

令和 5 年 5 月 25 日  
三菱原子燃料株式会社

### MFC-1 型核燃料輸送物 4/24 ヒアのご質問に対する説明

・経年変化の考慮にかかわり前提としている評価の前提条件について説明すること。

本輸送容器の経年変化評価の前提条件として以下を設定している。

(環境条件)

- ・本輸送容器の使用予定期間：60 年
- ・温度条件： $-20^{\circ}\text{C}$ ～ $73^{\circ}\text{C}$

輸送物に想定される最低温度から最高温度※

※： $38^{\circ}\text{C}$ の静止空気中に太陽熱輻射を受けた状態で置かれた場合の輸送物の温度

- ・放射線環境

新燃料集合体を装荷した状態が連続することを想定

(疲労評価条件)

- ・使用期間を通しての輸送回数：360 回

実際の平均輸送頻度を包絡するよう年 6 回を想定。

- ・吊り上げ回数：6000 回

吊り上げの評価は輸送物の標準的な取扱いとして想定される吊り上げ回数(15 回/輸送×輸送回数 360 回=5400 回)に、保守・点検時等の吊り上げ回数を考慮し 6000 回と想定

- ・温度変化に伴う応力発生想定回数：12000 回

1 日の間に輸送物に想定される最低温度( $-20^{\circ}\text{C}$ )から最高温度( $73^{\circ}\text{C}$ )の温度変化が生ずると想定し、輸送期間を一回の平均的な輸送期間を包絡するよう 30 日/回とし、輸送回数 360 回より想定される繰り返し数(30 日/回×輸送回数 360 回=10800 回)を包絡するよう 12000 回を想定。

・経年変化の考慮にかかわり交換部品の交換頻度の考え方を説明すること。

交換部品としているショックマウントに用いているゴムは、空気中のオゾン等により酸化し硬化することが予想されていることから定期的な交換を前提としている。ショックマウントのゴムの硬化に関しては、13 年以上経過したショックマウントのゴムの弾性力を測定し、硬化による落下衝撃への影響を考慮して落下時の安全性を評価した。その結果、ゴムの硬化を考慮しても落下時の安全性に影響しないことが確認(口章 A.10.12 参照)できた。これを踏まえて、ショックマウントは 13 年以内に交換することとした。

また、Oリングは、収納物である新燃料集合体の品質維持(水濡れ防止)のための部品で、安全機能に影響しないため定期的な交換は行わず検査で劣化が明らかになった時点での交換を行っている。なお、定期的に検査を実施することは、社内の検査要領書に定め、年 1 回の頻度で検査を実施している。

なお、口章 F.2 に記載のクロスフレーム(クッション)も、収納物である新燃料集合体の品質維持(傷つき防止)のための部品で、輸送物の安全評価に関係しない。そのため、Oリングとクロスフレーム(クッション)の経年劣化に関する記載は口章 F.2 の記載から削除する補正を行う。(別途、補正案を示す。)

・経年変化の考慮にかかわり中性子による劣化について、材料毎に文献による許容線量を示した上で論じるよう見直すこと。

別紙に補正案を示す。

・合金鋼をある評価では炭素鋼とするなど、評価によって材料名称が異なるので統一を図ること。

合金鋼としている [ ] は炭素鋼の一種であることから、炭素鋼に統一する。また、他の材料も下記のように一般的な名詞で統一し、規格等の詳細な情報が必要な場合には ( ) 付きにする補正を行う。

木材 ( [ ] )

ボロンステンレス鋼

炭素鋼 ( [ ] )

ジルコニウム合金 (ジルカロイ-4、Z i r l o、MDA)

ゴム ( [ ] )

・本輸送物のバウンダリは燃料被覆管との説明であるが、容器の内圧評価も行っている。どのように理解すればよいのか。容器にはリリーフバルブも取り付けられている。

本輸送物の安全機能としての密封境界（放射性物質の閉じ込めとなるバウンダリ）は燃料被覆管であり、当該部は密封健全性の観点から評価を実施している。（A.5.1.3参照）  
なお、容器（リリーフバルブ付）の内圧評価は、容器の構造健全性を示すために実施している（A.5.1.3参照）。

#### MFC-1 の A 型と B 型の違いについて説明のこと

タイプ A と B には、以下の違いがある。

- ・クロスフレーム：タイプ A (イ) - 第 C.8 図、タイプ B (イ) - 第 C.9 図
- ・クロスフレーム上部側のトップ端：タイプ A (イ) - 第 C.11 図、タイプ B (イ) - 第 C.12 図
- ・クランピングフレーム：タイプ A (イ) - 第 C.13 図、タイプ B (イ) - 第 C.14 図
- ・補助脚の使用及び格納状態：タイプ A (イ) - 第 C.16 図、タイプ B (イ) - 第 C.17 図
- ・ショック指示針位置：タイプ A (イ) - 第 C. 3 図、タイプ B (イ) - 第 C.4 図
- ・湿度計及びエアバルブ：タイプ A (イ) - 第 C.19 図、タイプ B (イ) - 第 C.20 図

