽材（エポキシ系樹脂）の質量減損率算定式⁽¹⁾の基となる質量減損データと MSF-24P(S)型の中性子遮蔽材（エポキシ系樹脂、自社開発品）の質量減損データを重ねたものを別紙3-1図に示す。図に示すとおり、両者の質量減損率は同等であり、文献の質量減損率算定式を用いることは妥当である。



別紙3-1図 中性子遮蔽材の質量減損データ^(註)
(自社開発品[MREX レジン]及び NS-4-FR⁽¹⁾)

(参考文献)

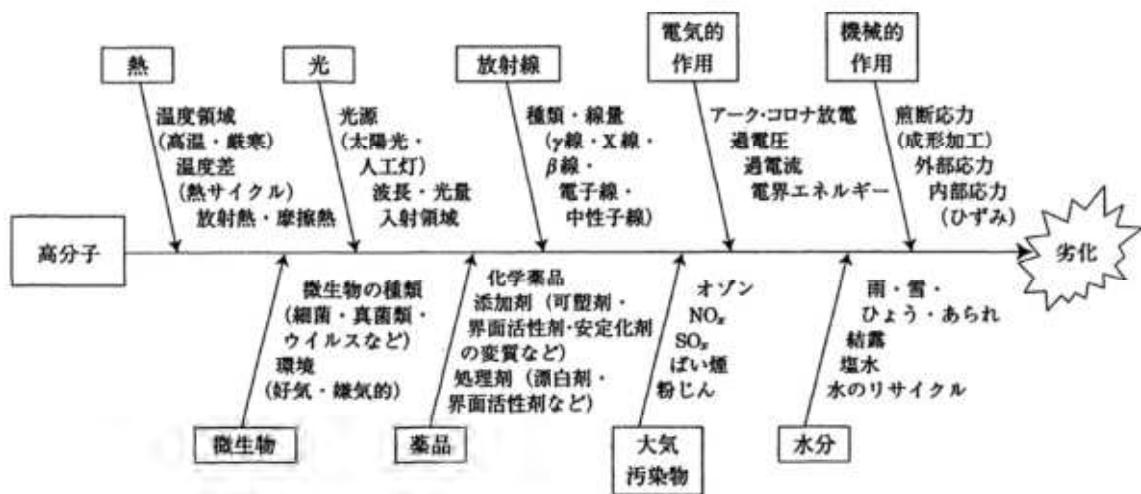
- (1) (財)原子力発電技術機構, 「平成14年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2003).
- (2) (財)原子力発電技術機構, 「平成12年度 リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(金属キャスク貯蔵技術確証試験) 報告書」, (2001).

別紙4 緩衝材の経年変化について

本別紙では、貯蔵用緩衝体の緩衝材に木材を用いる場合の緩衝材の経年変化要因と経年変化による健全性への影響について示す。

1. 緩衝材（木材）の経年変化要因と経年変化の評価の観点

木材は、高分子材料の一つであり、高分子材料の経年変化要因としては別紙4-1図に示す因子がある⁽¹⁾。また、木材に関する文献では、別紙4-1図の要因に加え、虫害が挙げられている⁽²⁾。



別紙4-1図 高分子材料の劣化因子⁽¹⁾

緩衝材は、カバープレートに覆われた設計としており、大気から遮断した閉鎖環境にあることから、経年変化因子のうち、光、電気的作用、大気汚染物の影響はなく、水分については、木材が含有する水分以外のものが侵入することはない。また、緩衝材に使用する木材には、所定の含水率に調節するために乾燥処理を施したものをを用いる。この処理において害虫は斃死することから、害虫の影響はない。さらに、木材には、薬品を使用せず、加工時に圧密等の処理は行わず、機械的作用による影響もない。したがって、微生物による腐食、熱、放射線照射が緩衝材の主な経年変化因子となる。

貯蔵用緩衝体は、特定兼用キャスクの落下や飛来物等のエネルギーを緩衝材の圧縮変形により吸収し、特定兼用キャスクに生じる荷重を緩和する機能を有することから、上記で示した微生物による腐食、熱、放射線照射による緩衝材の緩衝性能(圧縮強度)への影響について評価する。

3 つの経年変化要因に対する木材の評価における、主な評価の観点について別紙 4 - 1 表に示す。

別紙 4 - 1 表 緩衝材の主な評価の観点

経年変化要因	主な評価の観点
腐食	緩衝材の使用環境を踏まえ、微生物による腐食の有無を確認し、腐食による緩衝性能（圧縮強度）への影響について評価する。
熱	緩衝材の使用温度を踏まえ、緩衝材の熱による緩衝性能（圧縮強度）への影響について評価する。
放射線照射	緩衝材の放射線照射量を踏まえ、照射による緩衝性能（圧縮強度）への影響について評価する。

