

補足説明資料 16-6

第十六条

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

目 次

1	要求事項	3
2	要求事項への適合性	5
3	参考文献	22
別紙 1	CASTOR® geo26JP の構成部品に対する経年の影響	24
別紙 2	鑄鉄キャスクの要件と適合性	26
別紙 3:	中性子遮へい材の質量損失	34
別紙 4	参考文献の概要について	36

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通りである。

(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 項第一号ハ
 - ・ 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 項第一号
 - ・ 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 項第二号
 - ・ 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 項第三号
 - ・ 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 条第 5 項
 - ・ 第 16 条第 2 項第一号ハ及び同上第 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および構造であること。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。
- (3) 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

CASTOR® geo26JP 型の材料・構造健全性については、以下の通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条第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。

CASTOR® geo26JP 型の設計貯蔵期間は 60 年間とする。

CASTOR® geo26JP 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設計とする。また、CASTOR® geo26JP 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する設計とし、特定兼用キャスク本体の必要な箇所には、めっき及び塗装による防錆処理を施す設計とする。

CASTOR® geo26JP 型の主要な構成部材及び使用済燃料（燃料被覆管）の設計貯蔵期間中の温度及び放射線等の環境条件について表 1 から表 4 に示す。また、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（別紙1）について評価結果を表 5 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、CASTOR® geo26JP 型の材料・構造健全性については、以下の通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。

表 5 に示すとおり、構成部材は、最低使用温度における低温脆性破壊のおそれがない材料を使用する。

また、表 5 に示す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。(第 16 条補足説明資料 16-1 燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設 (1024-TR-00005)、同 16-2 臨界防止機能に関する説明資料 (1024-TR-00006)、同 16-3 遮蔽機能に関する説明資料(1024-TR-00007)、同 16-4 除熱機能に関する説明資料(1024-TR-00008)、同 16-5 閉じ込め機能に関する説明資料(1024-TR-00009)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いる。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(第 16 条補足説明資料「閉じ込め機能に関する説明資料」(1024-TR-00009)参照)。

なお、特定兼用キャスク本体の必要な箇所には、めっき及び塗装による防錆処理を施している。

【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。

CASTOR® geo26JP 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し、また、表 5 及び「除熱機能に関する説明資料」(1024-TR-00008)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。

表 1 CASTOR® geo26JP 型の主要構成部材の材質

構成部材		材質
キャスク 本体	胴	フェライト球状黒鉛鑄鉄(FCD 300 LT) 注 ¹
	中性子遮蔽材(側部、棒状) (内列/外列)	ポリエチレン <input type="text"/>
	中性子遮蔽材(底部、円板状)	ポリエチレン <input type="text"/>
	遮蔽棒	低炭素鋼 <input type="text"/>
	トラニオン、トラニオンボルト	析出硬化系ステンレス鋼 <input type="text"/> 注 ²
	キャスク底板	低炭素ステンレス鋼 <input type="text"/>
蓋	一次蓋、二次蓋	鍛造製ステンレス鋼 <input type="text"/> 又は 鍛造製ステンレス鋼 <input type="text"/>
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	クロムモリブデンバナジウム鋼 <input type="text"/> 注 ³
	中性子遮蔽材(蓋部、円板状)	ポリエチレン <input type="text"/>
	金属ガスケット	ニッケル基合金/ステンレス鋼/銀
バスケット	Hビーム	ステンレス鋼 <input type="text"/> 又はステンレス鋼 <input type="text"/>
	熱伝導及び中性子吸収材	Al-B4C ボロン添加アルミニウム合金 <input type="text"/>
	鋼製エッジセグメント、バスケット側板	低炭素ステンレス鋼 <input type="text"/>
	エッジセグメント	アルミニウム合金 <input type="text"/> 注 ⁴
	バスケット底板	ステンレス鋼 <input type="text"/>

注¹ 胴は、内面並びに一次蓋及び二次蓋に接触する面が電解ニッケルめっきによって覆われ、外表面はエポキシ樹脂により多層コーティング処理がなされる。

注² 構造物の開口部や隙間は、環境影響による腐食を防止するために腐食保護対策により密閉される。

注³ ボルトは防錆処理を施すことにより保護される。

注⁴ あらゆる形態の全面腐食や電解腐食を最小限に抑えるために、陽極酸化処理が施される。

表 2 CASTOR® geo26JP 型の主要構成部材及び使用済燃料の温度条件 (最高温度)

	部材	構造強度評価等に用いる温度 ^{注1} [°C]	設計基準 ^{注2} [°C]
キャスク 本体	胴/底部	120	350
	中性子遮蔽材(棒状)(内列/外列)		135 / 130
	中性子遮蔽材(円盤状)(底部)		135
	遮蔽棒(側部中性子体部 封止材)(内列/外列)		371
	トラニオンボルト		350
	キャスク本体溝部		105
蓋部	一次蓋、二次蓋	120	425
	中性子遮蔽材(円盤状)(蓋部)	110	135
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト		350
	金属ガスケット		125
バスケット	底板		250
	H-ビーム	425 / 350 ^{注3}	
	熱伝導及び中性子吸収材	250	
	鋼製エッジセグメント、コーナーエレメント及びバスケット側板	425	
	エッジセグメント	250	
使用済燃料	燃料棒被覆管	265	275

注1 除熱解析で得られた温度(補足説明資料「除熱機能に関する説明資料」(1024-TR-00008)参照)

注2 補足説明資料「燃料体等の取扱い施設及び貯蔵施設 16-1」(1024-TR-00005)参照

注3 H-ビームの材料は表2に示すように、2種類あり、それぞれの制限温度を示す。

表 3 CASTOR® geo26JP 型の主要部材の中性子照射量^{注1}

	部材	中性子線量 [n/cm ²]
キャスク本体	胴	
	中性子遮蔽材(棒状)(内側)の平均値	
	中性子遮蔽材(棒状)(外側)の平均値	
	中性子遮蔽材(円板状)(頭部)	
	中性子遮蔽材(円板状)(底部)	
	遮蔽棒(側部中性子遮蔽体部 封止材)	
	トラニオン(ボルト含む)	
蓋部	一次蓋ガスケット	
	二次蓋ガスケット	
	一次蓋の下端	
	一次蓋の上端	

	部 材	中性子線量 [n/cm ²]
	二次蓋の下端	
	二次蓋の上端	
バスケット	熱伝導及び中性子吸収材	
	H-ビーム	
	コーナーエレメント	
	バスケット側板	
	エッジセグメント	
	底板	
使用済燃料	燃料棒被覆管	

注1 遮蔽解析結果から得られた、貯蔵初期の中性子束が設計貯蔵期間(60年間)において減衰せず一定であると仮定して算出した設計貯蔵期間における累積値。(補足説明資料「遮蔽機能に関する説明資料」(1024-TR-00007)参照)

表 4 CASTOR® geo26JP 型の主要部材のガンマ線照射線量

	部 材	ガンマ線照射線量 ^{注1} [Gy]
キャスク本体	中性子遮蔽材(棒状)(内側)の平均値	
	中性子遮蔽材(棒状)(外側)の平均値	
	中性子遮蔽材(円板状)(頭部)	
	中性子遮蔽材(円板状)(底部)	
蓋部	一次蓋ガスケット	
	二次蓋ガスケット	
	一次蓋の下端	
	一次蓋の上端	
	二次蓋の下端	
	二次蓋の上端	
バスケット	熱伝導及び中性子吸収材	
	H-ビーム	
	コーナーエレメント	
	バスケット側板	

注1 遮蔽解析結果(第 16 条「遮蔽機能に関する説明資料」の補足説明資料(1024-TR-00007)参照)から得られる貯蔵初期のガンマ線が減衰せず、設計貯蔵期間(60年)中一定であると仮定して算出した設計貯蔵期間中の積算値。

表 5 CASTOR® geo26JP 型の主要な構成部材に対する経年変化の考慮について

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
胴外面、内面 【材質】 球状黒鉛鋳鉄	腐食	構造強度： 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴外面については、防錆対策を考慮しない沿岸環境における鋳鉄の全面腐食を想定すると、腐食量は約 4.2 mm (60 年 × 腐食進展速度 0.07 mm/年)となる [1]。 ・ ステンレス鋼や炭素鋼製のキャスク内面は、設計貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合においても、20 g/m³ 程度のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率 (1%燃料破損相当) 以下であれば、安定皮膜が形成され、腐食を考慮する必要はない[2]。<u>日本における長期乾式貯蔵後の燃料破損率はさらに保守的に 0.1%が想定される[2]。</u> ・ 胴内面にメッキされるニッケルは、高温の空気又は酸素雰囲気中でニッケル酸化皮膜をつくるため、炭素鋼よりも<u>耐食性性が優れている</u>[3]。 	使用環境： <ul style="list-style-type: none"> ・ ヘリウム雰囲気 ・ 中性子遮蔽材と接触 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴外面：防錆対策をしない場合、わずかに腐食するが、実際は、キャスクの胴(外面)の防錆対策により、腐食しない。(基本的な塗料として、欧米で実績のある3層構造のエポキシレジン及びアクリルを用いる。<u>必要に応じて定期的な管理を行う</u>) ・ 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：不活性雰囲気が維持され、腐食しない。 ・ <u>日本における長期乾式貯蔵時の燃料破損率の保守的な想定は 0.1%であり、ヨウ素ガスには、皮膜が形成されるので胴(内面)の腐食を考慮する必要はなく、構造強度への影響はない。</u>加えて、キャスク本体胴内面は電解ニッケルメッキされており、その不動態酸化皮膜により、炭素鋼より、高い耐食性を示す。胴のボアホール部及び底部は、中性子遮蔽材(側部及び底部)と接触している。ボアホール部及び底部への水分及び湿気の侵入がな