いずれも、取り扱い性を考慮した相違点があるが、各部位が担う機能は同じで容器の主要仕様等も同一である。

また、当該部位の取り扱い性の相違により A タイプ、B タイプがあるが、安全評価は両者を包絡する評価※としている。したがって、安全評価は全ての容器を含んでいることを明記する。

※：構造評価において固定枠 ((ロ) - A - 74 ページ) 部品の寸法 ((ロ) - 第 A.22 表に示す「はりの断面高さ」「はりの長さ」) に相違があるが、安全側に包絡するよう評価している。

・品質管理の方法に関して変更点を説明すること

核燃料輸送物設計承認申請に添付する「輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明」に関し、至近では、令和3年3月11付け原規規発第2103111号にて承認書の交付を受けている（MX-6P型輸送物）。上述の説明書は、当社内の文書「輸送容器品質保証計画」令和2年5月7日付け改訂発行版に基づいている。

その後、「輸送容器品質保証計画」は、令和5年3月15日の組織改編を踏まえ、令和5年3月20日付けにて改訂発行している。今般申請した「輸送容器に係る品質管理の方法等（設計に係るものに限る。）に関する説明」は、この令和5年3月20日付け改訂発行版に基づき作成している。

上述の「輸送容器品質保証計画」の改訂内容は、組織変更に関するものに限られるため、輸送容器の設計・調達・維持に関連する品質保証活動の内容そのものに変更はありません。

以 上

令和5年5月25日  
三菱原子燃料株式会社

## 口章 F 核燃料輸送物の経年変化の考慮

(ロ)－F．核燃料輸送物の経年変化の考慮

F.1 考慮すべき経年変化要因

本章では、本輸送物について使用を予定する期間中に想定される使用状況及びそれに伴う経年変化について考慮する。本輸送容器の使用予定期間は60年程度であり、輸送頻度は年6回程度で使用期間を通しての輸送予定回数は計360回、また1回の輸送期間(運搬)は通常数日から1ヶ月程度である。

本輸送物の使用期間中に想定される経年変化の要因としては、容器保管中や使用中における温度変化(熱)、収納物から発生する放射線、腐食等の化学変化及び繰り返し応力が生じることによる疲労が考えられる。そこで、これらの経年変化を生じさせる要因について、本輸送容器の構成部品に関して評価を実施する。

熱、放射線、化学変化の評価においては、使用予定より保守的な条件として60年の連続使用を考慮する。なお、ショックマウントは定期的な交換を行うため、使用期間である13年間を考慮する。

疲労の評価において、吊り上げ部は応力発生回数を6000回として行った。これは、以下に示す使用計画回数を保守的に包絡させた回数である。

使用計画回数：輸送容器使用期間×輸送回数×吊り上げ回数

ここで、

- ・輸送容器使用期間：60年
- ・輸送回数          : 6回/年
- ・吊り上げ回数     : 15回/輸送(輸送物の標準的な取扱いとして想定される吊り上げ回数に、保守・点検等を含め設定)

また、内圧変動による疲労評価では、応力発生回数を12000回とした。これは、以下に示す応力発生想定回数を保守的に包絡させた回数であり、輸送中に予想される圧力変動は、輸送物の最低温度(−20℃)から最高温度となる太陽熱輻射考慮したときの容器温度(73℃)まで変動するものとした。

応力発生想定回数：輸送容器使用期間×輸送回数×輸送期間

ここで、

- ・輸送期間 : 30 日／回（数日から 1 ヶ月程度を保守側に設定）

## F.2 安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

経年変化を考慮する本輸送容器の構成部品として、安全機能を担う構成部品とその使用材料を下記に示す。

輸送容器の構成部品	材料
クロスフレーム (スキン)	ボロンステンレス鋼
上蓋 (外筒, ドームプレート, 内筒, フランジ, ブラケット, 締付ボルト)	炭素鋼
下部容器 (外筒, ドームプレート, 内筒, フランジ, ショックマウント取付板, リブ)	
ショックマウントフレーム (サイドレール, クロスチューブ)	
クロスフレーム (トップフレーム, ボトムフレーム, クロスチューブ, ユニバーチャンネル)	
クロスフレーム (クランピングフレーム, 支持格子用パッド, 支持格子押さボルト, ジャッキスクリュー, 固定棒, ボトムサポート, アクスル)	
ショックマウント ( )	
緩衝材	木材