2. 緩衝材（木材）の経年変化に対する評価

別紙 4 - 1 表に示した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結果を別紙 4 - 2 表に示す。

別紙4-2表 緩衝材（木材）の経年変化に対する評価

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各部分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
緩衝材 【材質】 木材	腐食	● 緩衝性能による腐食による緩衝性能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 微生物による腐食要因として、木材腐朽菌の付着により木材細胞壁を分解する腐朽がある。腐朽は、水分（木材の含水率が繊維飽和点^(注1)である約28%以上）、酸素、温度（5℃～40℃）の3条件が揃うことで生じる^(注)。 木材の熱劣化の要因は、熱分解であり、木材の熱分解は、200℃以上で生じる^(注)。 木材を空気環境で様々な温度及び保持時間で熱暴露した木材の強度試験データ基に、温度及び保持時間をパラメータとした残存強度の予測式が構築されている^(注)。本予測式により、貯蔵中の熱劣化による木材の残存強度に対応する、貯蔵期間及び温度の組合せの推定が可能である。 -20℃において割れ等の強度劣化はない^(注)。 	緩衝材の含水率： 閉鎖環境（空気） 使用環境温度： -20℃～120℃ 使用環境平均温度 -20℃～75℃ 使用環境： 閉鎖環境（空気）	緩衝材の含水率は [] であり、また、木材充填空間はカバークラフトに覆われた閉鎖環境であり、腐朽による緩衝性能への影響はない。 ・緩衝材最高温度は200℃よりも低く、かつ、木材充填空間はカバークラフトに覆われた閉鎖環境であるため、熱分解はない。 ・木材とカバークラフト間に設置する断熱材により、製作時のカバークラフト溶接時の熱の影響はない。 ・緩衝材の温度は、熱分解が明確に生じる温度（200℃以上）よりも低い温度であるため、明確な熱劣化は生じないが、長期間の保持により、熱劣化が生じる可能性を否定できないことから、構健全性評価（緩衝材によるエネルギー吸収を考慮する場合）において、熱劣化による木材の強度低下を考慮する。
	熱	● 緩衝性能による照射による緩衝性能の低下	<ul style="list-style-type: none"> ガンマ線照射量が10^7rad(=10⁶Gy)までは、圧縮特性に顕著な変化は認められない^(注)。また、木材は、木材を構成するセルロースに比べ放射線に対する耐性が高い^(注)。 木材に比べ放射線による劣化に対する耐性が低いセルロースについて、中性子による影響は、$\ln/cm^2 = 10^{11}$rad(=10¹⁰Gy)の関係でガンマ線による影響から換算できる^(注)。 上記より、圧縮特性に顕著な変化が認められない中性子照射量は、1×10^{10}ne/cm²となる。 	中性子照射量： 10^{10} ne/cm ² 以下 ガンマ線照射量： 396y以下	中性子照射量及びガンマ線照射量は、緩衝材の圧縮特性に変化が認められる値以下であり、緩衝性能への影響はない。

(注1) 木材の細胞壁に取り込まれている水分を結合水というが、繊維飽和点とは、この結合水が細胞壁中で飽和する状態である。繊維飽和点を超えて細胞内腔に浸透する水分は自由水という。繊維飽和点の含水率は樹種、個体差、抽出成分等で異なるが、28～30%の範囲にある^(注)。

3. 緩衝材（木材）の熱劣化による強度低下量

別紙4-2表に示したとおり、貯蔵用緩衝体の緩衝材に木材を用いる場合、木材の温度は、熱分解が明確に生じる温度（200℃以上）よりも低い温度であるため、明確な熱劣化は生じないが、長期間の保持により、熱劣化が生じる可能性を否定できないことから、緩衝材の温度及び貯蔵期間を基に緩衝材の強度低下量を評価する。

文献(4)では、熱曝露を受けていない木材に対する熱曝露後の残存強度比（以下「残存強度比」という。）について、温度及び保持時間をパラメータとした残存強度比の予測式が構築されている。本予測式により、貯蔵中の熱劣化による木材の残存強度比に対応する、貯蔵期間及び温度の組合せの推定が可能である。

上記文献の計算式より、MSF-24P(S)型の貯蔵初期の緩衝材温度を設計貯蔵期間中一定とした条件で、設計貯蔵期間経過後の残存強度比を算定した例を別紙4-3表に示す。

別紙4-3表 設計貯蔵期間経過後の残存強度比（一例）

貯蔵場所	崩壊熱量 の設定例 (注1)	緩衝材 温度 (注2)	設計貯蔵期間 経過後の 残存強度比 (注3)	備考
屋外	7.9kW	75℃	0.6	残存強度比が0.6となるための貯蔵期間は、63.1年
貯蔵 建屋内	8.8kW	65℃	0.8	残存強度比が0.8となるための貯蔵期間は、62.4年

