

審査会合での説明、コメントを踏まえた TNF-XI 型輸送物核燃料輸送物設計承認申請の見直しについて

本資料では、TNF-XI 型輸送物核燃料輸送物設計承認申請に関する審査会合で説明した内容を整理する。

1. SAR の章ごとの見直しの方法について

SAR の章ごとの見直しの方法を表 1 にまとめる。

表 1 見直しの方法に係る整理 (1/3)

SAR 章番号	見直しの方法	備考
(イ)C	・外蓋回り止めデバイスに関する説明を、④付属品から①容器本体に記載箇所を変更	記載箇所の適正化
(イ)ー第 1 表	・可融栓の記載について、付属品の区分から容器本体及び外蓋の区分に記載箇所を変更	記載箇所の適正化
(イ)D.1.2(1)	・ブロッキングシステムの用途(ギャップを低減させるための措置)、材料特性(使用可能温度、融点、圧縮強度)を追加 ・ブロッキングシステムを収納した場合の悪影響について付属資料(※新規作成)に記載されている旨を記載	審査会合コメントへの対応
(イ)D.1.2(4)	・プラスチックスペーサの収納方法(ステンレス鋼製スペーサと内蓋とのギャップ量に合わせて 0~3 枚収納する旨)を記載	審査会合コメントへの対応
(イ)D.3.2(1)	(イ)D.1.2(1)と同じ	
(イ)D.3.2(4)	(イ)D.1.2(4)と同じ	
(イ)章付属資料 1 ※新規作成	・ブロッキングシステムの落下時における健全性及びブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価として当該付属資料を追加(審査会合資料 p7,8 と同様の内容)	審査会合コメントへの対応
(ロ)A.5.1.2	・ケース 1 及びケース 3 において、熱膨張差を考慮しても内容容器に収納するプラスチックスペーサの枚数を調整するため、プラスチックスペーサが内蓋と接触しない旨を記載	記載の適正化
(ロ)A.5.3	・ブロッキングシステムを収納せずブロッキングシステム分の重量を考慮した純鉄粉末を収納した旨を記載 ・ブロッキングシステムなしの方が保守的な条件である旨を記載	審査会合コメントへの対応

表1 見直しの方法に係る整理 (2/3)

補正箇所	補正内容	備考
(ロ)A.8.1.1	・プラスチックスペーサの収納方法(ステンレス鋼製スペーサと内蓋とのギャップ量に合わせて0~3枚収納する旨)を記載	審査会合コメントへの対応
(ロ)A.8.1.3	(ロ)A.8.1.1と同じ	
(ロ)A.9.1.4	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)A 付属資料 1	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)A 付属資料 2	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)A 付属資料 3	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)A 付属資料 4	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)B 付属資料 1	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)B 付属資料 3	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)C.3	(ロ)A.5.3と同じ	
(ロ)C.3.2	・ナイロンの記載を削除し、ブロッキングシステムの材料であるポリオキシメチレンを記載	記載の適正化
(ロ)D.1⑤	・解析条件に係り、保守的にブロッキングシステムを無視している旨を記載	審査会合コメントへの対応
(ロ)E1.2.1	・解析条件に係り、保守的にブロッキングシステムを水に置き換える旨を記載	審査会合コメントへの対応
(ロ)E3.2.1	(ロ)E1.2.1と同じ	審査会合コメントへの対応
(ロ)F	・審査会合のコメントを受け、全面的に見直し	審査会合コメントへの対応
(ロ)G 第三条第三項	・ポリオキシメチレンの追加。 ・ステンレス鋼が不動態膜を形成する旨、ステンレス鋼製の収納物が外観確認が可能で腐食が確認されたら補修・交換される旨を記載	審査会合コメントへの対応
(ロ)G 第四条第二号	・プラスチックスペーサの熱膨張により接触し応力が発生する恐れがない旨を記載	記載の適正化

表1 見直しの方法に係る整理 (3/3)