クロスピンについては定期的に新しいものと取替えるため経年変化考慮の対象外である。

以上より、輸送容器において経年変化の考慮の必要性を評価する材料は下記の5つである。

- ・ ボロンステンレス鋼
- ・ 炭素鋼
- ・ ゴム ( )
- ・ 木材

以下に、各材料の経年変化の考慮の必要性について、熱、放射線、化学変化及び疲労の観点から示す。

(1) ボロンステンレス鋼

ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) ー第 F.1 表に示す。

(ロ) ー第 F.1 表 ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ボロンステンレス鋼	熱	使用期間中に想定されるボロンステンレス鋼の温度範囲である-20℃から 73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。クリープの影響を受ける温度はステンレス鋼の融点(K)の三分の一である 280℃であり、運搬中に予想される最高温度(73℃)と比較して十分に高いことから、仮にボロンステンレス鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	放射線	収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、ステンレス鋼の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 $10^{17}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以上 <sup>(1)</sup> に対し、60 年間の累積照射量は <input type="text"/> n/cm <sup>2</sup> 以下で十分小さく無視しうることから照射による材料の脆化等の経年劣化の影響は受けない。また、含有されるボロンの量は上記 60 年間の累積照射量を受けても初期の <input type="text"/> 以下で有意に減損しない。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	ボロンステンレス鋼は材料の表面に不動態膜を形成することから腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で、腐食が確認された場合は補修又は交換する。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し



(ロ) ー第 F.1 表 ボロンステンレス鋼の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ボロンステンレス鋼	疲労	構造部材として用いられていないため発生応力のごく小さい。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(2)炭素鋼

炭素鋼の経年変化の考慮の必要性について、(ロ)－第F.2表に示す。

(ロ)－第F.2表 炭素鋼の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
炭素鋼	熱	<p>使用期間中に想定される炭素鋼の温度範囲である-20℃から73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。クリープの影響を受ける温度は炭素鋼の融点(K)の三分の一である 300℃であり、運搬中に予想される最高温度(73℃)と比較して十分に高いことから、仮に炭素鋼・合金鋼を使用期間中、継続して上記温度環境下に置いた場合でも、使用期間に想定される温度範囲においては組織変化、クリープ、割れ等の経年変化の影響は受けない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	放射線	<p>収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、炭素鋼の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 <math>10^{16}</math> n/cm<sup>2</sup> 程度以上<sup>(2)</sup>に対し、60年間の累積照射量は <input type="text"/> n/cm<sup>2</sup> 以下で十分小さく無視しうることから照射による経年劣化の影響は受けない。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	化学	<p>炭素鋼は防錆処置として塗装を施し、ボルトに用いる炭素鋼と合金鋼には防錆潤滑剤を塗布して使用していることから、腐食は発生しにくい。また、定期自主検査の外観検査で異常が確認された場合には補修又は交換する。さらに、発送前検査で外観に異常がないことを確認している。このため、使用期間内に腐食等の経年変化の影響は受けない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(ロ) ー第 F.2 表 炭素鋼の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
炭素鋼	疲労	外筒やブラケットにおいて、吊上げ荷重や温度変化による内外圧力差により繰り返し応力が発生するため、経年変化についての考慮が必要となる。  吊上げ荷重や温度変化による内外圧力差により外筒やブラケットに発生する応力の繰り返し回数を、F.1 で示したとおり保守側に設定した使用回数に基づいて疲労評価を行う  ((ロ)A.10.9 参照)。	有り

(3) ゴム (  )

ゴム (  ) の経年変化の考慮の必要性について、(ロ) - 第 F.3 表に示す。

(ロ) - 第 F.3 表 ゴム (  ) の経年変化の考慮の必要性(1/2)

材料	経年変化 要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化 の考慮の 必要性
ゴム ( <input type="checkbox"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="checkbox"/> )	熱	<p>使用期間中に想定されるゴム ( <input type="text"/> ) の温度範囲である -20°C から 73°C ((ロ)B.4.2 参照) までを考慮する。運搬中に予想される温度は A.4.2 に示す使用可能温度範囲であり熱劣化は生じないが、熱影響により応力緩和が生じ防振機構部の保持位置が低くなることが想定されることから、臨界・遮蔽上の安全機能への有意な影響がないことを確認している。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し
	放射線	<p>収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、ゴムが使用可能とされる中性子照射量 <math>10^{15}</math> n/cm<sup>2</sup> 程度以上<sup>(3)</sup> に対し、交換せずに 60 年間使用しても累積照射量は <input type="text"/> n/cm<sup>2</sup> 以下で十分小さく無視しうることから照射による経年劣化の影響は受けない。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(口) - 第 F.3 表 ゴム ( ) の経年変化の考慮の必要性(2/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
ゴム ( ) )	化学	金属材料と異なり腐食等は発生しないが、空気中に含まれるオゾン等により酸化 <sup>(4)</sup> し、若干硬化することが予想される。そのため落下評価においてショックマウント ( ) の硬化が衝撃荷重評価に影響する可能性がある。 F.1 に述べた通りショックマウントは定期交換を前提としているが、上記を踏まえ、使用期間中における落下評価に対するショックマウントの硬化影響を考慮する必要がある、その影響を確認する。((口)A.10.12 参照)。	有り
	疲労	定期的な点検により劣化状況を確認するとともに交換することで維持しているため、疲労による経年変化を防止する。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

