

## 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	21
別紙 1:	CASTOR® geo26JP の構成部品に対する経年の影響	23
別紙 2:	中性子遮へい材の質量損失	25
別紙 3:	参考文献の概要について	26

## 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及び蓋部表面の必要な箇所には、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<sup>®</sup> 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	評価温度 <sup>注1</sup> [°C]	評価基準 <sup>注2</sup> [°C]
キャスク本体	胴	120	350
	中性子遮蔽材 (棒状)(内列/外列)	120/115	135 / 130
	中性子遮蔽材 (円板状)(底部)	120	135
	遮蔽棒(側部中性子遮蔽体部 封止材)	110	371
	トラニオンボルト	105	350
蓋部	一次蓋、二次蓋	120	425
	一次蓋ボルト、二次蓋ボルト	100	350
	中性子遮蔽材 (円板状)(蓋部)	120	135
	金属ガスケット	100	125
バスケット	底板	120	425
	H-ビーム	245	425 / 350
	熱伝導及び中性子吸収材	245	250
	鋼製エッジセグメント、コーナーエレメント およびバスケット側板	170	425
	エッジセグメント	145	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

表 3 CASTOR® geo26JP 型の主要部材の中性子照射量<sup>注1</sup>

部材	中性子線量 [n/cm <sup>2</sup> ]
中性子遮蔽材(棒状)(内側)の平均値	1.27E+14
中性子遮蔽材(棒状)(外側)の平均値	3.14E+13
中性子遮蔽材(円板状)(頭部)	1.65E+13
中性子遮蔽材(円板状)(底部)	2.11E+13
一次蓋ガスケット	3.35E+13
二次蓋ガスケット	4.58E+12
一次蓋の下端	1.20E+14
一次蓋の上端	2.52E+13
二次蓋の下端	6.65E+12
二次蓋の上端	1.02E+12

部材	中性子線量 [n/cm <sup>2</sup> ]
ホウ素添加アルミニウム合金板	7.26E+14
H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板	5.77E+14

注<sup>1</sup> 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<sup>®</sup> 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 <sup>注1</sup> [Gy]
中性子遮蔽材(棒状)(内側)の平均値	2.17E+05
中性子遮蔽材(棒状)(外側)の平均値	2.99E+04
中性子遮蔽材(円板状)(頭部)	9.16E+01
中性子遮蔽材(円板状)(底部)	1.48E+02
一次蓋ガasket	6.32E+03
二次蓋ガasket	1.51E+01
一次蓋の下端	2.10E+06
一次蓋の上端	2.01E+02
二次蓋の下端	7.34E+01
二次蓋の上端	4.82E+00
熱伝導及び中性子吸収材	1.00E+08
H-ビーム、コーナーエレメント、バスケット側板	8.99E+07

注<sup>1</sup> 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"> <li>・ 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]。</li> <li>・ 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/m<sup>3</sup>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[2]。</li> <li>・ 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[3]。</li> </ul>	使用環境： <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ヘリウム雰囲気</li> <li>・ 中性子遮蔽材と接触</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 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。(具体的な防錆対策は貯蔵サイトの気候条件に依存するが、必要に応じて定期的な管理を行う)</li> <li>・ 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：不活性雰囲気維持され、腐食しない。仮に、1%燃料破損相当の燃料棒内ガスが存在しても、同(内面)の腐食による構造強度への影響はない。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、その不動態酸化物層により、高い耐食性を示す。</li> <li>・ 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。</li> </ul>

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
	熱	構造強度: 熱による亀裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> <li>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]</li> <li>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]。</li> <li>-20℃における脆性破壊に関する検査について、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 <math>K_{Id} &gt; 50.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}</math></li> </ul>	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℃。	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>
	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 $10^{16} \text{ n/cm}^2$ 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]。	中性子照射量: $10^{15} \text{ n/cm}^2$ 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>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4桁も低い条件で貯蔵され、鑄鉄キャスク本体の貯蔵中の照射損傷は無視できる。</li> </ul>
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"> <li>ボアホール部の水分は限定されており、追加の水分の浸入はなく、また、酸素の連続的な供給もないため、そ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。</li> <li>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</li> </ul>