補正箇所	補正内容	備考
(ハ)A.1(1)ケース1	・プラスチックスペーサと内蓋のギャップ量が所定の範囲に収まっていることを確認する旨を記載	審査会合コメントへの対応
(ハ)A.1(1)ケース3	(ハ)A.1(1)ケース1と同じ	
(ハ)A-第1図	・「粉末缶」→「収納物」に修正	記載の適正化
(ハ)A-第1表	・プラスチックスペーサをギャップ量に合わせて0~3枚収納する旨を記載 ・プラスチックスペーサと内蓋とのギャップ量が所定の範囲に収まっていることを確認する旨を記載	審査会合コメントへの対応
(ハ)A-第3表	(ハ)A-第1表と同じ	
(ハ)-B	・ガasketを輸送実施前に新しいものに取替える旨を記載	自主的な変更
(ハ)B.10	(ハ)-Bと同じ	自主的な変更
(ハ)B-第1表	・定期自主検査要領のガasketの目視検査の項目を削除	毎回交換する方針に変更するため

2. 審査会合のコメントを受けての経年変化に関する説明内容について

以下に、経年変化の考慮に関して審査会合での説明内容を整理する。

核燃料輸送物の経年変化の考慮

①考慮すべき経年変化要因

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 40 年であり、使用期間を通しての輸送予定回数は計 100 回、また 1 回の輸送期間は通常最長 4 ヶ月を想定している。

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、本輸送容器の主要材料・部材に関して評価を実施することとする。

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 40 年の連続使用を考慮する。また、疲労の評価においては、使用予定より保守的な条件として 40 年間毎日 1 日 1 回の輸送実施を考慮する。

②安全解析における経年変化の考慮の必要性の評価

経年変化の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
輸送容器構造材	ステンレス鋼
耐熱衝撃緩衝材	フェノリックフォーム
中性子吸収材	BORA レジン
	ボロン入りステンレス鋼

外蓋の補強材として使用されているアルミニウム合金は、外蓋に充填されているフェノリックフォームを区別するために使用しており、安全機能を有しないことから経年変化を考慮する必要がない。また、ガスケットについては輸送実施前に新しいものと取替えるため、経年変化は考慮しない。

次に、経年変化を考慮する収納物として、繰り返し使用する収納物とその使用材料を下記に示す。

収納物	材料
粉末収納缶	ステンレス鋼
長尺粉末収納缶	
ステンレス鋼製スパーサ	
ボロン入りステンレス鋼リング	ボロン入りステンレス鋼
プラスチックスパーサ	ポリオキシメチレン
センタリングシステム	

以上を纏めると、輸送容器、及び収納物において経年変化を考慮する材料は下記の 5 つである。

- ・ ステンレス鋼
- ・ フェノリックフォーム
- ・ BORA レジン
- ・ ボロン入りステンレス鋼
- ・ ポリオキシメチレン

以下に、各材料の経年変化の考慮について、熱、放射線、化学及び疲労の観点から示す。

(1)ステンレス鋼

ステンレス鋼の経年変化の考慮について、表 2 に示す。

表 2 ステンレス鋼の経年変化の考慮[1/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ステンレス鋼	熱	運搬中に予想されるステンレス鋼の温度範囲である-40℃から 72℃ (SAR の熱解析参照) 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 (1300℃以上) の三分の一である 433℃であり、運搬中に予想される最高温度(72℃)と比較して十分に高いことから、仮に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。	無し
	放射線	40 年の使用期間において、ウラン酸化物を各内容器に 75kg ずつ、計 300kg 収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は 7×10^{10} n/cm ² 以下であり、ステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{16} n/cm ² と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	化学	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、輸送容器外面、粉末収納缶、長尺粉末収納缶、及びステンレス鋼製スパーサの腐食については発送前検査や定期自主検査にて外観にて確認可能であり、確認された場合には補修または交換される。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。	無し