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
					<p>く、また、中性子遮蔽材の熱劣化による水の生成もないため、腐食による構造強度への影響はない。</p>
	熱	<p>構造強度： 熱による亀裂・破損</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属キャスク構造規格(2007年版)[4]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。[2, 3] ・ クリープによる変形を考慮すべき温度は、融点[絶対温度]の約1/3である[5, 6, 7]。 ・ <u>破壊靱性</u>について、金属キャスク構造規格(2007年版)に次の要件がある。 動的破壊靱性値 $K_{Id} > 50.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 	<p>使用環境温度： -22.4℃～120℃ 除熱解析では、 キャスク本体温度は、120℃。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>球状黒鉛鑄鉄の設計用強度・物性値が規定されており、熱によりき裂、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。</u> ・ <u>DCIの低温脆性に関する多くの論文があり、実物大鑄鉄キャスクの-40℃での9m落下試験のビデオもある。これらに基づくJSME規格があり、これらをまとめて、別紙2に示す。</u> ・ <u>最低温度は、申請書の記載通りである。最高温度は除熱解析結果(TR-08)による。</u> ・ 使用済燃料貯蔵中のキャスク本体は、約120℃である。球状黒鉛鑄鉄のクリープ温度は、約190℃であり、熱によるクリープ変形は無視できる。
	照射	<p>構造強度： 照射による機械的特性の変化</p>	<p>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に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない[2]。</p>	<p>中性子照射量： 10^{15} n/cm^2以下</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 鑄鉄は炭素鋼とともに鉄系材料で、その耐照射性が概ね同等と考えられる。乾式キャスク貯蔵では照射損傷の条件よりも低い条件で貯蔵され、鑄鉄

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
					キャスク本体の貯蔵中の照射損傷は無視できる。
遮蔽棒 【材質】 炭素鋼	腐食	遮蔽性能: 腐食による密度変化	防錆対策を考慮しない沿岸環境における炭素鋼の全面腐食を想定すると、約 1.8 mm～4.8 mm (60 年×腐食進展速度 0.3 mm/年～0.8 mm/10 年)となる [8]	使用環境: ・閉鎖環境 ・中性子遮蔽材と接触	<ul style="list-style-type: none"> ボアホール部はキャスク底板によりシールされるので、水分の供給はない。ボアホール内の空気中の限定された水分により棒鋼はわずかに腐食することがあるが、その水分が消費されると腐食は中断する。 中性子遮蔽材に接触するが、水分の浸入はなく、また、酸素の連続的な供給もないため、腐食による有意な密度変化はなく、遮蔽性能への影響はない。
	熱	遮蔽性能: 熱による亀裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 炭素鋼の融点は約 1500°Cである。 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 320°C [5, 6, 7]。 	使用環境温度: -22.4°C～120°C	使用環境温度の熱による亀裂・破損の可能性はなく、遮蔽性能に影響はない。
	照射	遮蔽性能: 照射による機械的特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量が 10^{16} n/cm² 以下では未照射材の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない[2]。 	中性子照射量: 1.91×10^{14} n/cm ²	照射による機械的特性に変化はなく、遮蔽性能に影響はない。
一次蓋、 一次蓋ボルト、 二次蓋内側表面	腐食	構造強度: 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> 不動態被膜を形成する[6]。 水環境でのオーステナイト系ステンレス鋼の全面腐食を想定すると、約 18 μm 	使用環境: ・ヘリウム雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> 水分は限定されており、不活性ガス雰囲気であるため、腐食による構造強度への影響はない。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
<p>【材質】 ステンレス鋼 クロムモリブデン バナジウム鋼</p>			<p>(全面腐食速度 0.3 $\mu\text{m}/\text{年} \times 60 \text{年}$)である[9]。</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.1%の保守的な想定[2]に対して、1%破損燃料からのヨウ素濃度によるステンレス鋼の60年間の腐食量は最大腐食速度 (0.13 $\mu\text{m}/\text{年}$)より 7.8 μmとなるが、腐食速度の漸減傾向を考慮すると腐食量はさらに低減する[10]。 金属キャスク内面については、残留水分が 10% (質量)以下の不活性ガス雰囲気にあるため、水分による腐食を考慮する必要はなく、貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合においても、20 g/m^3のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率 (1% 燃料破損相当)以下であれば、腐食を考慮する必要はない[2]。 	<ul style="list-style-type: none"> 中性子遮蔽材と接触 	<ul style="list-style-type: none"> ヨウ素による腐食も問題ない。 中性子遮蔽材の外側は不活性ガス雰囲気であり水分の流入はなく、また、熱による水分の生成もないため、腐食による構造強度への影響はない。 米国の SF 乾式貯蔵中における漏えい燃料発生率 (約 0.01%)、日本の軽水炉運転中の漏えい燃料は成立 (最大 0.00069%)を考慮して、保守的に 0.1%を想定した[2]。
	熱	構造強度: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格 JSME S FA1(2007年版)[4] (設計・建設規格 2007年追補版)[11]適用)は、-30°Cから 350°Cまたは 425°Cまでの設計用強度・物性値が規定されている。 -20°Cにおいて低温脆性破壊のおそれはない-[12, 13]。 	使用環境温度: $-22.4^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$	設計用強度、物性値が規定されており、熱によるき裂、破損が生じない温度域で使用されるため、構造強度への影響はない。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
			<ul style="list-style-type: none"> クリープによる変形を考慮すべき温度（融点 T_m [絶対温度] の 1/3 に相当）は約 290°C である[6, 7]。 		
	照射	構造強度： 照射による機械的特性の変化	<ul style="list-style-type: none"> ステンレス鋼及び低合金鋼は、中性子照射量がそれぞれ、10^{17} n/cm² 及び 10^{16} n/cm² 以下では未照射材の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない [2]。 	中性子照射量： 10^{15} n/cm ² 以下	<ul style="list-style-type: none"> 中性子照射量は、機械的特性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。
二次蓋外側表面、 二次蓋ボルト、 トラニオン、 トラニオンボルト、 キャスク底板 【材質】 ステンレス鋼 クロムモリブデン バナジウム鋼 析出硬化型ステン レス鋼	腐食	構造強度： 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> 不動態被膜を形成する[6, 7]。 水環境でのオーステナイト系ステンレス鋼の全面腐食を想定すると、約 18 μm（全面腐食速度 0.3 μm/年 × 60 年）である[9]。 	使用環境： <ul style="list-style-type: none"> 外気 中性子遮蔽材と接触 	二次蓋、トラニオンおよびトラニオンボルトはステンレス製で、12%以上の高いクロム含有率により耐食性に優れており、腐食は除外される。
	熱	構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格 JSME S FA1 (2007 年版) [4]は、-30°Cから 350°C または 425°Cまでの設計のための強度および物性を規定している。 -20°Cにおいて低温脆性破壊のおそれはない。[2, 12, 13], 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°Cである[5, 6, 7, 14]。 	使用環境温度： -22.4°C~120°C	設計用強度、物性値が規定されており、熱によるき裂、破損が生じない温度域で使用されるため、構造強度への影響はない。
	照射	構造強度：	<ul style="list-style-type: none"> ステンレス鋼及び低合金鋼は、中性子照射量がそれぞれ、10^{17} n/cm² 及び 	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。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
		照射による機械的特性の変化	10 ¹⁶ n/cm ² 以下では未照射材の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない[2]。		
中性子遮蔽体(ロッド)及び中性子遮蔽体(ディスク) 【材質】	熱	遮蔽機能: 熱分解による質量低下	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリエチレン()の非晶質化温度は、130℃及び135℃である。[15, 16]。 ・タイプLの相転移は約130℃で始まり、約135℃で終了し、この時点で半結晶から液体へと状態が変化する。このことから、制限温度を130℃とした。 ・タイプGは半結晶性材料で、約135℃で相転移が起こる。 ・熱分解は、340℃を超える温度で起こる[17]。 	使用環境温度: -22.4℃～120℃	使用温度範囲は非晶質化温度以下及び熱分解温度以下であり、水素分子の分解・損失もない。したがって、質量低下は生じず、遮蔽機能への影響はない。
ポリエチレン	照射	遮蔽機能: 分解による質量減損	<ul style="list-style-type: none"> ・ガンマ線によりポリエチレンの分解や架橋が起こる。真空中や酸素を排除した状態では主に架橋が観察され、架橋により水素が放出される。架橋に起因する水素の損失率は約6.3 × 10⁻⁴ %である。[18](別紙2参照) ・中性子線はポリエチレンの構造には影響を与えない[19]。 	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	ガンマ線照射による質量低下は無視できる量であり、遮蔽機能への影響はない。 中性子線は影響を与えない。
Hビーム、鋼製エッジセグメント、	腐食	構造強度: 腐食による構造強度低下	不動態被膜を形成する[6, 7]。	使用環境: ヘリウム雰囲気	水分は限定されており、不活性ガス雰囲気であるため、腐食による構造強度への影響はない。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
バスケット底板 【材質】 ステンレス鋼	熱	構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> 金属キャスク構造規格 JSME FAS FA1(2007年版) [4]は、-30°Cから425°Cまでの設計のための強度および物理的性質を規定している。 -20°Cにおいて低温脆性破壊のおそれはない[12, 13]。 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$280\sim 320^{\circ}\text{C}$である[5, 6, 7]。 	使用環境温度： $-22.4^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$	設計用強度、物性値が規定されており、熱によるき裂、破損が生じない温度域で使用されるため、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	顕著な機械特性の変化が認められるのは中性子照射量が 10^{17} n/cm^2 以上である[2]	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。
熱伝導及び中性子吸収板、バスケットエッジセグメント 【材質】 ホウ素添加アルミニウム合金 <input type="text"/>	腐食	臨界防止機能： 腐食による臨界防止機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 使用済燃料貯蔵中の使用済燃料プール水(ホウ酸水)による腐食は、実用上有意なものではないと考えられている[20]。 金属キャスク内部は、残留水分が10%(質量)以下の不活性ガス雰囲気にあるため、この環境におけるアルミニウム合金、ほう素添加アルミニウム合金は、腐食を考慮する必要はなく、貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合においても、20 g/m^3のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率(1%燃料破損相当) 	使用環境： ヘリウム雰囲気	ホウ酸水に対して良好な耐食性を有しているため、腐食による臨界防止機能の低下はない。 なお、使用済燃料貯蔵時に使用済燃料が使用済燃料プール水中に置かれる期間は数日程度であり、腐食による臨界防止機能への影響はない。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
			以下であれば、腐食を考慮する必要はない[10]。		
	熱	臨界防止機能： 熱による臨界防止機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 中性子吸収材に含まれる炭化ホウ素は、融点が約 2350°C [21]。 アルミニウム合金の融点は 630°C 以上である[22]。 	使用環境温度： -22.4°C～250°C	ホウ素添加アルミニウム合金製バスケットの使用環境温度は、融点以下である。したがって、臨界防止機能に影響はない。
	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	<ul style="list-style-type: none"> ^{10}B の量は、<input type="text"/> である。同位体 ^{10}B は、熱中性子を吸収することができ、それによってリチウムに変換され、これは、以下の式によって表される。 $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$ 機械的特性の顕著な影響は、10^{19} n/cm² を超える中性子束でのみ予想される [2]。 	中性子照射： 10^{15} n/cm ² 以下	<ul style="list-style-type: none"> ホウ素添加アルミニウム合金板への最大中性子束(60 年間)は 7.26×10^{14} 個である。したがって、7.26×10^{14} 個/cm² の ^{10}B 原子はリチウムに変換され、その量は 1.21×10^{-9} mol/cm² または 1.21×10^{-5} mg/cm² である。これは、60 年の期間にわたって、照射された ^{10}B 原子の最大 380 ppb の減損をもたらす。 この ^{10}B の減損割合は無視できるレベルであるため、臨界防止機能への影響はない。
金属ガスケット 【材質】 銀、ステンレス鋼、ニッケル合金	腐食	閉じ込め機能： 腐食による閉じ込め機能低下	<ul style="list-style-type: none"> 銀被覆金属ガスケットのすべての構成材料（銀、ステンレス鋼、ニッケル合金）は空気、残留水分等に対して、腐食による減肉量を見積もったところ、<input type="text"/> 以下であった[23.]。 	使用環境： 一次蓋、二次蓋：ヘリウム雰囲気 二次蓋外側：外気	<ul style="list-style-type: none"> 一次蓋および二次蓋内側の不活性雰囲気維持される限り、金属ガスケットは、腐食しない。 金属ガスケットは長期貯蔵中に蓋間圧力を監視しているので、万が一の異常があれば、ガスケットの交換な