(4)木材

木材の経年変化の考慮の必要性について、(ロ)－第F.4表に示す。

(ロ)－第F.4表 木材の経年変化の考慮の必要性 (1/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
木材	熱	<p>使用期間中に想定される木材の温度範囲は、熱解析で算出した容器の温度と同等の 73℃((ロ)B.4.2 参照)までを考慮する。高温環境下では熱による強度低下が考えられ、木材温度が 200 ℃に達すると木材の熱分解が進む<sup>(6)</sup>との文献が確認できたものの、直接参照できる文献は乏しい状況にある。一方で、緩衝材として木材が広く使用されていることを踏まえ、現在国内事業者が使用又は使用予定の輸送容器について、これまでの実輸送時の条件をもとに収納物による設計上の最大入熱を考慮した輸送容器の緩衝材の平均温度を評価した結果、約 40～70 ℃程度であること、使用済燃料輸送実績のある輸送容器を廃棄する際に採取した木材の圧潰強度及び密度測定の結果、木材の衝撃吸収性能は健全であり性能劣化はなかった<sup>(注)</sup> こと、また本輸送物の収納物が発熱しないことから、これまでの実績と同様の使用環境であれば、木材の熱的劣化は生じない。</p> <p>以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。</p>	無し

(注) 参考資料：第 12 回輸送容器及び使用済燃料貯蔵施設に係る特定容器に関する審査会合  
(令和 4 年 4 月 25 日) 資料 1 別紙「緩衝材 (木材) の熱的劣化について」

(ロ) ー第 F.4 表 木材の経年変化の考慮の必要性 (2/2)

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の必要性の検討	経年変化の考慮の必要性
木材	放射線	収納物は新燃料で人が接近可能な程度の放射線強度であり、木材の顕著な機械的特性変化を与えるとされる中性子照射量 $10^{16}$ n/cm <sup>2</sup> 程度以上 <sup>(6)</sup> に対し、60 年間の累積照射量は <input type="text"/> n/cm <sup>2</sup> 以下で十分小さく無視しうることから照射による経年劣化の影響は受けない。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	化学	緩衝材の充填空間は炭素鋼製の外筒や内筒等に覆われた閉鎖環境にあり、酸素が連続的に供給されないため、腐朽による経年変化の影響は受けない。 以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し
	疲労	木材の使用箇所には、内外圧差や取扱いに起因する応力が生じないため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから技術基準への適合性を評価する上で経年変化の考慮は必要ない。	無し

### F.3 安全解析における経年変化の考慮内容

前節に示した通り、本輸送物に係る安全機能を担う構成部品の材料を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。

ボロンステンレス鋼、炭素鋼、木材については、技術基準への適合性を評価する上で使用期間中の経年変化を考慮する必要がないことを確認した。

炭素鋼については熱、放射線、化学変化において、またゴムについては定期交換を踏まえ、熱、放射線、疲労において、技術基準への適合性を評価する上で使用期間中の経年変化を考慮する必要がないことを確認した。

炭素鋼製の外筒やボルトについては、吊り上げや内外圧力差によって繰り返し応力が発生するため、疲労による経年変化を考慮する必要がある。使用期間中に想定される最も厳しい応力条件、かつ、保守的な繰り返し回数を考慮した上で吊り上げと内外圧力差による疲労を評価したところ、使用期間において疲労破壊は発生せず、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はないことを確認した。

ショックマウントに使用する  については、空気中に含まれるオゾン等により酸化し若干硬化する経年変化を考慮する必要がある。ショックマウントの硬化影響を考慮した上で、衝撃加速度を評価した結果、最も余裕率の小さい燃料被覆管においても構造健全性は維持され、輸送物が規則に定める技術基準に適合していることへの影響はないことを確認した。



## 参考文献

- (1) 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).
- (2) 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).
- (3) 栗山将, 「原子力産業に要求される高分子材料」, 日本原子力研究所, JAERI-M 9412, (1981).
- (4) 大武義人, 「ゴム・プラスチック材料のトラブルと対策-劣化と材料選択-」, 日刊工業新聞社, (2010).
- (5) 岡野健, 祖父江信夫, 「木材科学ハンドブック」, 朝倉書店, (2006).
- (6) 三菱重工業(株), 「発電用原子炉施設に係る特定機器の設計の型式証明申請書 (特定兼用キャスク) 本文及び添付書類の一部補正について」, (2021).