表2 ステンレス鋼の経年変化の考慮[2/2]

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ステンレス鋼	疲労	<p>輸送容器構造材に対しては、-40℃から 52℃までの温度変化による内外圧力差により、最大 43.1 MPa (N/mm²)の応力が内蓋に生じる (SAR の構造解析参照)。保守的に年間 365 回温度変化による応力が発生すると仮定し、製造から本申請後の使用期間として 40 年間を考慮すると、40(年)×365(回)=14600 回の繰り返し応力が製造から使用期間まで蓄積することになる。図 1 のステンレス鋼の疲労曲線によると、100 N/mm²以下の応力では室温から 700℃の環境下において 10⁷回以上繰り返し応力が発生しても疲労破壊が生じることはない。</p> <p>また、粉末収納缶、長尺粉末収納缶及びステンレス鋼製スプーサーには、内外圧力差や取扱いに起因する応力は生じない。このため、疲労による経年変化は発生しない。以上のことから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。</p>	無し

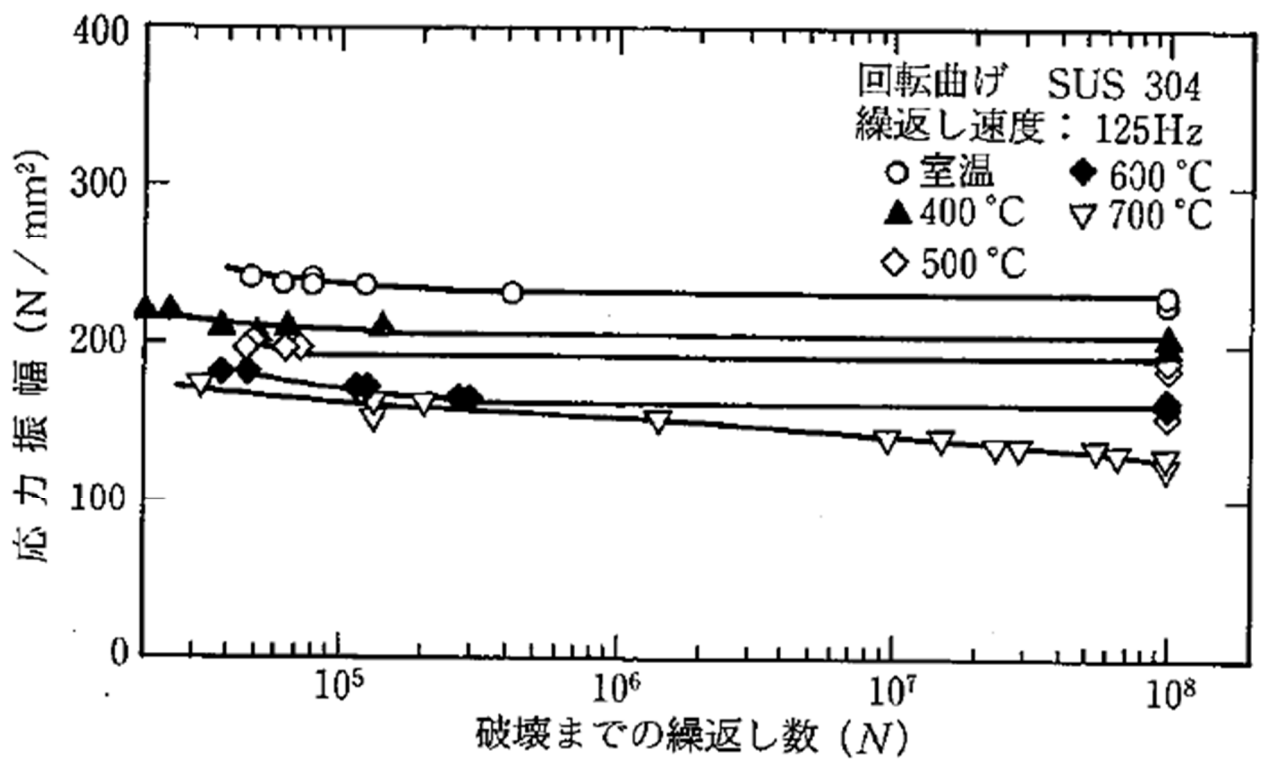


図1 ステンレス鋼疲労曲線

(出典) ステンレス鋼便覧—第3版—ステンレス協会(1995年1月)

