

**MSF-24P型／MSF-32P型
核燃料輸送物設計変更承認申請に係る
指摘事項への回答について**

令和4年2月1日
四国電力株式会社



目次

1. 指摘事項への回答	⇒	2
-------------	---	---

1. 指摘事項への回答(1/6)

指摘事項

バスケットに使用するアルミニウム合金を含め、輸送物の各構成部材について、経年変化の考慮による技術基準適合性への影響を体系的に整理し説明すること。

回答

- 輸送貯蔵兼用キャスクとして想定される使用状況を踏まえ、経年変化の考慮による技術基準適合性への影響について以下の考えで評価する。なお、評価結果は、MSF-24P型輸送物を代表^{※1}として示す。
 - 使用予定期間中(60年)継続して使用される輸送物の各構成部材については、長期間の貯蔵に供した後、1回の事業所外運搬により再処理工場に輸送されるケースと、再利用により短期間の貯蔵と輸送を最大10回繰り返すケースを考慮して、使用予定期間中に想定される最大の温度、累積照射量、負荷の繰り返し回数を用いて経年変化の影響を考慮し、技術基準に適合していることを確認した。
 - 輸送時のみに使用される三次蓋、緩衝体については、使用予定期間中最大30回^{※2}の使用を想定し、輸送時における各構成部材の最高温度、累積照射量を用いて経年変化の影響を考慮し、技術基準に適合していることを確認した。

※1 MSF-32P型輸送物に比べてMSF-24P型輸送物の方が発熱量および放射能強度が高く、各構成部材の最高温度も一次蓋等の一部構成部材を除いてMSF-24P型輸送物の方が高いため、MSF-24P型輸送物を代表として示す。

※2 輸送時のみに使用される三次蓋、緩衝体については、複数容器で共用するため、使用予定回数を30回、1回の輸送当たりに要する日数を60日として想定し、総輸送期間1,800日間(うち100日間は太陽熱放射有、1,700日間は太陽熱放射無)として評価した。経年変化の考慮における輸送期間中の太陽熱放射の有無に係る考え方については、7ページにて説明する。

1. 指摘事項への回答(2/6)

<熱的劣化>

- ・ 貯蔵または輸送時における除熱解析結果(最高温度評価結果)を使用予定期間における評価温度として用い、以下の通り評価した。

構成部材名 (材料名)	評価温度		熱的劣化の考慮による技術基準適合性への影響
	貯蔵時	輸送時 (太陽熱放射有)	
中性子遮蔽材 (レジン)	136℃	127℃	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温環境下では含有する水分が放出されることによる質量減損が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響(規則第5条第7号、第8号および第6条第2号、第3号)></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価温度を踏まえて上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の質量減損量を評価した結果、約2.0%となった。 ・ 遮蔽解析では、保守的に2.5%の質量減損を考慮し、輸送物表面または表面から1m離れた位置における線量当量率を評価した結果、技術基準に定める線量当量率を満足していることを確認した。
緩衝材(木材)	—	113℃	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 高温環境下では組織変化(熱分解)による強度低下が考えられる。また、熱分解に至らない温度においても長期間の保持による強度低下が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響(規則第6条、第11条)></p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価温度は、熱分解を考慮する必要のない温度範囲(200℃以下)である。なお、評価温度および使用予定期間を踏まえた強度低下による影響を考慮することとし、熱暴露後の残存強度の予測式をもとに強度低下量を評価した結果、約□□となった。 ・ 保守的に□□の強度低下を考慮し、BM型輸送物および核分裂性輸送物に係る一般および特別条件の試験条件下での衝撃加速度および緩衝体変形量を評価した。 ・ その結果、衝撃加速度については、強度低下を考慮する場合と考慮しない場合で同程度であるため、構造解析では両者の衝撃加速度を包絡する設計加速度を用いて、各試験条件下における輸送物の状態を評価し、各技術基準への適合性を確認した。 ・ 緩衝体変形量については、強度低下を考慮する場合の方が大きくなるため、遮蔽解析では強度低下を考慮した変形量を用いて輸送物表面または表面から1m離れた位置における線量当量率を評価した結果、技術基準に定める線量当量率を満足していることを確認した。

1. 指摘事項への回答(3/6)