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
			<ul style="list-style-type: none"> 0.1 % の保守的な想定に対して、1%破損燃料からのヨウ素と反応し、ヨウ化銀を生成する。濃度をバスケットの腐食に費やしたとみなしても、腐食量は無視できるレベルである[10]。 銀被覆金属ガスケットの長期閉じ込め性能確認試験では、125°Cの温度で閉じ込め性能を維持した（19 年以上）[24]。 		<p>どの措置を施し、キャスクの閉じ込め機能は維持できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 二次蓋外側は外気で、空気に対しては、腐食は問題にならない。
	熱	閉じ込め機能：熱による閉じ込め機能の低下	<ul style="list-style-type: none"> 初期の閉じ込め機能 (1.0×10^{10} Pa m^3/s) を保持できるラーソンミラーパラメーター (LMP) は、定数 $C=14$ で約 8.0×10^3 [24] である。 銀被覆金属ガスケットの長期閉じ込め性能確認試験では、125°Cの温度で閉じ込め性能を維持した（19 年以上）。設計貯蔵期間を 60 年とした場合の長期閉じ込め性能確認試験と同じ LMP である。金属ガスケットの初期温度が LMP 初期温度より低ければ、閉じ込め機能を維持できる[24]。 	使用環境温度： $-22.4^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C}$	使用環境温度は、銀被覆金属ガスケットの長期閉じ込め性能確認試験 LMP 初期温度 (120°C) よりも低いため、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	<ul style="list-style-type: none"> スプリングに使用するニッケル合金は、照射量が $3.7 \times 10^{17} \text{cm}^{-2}$ 以下では未照射の機械的特性に対して有意な差がない 	中性子照射： 10^{15}n/cm^2 以下	中性子照射量は、機械的特性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。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
			<p>く、照射の影響を考慮する必要がない[2]。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 貯蔵中の金属ガスケットが受ける中性子照射量($2.12 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$以下)は、外被材の銀を含む構成材料の機械的性質に重大な変化をもたらす放射線量値以下である[26, 25]。 		
燃料棒被覆管 【材質】 ジルカロイ	腐食	腐食による亀裂・破損	残留水分量が 10 wt% 以下の不活性雰囲気にある燃料被覆管の酸化量や水素吸収量は無視できるほど小さい[2]。	使用環境： ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気保たれている限り、燃料被覆管は腐食の影響を受けず、亀裂・破損は生じない。
	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、以下のような評価が必要である。クリープひずみの進行による燃料被覆管の破断、照射回復による燃料被覆管の強度低下、燃料被覆管内の水素化物の再配向による燃料被覆管の脆化、応力腐食割れの評価が必要である。 ・ 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%以下となるように温度を制限することで破損を防止することができる[26]。以下に示す燃料被覆管の水素化物再配向の限界範囲では、累積クリープひずみは 1%を超えないことが確認されている。 	環境温度： $-22.4^{\circ}\text{C} \sim 265^{\circ}\text{C}$	燃料被覆管における経年変化要因のうち、水素化物の再配向を防止することにより、他の発生を同時に防止することができる。設計貯蔵期間中の温度および周方向応力は、 275°C および 100 MPa を超えないため[27]、熱による影響はなく、亀裂・破損は生じない。

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
			<ul style="list-style-type: none"> ・ 照射硬化回復については、国内の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から、硬化回復の閾値は 300℃であることが示されている[26]。この閾値以下であれば、照射回復性は小さく、使用済燃料被覆管の温度を制限することで照射回復を防止することができる。 ・ 燃料被覆管の水素化物再配向については、国内の軽水炉で照射した 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の機械的特性を低下させない温度は 275℃以下、周方向の応力は 100MPa 以下が要求されている。燃料被覆管温度と周方向応力を制限することにより、機械的性質の劣化を防止することができる[26]。 ・ 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物ガスの放出がなく、また、原子炉運転中に燃料棒ペレットから放出されるヨウ素はヨウ化セシウムとして安定に存在するため、応力腐食割れが発生する化学雰囲気は存在しない[26]。 		

部材及び材質	要因	主な評価の観点	各成分の材質に対する経年変化に関わるデータ	設計条件	評価
	照射	照射による亀裂・破損	ジルコニウム合金の場合、中性子照射量が $10^{21} \sim 10^{22}$ n/cm ² 程度と十分に低ければ、照射の影響は無視することができる [26]。	中性子照射： 10^{16} n/cm ² 以下	中性子照射量は、機械的特性変化が認められる値以下であり、亀裂・破損は生じない。

3 参考文献

- [1] DECHEMA-Korrosionsverhalten Werkstoff-Tabelle, 37. Ergänzungslieferung, Frankfurt a. M.: DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 1995
(ドイツ化学協会、材料の腐食)
- [2] (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:2021(AESJ-SC-F002:2021)」(2021)
- [3] I. P. B. Beverskog, “Revised Pourbaix diagrams for nickel at 25–300°C”, Corrosion Science, Vol.39, No.5,1997.
- [4] (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)
- [5] 吉田キャスト工業(株) 鉄合金の比重と融点 (<https://yoshidacast.com>)
機械技術ノート (<https://tec-note.com.1842>)
- [6] 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)
- [7] M. F. Ashby and. David R. H. Jones, Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design, Fifth Edition, Elsevier Ltd., 2019 (P.312)
- [8] R. W. Revie, Uhlig's Corrosion Handbook, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2011
- [9] Durability of Spent Nuclear Fuels and Facility Components in Wet Storage; IAEA-TECDOC-1012, Vienna: IAEA, 1998
- [10] (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」, 2003
- [11] (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)
- [12] NRC, NUREG 2214 Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report, 2019.
- [13] (一社)日本原子力学会、「使用済燃料、混合酸化物新燃料及び高レベル放射性廃棄物容器の安全設計及び検査に関する規格: 2013 年(AESJ-SC-F006: 2013)」, (2013)

- [14] [Stainless Steel | Ulbrich](https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/)
<https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/>
- [15]
- [16]
- [17] D. H. Dr. Ortner, Beurteilung von Kunststoffbränden – Bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehende Stoffe nach den Anhängen II – IV der 12.BImSchV, 1995
 (プラスチック火災評価)
- [18] W. Schnabel, Polymer Degradation-Principles and practical applications, Wien: Carl hanser Verlag, 1981
- [19] 班目他、高耐熱・耐放射性中性子遮へい材量の高速中性子照射実験、東大院 14K-11.
- [20] D. Nagasawa, Accelerated Corrosion Testing of Aluminum Boron Carbide Metal Matrix Composite in Simulated PWR Spent Fuel Pool Solution, PATRAM 2010, 2010
- [21] F. Thévenot, “Boron Carbide – A Comprehensive Review, “Journal of the European Ceramic Society, 1990
- [22] F. Ostermann, Anwendungstechnologie Aluminium, 3.Auflage, Springer Verlag, 2014.
 (アルミニウムの応用技術)
- [23] Gutachterliche Stellungnahme GU400/13/98, Gutachterliche Stellungnahme zum Langzeit-Korrosionsschutzverhalten der äußeren Beschichtung von Transport und Lagerbehältern, Institut Korrosionsschutz Dresden GmbH, 1998.
 ドレスデン腐食防食協会、銀被覆金属ガasket腐食鑑定書 GU400/13/99
- [24] 電力中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基礎」(ERC 出版), 2014
- [25] T. Yokoyama, et al., Integrity Assessment of Dual-Purpose Metal Cask after Long Term Interim Storgae – Seal Performance under Transport Conditions, PATRAM 2004 paper # 076, Berlin, Germany, Sept. 20-24, 2004.
- [26] 総合エネルギー調査会 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」, 2019
- [27] 三菱原子燃料株式会社、三菱 PWR 高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計、MNF-1000 改1平成 23 年 3 月