(2)フェノリックフォーム

フェノリックフォームの経年変化の考慮について、表 3 に示す。

表 3 フェノリックフォームの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
フェノリックフォーム	熱	運搬中に予想されるフェノリックフォームの温度範囲である-40℃から 72℃（SAR の熱解析参照）までを考慮する。フェノリックフォームはステンレス鋼の外容器外面と内容器外壁により密封されているため、外気との接触はない。また、運搬中に予想される温度範囲は、熱重量分析で確認された顕著な重量変化が生じる温度（90℃）と比較し十分に低い。よって、使用期間中にさらされる温度において熱による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	放射線	40 年の使用期間において、ウラン酸化物を各内容器に 75kg ずつ、計 300kg 収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は 7×10^{10} n/cm ² 以下であり、またガンマ線の累積照射量は 5×10^1 Gy 以下であり、フェノリックフォームの材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{14} n/cm ² 、ガンマ線照射量 10^4 Gy と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	化学	フェノリックフォームはステンレス鋼の外容器外面と内容器外壁により密封されているため、外気との接触はなく、水分や紫外線等の影響は受けない。このため、使用期間内に、加水分解、紫外線による分解といった化学的影響は受けず、経年変化は発生しない。以上のことから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。	無し
	疲労	フェノリックフォームの使用箇所には、内外圧力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を考慮する必要はない。以上のことから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。	無し

(3)BORA レジン

BORA レジンの経年変化の考慮について表 4 に示す。

表 4 BORA レジンの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の評価	経年変化の有無
BORA レジン	熱	<p>運搬中に予想される BORA レジンの温度範囲である-40℃から 50℃（SAR の熱解析参照）までを考慮する。BORA レジンはステンレス鋼の内容器外壁と内容器内壁により密封されているため、外気との接触はない。</p> <p>また、運搬中に予想される温度範囲は、熱重量分析で確認された顕著な重量変化が生じる温度（150℃）と比較し十分に低い。よって、使用期間中にさらされる温度において熱による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。</p>	無し
	放射線	<p>40 年の使用期間において、ウラン酸化物を各内容器に 75kg ずつ、計 300kg 収納するものとして条件を定める。</p> <p>使用期間における中性子の累積照射量は $7 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 以下であり、またガンマ線の累積照射量は $6 \times 10^1 \text{ Gy}$ 以下であり、BORA レジンの母材であるポリエステル材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{14} n/cm^2、ガンマ線照射量 10^4 Gy と比較して十分小さい。</p> <p>加えて累積の中性子照射による ^{10}B の減損率は 10^{-10} 未満であり、中性子吸収性能への影響はない。よって、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。</p>	無し
	化学	<p>BORA レジンはステンレス鋼の内容器外壁と内容器内壁により密封されているため、外気との接触はなく、水分や紫外線等の影響は受けない。このため、使用期間内に、加水分解、紫外線による分解といった化学的影響は受けず、経年変化は発生しない。以上のことから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。</p>	無し
	疲労	<p>BORA レジンが使用されている箇所には、設計上内外圧差や取扱いにおいてほとんど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。</p>	無し