構成部材名 (材料名)	評価温度		熱的劣化の考慮による技術基準適合性への影響
	貯蔵時	輸送時 (太陽熱放射有)	
バスケット (アルミニウム 合金)	191°C	177°C	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 高温環境下では組織変化による強度低下(過時効の効果含む)が考えられる。加えて高温環境下で応力が長期作用する場合はクリープによる変形が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響(規則第11条第2号)></p> <ul style="list-style-type: none"> 評価温度を踏まえて上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の材料特性を反映した設計用強度・物性値をもとに、核分裂性輸送物に係る一般および特別条件の試験条件下での強度評価を行った。 その結果、いずれの条件においてもバスケットは変形しないことを確認した。また、貯蔵時にバスケットに生じる応力は1MPa未満のため、クリープの影響はない。 臨界解析では、バスケットの変形を考慮しないモデルを用いて評価した結果、技術基準に定めるとおり臨界に達しないことを確認した。
金属ガスケット (アルミニウム／ ニッケル基合金)	109°C	109°C	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 高温環境下ではニッケル基合金製のコイルスプリングおよびニッケル基合金およびアルミニウム製の被覆材のリラクゼーションに伴う、落下時の密封性能の低下が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響(規則第11条第2号)></p> <ul style="list-style-type: none"> 評価温度を踏まえて上記影響を考慮することとし、貯蔵開始時の温度が60年間継続する際の密封性能の低下を考慮しても保証できる漏えい率を用いて、15m浸漬における1か月の浸水量を評価した結果、約2リットルとなった。 臨界解析では、保守的に5リットルの浸水量を考慮して評価した結果、技術基準に定めるとおり臨界に達しないことを確認した。

1. 指摘事項への回答(4/6)

構成部材名 (材料名)	評価温度		熱的劣化の考慮による技術基準適合性への影響										
	貯蔵時	輸送時 (太陽熱放射有)											
燃料被覆管 (ジルカロイ)	219°C	206°C	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 高温環境下では組織変化、クリープによる変形、照射硬化の回復による強度低下、水素化物再配向による機械的特性の劣化が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響></p> <ul style="list-style-type: none"> 評価温度および本評価温度における周方向応力(86MPa以下)は、上記の中で最も厳しい条件となる水素化物再配向を考慮する必要のない範囲(温度275°C以下、周方向応力100MPa以下)であり、使用予定期間中の健全性は維持されるため、技術基準適合性への影響はない※1。 										
胴、一次蓋※2、二次蓋、外筒、蓋部中性子遮へい材カバー (炭素鋼)	147°C	133°C	<p><想定される経年変化></p> <ul style="list-style-type: none"> 高温環境下では組織変化による強度低下およびクリープによる変形が考えられる。 <p><技術基準適合性への影響></p> <ul style="list-style-type: none"> 伝熱フィン(銅)以外の構成部材について、評価温度は下表のとおり、これまで原子力設備の設計に広く用いられている発電用原子力設備規格(材料規格等)においてクリープによる変形を考慮する必要のない範囲として設計用強度・物性値が規定されている温度範囲であり、使用予定期間中の健全性は維持されるため、技術基準適合性への影響はない。 <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th>材料名</th> <th>設計用強度・物性値規定温度範囲</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炭素鋼</td> <td>-30°C~350°C</td> </tr> <tr> <td>ニッケルクロムモリブデン鋼</td> <td>-30°C~350°C</td> </tr> <tr> <td>析出硬化系ステンレス鋼</td> <td>-30°C~350°C</td> </tr> <tr> <td>ステンレス鋼</td> <td>-30°C~425°C</td> </tr> </tbody> </table>	材料名	設計用強度・物性値規定温度範囲	炭素鋼	-30°C~350°C	ニッケルクロムモリブデン鋼	-30°C~350°C	析出硬化系ステンレス鋼	-30°C~350°C	ステンレス鋼	-30°C~425°C
材料名	設計用強度・物性値規定温度範囲												
炭素鋼	-30°C~350°C												
ニッケルクロムモリブデン鋼	-30°C~350°C												
析出硬化系ステンレス鋼	-30°C~350°C												
ステンレス鋼	-30°C~425°C												
一次蓋ボルト※2、二次蓋ボルト、三次蓋ボルト (ニッケルクロムモリブデン鋼)	110°C	109°C											
トラニオン(析出硬化系ステンレス鋼)	132°C	118°C											
下部端板、底部中性子遮蔽材カバー、三次蓋 (ステンレス鋼)	129°C	117°C											
伝熱フィン(銅)	131°C	115°C	<ul style="list-style-type: none"> 伝熱フィン(銅)について、評価温度は日本産業規格(圧力容器の設計)において設計用強度・物性値が規定されている温度範囲(-30°C~200°C)かつクリープによる変形を考慮する必要のない温度範囲(170°C以下)であり、使用予定期間中の健全性は維持されるため、技術基準適合性への影響はない。 										

※1 MSF-32P型輸送物は、評価温度が209°Cかつ周方向応力が96MPa以下であり、使用予定期間中の健全性は維持される

※2 一次蓋、一次蓋ボルトの輸送時の輸送時の最高温度については、MSF-24P型輸送物に比べてMSF-32P型輸送物の方が約1°C高いが評価温度に影響はない。

1. 指摘事項への回答(5/6)