別紙 1 CASTOR® geo26JP の構成部品に対する経年の影響

1. 兼用キャスク機器及び使用済燃料の経年変化要因と設計

使用済燃料兼用キャスクの構成部品及び使用済燃料の設計上の経年変化要因は、次のとおりである。

(1) 腐食

ジルカロイの全面腐食,隙間腐食,応力腐食割れ,異種材料接触部の化学反応,水素吸収と酸化。

(2) 熱

低温または高温での材料組成および材料構造の変化、強度、延性、脆性、クリープ、及びその他の物理特性の変化、および質量の減少。

(3) 照射

ガンマ線及び中性子照射による材料組成及び材料構造並びに強度、延性、脆性及びその他の物理的特性の変化。

安全機能(安全機能構成部品)および構造強度(構造強度構成部品および使用済燃料)に対して列挙された経年要因の影響は、文献、試験データ、および 1500 を超える使用済燃料キャスク CASTOR 型の製造から得られた経験に基づいて決定される。

2. CASTOR® geo26JP の経年評価手法

(1)~(3)に示した 3 つの経年変化要因について、構成部品及び使用済燃料の経年変化挙動の評価方針を表 A1-1 に示す。

表 A1-1 CASTOR® geo26JP の構成部品の経年変化効果に関する主な評価項目

経年変化要因	主な評価項目
(1) 腐食	兼用キャスク構成部品及び使用済燃料(燃料被覆管)の腐食の外観及び腐食の程度は、材料特性と環境条件に基づいて決定される。 腐食が構造強度(構造強度構成要素)又は安全機能(安全機能構成要素)に及ぼす影響も評価する。メッキ、塗装、シールなどの対策を施す。
(2) 熱	最小使用温度および最大使用温度が兼用キャスクの構成部品と使用済燃料(燃料被覆管)に及ぼす影響。特に低温脆性破壊と高温クリープの発生、主に構造強度や安全機能を担う構成部品を評価する。さらに、熱が物性、質量等に及ぼす影響についても評価する。

経年変化要因	主な評価項目
(3) 照射	<p>主に兼用キャスク及び使用済燃料(燃料被覆管)に対する構造強度と安全機能部品の機械的性質の変化に及ぼす照射の影響を評価するため、中性子照射量を考慮する^{注1}。</p> <p>中性子遮蔽材に関しては、ガンマ線照射線量の影響も考慮する。</p>

^{注1} 金属材料では、以下の補足説明に示すように、ガンマ線の材料特性に対する照射の影響は中性子のそれよりも小さい。

補足説明: 金属材料の照射損傷

(1) 中性子照射による金属材料の特性変化

中性子照射すると、金属材料の脆化に関連して材料が硬化する[28]。中性子照射による金属の脆化は、ある一定量を超える中性子量に対してのみ考慮する必要がある[2]。したがって、中性子による放射線損傷は、キャスクのすべての金属部品に対して影響するわけではない。

(2) 金属材料の特性変化に及ぼすガンマ線の影響

ガンマ線は電磁波であり、励起またはイオン化によって原子と相互作用するが、一般的に、原子を格子サイトからたたき出すことができず、むしろ、主にイオン化及び励起を通じてそれらのエネルギーのほとんどを失う。したがって、ガンマ線は、原子核との弾性衝突をもたらさず、金属に対して損傷を及ぼさない[29]。したがって、 γ 線照射が兼用キャスク及び使用済燃料(燃料被覆)の金属部品の機械的特性に及ぼす影響はない。

参考資料

[28] M. W. Thompson Defects and radiation damage in metals Cambridge university press, 2010

[29] K. Lintner, E. Schmid Bedeutung von Korpuskularbestrahlung für die Eigenschaften von Festkörpern Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft, Band XXVIII, S. 302-406 (1955)

別紙 2 鋳鉄キャスクの要件と適合性

鋳鉄キャスクの要件として、「機械学会構造規格 JSME 2007 の要件」及び「JIS 規格低温用厚肉フェライト球状黒鉛鋳鉄品 G5504 (2005)の要件」がある。それぞれについて、鋳鉄キャスクの適合性を評価する。

1. 機械学会構造規格 JSME 2007 の要件

MCM-1110 密封容器材料は別表 1-1 に示す材料に適合するもの、を選定する。

別表 1-1 には、各種ステンレス鋼や低温用合金鍛鋼品に加え、次を含む。

JISG5504(2005) 低温用厚肉フェライト球状黒鉛鋳鉄品 (FCD300LT)

MCM-1333 低温用厚肉フェライト球状黒鉛鋳鉄品

低温用厚肉フェライト球状黒鉛鋳鉄品の場合は、MGM-3400 に規定する動的破壊靱性試験を行い、得られた動的破壊靱性 K_{Ic} が次の不等式を満足し、

$$K_{Ic} > 50.8 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \quad (\text{MCM-3})$$

又は、次の不等式を満足すること。

$$20 + 1.344e^{0.0261(T+160)} > K \quad (T \leq 0^\circ\text{C}) \quad (\text{MCM-4})$$

$$108 > K \quad (0^\circ\text{C} < T) \quad (\text{MCM-5})$$

T : 貯蔵時, 取扱い時および輸送時における材料の温度($^\circ\text{C}$)

K : 貯蔵時, 取扱い時および輸送時における応力拡大係数($\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$)

ただし、試験状態に対しては、式 MCM-3, 式 MCM-4 および式 MCM-5 は適用しない。応力拡大係数の算定のための仮想欠陥としてはき裂深さが 25 mm, アスペクト比が 1/6 の半だ円状の表面欠陥を考慮する。

2. 機械学会構造規格 JSME 2007 への適合性

表 A2-1 は、国内外で製造された、実物大鑄鉄キャスクモデル(FC1~FC3)及び厚肉の円筒構造物(MC4, MC8) (図 A2-1)の概略仕様及びその破壊靱性値を示す。いずれも、JSME 2007 の基準値を満たしている。参考に、これらを含む球状黒鉛鑄鉄から採取した試験片による破壊靱性値の参照破壊靱性値(温度依存性)を図 A2-2 に示す[30]。破壊靱性値は、低温側で低くなるので、使用最低温度以下で試験・評価する必要がある。

表 A2-1 実物大鑄鉄キャスク等の概略仕様

供試体 No	区分	材質	形状	寸法 (mm)			重量 (t)	破壊靱性値 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
				外径	肉厚	長さ		基準値 > 50.8
FC1	国内 確証試験[31]	JIS G5504 適合	底付 円筒	2020	310	5270	75	65
FC2				2040	310	5377	80	84
FC3				2150	355	5235	79	112
MC4	電中研 QA 研究会[32]			約 2000	約 300	約 2500	約 60	66
MC8	電中研 自主研究[33]		円筒	1400	400	1700	19	103

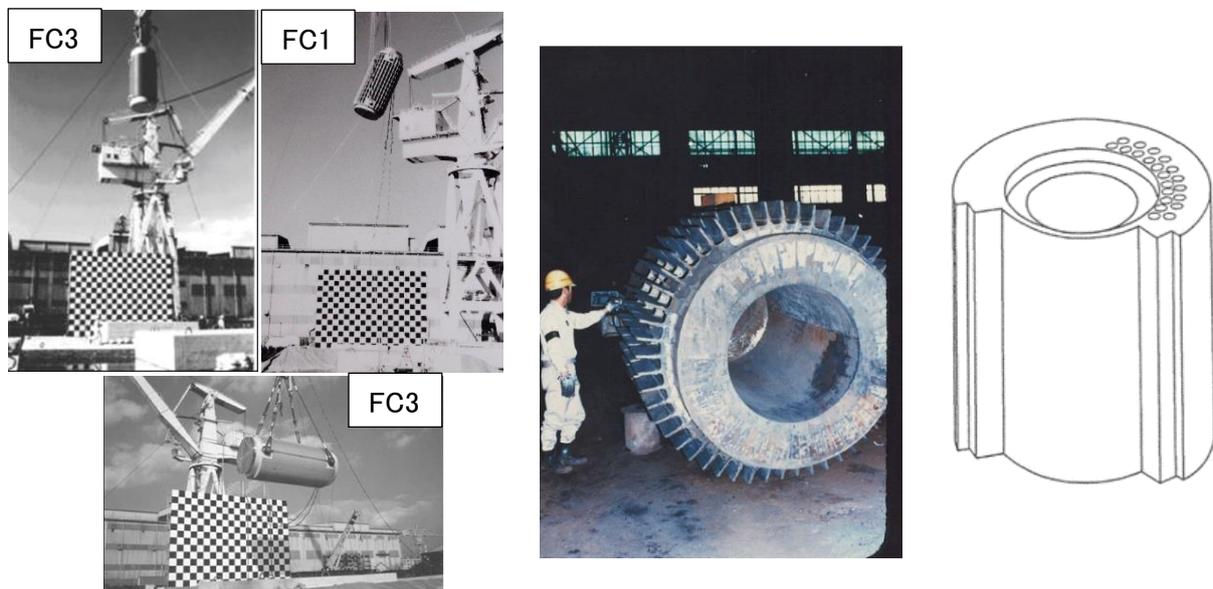
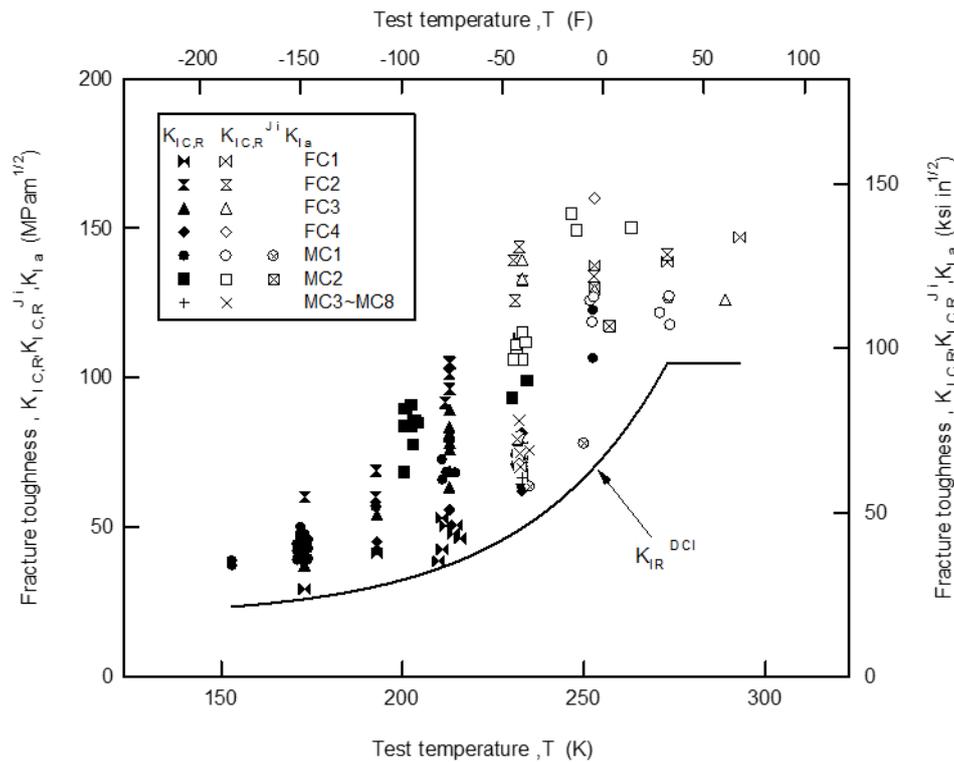