(4)ボロン入りステンレス鋼

ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮について、表 5 に示す。

表 5 ボロン入りステンレス鋼の経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の評価	経年変化の有無
ボロン入り ステンレス鋼	熱	運搬中に予想されるボロン入りステンレス鋼の温度範囲である-40℃から 72℃（SAR の熱解析参照）までを考慮する。ボロン入りステンレス鋼は 99%のステンレス鋼と 1%のボロンからなるので、基本的な性質はステンレス鋼と変わらない。そのため、ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に、40 年の使用期間にて継続して上記温度環境下に置かれた場合でも、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。	無し
	放射線	40 年の使用期間において、ウラン酸化物を各内容器に 75kg ずつ、計 300kg 収納するものとして条件を定める。ボロン入りステンレス鋼は 99%のステンレス鋼と 1%のボロンからなるので、中性子照射に対する影響はステンレス鋼と変わらない。使用期間における中性子の累積照射量は $7 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2$ 以下であり、ボロン入りステンレス鋼の材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{16} n/cm^2 と比較して十分に小さい。加えて累積の中性子照射による ^{10}B の減損率は 10^{-9} 未満であり、中性子吸収性能への影響はない。よって、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	化学	ボロン入りステンレス鋼はステンレス鋼と同様に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。またボロン入りステンレス鋼は外蓋の内部、また内容器の底面に使用されているため、日光や雨に直接さらされることはない。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。	無し
	疲労	ボロン入りステンレス鋼が使用されている部材には、設計上内外圧差や取扱いにおいてほとんど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。	無し

(5)ポリオキシメチレン

ポリオキシメチレンの経年変化の考慮について、表 6 に示す。

表 6 ポリオキシメチレンの経年変化の考慮

材料	経年変化要因	経年変化の考慮の評価	経年変化の有無
ポリオキシメチレン	熱	運搬中に予想されるポリオキシメチレンの温度範囲である-40℃から 52℃（熱解析参照）までを考慮する。ポリオキシメチレンの使用可能温度は-40℃~100℃の範囲であり、熱分解等の反応は発生しない。従って運搬中の温度においては熱による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	放射線	40 年の使用期間において、ウラン酸化物を各内容器に 75kg ずつ、計 300kg 収納するものとして条件を定める。使用期間における中性子の累積照射量は 7×10^{10} n/cm ² 以下であり、またガンマ線の累積照射量は 7×10^1 Gy 以下であり、ポリオキシエチレンの材料強度に影響を与えるとされる中性子照射量 10^{13} n/cm ² 、ガンマ線照射量 10^3 Gy と比較して十分に小さいことから、放射線照射による経年変化の影響は受けない。以上のことから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。	無し
	化学	ポリオキシメチレンが使用されているプラスチックスペーサ、センタリングシステムは内容器内に収納されるため、日光や雨に直接さらされることはない。このため使用期間内に、加水分解、紫外線による分解といった化学的影響は受けず、経年変化は発生しない。以上のことから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。	無し
	疲労	ポリオキシメチレンが使用されているセンタリングシステム及びプラスチックスペーサには、設計上内外圧差や取扱いにおいてほとんど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。	無し

③ 安全解析における経年変化の考慮内容

以上に示した通り、本輸送物に係る安全機能を担う構成部品及び繰返し使用する収納物の材料を対象に、経年変化の考慮の必要性について評価を行った。その結果、構成部品及び収納物について、安全解析において使用期間中の経年変化は発生しないことがわかった。以上のことから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。

3. 審査会合のコメントを受けての「ブロッキングシステムの落下時健全性及びブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価」について

以下に、「ブロッキングシステムの落下時健全性及びブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価」に関して、審査会合での説明内容を整理する。

①はじめに

本文書では、落下時におけるブロッキングシステムの健全性評価及びブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価をまとめる。ブロッキングシステムは落下時の衝撃力を低減するため、内容器内に装荷する収納物である。以下に、落下時におけるブロッキングシステムの健全性評価、及び輸送物の安全解析への影響評価について説明する。

②落下時におけるブロッキングシステムの健全性評価

ブロッキングシステムを収納した状態で 9m 落下した場合の、ブロッキングシステムの健全性評価を行う。

落下時には内容器内の収納物（核燃料物質、粉末収納缶、ブロッキングシステム）の全重量が、内蓋と粉末収納缶との間に収納されるステンレス鋼製スペーサ、及びプラスチックスペーサに負荷される。これらのうち、強度の低いプラスチックスペーサを対象に健全性評価を行う。