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
					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"> <li>炭素鋼の融点は約 1500°Cである。</li> <li>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]。</li> </ul>	使用環境温度: -20°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。
一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋内側表面  【材質】 鍛造ステンレス鋼 クロムモリブデン バナジウム鋼	腐食	構造強度: 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>不動態被膜を形成する[6]。</li> <li>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]。</li> <li>0.1% の保守的な想定に対して、1%破損燃料からのヨウ素濃度による鍛造ステンレス鋼の 60 年間の腐食量は最大腐食速度 (0.13 μm/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]。</li> <li>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<sup>3</sup>のヨウ素ガス濃度となる燃料破損率 (1%</li> </ul>	使用環境: <ul style="list-style-type: none"> <li>ヘリウム雰囲気</li> <li>中性子遮蔽材と接触</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>ヨウ素による腐食も問題ない。</li> <li>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。</li> </ul>

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
			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]。		
	熱	構造強度: 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> <li>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℃から 350℃または 425℃までの設計用強度・物性値が規定されている。</li> <li>-20℃において低温脆性破壊のおそれはない-[12, 13]。</li> <li>クリープによる変形を考慮すべき温度 (融点 <math>T_m</math> [絶対温度] の 1/3 に相当) は約 290℃ である[6, 7]。</li> </ul>	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	<ul style="list-style-type: none"> <li>ステンレス鋼及び低合金鋼は、中性子照射量が <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> 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, 14.]。</li> </ul>	中性子照射量: $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
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  【材質】 鍛造ステンレス鋼 クロムモリブデン バナジウム鋼	腐食	構造強度: 腐食による構造強度低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>不動態被膜を形成する[6, 7]。</li> <li>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]。</li> </ul>	使用環境: <ul style="list-style-type: none"> <li>外気</li> <li>中性子遮蔽材と接触</li> </ul>	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"> <li>金属キャスク構造規格 JSME S FA1 (2007年版)[4]は、-30℃から 350℃ま</li> </ul>	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
析出硬化型ステンレス鋼			<p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-20°C において低温脆性破壊のおそれはない。[2, 12, 13],</li> <li>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, 15]。</li> </ul>		
	照射	構造強度: 照射による機械的特性の変化	<p>ステンレス鋼及び低合金鋼は、中性子照射量が <math>10^{17}</math> n/cm<sup>2</sup> 及び <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> 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>	中性子照射量: $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 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。
中性子遮蔽体(ロッド)及び 中性子遮蔽体(ディスク)  【材質】 ポリエチレン	熱	遮蔽機能: 熱分解による質量低下	<ul style="list-style-type: none"> <li>ポリエチレン( )の非晶質化温度は、130°C 及び 135°C である。[16, 17]。</li> <li>熱分解は、340°C を超える温度で起こる[18]。</li> </ul>	使用環境温度: -20°C ~ 120°C	使用温度範囲は溶出温度以下及び熱分解温度以下であり、質量低下は生じず、遮蔽機能への影響はない。
	照射	遮蔽機能: 分解による質量減損	<ul style="list-style-type: none"> <li>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 <math>6.3 \times 10^{-4}</math> % である。[19] (別紙2参照)</li> </ul>	中性子照射量: $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 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。

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"> <li>中性子線はポリエチレンの構造には影響を与えない [20]。</li> </ul>		
Hビーム、 鋼製エッジセグメント、底板  【材質】  ステンレス鋼	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。
	熱	構造強度： 熱によるき裂・破損	<ul style="list-style-type: none"> <li>金属キャスク構造規格 JSME FAS FA1(2007年版) [4]は、<math>-30^{\circ}\text{C}</math>から <math>425^{\circ}\text{C}</math> 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。</li> <li><math>-20^{\circ}\text{C}</math>において低温脆性破壊のおそれはない[12, 13]。</li> <li>クリープによる変形を考慮すべき温度(融点[絶対温度]の <math>1/3</math> に相当)は <math>280\sim 320^{\circ}\text{C}</math>である[5, 6, 7]。</li> </ul>	使用環境温度： $-20^{\circ}\text{C}\sim 245^{\circ}\text{C}$	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 $10^{17} \text{ n/cm}^2$ 以上である[2]	中性子照射量： $10^{15} \text{ n/cm}^2$ 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	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"> <li>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[21]。</li> <li>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</li> </ul>	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
アルミニウム合金 □			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 <sup>3</sup> 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[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"> <li>中性子吸収材に含まれる炭化ホウ素は、融点が約 2350°C [22]。</li> <li>アルミニウム合金の融点は 630°C 以上である[23]。</li> </ul>	使用環境温度: -20°C ~ 245°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、-20°C ~ 245°C であり、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"> <li><sup>10</sup>B の量は、□ である。同位体 <sup>10</sup>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。 <math>^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha</math></li> <li>機械的特性の顕著な影響は、10<sup>19</sup> n/cm<sup>2</sup> を超える中性子束でのみ予想される [2]。</li> </ul>	中性子照射: 10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> 以下	<ul style="list-style-type: none"> <li>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 x 10<sup>14</sup> 個である。したがって、7.26 x 10<sup>14</sup> 個/cm<sup>2</sup> の <sup>10</sup>B 原子はリチウムに変換され、その量は 1.21 x 10<sup>-9</sup> mol/cm<sup>2</sup> または 1.21 x 10<sup>-5</sup> mg/cm<sup>2</sup> である。これは、60 年の期間にわたって、照射された <sup>10</sup>B 原子の最大 380 ppb の減損をもたらす。</li> <li>この <sup>10</sup>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。</li> </ul>
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"> <li>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</li> </ul>	使用環境: 一次蓋、二次蓋: ヘリウム雰囲気	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>