図 A2-1 左:実物大鑄鉄キャスクモデル(FC1~FC3)、中央:MC4 球状黒鉛鑄鉄製厚肉の円筒構造物、右:MC8 球状黒鉛鑄鉄 モデルキャスク



$K_{IC,R}$: 動的破壊靱性値

$K_{IC,R}^{J1}$: J 積分から変換した値

K_{Ia} : き裂停止破壊靱性値

FC1～FC4: 実物大鑄鉄キャスク試験体から採取した試験片のデータ

MC1～MC8: 実物大直径鑄鉄キャスク(短尺長さ)の試験体から採取した試験片のデータ

図 A2-2 球状黒鉛鑄鉄の参照破壊靱性値

図 A2-2 において、 -40°C における動的破壊靱性値はいずれも基準値 ($50.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) を上回っている。

3. JIS 規格低温用厚肉フェライト球状黒鉛鑄鉄品 G5504 (2005)の要件

- (1) **化学成分** 原子力用使用済燃料等輸送・貯蔵容器(キャスク)は、附属書による。
- (2) **機械的性質** 鑄鉄製キャスクは、本体の 13.4 の試験(表 2 に機械的性質の要件を示す)に加えて、破壊じん性試験を行い、その伸び及び破壊じん性値は、附属書表2による。
- (3) **黒鉛球状化率** 黒鉛球状化率は、80%以上とする。
- (4) **基地組織** 基地組織のフェライト面積率は、80%以上とする。
- (5) **内部の健全性** 鑄鉄品の内部には、使用上有害な鑄巣などがあってはならない。
- (6) **試験**
- 1) **供試材の採取** 供試材は、鑄鉄品毎に、鑄鉄品又はその余長部から採取する。供試材の採取位置及び数は、受渡当事者間協定による。
- 2) **分析試験** 以下略

表 2 機械的性質

引張強さ [N/mm ²]	0.2% 耐力 [N/mm ²]	伸び [%]		シャルピー吸収エネルギー [J]	
		3 個の試験片 の平均値	個々の試験片 の値	3 個の試験片 の平均値	個々の試験片 の値
300 以上	200 以上	12 以上	8 以上	6 以上	4 以上

附属書(規定)原子力用使用済燃料等輸送・貯蔵容器(キャスク)の追加要件

- (1) **化学成分** 鑄鉄製キャスクの主な化学成分の範囲は附属書表1又は受け渡す当事者間の協定による。

附属書表1 化学成分 単位%

C	Si	Mn	P	Cu	Ni	Cr	Mg
3.0~3.7	1.2~2.3	0.25 以下	0.03 以下	0.1 以下	1.0 以下	0.07 以下	0.07 以下

附属書表2 伸び及び破壊じん性値

伸び % (室温)	破壊じん性値 MPa√m (-40°C)
12 以上	50 以上

(2) 破壊じん性試験

- 1) **試験片** ASTM E1820 に規定する試験片とし、供試材から採り、その数は、予備の試験片を除き4個とする。
- 2) **試験方法** 破壊じん性試験方法は、ASTM E1820 による。ただし、試験温度は-40℃以下とする。

4. JIS 規格低温用厚肉フェライト球状黒鉛鑄鉄品 G5504 (2005)の要件への適合性

JIS G 5504 (2005) 制定時の JIS 原案作成委員会によれば、化学成分は規範的な要件ではなく、参考指標とする考えが以下のように解釈されている。

「機械的性質、組織、内部の健全性が主体であり、それらを満足するための指標として化学成分がある。」したがって、JIS G 5504 が求める主体的な要件は、以下の通りである。

- (1) 機械的性質(引張強さ、0.2%耐力、伸び、シャルピー吸収エネルギー、破壊靱性値)
- (2) 黒鉛球状化率(80%以上)
- (3) 素地組織(フェライト面積率 80%以上)

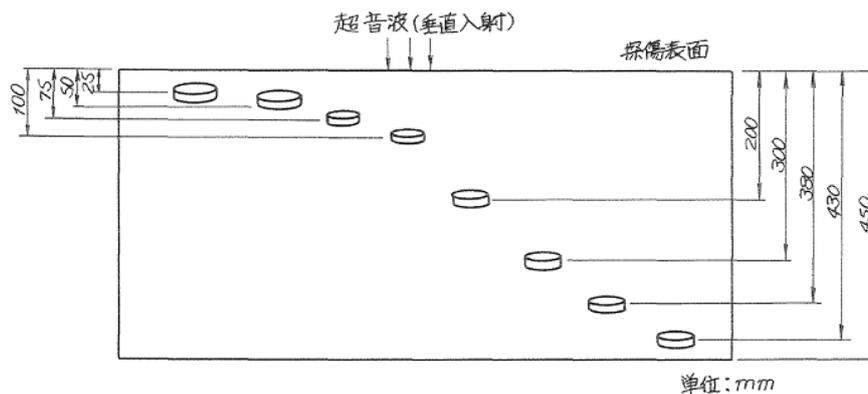
表 A2-2 に、国内外で製造された、実物大鑄鉄キャスクモデル(FC1~FC3)及び厚肉の円筒構造物(MC4, MC8)の JIS G5504 (2005)のうち上記(1)~(3)項への適合性評価結果を示す[34]。いずれも JIS G5504 (2005)の基準値を上回り、適合している。表 A2-2 実物大鑄鉄キャスクモデル(FC1~FC3)及び厚肉円筒構造物(MC4, 8)の例及び JIS G5504 (2005)への適合性評価結果

供試体 No	区分	形状	引張強さ	0.2% 耐 力	伸び	シャル ピー	黒鉛球状 化率	フェライト面 積率
			[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]	[%]	[%]
基準			>300	>200	>12	>12	>80%	>80%
FC1	国内 確証試験	底付 円筒	338	210	23	13	88	99
FC2			337	218	19	23	93	98
FC3			342	221	25	27	98	99
MC4	電中研 QA 研究会		345	205	21	29	99	100
MC8	電中研自主 研究	円筒	378	239	19	16	87	87

(4) 内部の健全性(有害な鑄巣などがあってはならない)

鑄鉄品内部の健全性の評価方法として、非破壊試験(浸透試験、超音波探傷などの方法)よって行う。例えば、MC8 のコア材を対象に液体浸透探傷試験(PT)及び放射線透過探傷試験(RT)による結果、引け巣、割れ等の有害な鑄造欠陥のないことを確認している[33]。

なお、超音波探傷試験(以下、UT という)による球状黒鉛鑄鉄の鑄造欠陥の検出限界値を明らかにするために、ラウンドロビン試験(同一の試験体を複数の試験機関で検査すること。以下 RRT という)を行った[35, 36]。図 A2-3 は球状黒鉛鑄鉄のブロックの内部に人工欠陥を設定した UT 試験体の模式図である。その結果、垂直探傷法では 6mm、斜角探傷法では 3mm の平底穴欠陥を検出できることを明らかにした。この UT による欠陥検出限界値は鑄鉄キャスクの破壊靱性評価上、十分、保守的である。JSME の金属キャスク構造規格(MCM-1333 では、破壊靱性値と比較する応力拡大係数の算定のための



垂直探傷試験体の人工欠陥設定位置 (模式図)

図 A2-3 UT 試験体の人工欠陥設定位置(模式図)

仮想欠陥として、亀裂深さが 25mm、アスペクト比が 1/6 の半だ円状の表面欠陥を考慮する。

5. 実物大鑄鉄キャスク試験体の落下試験

JSME (MCM-1333)の破壊靱性要件を満たす実物大鑄鉄キャスク試験体が、落下衝撃に耐えられることを確認する実証試験を行った(図 A2-4)。実物大鑄鉄キャスク試験体を鑄造し、落下試験に供した[37][38]。-40°Cに冷却した鑄鉄キャスク試験体を 9m の高さから水平に、非降伏面上に落下した。キャスク試験体の表面の最大引張り応力の発生する箇所に、人工欠陥(深さ 83.5mm 長さ 510mm の半楕円形状)を放電加工により挿入した。



図 A2-4 実物大鑄鉄キャスクの 9m 落下試験(-40°C)

1) 試験体の破壊靱性値

表 A2-3 に上記落下試験体の鑄造時余長部から採取した試験片を用いて得た動的破壊靱性試験の結果を示す。これら破壊靱性値の平均値及び標準偏差は、ワイブル分布を仮定して、累積分布確率を得るメディアンランク法を用いて次のように算定した。