<放射線照射による劣化>

- 中性子照射による強度、弾性、脆化等の機械的性質影響が考えられるが、以下の理由により機械的性質の劣化による技術基準適合性への影響はない。
 - 燃料被覆管については、使用予定期間中の累積照射量が炉内での中性子照射量に比べて十分小さい。
 - 本体胴等の容器を構成する金属部材および緩衝材(木材)については、使用予定期間中の累積照射量が機械的特性変化を考慮する必要のない照射量に比べて小さい。
 - 中性子遮蔽材(レジン)については、使用予定期間中の累積照射量が質量減損を考慮する必要のない照射量に比べて小さい。
 - ほう素添加アルミニウム合金については、使用予定期間中の累積照射量による中性子吸収材中のほう素の減損割合は 10^{-5} 程度であり、無視し得る。

<化学的劣化>

- 腐食による強度の低下が考えられるが、以下の理由により腐食による技術基準適合性への影響はない。
 - 燃料被覆管、胴内面、一次蓋、二次蓋内面、バスケット等は不活性ガス雰囲気下にある。
 - 中性子遮蔽材(レジン)、緩衝材(木材)およびこれらと接する各構成部材は遮蔽材カバー等に覆われており、酸素が連続的に供給されない閉鎖環境下にある。(中性子遮蔽材(レジン)の質量減損は熱的劣化にて考慮する)。
 - トラニオン、三次蓋は耐食性のある材料を使用し、その他の金属材で大気に触れる部分は塗装等の防錆措置を施す。

<疲労による劣化>

- 繰り返し荷重の作用による疲労破壊が考えられるが、以下の理由により疲労による技術基準適合性への影響はない。
 - 吊上装置であるトラニオンについては、使用予定期間中の使用済燃料乾式貯蔵施設内での取扱いを含めた吊上げ回数は200回としており、許容繰り返し回数(約10,000回)を大きく下回る。

今後の補正手続きにおいて、上記検討結果を(ロ)章-F(経年変化の考慮)に反映するとともに、(ロ)章-G(外運搬規則及び外運搬告示に対する適合性の説明)について、規則第3条第3項、第11条第2項等、BM型輸送物および核分裂性輸送物に係る各技術基準を定める条文への適合性について、経年変化の考慮に関する説明を明確化する。

1. 指摘事項への回答(6/6)

(補足説明)経年変化の考慮における輸送期間中の太陽熱放射の有無に係る考え方について

- 輸送時のみに使用される三次蓋、緩衝体については、複数容器で共用するため、使用回数を30回、1回の輸送あたりに要する日数を60日として想定し、総輸送期間1,800日間として評価している。
- このうち、緩衝体の経年変化を考慮するにあたっては、屋外において太陽熱放射の影響を受ける期間と、屋内等において太陽熱放射の影響を受けない期間に応じて、それぞれ規則適合性に係る条件を用いて評価を行う。

適用する評価条件	太陽熱放射有 (外運搬規則第6条第2号および外運搬告示別記第四第1号に定める要件を踏まえた除熱解析結果)	太陽熱放射無 (外運搬規則第6条第2号ハに定める要件を踏まえた除熱解析結果)
想定する範囲	屋外(構内輸送、事業所外運搬に係る船舶輸送前後の車両輸送)	屋内(発送前検査、外運搬規則第19条に係る運搬確認証交付までの期間等) 船倉内(事業所外運搬に係る船舶輸送)
想定する日数	100日 (3日/回×30回+10日)	1,700日 (1,800日のうち左記を除く期間)
妥当性	<ul style="list-style-type: none"> 想定日数については、1回の輸送あたりに3回の屋外輸送を想定しており、それぞれにおいて実際に太陽熱放射の影響を受ける期間は限定的であるが、保守的に3日間(72時間)の太陽熱放射を想定するとともに、30回分の日数に加えて、異常時の対応等を考慮して更に10日分の余裕を見込んでいる。 輸送時期によらず、想定する日数に対して、評価条件が維持されるものとして保守性を見込んでいる。 	<ul style="list-style-type: none"> 評価温度については、太陽熱放射の有無を除いて外気温等は同じ条件にて評価を行っている。 屋内および船倉内は換気空調設備による管理がなされており外気温と同程度以下となる。 輸送時期によらず、想定する日数に対して、評価条件が維持されるものとして保守性を見込んでいる。

- なお上記評価においても適切な保守性を有していると考えますが、緩衝体の評価の前提となる太陽熱放射有無の期間を確実なものとするため、1,800日間のうち太陽熱放射環境下となる期間を100日以内に管理する旨を、本申請書(輸送容器の設計及び核燃料物質等を当該輸送容器に収納した場合の核燃料輸送物の安全性に関する説明書の(二)章「安全設計及び安全輸送に関する特記事項」)に記載し、今後社内規定に反映するとともに、事業所外運搬の実施にあたっては、車両運搬確認申請において輸送中の管理方法を含めた使用状況に係る説明を行う。