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>減肉量を見積もったところ、<input type="text"/>以下であった[24.]。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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]。</li> <li>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）[25]。</li> </ul>	二次蓋外側：外気	<ul style="list-style-type: none"> <li>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どの措置を施し、キャスクの閉じ込め機能は維持できる。</li> <li>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。</li> </ul>
	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"> <li>初期の閉じ込め機能 (<math>1.0 \times 10^{10} \text{ Pa m}^3/\text{s}</math>) を保持できるラーソンミラーパラメーター (LMP) は、定数 <math>C=14</math> で約 <math>8.0 \times 10^3</math> [25] である。</li> <li>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 [25]。</li> </ul>	使用環境温度：-20°C～100°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。

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	閉じ込め機能: 照射による機械的特性の変化	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く、照射の影響を考慮する必要がない[2]。	中性子照射: $10^{15} \text{ n/cm}^2$ 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。
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しできるほど小さい[2]。	使用環境: ヘリウム雰囲気	不活性雰囲気が保たれている限り、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"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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</li> </ul>	環境温度限界: $-20^\circ\text{C} \sim 265^\circ\text{C}$	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、 $275^\circ\text{C}$ および 100 MPa を超えないため、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
			<p>た照射硬化回復試験の結果から、硬化回復の閾値は 300°C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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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°C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]。</li> <li>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]。</li> </ul>		

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 <sup>2</sup> 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： $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 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 Facilitu 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] W. Schatt, Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaues, Leipzig: VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, 1982 (機械材料)
- [15] [Stainless Steel | Ulbrich](https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/)  
<https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/>
- [16]
- [17]
- [18] 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)
- [19] W. Schnabel, Polymer Degradation-Principles and practical applications, Wien: Carl Hanser Verlag, 1981
- [20] 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.
- [21] D. Nagasawa, Accelerated Corrosion Testing of Aluminum Boron Carbide Metal Matrix Composite in Simulated PWR Spent Fuel Pool Solution, PATRAM 2010, 2010
- [22] F. Thévenot, “Boron Carbide – A Comprehensive Review,” Journal of the European Ceramic Society, 1990
- [23] F. Ostermann, Anwendungstechnologie Aluminium, 3.Auflage, Springer Verlag, 2014.  
(アルミニウムの応用技術)
- [24] 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
- [25] 電力中央研究所、「使用済核燃料貯蔵の基礎」(ERC 出版), 2014
- [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

## 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別表 1-1 に示す。

別表 1-1 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<sup>注1</sup>。</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>

<sup>注1</sup> 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[27]。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, 14]。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[28]。したがって、 $\gamma$  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

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

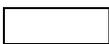
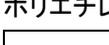
[28] K. Lintner, E. Schmid Bedeutung von Korpuskularbestrahlung für die Eigenschaften von Festkörpern Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft, Band XXVIII, S. 302-406 (1955)

## 別紙 2: 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(別表 2-1)。減速材の全体質量 2310 kg との比較において<sup>1</sup>、減速材は約 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  $7.0 \times 10^{-4}$ )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。

別表 2-1: 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 <sup>3</sup> ]	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 	減速材棒状-外側列	0.955	1200	1	$2.99 \times 10^4$	35.9
ポリエチレン 	減速材棒状-内側列	0.935	900	1	$2.17 \times 10^5$	195.3
	下端の減速材円盤状		120	1	$1.48 \times 10^2$	0.02
	蓋間の減速材円盤状		90	1	$9.16 \times 10^1$	0.008
	計		2310			231.23