ワイブル分布変数 $\alpha = 12.3$, $\beta = 74.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

$$(\text{average})K_{IC,R} = 71.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{-----}(1)$$

$$\sigma_{SD} = 7.09 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{-----}(2)$$

$$(\text{average})K_{IC,R} - 3\sigma_{SD} = 50.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \text{-----}(3)$$

この材料の破壊靱性値は MCM-3 式の制限値(50.8 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)とほぼ同じで、実証試験体は、代表的な物性を有しているといえる。

2) 応力拡大係数

落下時の応力拡大係数 K は、38.2 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった(前述の(8)式に落下試験時に欠陥先端に発生したひずみの測定値から換算した応力 σ_m : 60MPa, σ_b : 16MPa を代入して求めた)。

3) 落下試験結果と破壊に対する裕度

落下試験後、人工欠陥先端から亀裂進展のないことを光マイクロスコープで確認した。

表 A2-3 鋳鉄キャスク試験体材料の動的破壊靱性値(MPa√m)

材 料	破壊靱性値	平均値	標準偏差	平均値-3x 標準偏差
球状黒鉛	81.5			
鋳鉄	71.6	71.7	7.09	50.4
JIS G	68.8			
5504	70.1			

前項で述べたように、鋳鉄キャスクには破壊力学が適用できる。すなわち、破壊力学では、応力拡大係数が破壊靱性値に等しくなった時に、破壊が起こる。キャスク試験体の 9m 落下による破壊に対する裕度は、鋳鉄キャスク試験体の破壊靱性値の平均値に対しては、 $71.7/38.2=1.88$ であったといえる。

一方、実証試験体の破壊靱性値の平均値-3 標準偏差で得られる

(average) $K_{IC,R} - 3\sigma_{SD} = 50.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対しては、 $50.4/38.2=1.32$ であったといえる。

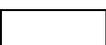
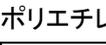
実際の設計で(3)式を用いる場合の設計裕度は、1.32 以上であれば、安全性が実証されていることになる。ちなみに IAEA の指針[39]では 1.4 が推奨されている。

別紙 3: 中性子遮へい材の質量損失

中性子遮蔽材には 2 種類のポリエチレンが使用されているが、これらの材料の照射下での挙動は、製造者と GNS が調査・検討した。その結果、材料にガンマ線を照射すると、水素が分離して高分子構造内に架橋が形成されることがわかった。炭化水素やその他の分解生成物の形成は除外される。したがって、中性子遮蔽材の有意な分解は考慮する必要がない。中性子遮蔽材の水素放出率は、製造者が調査・決定した。その結果、水素放出率は 1 g/(MGy・kg)未満であることが明らかになった。供用期間中の水素損失を計算する上で、保守的に 1 g/(MGy・kg)を、2 種類のポリエチレンに想定した。

保守的な境界条件(水素放出率を伴う最大エネルギー量)を考慮すると、ガンマ線照射誘起架橋によって引き起こされる水素の損失は約 231 g である(表 A3-1)。遮蔽材の全体質量 2310 kg との比較において¹、遮蔽材は約 330 kg の水素原子量を含むので、60 年の貯蔵期間中のこの損失率(約 7.0×10^{-4})は無視することができ、中性子遮蔽能力の喪失はないと言える。

表 A3-1 ポリエチレン構成部品の質量損失

材質	構成部品	密度 [g/cm ³]	質量 [kg]	水素放出率 [g]/(MGy・kg PE)	最大 エネルギー線量/60 年 [Gy]	H の放出量 [g]
ポリエチレン 	遮蔽材棒状-外側列	0.955	1200	1	2.99×10^4	35.9
ポリエチレン 	遮蔽材棒状-内側列	0.935	900	1	2.17×10^5	195.3
	下端の遮蔽材円盤状		120	1	1.48×10^2	0.02
	蓋間の遮蔽材円盤状		90	1	9.16×10^1	0.008
	計		2310			231.23

注¹ 遮蔽材の質量は代表的な推定値であり、最終的な製造上の確認ではない。

参考資料

- [30] T. Arai, et al., Determination of lower-bound fracture toughness for heavy-section ductile cast iron (DCI) and estimation by small specimen tests, ASTM STP 1207, p.355-368
- [31] 電力中央研究所、原子力発電所使用済燃料貯蔵技術確証試験報告書 総合報告書(昭和 62 年度～平成 3 年度通商産業省委託研究 平成 4 年 3 月)。
- [32] 電力中央研究所、研究報告 L87002、鑄鉄キャスクの品質保証に関する研究、昭和 62 年 11 月。
- [33] 高久 啓他、鑄鉄製キャストール型モデルキャスクコア材の諸特性、研究報告 285059、電中研 1986 年 10 月。
- [34] 三枝利有、新井 拓、使用済燃料輸送・貯蔵用鑄鉄キャスクの ASME 規格化、研究報告 N11027、電中研 2012 年 4 月。
- [35] Imaeda, H. “Estimation of the Critical Size of Detectable Flaws in Ductile Cast Iron Using Ultrasonic Testing”, Nondestr. Test. Eval., 1994, Vol. 11, pp.43-62.
- [36] Imaeda, H. “Estimation of the Critical Size of Natural Flaws in Ductile Cast Iron Using Ultrasonic Testing”, Nondestr. Test. Eval., 1994, Vol. 11, pp.341-348.
- [37] Shirai, K., Ito, C., Arai T. and Saegusa T. : “Integrity of Cast Iron Cask against Free Drop Test-Verification of Brittle Failure Design Criterion.”, RAMTRAN, Vol.4, No.1, pp.5-13 (1993).
- [38] 白井、加藤、伊藤、島崎、三枝「鑄鉄キャスクの落下衝撃に対する健全性評価(その 3)脆性破壊評価基準の検証」電力中央研究所 研究報告 U90001(平成 2 年 4 月)
- [39] IAEA, Guidelines for Safe Design of Shipping Packages against Brittle Fracture, IAEA TECDOC-717 (Vienna: IAEA).

別紙 4 参考文献の概要について

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
		文献概要		
[1]	DECHEMA-Werkstoff-Tabelle, 37. Ergänzungslieferung, Frankfurt a. M.: DECHEMA Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e.V., 1995. (ドイツ化学協会、材料の腐食)	<p>① ステンレス鋼の腐食: ステンレス鋼は、設計貯蔵期間中の燃料被覆管の破損を考慮する場合においても、20g/m³ 程度のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率(1%燃料破損相当)以下であれば、腐食を考慮する必要はない。</p> <p>② ステンレス鋼及び低合金鋼の照射: 中性子照射量がそれぞれ 10¹⁷ n/cm² 及び 10¹⁶ n/cm² 以下では未照射材の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要はない。</p> <p>③ ニッケル合金の照射影響: 金属ガスケットスプリングに使用するニッケル合金は、照射量が 3.7×10¹⁷cm⁻² 以下では未照射の機械的特性に対して有意な差がなく、照射の影響を考慮する必要がない。</p> <p>④ ほう素添加アルミ合金: 10¹⁹ cm⁻² までの中性子照射量に対して脆化を考慮する必要はない。また、照射影響に対するほう素含有量による影響は見られない。</p>		本文献には、材料及びコーティング材料の腐食挙動に関する情報とデータが説明されており、参考文献として適切である。
[2]	(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: 2021(AESJ-SC-F002:2021)」(2021).			<p>本文献は、中間貯蔵用金属キャスクの安全設計及び検査基準等について、次のように解説しており、参考文献として適切である。</p> <p>① キャスク内面: キャスク本体胴内面は電解ニッケルメッキされている。ステンレス鋼と同等以上の耐食性があり、ヨウ素による腐食を考慮する必要はない。</p> <p>② 中性子照射量(10¹⁵ n/cm²)は、機械的特性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。</p> <p>③ 中性子照射量(10¹⁵ n/cm² 以下)は、機械的特性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。</p> <p>④ 中性子照射量(10¹⁵ n/cm² 以下)は、ほう素含有量による影響を与える値以下であり、未臨界機能への影響はない。</p>
[3]	I. P. B. Beverskog, "Revised Pourbaix diagrams for nickel at 25-300°C," Corrosion Science, Vol.39, No.5,1997.未入手	ニッケルは、鉄やクロムよりもはるかに標準電位が貴であり、高温の空気又は酸素雰囲気中でニッケル酸化物皮膜をつくるため、炭素鋼よりも耐酸化性が優れている。		本文献は、ニッケルの「腐食なし・不動態及び腐食」の領域を図示する、電気化学的電位-pH 図(Pourbaix 図)を掲載・説明している。ニッケルの耐食性を評価するのに適している。

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
[4]	(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).	球状黒鉛鑄鉄、炭素鋼、等の熱・構造強度: -30°Cから350°Cまたは425°Cまでの設計用強度・物性値が規定されている。	本文献には、特定兼用キャスク各部材の設計用強度及び物性値の規格値が示されている。文献の温度範囲は、特定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、参考文献として適切である。
[5]	吉田キャスト工業(株) 鉄合金の比重と融点 (https://yoshidacast.com) 日本冶金工業(株)ホームページ NAS_630_J.pdf (nyk.co.jp)	鉄合金の融点 球状黒鉛鑄鉄: 1116-1176°C 炭素鋼: 1497°C SUS630: 1430°C	本文献には、鉄合金の一般的な融点がまとめて掲載されており、融点の約1/3であるクリープ温度を知るには適している。例えば、 球状黒鉛鑄鉄: $(1116+273)/3-273=190^{\circ}\text{C}$ 炭素鋼: $(1497+273)/3-273=317^{\circ}\text{C}$ SUS630: $(1430+273)/3-273=295^{\circ}\text{C}$
[6]	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、試験温度が融点 T_m (絶対温度) の1/3以下の低い温度においては、クリープによる変形量が無視できるほどに小さいためクリープ現象が問題視されることは少ない。しかし、試験温度が T_m の約1/3を超えるようになると、クリープによる変形量が無視できなくなる。	本文献は、材料のクリープ温度を含む基礎的性質、腐食、及びステンレス鋼を含む実用材料の特性、製造等について豊富なデータとともに解説しており、参考文献として適切である。
[7]	M. F. Ashby and David R. H. Jones, Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design, Fifth Edition, Elsevier Ltd., 2019. Page 312.	一般的にクリープ開始温度は、 $0.3\sim 0.4 T_m$ (T_m : 融点(絶対温度))。	本文献は、材料の基礎物性、有用性、弾性論、引張特性、延性、脆性破壊、疲労、高温クリープ、腐食などについて豊富なデータとともに解説しており、参考文献として適切である。
[8]	R. W. Revie, Uhlig's Corrosion Handbook, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2011.	沿岸環境における炭素鋼の腐食減量から計算した腐食量は0.3-0.8 mm/10年である。	本文献は、産業界で使われている構築物の各種材料の様々な環境条件における腐食挙動・データを網羅しており、参考文献として適切である。
[9]	Durability of Spent Nuclear Fuels and Facility Components in Wet Storage; IAEA-TECDOC-1012, Vienna: IAEA, 1998.	水環境でのオーステナイト系ステンレス鋼製のプール構成部品の全面腐食速度は、 $0.3 \mu\text{m}/\text{年}$ である。	本文献は、二次蓋等の残留水分などによる腐食量を保守的に評価する際の参考値を示しており、参考文献として適切である。