(注1)MSF-24P(S)型の制限崩壊熱量は15.8kWであり、その範囲内で崩壊熱量を制限して使用する。

崩壊熱量を制限して使用する場合、電気事業者は、その崩壊熱量以下となるように使用済燃料を収納することとなる。

(注2)「崩壊熱量の設定例」欄の崩壊熱量を用いた除熱解析により算定した、貯蔵初期の平均温度である。緩衝材温度は、保守的に貯蔵期間（曝露期間）中一定とする。

(注3)木材の残存強度比は、緩衝材温度及び熱曝露期間を基に、以下式⁽⁴⁾により算出される。熱曝露期間が設計貯蔵期間である60年以上となるように残存強度比を決定した。

$$\log t = -13.755 + 6125/T \quad (\text{残存強度比 } 0.8 \text{ の場合})$$

$$= -13.451 + 6202/T \quad (\text{残存強度比 } 0.6 \text{ の場合})$$

ここで、

t：熱曝露期間（日）

T：緩衝材温度（K）

<残存強度比の算定における保守性について>

上記の緩衝材の残存強度比（0.8又は0.6）の算定には、以下の保守性を有している。

・緩衝材の貯蔵初期温度の保守性

崩壊熱量（8.8kW又は7.9kW）に対して、軸方向燃焼度分布の考慮により崩壊熱量を約14%保守的に設定した崩壊熱量（10.0kW又は9.0kW）を用いて除熱解析を行い木材温度を算出している。また、補足説明資料16-4「除熱機能に関する説明資料(L5-95JY213)」参照）に示すとおり、モデル化に係る条件設定に保守性を考慮しており、算出した貯蔵初期の温度を高く評価している。

・貯蔵期間中の緩衝材の温度減衰の未考慮

貯蔵中は、崩壊熱量が低下することに伴い、緩衝材温度は低下するが、保守的に貯蔵初期の温度を一定としており、残存強度比を小さく評価している。

4. 構造健全性評価における強度低下の考慮

MSF-24P(S)型が落下する場合等、貯蔵用緩衝体がエネルギー吸収する場合において、緩衝材の残存強度が低下すると、同じエネルギー量を吸収するために必要な緩衝材の変形量が大きくなる。吸収すべきエネルギー量が大きい場合、変形量が過大となり、エネルギーを吸収しきれずに金属衝突が生じ衝撃力の増大に繋がる恐れがある。

MSF-24P(S)型は、貯蔵用緩衝体の装着により、蓋部の金属部への衝突が生じない設置方法により貯蔵する設計方針としており、緩衝材に木材を用いる場合において、緩衝体のエネルギー吸収を考慮する場合には、3.に示した木材の強度低下を考慮する。

5. 参考文献の概要

別紙4-2表に示した緩衝材（木材）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4-4表に示す。

別紙4-4表 参考文献の概要（木材関連）

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
2	(公社)土木学会 鋼構造工学委員会 木橋技術小委員会, 木材技術の手引き 2005, (2005).	腐朽は、水分（木材の含水率が繊維飽和点である約28%以上）、酸素、温度（5℃～40℃）の3条件が揃うことで生じる。	○本文獻は、木材に腐朽が生じるための必要条件を示す文獻である。本文獻には、木材の腐朽に対する一般論として、腐朽が生じるための必要条件が示されており、参考文献として妥当である。
3	岡野健, 祖父江信夫編, 「木材科学ハンドブック」, 朝倉書店, (2006).	木材の熱劣化の要因は、熱分解であり、木材の熱分解は200℃以上で生じる。	○本文獻は、緩衝材に使用する木材の熱分解が生じる温度を示す文獻である。本文獻には、木材の主要成分であるセルロース（熱分解温度 240℃以上）、ヘミセルロース（熱分解温度 230℃以上）、リグニン（熱分解温度 230℃以上）の熱分解温度が示されており、木材の樹種を問わず適用できるため、参考文献として妥当である。
4	M. A. Millett, C. C. Gerhards, "Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115°C to 175°C", Wood Science Vol. 4(4), (1972).	木材（含水率が10%以下の6つの木材種（米スギ・ダグラスファー・ポンドオーク・サトウカエデ）を閉鎖された空気環境において、115℃～175℃の温度範囲で様々な時間（最長255日間）加熱保持し、加熱後試験片の曲げ試験により、加熱保持した試験片の非加熱材に対する曲げ強度の残存強度比を求めた。さらに、求めた残存強度比と、温度及び保持期間の関係をアレニウスモデルにより定式化し、これにより、高温状態で長期間保持した場合の残存強度比の推定が可能である。	○本文獻に示す試験条件では、木材試験片の含水率及び雰囲気（空気環境、閉鎖条件）は、MSF-24P(S)型の使用環境と同じである。また、長期間加熱による曲げ強度の低下率は、圧縮強度の低下率に比べて大きい ^(注1) ことが確認されており、曲げ強度の低下率により、圧縮強度の低下率を評価することは保守的である。また、本文獻に示す試験では、MSF-24P(S)型の緩衝材に用いる米スギ及びオークが用いられている。さらに、木材の構成元素である炭素、酸素及び水素の構成比は、それぞれ50%、6%、43%と樹種間による差は小さい ^(注2) 。熱劣化の要因となる熱分解では、構成元素の原子間結合が切断されるが、構成元素比に差が小さいことから、樹種による熱分解の速度の差は小さい。以上より、本文獻を参考文献とすることは妥当である。 (注1) 出典：中戸莞二編著, 「新編 木材工学」, 養賢堂, (1985). (注2) 出典：原田寿郎, 「木材の燃焼性および耐火性能に関する研究」, 森林総研研報 No. 378, 1-85, (2000).