注<sup>1</sup> 減速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。

## 別紙 3: 参考文献の概要について

番号	参考文献		参考文献の適切性
	文献名	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)	鑄鉄の耐食性:防錆対策を考慮しない沿岸環境における鑄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。	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>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、<math>20\text{g}/\text{m}^3</math> 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 <math>10^{17}\text{ n}/\text{cm}^2</math> 及び <math>10^{16}\text{ n}/\text{cm}^2</math> 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 <math>3.7\times 10^{17}\text{ cm}^{-2}</math> 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: <math>10^{19}\text{ cm}^{-2}</math> 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>	<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(<math>10^{15}\text{ n}/\text{cm}^2</math>)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(<math>10^{15}\text{ n}/\text{cm}^2</math> 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(<math>10^{15}\text{ n}/\text{cm}^2</math> 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・不働態及び腐食」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) <u>鉄合金の比重と融点</u> ( <a href="https://yoshidacast.com">https://yoshidacast.com</a> ) 機械技術ノート( <a href="https://tec-note.com.1842">https://tec-note.com.1842</a> )	鉄合金の融点 球状黒鉛鑄鉄:1116-1176°C 炭素鋼:1497°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°C 炭素鋼:(1497+273)/3-273=317°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、0.3~0.4 $T_m$ ( $T_m$ : 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。
[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.	・ 鍛造ステンレス鋼は、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	・ 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:

番号	文献名	参考文献		参考文献の適切性
			文献概要	
			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 $\mu\text{m}$ 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。	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1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、 $10^{19}$ n/cm <sup>2</sup> 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 $10^{13}$ - $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 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く、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]	W. Schatt, Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaues, Leipzig: VEB Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, 1982. (機械材料)		機械・プラント・器具の材料において、顕著な機械的特性の変化が認められるのは中性子照射量が $10^{18}$ n/cm <sup>2</sup> 以上である。 高速の中性子と原子の衝突過程の結果、 $10^{18}$ n/cm <sup>2</sup> の中性子線量以上で格子欠陥が発生する。	本文献は、CASTOR® geo26JP型の主要部材の中性子照射量( $10^{15}$ n/cm <sup>2</sup> 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ことを示しており、参考文献として適切である。
[15]	Stainless Steel   Ulbrich ( <a href="https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/">https://www.ulbrich.com/alloys/stainless-steel/</a> )		SUS 304、SUS 304L の融点: 1399-1454°C SUS 347 の融点: 1371-1400°C SUS 410 の融点: 1495°C SUS 630 の融点: 1371-1400°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: $(1371+273)/3-273=275^\circ\text{C}$

番号	文献名	参考文献 文献概要	参考文献の適切性
			SUS 410:(1495+273)/3-273=316°C SUS 630:(1371+273)/3-273=275°C  球状黒鉛鋳鉄:(1116+273)/3-273=190°C 炭素鋼:(1497+273)/3-273=317°C
[16]		ポリエチレン [ ] は 190°C で溶出する。	ヨンデルバツセル社は 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。
[17]		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。
[18]	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度時の参考文献として適切である。
[19]	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。
[21]	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。
[22]	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の結

番号	文献名	参考文献 文献概要	参考文献の適切性
			果である。実験的・理論的な論文で適切な参考文献である。
[23]	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。
[24]	Gutachterliche Stellungnahme GU400/13/98, Gutachterliche Stellungnahme zum Langzeit-Korrosionsschutzverhalten der äußeren Beschichtung von Transportund 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。
[25]	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"> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。 <math display="block">LMP = T (14 + \log t)</math></li> <li>・ 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)。</li> </ul>	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。

番号	文献名	参考文献 文献概要	参考文献の適切性
[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"> <li>・ 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。</li> <li>・ 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維持されるので、腐食の問題はない。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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。</li> <li>・ 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℃以下、周方向応力を 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。</li> <li>・ 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℃では照射硬化の回復の可能性は小</li> </ul>	本文献には、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>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>放射線による要因(放射線劣化)</li> </ul> <p>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(<math>\alpha, n</math>)反応により発生した高速中性子による照射を受けるが、その照射量は貯蔵期間中(60年間)で <math>10^{16} / \text{cm}^2</math> 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(<math>10^{21} \sim 10^{22} / \text{cm}^2</math> 程度)に比べて十分に低く、機械的特性に影響しない。</p>	
[27]	M. W. Thompson Defects and radiation damage in metals Cambridge university press, 2010	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	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。
[28]	K. Lintner, E. Schmid Bedeutung von Korpuskularbestrahlung für die Eigenschaften von Festkörpern Ergebnisse der exakten Naturwissenschaft, Band XXVIII, S. 302-406 (1955)	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>	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。