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
		文献概要		
[10]	(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」, 2003.	<ul style="list-style-type: none"> ・ ステンレス鋼は、1%破損燃料からのヨウ素濃度による 60 年間の腐食量が最大腐食速度($0.13 \mu\text{m}/\text{年}$)より $7.8 \mu\text{m}$ となるが、腐食速度の漸減傾向を考慮すると腐食量はさらに低減する。 ・ アルミ系材料は、ヨウ素の浸入深さは μm オーダ以下であり、ごく表面層のみにヨウ素による腐食層が生じたとしても部材全体の強度への影響は小さいものと推定される。 		<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%破損の条件及び特定兼用キャスク内部の最高温度(燃料集合体最高温度: 265°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、特定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、参考文献として適切である。
[11]	(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).	炭素鋼、ステンレス鋼、ニッケルクロムモリブデン鋼等の熱・構造強度: -30°C から 350°C または 425°C までの設計用強度・物性値が規定されている。		本文献には、特定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。設計貯蔵期間中の温度範囲を包絡しており、参考文献として適切である。
[12]	NRC, NUREG 2214, Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report, 2019.	照射損傷に関しては、 $10^{19} \text{ n}/\text{cm}^2$ 以上の中性子束により、炭素鋼の機械的性質は劣化する。乾式キャスク貯蔵では、60 年間に受ける中性子束は約 $10^{13}\text{--}10^{15} \text{ n}/\text{cm}^2$ である。照射損傷の条件よりも4桁も低い条件で貯蔵される。		本文献は、金属キャスクを含む貯蔵施設全般の材料の照射劣化などを評価しており、参考文献として適切である。
[13]	(一社)日本原子力学会、「使用済燃料、混合酸化新燃料及び高レベル放射性廃棄物容器の安全設計及び検査に関する規格: 2013 年(AESJ-SC-F006: 2013)」, (2013).	炭素鋼やオーステナイト系ステンレス鋼は、静止状態で -40°C の低温になっても低温脆性破損することはない。遮蔽性能や構造強度に影響はない。		本文献は、特定兼用キャスク各部材の最低使用温度 (-22.4°C) を含む低温特性評価を示しており、参考文献として適切である。
[14]	Stainless Steel Ulbrich (https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/)	SUS 304、SUS 304L の融点: $1399\text{--}1454^{\circ}\text{C}$ SUS 347 の融点: $1371\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ SUS 410 の融点: 1495°C SUS 630 の融点: $1371\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ (SUS347 と同様の化学成分により仮定)		本文献には、ステンレス鋼等の融点が列挙されており、融点の約 1/3 であるクリープ温度を知るには適している。例えば、 SUS 304、SUS304L: $(1399+273)/3-273=284^{\circ}\text{C}$ SUS 347: $(1371+273)/3-273=275^{\circ}\text{C}$ SUS 410: $(1495+273)/3-273=316^{\circ}\text{C}$ SUS 630: $(1371+273)/3-273=275^{\circ}\text{C}$

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
			球状黒鉛鑄鉄:(1116+273)/3-273=190°C 炭素鋼:(1497+273)/3-273=317°C
[15]		ポリエチレン [] は 190°C で溶出する。	ヨンデルバッセル社は 70 年の歴史あるドイツの会社で、自社製品の技術データシートを公表しており、参考文献として適切である。
[16]		ポリエチレン [] は 190°C で溶出する。	セレニーズ社は 100 年以上の歴史を有する米国の会社で、自社製品の技術情報を公表しており、参考文献として適切である。
[17]	D. H. Dr. Ortner, Beurteilung von Kunststoffbränden – Bei einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs entstehende Stoffe nach den Anhängen II – IV der 12.BImSchV,1995. (プラスチック火災評価)	熱分解は、340°C を超える温度で起こる。	本文献は高分子材料全般の熱的評価をまとめたもので、ポリエチレンの高温時の参考文献として適切である。
[18]	W. Schnabel, Polymer Degradation-Principles and practical applications, Wien: Carl Hanser Verlag, 1981.	高分子における劣化の原理を明らかにし、各種の劣化を統一的に記述した。劣化全般にわたる広い視野の教科書である。ガンマ線によりポリエチレンの分解や架橋が起こる。	ポリエチレンの架橋により水素が放出される。架橋に起因する水素の損失率を説明しており、参考文献として適切である。
[19]	<u>班目他、高耐熱・耐放射性中性子遮へい材量の高速中性子照射実験、東大院 14K-11</u>	<u>レジンに中性子照射試験を行った結果、レジンの劣化の主要因は熱劣化であり、線種によらず照射影響は小さいことが確認された。</u>	<u>ポリエチレンの照射劣化の影響を評価するうえで、本文献は参考文献として適切である。</u>
[20]	D. Nagasawa, Accelerated Corrosion Testing of Aluminum Boron Carbide Metal Matrix Composite in Simulated PWR Spent Fuel Pool Solution, PATRAM 2010.	5年間の加速湿式腐食試験の結果、27°C で 90 年間のプール環境内条件で、ほう素 10 の面密度に変化はないことを確認した。すなわち、乾式キャスクの使用済燃料装荷時の湿式条件下や乾式貯蔵条件下で、中性子吸収性能に影響のないことを確認した。	本文献は、乾式貯蔵キャスクバスケットに使われるほう素添加アルミニウム合金が貯蔵中の経年劣化の有無を評価するのに適切である。
[21]	F. Thévenot, “Boron Carbide – A Comprehensive Review, “Journal of the European Ceramic Society, 1990.	中性子吸収材に含まれる炭化ホウ素は、融点が約 2350°C である。	本文献は、欧州セラミックス協会誌に掲載された、セラミック材料に関連する独自の研究とレビュー

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	文献概要	
			の結果である。実験的・理論的な論文で適切な参考文献である。
[22]	F. Ostermann, Anwendungstechnologie Aluminium, 3.Auflage, Springer Verlag, 2014. (アルミニウムの応用技術)	アルミニウム合金の融点は 630°C 以上である。	本文献は、アルミニウム合金の開発、材料データ、規格に関する最新情報を掲載している。豊富な資料とデータ、多数の文献ソースにより、参考文献として適切である。
[23]	Gutachterliche Stellungnahme GU400/13/98, Gutachterliche Stellungnahme zum Langzeit-Korrosionsschutzverhalten der äußeren Beschichtung von Transport- und Lagerbehältern, Institut Korrosionsschutz Dresden GmbH, 1998. ドレスデン腐食防食協会、銀被覆金属ガスケット腐食鑑定書 GU400/13/99	銀被覆金属ガスケットのすべての構成材料(銀、ステンレス鋼、ニッケル合金)は空気、残留水分等に対して、腐食による減肉量を見積もったところ、1 μm 以下であった。	本文献は、輸送貯蔵兼用キャスクに使われる銀被覆金属ガスケットの長期挙動(腐食)に関する第3者である専門家(ドレスデン腐食防食協会)に委託して調査・検討した鑑定結果を示しており、参考文献として適切である。
[24]	電力中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基礎」(ERC 出版), 2014.	<ul style="list-style-type: none"> ・ 金属ガスケット(外被材: 銀、内被材及びコイルスプリング: ニッケル合金)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 7781 を超えなければ貯蔵初期の漏えい率が維持される。 ・ LMP は以下の式の通り示され、温度 117 °C では、LMP が 7781 となる時間 t は約 100 年となる。 $LMP = T(14 + \log t)$ ・ 銀被覆金属ガスケットの長期閉じ込め性能確認試験では、125°C の温度で閉じ込め性能を維持した(19 年以上)。 	本文献での試験は、特定兼用キャスクで使用する金属ガスケットとほぼ同じ構造・寸法・材料で行われている。さらに、特定兼用キャスクの蓋部実物大モデルに装着した金属ガスケットの 19 年間の漏えい率が示されており、設計漏えい率の設定の参考になるなど、参考文献として適切である。
[25]	T. Yokoyama, et al., Integrity Assessment of Dual-Purpose Metal Cask after Long Term	・ 60 年間の貯蔵後輸送の健全性評価のために、アルミまたは銀被覆の金属ガスケットの熱及び放射線によ	本文献が示す銀被覆の金属ガスケットの構成材料の機械的性質に重大な変化をもたらす放射線