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
5	(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).	木材は、-20℃において割れ等の強度劣化が生じない材料である。	○本文献は、特定兼用キヤスクに装着する緩衝材(木材)の最低使用温度である-20℃を含む低温特性評価が示されており、参考文献として妥当である。
6	T. Aoki, M. Norimoto, T. Yamada, "Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays", Wood Research No. 62, (1977).	<ul style="list-style-type: none"> 木材の照射材を用いた圧縮試験の結果、ガンマ線照射量が $10^7 \text{rad}(=10^5 \text{Gy})$ 以下では、未照射材に対する圧縮強度の有意な低下はみられない。 木材は、木材を構成するセルロースに比べ、放射線に対する耐性が高い。 	○本文献では、様々な種類の木材及びセルロース材に対する、ガンマ線照射による圧縮強度等への影響が示されている。本文献には、設計貯蔵期間中のガンマ線照射量 (39Gy) を上回るガンマ線照射量 (10^5Gy) と圧縮強度の関係が示されており、圧縮強度への影響が無いガンマ線照射量の範囲を示すための参考文献として妥当である。 ○本文献は、木材がセルロースに比べ、放射線に対する耐性が高いことについて、設計貯蔵期間中のガンマ線照射量 (39Gy) を上回るガンマ線照射量 (10^5Gy) による試験データにより確認されており、参考文献として妥当である。
7	O. Teszler, et al., "The effect of Nuclear Radiation on Fibrous Materials PARTIII: Relative Order of Stability of Cellulosic Fibers", Textile Research Journal 28, (1958).	セルロースへの中性子の影響は、 $1 \text{n/cm}^2 = 10^{-9} \text{rad}(=10^{-11} \text{Gy})$ の関係で、ガンマ線の影響から換算できる。	○本文献では、文獻(31)に示すとおり、木材に比べ、放射線による劣化に対する耐性が低いセルロース材に対する、中性子照射及びガンマ線照射による影響の換算関係を示した文獻である。本文献には、設計貯蔵期間中の中性子照射量 (10^{13}n/cm^2 以下) 及びガンマ線照射量 (39Gy) を上回る中性子照射量 (10^{16}n/cm^2) とガンマ線照射量 (10^5Gy) の関係が示されており、参考文献として妥当である。
8	石丸優, 古田裕三, 杉山真樹編, 「木材科学講座3 木材の物理」, 海青社, (2017).	繊維飽和点の含水率は、樹種、個体差、抽出成分等で異なるが、28~30%の範囲にある。	○本文献は、木材の繊維飽和点の含水率を示す文獻である。繊維飽和点は、木材種等の違いによっても、28~30%の範囲にあることが示されており、参考文献として妥当である。

6. 参考文献

- (1) 大澤善次郎, 成澤郁夫監修, 「高分子の寿命予測と長寿命化技術」, エス・ディー・エス, (2002).
- (2) (公社)土木学会 鋼構造工学委員会 木橋技術小委員会, 木材技術の手引き 2005, (2005).
- (3) 岡野健, 祖父江信夫編, 「木材科学ハンドブック」, 朝倉書店, (2006).
- (4) M.A. Millett, C.C. Gerhards, “Accelerated Aging: Residual Weight and Flexural Properties of Wood Heated in Air at 115°C to 175°C”, Wood Science Vol.4(4), (1972).
- (5) (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).
- (6) T. Aoki, M. Norimoto, T. Yamada, “Some Physical Properties of Wood and Cellulose Irradiated with Gamma Rays”, Wood Research No.62, (1977).
- (7) O. Teszler, et al., “The effect of Nuclear Radiation on Fibrous Materials PARTIII: Relative Order of Stability of Cellulosic Fibers”, Textile Research Journal 28, (1958).
- (8) 石丸優, 古田裕三, 杉山真樹編, 「木材科学講座3 木材の物理」, 海青社, (2017) .