最も厳しい条件として、特別の試験条件である落下試験 I と同じ高さ 9m からケース 1 及びケース 3 の収納物の最大重量を有した輸送物を落下させた場合の評価を行う。収納物の全重量がプラスチックスペーサに負荷するよう、輸送容器上面を下向きにして落下する条件とする。

プラスチックスペーサに加わる圧縮応力 σ は以下の式で表される。

$$\sigma = \frac{M \times a}{A}$$

M : 内容器内の収納物最大重量

a : 衝撃加速度

A : 荷重を受ける面積

ここで、各パラメータは以下の通りである。

項目	設定値	設定根拠
M	100kg	ケース 1 及びケース 3 の収納物の最大重量 96.5kg を元に保守的に設定。
a	5194m/s ²	原型容器 P3 の落下試験 I の結果を元に、以下の式から算出。 $a = \frac{g \times h}{x}$ g : 重力加速度 9.81 m/s ² h : 落下高さ 9m x : 変形量 0.017m
A	1.9×10 ⁴ mm ²	プラスチックスペーサが荷重を受ける面積を元に保守的に設定

プラスチックスペーサにかかる圧縮応力 σ は

$$\sigma = 28 \text{ MPa}$$

プラスチックスペーサの圧縮許容応力は 100MPa 以上であるため、落下時の衝撃により破損することはない。

③ブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価

ここでは、ブロッキングシステム装荷による輸送物への影響を確認する。各項目について、影響確認結果を表7に示す。

表7に示す通り、ブロッキングシステム装荷によって輸送物に悪影響を与えることはない。

表7 ブロッキングシステム装荷による輸送物への影響評価

輸送物への影響を考慮する項目	影響確認結果
ブロッキングシステムの重量に係る対応	落下試験に用いた原型容器にはブロッキングシステム(最大重量 16kg)を収納していないが、原型容器に収納する純鉄粉末を、TNF-XI 型輸送物におけるウラン酸化物若しくはウラン残渣の最大重量 284kg より 16kg 多い 300kg にすることで、ブロッキングシステムの重量を考慮している。したがって、安全解析においては、ブロッキングシステムの重量を考慮した条件で評価を行っている。
運搬中に予想される温度範囲での熱的特性	ブロッキングシステムの運搬中に予想される温度範囲は-40℃から 52℃である。センタリングシステム及びプラスチックスペーサには、予想される温度範囲で熱的に安定な材料であるポリオキシメチレン（使用可能温度：-40℃～100℃）を採用している。
熱膨張による影響	センタリングシステムと内容器側面及び粉末収納缶については、10mm 以上のギャップを有しているため、熱膨張により接触する恐れはない。プラスチックスペーサと内蓋については、熱膨張を考慮しても内蓋と接触しないように内容器に収納するプラスチックスペーサの枚数を調整するため、熱膨張により接触する恐れはない。
輸送物回りの線量当量率への影響	ブロッキングシステムは核燃料物質より外側に配置されるため線量を下げる効果がある。また、収納物である核燃料物質から発生する中性子源強度は小さく、ブロッキングシステムの二次放射線は無視できる。
未臨界性への影響	ポリオキシメチレンの水素原子個数密度は水の 85%程度であるため、中性子の反射効果及び減速効果が水より低くなる。したがって、臨界解析においては、ブロッキングシステムを水に置き換えた条件で評価を行っている。
経年変化の影響	センタリングシステム及びプラスチックスペーサの材質であるポリオキシメチレンについて経年変化の考慮について評価を実施した結果、熱・放射線・化学・疲労のいずれの要因においても経年変化の影響を考慮する必要はないことから、ブロッキングシステムの装荷による経年変化への影響は発生しない。