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
			文献概要	
	<u>Interim Storgae – Seal Performance under Transport Conditions, PATRAM 2004 paper # 076, Berlin, Germany, Sept. 20–24, 2004</u>		る性能劣化を実験と解析により調べた。その結果、貯蔵中の金属ガスケットが受ける中性子照射量($2.12 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 以下)は、外被材の銀を含む構成材料の機械的性質に重大な変化をもたらす放射線量値以下であることが分かった。	量値($2.12 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ 以下)に対して、CASTOR®.geo26JP 型キャスクが貯蔵中に受ける中性子照射量(10^{15}n/cm^2 以下)は小さく、影響はないことを示しており、参考文献として適切である。
[26]	総合エネルギー調査会 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」, 2019.	<ul style="list-style-type: none"> ・ 使用済燃料に関する劣化要因として以下のように評価できる。 ・ 化学的要因(腐食) 特定兼用キャスク内部は不活性ガス雰囲気には維持されるので、腐食の問題はない。 ・ 化学的要因(応力腐食割れ) 原子炉運転中にペレットから放出されたヨウ素はヨウ化セシウムとして存在していることが考えられるが、貯蔵中の環境条件下では分解せず、SCC が発生するような化学的雰囲気にはなっていない。 ・ 熱的要因(クリープ) 燃料被覆管は 1%以上のクリープ変形能力を有することが確認されている。貯蔵時においては、クリープ歪みが 1%以下となるように温度を制限することによりクリープ破損を防止することができる。 ・ 機械的要因(水素化物再配向による脆化) 貯蔵期間中は燃料棒の内圧は外圧より高いため、燃料被覆管には周方向応力が発生しており、水素化物の多くが半径方向に配向すると機械特性を低下させることになる。燃料被覆管の温度を 275°C以下、周方 	本文には、特定兼用キャスクに収納する PWR 48 GWd/t 燃料を対象として試験結果に基づく評価結果が示されている。また、本文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、参考文献として適切である。	

番号	文献名	参考文献	参考文献の適切性
		文献概要	
		<p>向応力を 100MPa 以下に制限することによって、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"> 放射線による要因(照射硬化回復) 燃料被覆管は炉内で照射されると強度が増加し、延性が低下するが、国内の軽水炉で照射された PWR 燃料のジルカロイ4燃料被覆管を用いた照射硬化回復試験の結果では、約 300°Cでは照射硬化の回復の可能性は小さいので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することができる。 放射線による要因(放射線劣化) 貯蔵期間中、使用済燃料内からの超ウラン元素の自発核分裂や(α, n)反応により発生した高速中性子による照射をうけるが、その照射量は貯蔵期間中(60年間)で $10^{16}/\text{cm}^2$ 程度と評価されており、実機照射に伴う高速中性子照射量($10^{21} \sim 10^{22}/\text{cm}^2$ 程度)に比べて十分に低く、機械的特性に影響しない。 	
[27]	<u>三菱原子燃料株式会社、三菱 PWR 高燃焼度化ステップ2燃料の機械設計、MNF-1000 改1平成 23 年 3 月</u>	<ul style="list-style-type: none"> PWR 高燃焼度化ステップ2燃料の製造メーカーが、ステップ燃料の概要、特性及び健全性について、設計手法・基準・評価結果を詳細に記述している。<u>すなわち、原子炉運転初期から 4 サイクル燃焼後の燃料棒内圧の解析結果を示している。</u> 	本文献の燃料棒内圧データ等を用いて、設計貯蔵期間中の使用済燃料被覆管の周方向応力を計算すると、100 MPa を超えず、燃料被覆管における水素化物の再配向が起こらないことが分かり、参考文献として適切である。
[28]	<u>M. W. Thompson Defects and radiation damage in metals Cambridge university press, 2010</u>	<ul style="list-style-type: none"> <u>中性子照射すると、金属材料の脆化に関連して材料が硬化する。</u> 	本文献は金属中の放射線によって誘発される基本的な原子機構について論じている。そのうえで放射線損傷を議論しており、照射の原理と影響の文献として適している。

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
			文献概要	
[29]	K. Lintner, E. Schmid Bedeutung von Korpuskularbestrahlung für die Eigenschaften von Festkörpern Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft, Band XXVIII, S. 302-406 (1955)	・	ガンマ線は、励起又はイオン化によって原子と相互作用するが、一般的に、原子を格子サイトからたたき出すことができず、むしろ、主にイオン化及び励起を通じてそれらのエネルギーのほとんどを失う。したがって、ガンマ線は、原子核との弾性衝突をもたらさず、金属に対して損傷を及ぼさない。	本文献は、粒子照射による固体の性質への影響を論じており、照射損傷の基礎的な現象に関する文献として適している。
[30]	<u>T. Arai, et al., Determination of lower-bound fracture toughness for heavy-section ductile cast iron (DCI) and estimation by small specimen tests, ASTM STP 1207, p.355-368</u>	・	鋳鉄キャスク材料の破壊靱性値について、3体の実物大キャスク及び2体のモデルキャスクから採取した試験片の破壊靱性値の温度依存性を明らかにするとともに、その下限値を設定している。	本文献は機械学会による金属キャスク構造規格に定める、鋳鉄キャスクの破壊靱性要件の基礎となっている。CASTOR®.geo26JP型キャスクが低温脆性破壊に関する規格要件に適合していることを示す参考文献として適切である。
[31]	<u>電力中央研究所、原子力発電所使用済燃料貯蔵技術確証試験報告書 総合報告書 (昭和62年度～平成3年度通商産業省委託研究 平成4年3月)</u>	・	日本国政府の委託研究として実施された使用済燃料貯蔵技術確証試験の結果をまとめたもので、実物大鋳鉄キャスクを用いた材料試験及び落下試験結果等を含んでいる。	本文献は、球状黒鉛鋳鉄のJIS規格に適合する材試験データの詳細や-40℃における落下試験による破壊靱性実証試験を行っており、参考文献として適切である。
[32]	<u>電力中央研究所、研究報告 L87002、鋳鉄キャスクの品質保証に関する研究、昭和62年11月</u>	・	国内外で設計製造された鋳鉄キャスク相当の厚肉円筒構造物から採取された鋳鉄材料試験片を用いて、破壊靱性値などキャスク設計に必要な材料データを取得整備し、JIS材料規格や機械学会の構造規格などの基礎データを提供している。	本文献は鋳鉄キャスクが具備すべき材料特性の基礎を提供しており、CASTOR®.geo26JP型キャスクがJIS規格等に適合していることを示す適切な文献である。
[33]	<u>高久 啓他、鋳鉄製キャスト型モデルキャスクコア材の諸特性、研究報告 285059、電中研 1986年10月</u>	・	ドイツGNS社から提供された球状黒鉛鋳鉄製厚肉円筒から採取した材料試験片を用いて、鋳鉄破壊靱性試験などの材料特性を明らかにしている。	本文献はドイツで製造された鋳鉄キャスク相当の構造物の材料特性がJIS規格に適合することを示す適切な文献である。
[34]	<u>三枝利有、新井 拓、使用済燃料輸送・貯蔵用鋳鉄キャスクのASME規格化、研究報告 N11027、電中研 2012年4月</u>	・	国内で試験研究されたデータを基礎に米国機械学会規格ASME Codeを策定・提案した経緯の詳細を求めたものである。	本文献には、鋳鉄キャスクの各種試験データが適切に審議・整備されており、CASTOR®.geo26JP型キャスクの規格適合性を評価するのに適切な参考文献である。

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
		文献概要		
[35]	<u>Imaeda, H. "Estimation of the Critical Size of Detectable Flaws in Ductile Cast Iron Using Ultrasonic Testing", Nondestr. Test. Eval., 1994, Vol. 11, pp.43-62</u>	・ <u>球状黒鉛鑄鉄内の人工欠陥を複数の事業者によるラウンドロビン方式で、超音波探傷法(垂直法)による検査を行った。その結果、直径 6mm の欠陥が検出限界であった。</u>		<u>本文献は、-40°Cで落下試験に供した実物大鑄鉄キャスクの表面に設置した人工欠陥の寸法の保守性を評価するのに適切な参考文献である。</u>
[36]	<u>Imaeda, H. "Estimation of the Critical Size of Natural Flaws in Ductile Cast Iron Using Ultrasonic Testing", Nondestr. Test. Eval., 1994, Vol. 11, pp.341-348</u>	・ <u>球状黒鉛鑄鉄内の自然欠陥を複数の事業者によるラウンドロビン方式で、超音波探傷法(垂直法及び射角法)による検査を行った。その結果、自然欠陥についても、前報と同様の検出限界であった。</u>		<u>本文献は、上記同様、-40°Cで落下試験に供した実物大鑄鉄キャスクの表面に設置した人工欠陥の寸法の保守性を評価するのに適切な参考文献である。</u>
[37]	<u>Shirai, K., Ito, C., Arai T. and Saegusa T. : "Integrity of Cast Iron Cask against Free Drop Test-Verification of Brittle Failure Design Criterion.", RAMTRAN, Vol.4, No.1, pp.5-13 (1993)</u>	・ <u>鑄鉄キャスクの低温時の落下試験条件で脆性破壊防止基準が提案された。さらに、その妥当性を実証するため、-40°Cに冷却された実物大鑄鉄キャスクの外表面に深さ 83mm の半楕円形状の人工欠陥を挿入し、9m 落下試験を行った。</u>		<u>本文献は JIS 規格を満たす鑄鉄キャスクが 9m 落下試験の衝撃に耐えることを評価するのに適した参考文献である。</u>
[38]	<u>白井、加藤、伊藤、島崎、三枝「鑄鉄キャスクの落下衝撃に対する健全性評価(その 3)脆性破壊評価基準の検証」電力中央研究所 研究報告 U90001(平成 2 年 4 月)</u>	・ <u>鑄鉄キャスクの 9m 落下衝撃に対する脆性破壊防止基準の実証試験と同基準における安全率の妥当性を確認した。さらに、解析コード DYNA-3D の解析結果との比較の結果、十分な解析精度を有することを確認した。</u>		<u>鑄鉄キャスクの低温脆性破壊防止設計に対する解析の妥当性を評価する上に、適切な参考文献である。</u>
[39]	<u>IAEA, Guidelines for Safe Design of Shipping Packages against Brittle Fracture, IAEA TECDOC-717 (Vienna: IAEA),1993.</u>	・ <u>国内で提案評価したキャスクの脆性破壊防止基準の考え方を国際的な専門家による審議の結果、IAEA の指針としてまとめた。</u>		<u>本文献は鑄鉄キャスクが、IAEA 輸送規則に適合し、安全な輸送に資することを評価するのに適した参考文献である。</u>